

거대 초 광 대역 애드 혹 네트워크에서의 개선된 용량 스케일링

신원용*

Improved Throughput Scaling of Large Ultra-Wide Band Ad Hoc Networks

Won-Yong Shin*

Department of Computer Science and Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

요 약

n 개의 무선 노드가 랜덤하게 위치한 초 광 대역 애드 혹 네트워크에서의 개선된 용량 스케일링 법칙을 보인다. 먼저, 수정된 계층적 협력 기술이 사용되는 경우를 고려한다. 단위 면적의 밀집 네트워크에서, 유도한 용량 스케일링은 전력 제한된 성격 때문에 특정 동작 영역에서 경로손실 지수 α 에 의존함을 보인다. 또한, 계층적 협력 기술은 $2 < \alpha < 3$ 에서 우월하지만 $\alpha \geq 3$ 에 대해서는 다중 홉 라우팅을 사용하는 것이 더 높은 용량을 취득함이 밝혀진다. 둘째로, m 개의 기지국이 초 광 대역 네트워크에 균일하게 분포한 경우, 인프라 구조의 영향 및 이득을 분석한다. 이때, 모든 동작 영역에 대해 전력 제한된 성격 때문에, 유도한 용량 스케일링은 α 에 의존한다. 게다가, 변수 m 이 특정 레벨 이상일 때 전체 용량이 m 과 함께 선형적으로 스케일함을 보인다. 그러므로 계층적 협력 또는 인프라 구조의 사용은 특정 조건에서 초 광 대역 네트워크의 용량을 개선하는데 도움이 된다.

ABSTRACT

We show improved throughput scaling laws for an ultra-wide band (UWB) ad hoc network, in which n wireless nodes are randomly located. First, we consider the case where a modified hierarchical cooperation (HC) strategy is used. Then, in a dense network of unit area, our result indicates that the derived throughput scaling depends on the path-loss exponent α for certain operating regimes due to the power-limited characteristics. It also turns out that the HC protocol is dominant for $2 < \alpha < 3$ while using the nearest multihop (MH) routing leads to a higher throughput for $\alpha \geq 3$. Second, the impact and benefits of infrastructure support are analyzed, where m base stations (BSs) are regularly placed in UWB networks. In this case, the derived throughput scaling depends on α due to the power-limited characteristics for all operating regimes. Furthermore, it is shown that the total throughput scales linearly with parameter m as m is larger than a certain level. Hence, the use of either HC or infrastructure is helpful in improving the throughput of UWB networks in some conditions.

키워드 : 계층적 협력, 다중 홉, 애드 혹 네트워크, 인프라 구조, 초 광 대역

Key word : Hierarchical cooperation, multihop, ad hoc network, infrastructure, ultra-wide band

접수일자 : 2013. 09. 08 심사완료일자 : 2013. 10. 08 게재확정일자 : 2013. 10. 28

* **Corresponding Author** Won-Yong Shin (E-mail: wyshin@dankook.ac.kr, Tel: +82-31-8005-3253)

Department of Computer Science and Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2014.18.2.303>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

[1]에서 거대 무선 애드 혹 네트워크의 합 용량 스케일링을 소개하고 분석하였다. [1]에서는 단위 면적에 랜덤하게 분포된 n 개의 노드를 갖는 네트워크에 대해 전체 용량이 $\Theta(\sqrt{n/\log n})$ 으로 스케일함을 보였다. 이 용량 스케일링은 다중 홉(MH: multihop) 기술을 사용하여 취득된다. 최근 연구에서는 계층적 협력(HC: hierarchical cooperation) 기술을 사용함으로써 거의 선형적인 용량, 즉, 협 대역 애드 혹 네트워크에서 얻을 수 있는 최선의 용량이 취득 가능함을 보였다[2]. [2]이외에, 무선 네트워크의 용량을 선형 스케일링으로 개선하기 위해 노드 이동성[3], 간섭 정렬[4], 인프라 구조(즉, 기지국) 사용[5][6]과 같은 새로운 기술들이 제안되었다.

위에 언급한 모든 연구 활동은 네트워크가 대역폭 제한되어 있다는 협 대역 가정 하에서 이루어졌다. 반면에, 노드 당 송신 전력이 제한된 무한대 대역폭(스펙트럼) 자원을 사용하는 또 다른 중요한 네트워크 시나리오가 존재한다. 초 광 대역(UWB: ultra-wide band) 기술은 매우 낮은 전력을 갖는 전송 뿐 아니라 근거리 통신에 대해 가장 적합한 것으로 알려져 있기에, UWB의 성격이 적합한 애드 혹 센서 네트워크를 위해 개발될 수 있다. [7][8]에서는, MH 기술이 UWB 애드 혹 네트워크에 적용될 때 용량 스케일링에 대한 상하향선을 유도하였다. 상하향선 사이의 차이는 삼투(percolation) 이론을 사용하여 줄어들 수 있음을 보였다 [9].

본 논문에서는, n 개의 무선 노드가 랜덤하게 위치하는 UWB 애드 혹 네트워크에 대해 개선된 용량 스케일링 법칙을 보인다. 먼저, 수정된 HC 기술이 사용되는 경우를 고려한다. 협 대역 모델에 대해 HC 기술의 깊은 연구가 수행되어 온 반면 [2], UWB 네트워크에 대해 그러한 시도는 이루어지지 않았다. 버스티(bursty) 전송을 하는 HC 기술을 언급하도록 한다. 우리의 취득 결과는 삼투 고속도로 이론 [9]을 사용한 최 근거리 MH 기술과 수정된 HC 기술 중 하나를 사용하는 것에 기반한다. 밀집 UWB 네트워크에서, 유도된 용량 스케일링은 전력 제한된 특성 때문에 특정 동작 영역(즉, 경로손실 감쇄 영역)에 대해 경로손실 지수 α 에 의존함을 보인다. 이 결과는 협 대역 모델 [1][2]의 경우와 대조되는 것이다. 또한 HC 기술의 사용은 특정 조건에서 UWB

네트워크의 용량 스케일링을 개선하는데 도움이 됨을 밝힌다. 보다 구체적으로, HC 기술은 $2 < \alpha < 3$ 에서 MH 기술보다 우수하지만, $\alpha \geq 3$ (매우 전력 제한적인 네트워크 영역)에 대해서는 MH 기술 사용이 더 높은 용량 취득이 가능함을 보인다. 다음으로, m 개의 균등하게 위치한 기지국을 가진 인프라 구조 지원을 받는 UWB 네트워크를 고려한다. 협 대역 모델에 대해 기지국 지원의 깊은 연구가 수행되어 온 반면 [5][6], UWB 네트워크에 대한 그러한 시도는 이루어지지 않았다. 약간의 수정을 통해 기지국 도움을 받는 라우팅 그리고 받지 않는 라우팅, 이렇게 두 가지 기술을 사용한다. 기지국 지원을 받지 않는 애드 혹 전송에 대해 삼투 고속도로 이론 [9]을 사용한 최 근거리 MH 기술을 적용한다. 유도된 용량 스케일링 결과는 항상 모든 동작 영역에 대해 경로손실 지수 및 변수 m 에 의존함을 보인다. 또한 협 대역 시나리오 [5][6]와 같이, m 이 특정 레벨 이상일 때 전체 용량은 m 과 함께 선형적으로 증가함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 및 채널모델을 소개한다. III장에서는 수정된 HC 기술을 언급하고 그 것의 취득 가능한 용량 스케일링을 분석한다. IV장에서는 인프라 구조 지원을 받는 라우팅 기술을 언급하고 그 것의 취득 가능한 용량 스케일링을 분석한다. V장에서는 본 논문을 요약 및 마무리 한다. 본 논문에서는, 전체적인 가독성을 높이기 위해 필요 시 theorem의 간략한 증명만을 제공하도록 한다.

II. 시스템 및 채널 모델

단위 면적의 스쿼어에 균일하고 독립적으로 분포된 n 개의 무선 노드로 구성된 2차원 애드 혹 네트워크(즉, 밀집 네트워크 [1][2])를 고려한다. 각 노드가 정확히 source 하나의 destination이 되도록 source-destination(S-D) 쌍을 랜덤하게 고르도록 한다. 각 노드는 전체 시스템 대역폭에 대해 평균 송신 전력 제한 P (상수)를 가지고 $T(n)/n$ 의 전송률로 송신을 한다고 가정한다. 여기에서, $T(n)$ 은 네트워크의 전체 용량을 나타낸다. 게다가, 각 링크가 n 의 함수로써 증가하고 상대적으로 큰 대역폭 W 를 걸쳐 동작하는 UWB 통신 모델을 가정한다. 이 가정은(대역폭 제한적이 아닌) 전력 제한적인 시

스텝을 양산한다.

기본 신호 모델은 아래와 같이 묘사된다. 주어진 시간에서 노드 $k \in \{1, \dots, n\}$ 에 대한 수신 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{i \in I} h_{ki} x_i + n_k$$

여기에서, $I \subset \{1, \dots, n\}$ 은 네트워크에 유용한 n 개의 송신기의 부분집합인 동시에 전송하는 노드들의 집합을 나타내고, $x_i \in C$ 는 i 번째 노드에서 전송된 신호이고, n_k 는 영 평균 및 분산 N_0 를 갖는 순환 대칭적인 복소 부가 백색 가우시언 (Gaussian) 잡음을 나타낸다. 또한, 두 노드 $i, k \in \{1, \dots, n\}$ 사이의 복소 채널 이득 $h_{ki} \in C$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$h_{ki} = \frac{e^{j\theta_{ki}}}{r_{ki}^{\alpha/2}} \quad (1)$$

여기에서, $e^{j\theta_{ki}}$ 는 $[0, 2\pi]$ 에서 균일하게 분포하고 다른 i, k , 시간 (전송 심볼)에 대해 독립적인 랜덤 위상을 나타낸다. 즉, 빠른 페이딩을 가정한다. 또한, r_{ki} 는 노드 i 와 k 사이의 거리를, $\alpha > 2$ 는 경로손실 지수를 나타낸다. 원하는 송신기가 노드 i 라 가정할 때, 노드 k 에서 수신 간섭량과 잡음의 합은 다음과 같다.

$$WN_0 + \sum_{i' \neq i, i' \in I} P|h_{ki'}|^2 \quad (2)$$

여기에서, WN_0 는 W 안에 존재하는 잡음 전력을 나타낸다. 전력 제한된 시나리오에서,

$$WN_0 \gg \sum_{i' \neq i, i' \in I} \frac{P}{N_0} |h_{ki'}|^2$$

를 만족하면, 가정하는 시스템은 (간섭이 아닌) 전력에 의해 영향을 받는다 (구체적인 분석은 나중에 다루도록 한다).¹⁾

이제, 인프라 구조 지원을 받는 UWB 애드 혹 네트워크를 고려한다. 전체 영역이 m 개의 스퀘어 셀로 분할되고 셀 각각은 중앙에 하나의 단일 안테나 기지국을 갖는다고 가정한다. 분석적 편의를 위해 변수 n 과

m 은 $\beta \in [0, 1)$ 에 대해 수식 $m = n^\beta$ 를 따르도록 한다. 게다가 [5][6]에서와 같이, 기지국 간 링크는 서로 무한대의 대역폭 접속을 가지고 기지국들은 source나 destination 역할을 하지 않는다고 가정한다.

이 경우, 상향링크에서의 신호 모델은 아래와 같이 묘사된다. 주어진 시간에서 기지국 $k \in \{1, \dots, n\}$ 에 대한 수신 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{i \in I} h_{ki} x_i + n_k$$

여기에서, $x_i \in C$ 는 i 번째 노드에서 전송된 신호이고, 노드 $i \in \{1, \dots, n\}$ 와 기지국 k 사이의 복소 채널 이득 h_{ki} 는 수식 (1)로 주어진다. 이 때, r_{ki} 는 노드 i 와 기지국 k 사이의 거리이다. 원하는 송신기 i 로부터 기지국 k 에서의 수신 신호 대 간섭 및 잡음비 (SINR: signal-to-interference-and-noise ratio)는 아래와 같이 주어진다.

$$SINR = \frac{Ph_{ki}^2}{WN_0 + \sum_{i' \neq i, i' \in I} Ph_{ki'}^2}$$

마찬가지로, 기지국 $k \in \{1, \dots, m\}$ 와 노드 $i \in \{1, \dots, n\}$ 사이의 하향링크에서의 복소 채널, 그리고 노드 $i, k \in \{1, \dots, n\}$ 사이의 복소 채널도 유사한 방법으로 모델링이 가능하다.

III. 계층적 협력 기술 사용 시 개선된 용량 스케일링

먼저, 수정된 HC 기술을 사용함으로써 UWB 네트워크에서의 개선된 용량 스케일링 법칙을 보인다.

3.1. 라우팅 기술

본 절에서는 시간의 특정 일부만을 사용하여 계층적 기술을 운영하는 버스티 전송에 기반한 수정된 HC 기술을 설명한다. 비교를 위해, UWB 애드 혹 네트워크에서 기존 최 근거리 MH 기술 [9]을 보인다.

1) 수정된 계층적 협력: 협 대역 애드 혹 네트워크에

1) 대역폭 제한된 경우 [1], [2], $W = \theta(1)$ 이 가정되고 결과적으로 시스템은 간섭에 영향을 받는다.

대한 초기 연구 [1][2]에 기반하여, HC 기술을 사용하는 것이 대역폭 제한된 영역에서 선호된다는 것을 확인할 수 있다. UWB 애드 혹 네트워크에서, HC 기술이 MH 기술보다 더 좋은 용량을 가지는 그러한 동작 영역 (또는 경로손실 감쇄 영역)을 확인하기 위하여 수정된 HC 기술을 소개한다. HC는 다음과 같이 세 phase로 구성된다.

- (i) 네트워크를 각각 M 노드를 갖는 클러스터들로 나눈다.
- (ii) 첫 번째 phase 동안, 각 source는 같은 클러스터 안에 존재하는 다른 $M-1$ 개 노드들에게 데이터를 전송한다.
- (iii) 두 번째 phase 동안, source와 destination을 갖는 두 클러스터 사이 장거리 다중 입력 다중 출력 전송을 수행한다.
- (iv) 마지막 phase 동안, 각 노드는 수신 신호를 양자화 (quantization) 하고 같은 클러스터 내 대응하는 destination 노드에게 양자화된 데이터를 전달한다. 모든 양자화된 신호를 수집함으로써, 각 destination은 패킷을 복호할 수 있다.

각 노드가 클러스터 안에 데이터를 전송할 때 (첫 번째 및 세 번째 phase에 해당), 각 클러스터를 더 작은 클러스터로 분할함으로써 각 클러스터 내에서 또 다른 더 작은 스케일의 협력 통신을 적용하는 것이 가능하다. 이 과정을 반복적으로 적용함으로써, 네트워크에 계층적 방법을 수립하는 것이 가능하다. 더 구체적인 설명은 [2]를 참고하도록 한다.

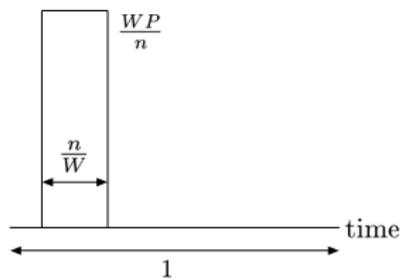


그림 1. 가정하는 시스템 모델에서의 버스티 전송
 Fig. 1 Bursty Transmission under the assumed system model

전력 제한된 성격 때문에, HC 기술은 최대 송신 전력 (즉, 노드 당 송신 전력 P)을 사용한다. 전력 제한 없는 네트워크에 가정하는 네트워크 모델을 간단히 적용하기 위해, [2]에서와 유사하게 기존 (연속적인) HC 기술 대신에 버스티 전송을 활용하도록 한다. 이 때, 노드 당 순간 전력 WP/n 과 함께 실제 전송에 대해 시간의 $\Theta(n/W)$ 만을 사용하며 나머지 시간에 대해서는 아무 전송도 이루어지지 않는다 (그림 1 참조). 이 기법과 함께 원하는 송신기로부터의 수신 신호 전력과 잡음은 동일한 스케일링 $\Theta(W)$ 를 갖게 되고, (순간) 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)는 UWB 모델 하에서 $\Theta(1)$ 로 유지된다 (검증은 다음절에서 보이도록 한다).

2) 삼투 고속도로 전달 라우팅: UWB 애드 혹 네트워크 하에서 삼투 고속도로 이론 [9]을 통해 MH 기술을 어떻게 동작시킬 수 있는지를 간략히 소개한다. [9]에서의 기술은 존재하는 MH 기술 [7-9] 중 가장 우수한 용량 성능을 보인다. 삼투 고속도로 전달의 기본 절차는 draining, highway, delivery phase 이렇게 세 단계를 따른다. 먼저 backbone 네트워크를 어떻게 설계하는지를 설명한다. 영역을 모서리 길이 $c_1/(2\sqrt{n})$ ($c_1 > 0$ 은 n 과 독립적인 상수)의 동일한 스퀘어 격자로 나눈다. 다음으로, 네트워크 영역을 크기 $l \times \frac{1}{l} \log l$ ($l = \sqrt{2n}/c_1$)의 동일한 수평 직사각형으로 분할한다. 이는 왼쪽에서 오른쪽으로 각 직사각형을 가로지르는 $\Theta(\log l)$ 개의 수평으로 분리된 열린 경로 생성을 가능하게 한다. 따라서 각 직사각형은 삼투 모델에서 $l \times \log l$ 격자를 갖는다. 그 영역은 아래에서 위로의 수평으로 분리된 경로 생성을 위해 역시 $m/\log m$ 개의 동일한 수직 직사각형으로 분할될 수 있다.

- (i) Draining phase: 각 수평 직사각형 내의 source는 backbone 네트워크의 수평 경로에 있는 노드로 단일 홉을 통해 직접 패킷을 전송한다.
- (ii) Highway phase: 패킷은 MH 기술을 사용하여 수평 경로를 따라 전송되며 수직 경로에 이르게 된다.
- (iii) Delivery phase: 수직 경로 안의 노드는 대응하는 destination에게 단일 홉으로 직접 패킷을 전송한다.

더 구체적인 설명은 [9]를 참고하도록 한다. 활성화된 S-D 쌍의 평균 수는 높은 확률로 $\Theta(\sqrt{n})$ 으로 주어지는데, 이는 모든 직사각형과 함께 동시에 $\Theta(\sqrt{n})$ 개의 수평 및 수직 경로가 존재하기 때문이다.

3.2. 용량 분석

이 절에서는 III-1절에서 보인 두 가지 기술 HC와 MH에 기반하여 취득 가능한 용량 스케일링을 소개한다. 먼저 다음 lemma를 보이도록 한다.

Lemma 1: n 개의 노드가 균일하게 분포하는 2차원 밀집 네트워크에서, 두 노드 사이의 최소 거리는 높은 확률로 $\frac{1}{n\sqrt{\log n}}$ 보다 크다.

이 lemma의 증명은 [2]에서 주어진다. Lemma 1, 그리고 수식 (1)과 (2)로부터 아래와 부등식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i' \neq i, i' \in I} P|h_{ki'}|^2 = \sum_{i' \neq i, i' \in I} \frac{P}{r_{ki'}^\alpha} \leq Pn^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2}$$

따라서 $W = \Omega(n^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2})$ 이면, 간섭은 잡음에 비해 무시할 만하며, 심지어 밀집 네트워크에서도 제한된 수신 신호 전력을 이끌어내게 된다. 즉, 더 높은 송신 전력은 조건 $W = \Omega(n^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2})$ 에서 더 증가된 SINR, 따라서 더 좋은 용량을 이끌어낼 수 있게 된다. 다음 결과는 최 근거리 MH 기술 사용 시 취득 가능한 용량을 나타낸다.

Lemma 2: $W = \Omega(n^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2})$ 를 가정하자. 이 때, 고속도로를 따라 MH 기술을 사용하면 $T(n) = \Omega(n^{(\alpha+1)/2})$ 이 취득 가능하다.

이 lemma의 증명은 [9]에서 주어진다. 두 가지 라우팅 기술에 기반하여, 첫 번째 주요 결과인 UWB 애드 혹 네트워크에서의 전체 용량 $T(n)$ 을 보이도록 한다.

Theorem 1: $W = \Omega(n^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2})$ 를 가정하자. 언급한 두 가지 라우팅 기술을 사용한 밀집 UWB 네트워크에서, 높은 확률로 아래 용량이 취득 가능하다.

$$T(n) = \Omega(\max\{n^{(\alpha+1)/2}, n^{2-\epsilon}\}) \quad (3)$$

($\epsilon > 0$ 은 임의의 작은 상수)

증명: 협 대역 네트워크와 비교할 때 각 노드에서의 수신 SINR은 증가하는 n 과 함께 W 의 요소로 감소하

게 된다. 네트워크가 전력 제한적이기 때문에, HC 기술을 수행하는데 요구되는 평균 노드 당 송신 전력은 P/n 이 아닌 최대 전력 P 가 되고, 이는 간섭이 잡음보다 더 늦게 스케일된다는 사실로부터 $SNR = \Theta(n/W)$ 를 이끌어낸다. 따라서 버스티 HC 기술을 사용함으로써, 각 노드에서 순간 전력 WP/n 과 함께 시간의 일부 $\Theta(n/W)$ 에 대해 수신 SNR을 $\Theta(1)$ 로 유지시킬 수 있다. 그러므로, HC 기술과 함께 아래 용량이 취득 가능하다.

$$T(n) = \Theta\left(W\left(T_{NB}(n)\frac{n}{W}\right)\right) = \Theta(nT_{NB}(n)) = \Omega(n^{2-\epsilon})$$

여기에서, $T_{NB}(n)$ 은 HC를 사용한 협 대역 네트워크의 용량 스케일링을 나타낸다. Lemma 2와 위의 취득 용량을 사용함으로써 최종적으로 수식 (3)을 얻을 수 있다. 이 결과로부터 동작 영역 (또는 경로손실 감쇄 영역)에 따라 아래와 같은 재미있는 현상을 관찰할 수 있다.

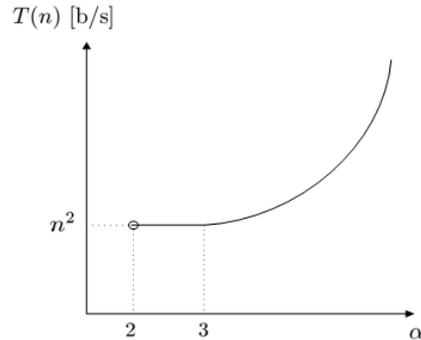


그림 2. 경로손실 지수 α 에 따른 전체 용량 스케일링 $T(n)$
Fig. 2 Total throughput scaling $T(n)$ according to the path-loss exponent α

그림 2에서 확인할 수 있듯이, 수식 (3)에서의 용량 스케일링은 $\alpha \geq 3$ 에 대해 경로손실 지수 α 에 의존하게 된다. 이는 협 대역 경우 [1], [2]와는 달리 고려하는 밀집 네트워크가 대역폭 제한이 아닌 전력 제한되어 있기 때문이다. 각 동작 영역에서 두 가지 기술 HC와 MH 중 최고 성능을 가지는 것이 무엇인지 조사하는 것은 중요하다 하겠다. $2 < \alpha < 3$ 영역에서, HC 기술은 임의의 작은 $\epsilon > 0$ 에 대해 $T(n) = \Omega(n^{2-\epsilon})$ 을 취득하며 MH 기술보다 우수한 성능을 가진다. 반면 $\alpha \geq 3$ 영역에서는, 네트워크가 매우 전력 제한적이기 때문에 MH 기술을

사용하는 것이 더 높은 용량 ($T(n) = \Omega(n^{(\alpha+1)/2})$)을 제공하게 된다. 추가로, 전 대역폭 W 에 대해 계산된 전체 용량 $T(n)$ 은 α 가 증가할 때 감소하지 않는 반면, 대역폭 당 용량은 α 가 증가함에 따라 감소하게 된다.

게다가, 유도된 취득 용량 스케일링을 협 대역 경우와 비교해 보도록 하자. 단위 면적의 협 대역 애드 혹 네트워크에서는, 기존 HC 기술을 사용하여 거의 선형 용량 취득이 가능하다. 대역폭 제한 때문에, 각 노드에서 특정 레벨 이상의 송신 전력은 전체 용량 측면에서 더 좋은 성능을 제공해 주지는 않는다. 이 점이 바로 협 대역 시스템과 UWB 애드 혹 네트워크를 구분할 수 있는 주요 특징이다.

IV. 인프라 구조 사용 시 개선된 용량 스케일링

이제, 균일하게 위치한 인프라 구조 노드를 가진 UWB 네트워크에서의 개선된 용량 스케일링 법칙을 보인다.

4.1. 라우팅 기술

본 절에서는 인프라 구조 지원을 가지는 라우팅, 지원이 없는 라우팅, 이렇게 두 가지 기술을 설명한다. 특별히, UWB 네트워크에서 약간의 수정과 함께 기존 기술 [7]-[9] 중 가장 좋은 용량을 보이는 기술 [9]을 활용한다.

1) 인프라 구조 지원을 받는 전달 라우팅: 밀집 네트워크에서, 기지국 기반 MH 기술은 아래와 같이 묘사된다.

- 네트워크를 각 셀의 중심에 하나의 기지국을 가지는 면적 $1/m$ 의 동일한 스퀘어 셀들로 나눈다. 그리고 다시 각 셀을 면적 $2\log n/n$ 의 (라우팅 셀로 불리는) 더 작은 스퀘어 셀로 분할한다. 이 라우팅 셀은 높은 확률로 최소 하나 이상의 노드를 포함한다.
- 접속 (access) 라우팅에서, 셀 당 하나의 source는 각 인접한 라우팅 셀 내 노드들 중 하나를 사용하여 최단거리 MH 기술을 통해 대응하는 기지국으로 패킷을 전송한다. 각 노드에서 최대 전력 P 를 사용한다.²⁾

- 패킷 복호를 완료한 기지국은 유선 기지국 간 링크를 통해 대응하는 destination에 가장 가까운 기지국으로 패킷을 전송한다.
- 출구 (exit) 라우팅에서, 접속 라우팅 경우와 유사하게 기지국으로부터 대응하는 destination까지 최단거리 MH 기술을 수행한다.

위 라우팅에서 m 개의 S-D 쌍이 동시에 활성화될 수 있다.

2) 삼투 고속도로 전달 라우팅: 기지국 지원을 받는 네트워크의 용량 스케일링을 개선하기 위해, 기지국 수 m 이 특정 레벨보다 높을 필요가 있다. 다시 말하면, m 이 충분히 크지 않으면, 기지국 도움을 받지 않는 애드 혹 전송이 더 높은 용량 스케일링을 제공할 수 있다. UWB 애드 혹 네트워크에서는 삼투 고속도로 전달 라우팅을 사용한다. 더 구체적인 설명은 III.1-2)를 참고하도록 한다.

4.2. 용량 분석

이 절에서는 3.1 절에서 보인 두 가지 라우팅 기술에 기반하여 취득 가능한 용량 스케일링을 분석한다. Lemma 1과 2를 사용하여 두 번째 주요 결과를 보이도록 하는데, 이는 다중 기지국을 가진 UWB 네트워크에서의 취득 가능한 전체 용량 $T(n)$ 을 보이는 것이다.

Theorem 2: $W = \Omega(n^{\alpha+1}(\log n)^{\alpha/2})$ 를 가정하자. 언급한 두 가지 라우팅 기술을 사용한 밀집 UWB 네트워크에서, 높은 확률로 아래 용량이 취득 가능하다.

$$T(n) = \begin{cases} \Omega(n^{(\alpha+1)/2}) & \text{if } m = o(\sqrt{n}(\log n)^{\alpha/2}) \\ \Omega\left(\frac{mn^{\alpha/2}}{(\log n)^{\alpha/2}}\right) & \text{if } m = \Omega(\sqrt{n}(\log n)^{\alpha/2}) \end{cases} \quad (4)$$

and $m = O(n^{1-\epsilon})$

($\beta \in [0,1)$ 에 대해 $m = n^\beta$ 이고, $\epsilon > 0$ 은 임의의 작은 상수)

증명: 먼저 상향링크 (접속 라우팅)를 고려하자. 각 홉 당 수신 SINR은 아래와 같이 유도될 수 있다.

2) 반면 협 대역 모델에서는, 요구 용량 스케일링을 보장하기 충분한 노드 당 $P/n^{\alpha/2}$ 의 송신 전력을 사용한다. 이는 전력 제한적이지 아닌 대역폭 제한적이기 때문이다.

$$SINR \geq \frac{c_2 P}{WN_0} \left(\frac{1}{\sqrt{2 \log n/n}} \right)^\alpha = \frac{c_2 P n^{\alpha/2}}{2^{\alpha/2} WN_0 (\log n)^{\alpha/2}}$$

($c_2 > 0$ 는 n 과 무관한 상수) 여기에서, 부등식은 홉 당 거리가 $O(\sqrt{2 \log n/n})$ 로 주어진다. 사실로부터 유도된다. $SINR = 0(1)$ 이기 때문에, 각 링크 당 전송 율 R 은 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$R \geq W \log(1 + SINR) \geq \frac{c_2 (\log e) P n^{\alpha/2}}{2^{\alpha/2} WN_0 (\log n)^{\alpha/2}}$$

결과적으로 조건 $\beta \in [0, 1)$ 하에서 $R = \Omega(n^{\alpha/2}/(\log n)^{\alpha/2})$ 를 얻을 수 있다. 마찬가지로 하향링크에서도 동일한 전송 율을 얻는다. m 개의 S-D 쌍이 동시에 활성화되기 때문에, 기지국 기반 기술 사용 시 전체 용량은 $T(n) = \Omega\left(\frac{mm^{\alpha/2}}{(\log n)^{\alpha/2}}\right)$ 로 주어진다. Lemma 2와 위의 취득 용량을 사용함으로써 최종적으로 수식 (4)을 얻을 수 있다.

그림 3에서 확인할 수 있듯이, 수식 (4)에서의 용량 스케일링은 모든 동작 영역 $\beta \in [0, 1)$ 에 대해 경로손실 지수 α 에 의존하게 된다. 이는 협 대역 경우 [5]와는 달리 고려하는 밀집 네트워크가 전력 제한되어 있기 때문이다. 또한 전체 용량 $T(n)$ 이 네트워크에서의 기지국 수 m 에 따라 어떻게 스케일하는지 보인다. m 이 인프라 구조가 도움이 안 되는 특정 레벨 이하일 때, $T(n)$ 은 증가하지 않음을 관찰할 수 있다.

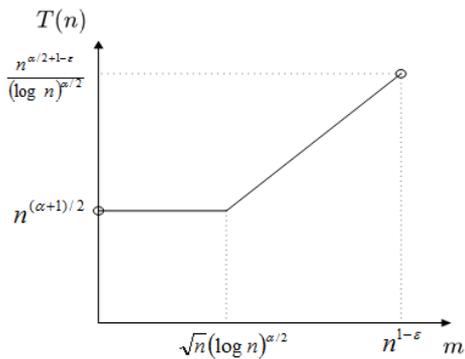


그림 3. 기지국 수 m 에 따른 전체 용량 스케일링 $T(n)$
Fig. 3 Total throughput scaling $T(n)$ according to the number of base stations, m

반면, m 이 그 레벨을 넘어서면, 협 대역 모델과 같이 기지국 기반 기술이 우월해지게 된다. 예를 들면, 동작 영역 $m = \Omega(\sqrt{n}(\log n)^{\alpha/2})$ 및 $m = O(n^{1-\epsilon})$ ($\beta \in (1/2, 1)$ 에 대응)에서는 $T(n)$ 이 m 과 함께 선형적으로 스케일함을 확인할 수 있다.

V. 결론

단위 면적의 UWB 애드 혹 네트워크에 대하여, HC 기술 또는 인프라 구조의 사용이 전체 용량 스케일링을 개선하는데 도움이 됨을 분석하였다. 합 용량 $T(n)$ 을 n 과 α (그리고 기지국 기반 네트워크의 경우 m)의 함수로 유도하였다. 동작 영역 $2 < \alpha < 3$ 에 대해 HC 기술이 MH 기술보다 우수한 성능을 보이며, m 이 $\sqrt{n}(\log n)^{\alpha/2}$ 보다 빠르게 스케일할 때, 즉 $\beta > 1/2$ 일 때 인프라 구조 지원의 영향이 우월함을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 ‘범부처 Giga KOREA 사업’의 일환으로 수행하였음. [GK13N0100, 밀리미터파 5G 이동통신 시스템 개발]

REFERENCES

- [1] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, pp. 388-404, Mar. 2000.
- [2] A. Ozgur, O. Leveque, and D. N. C. Tse, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, pp. 3549-3572, Oct. 2007.
- [3] M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 10, pp. 477-486, Aug. 2002.
- [4] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, pp. 3425-3441, Aug. 2008.

- [5] A. Zemplianov and G. de Veciana, "Capacity of ad hoc wireless networks with infrastructure support," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 657-667, Mar. 2005.
- [6] W.-Y. Shin, S.-W. Jeon, N. Devroye, M. H. Vu, S.-Y. Chung, Y. H. Lee, and V. Tarokh, "Improved capacity scaling in wireless networks with infrastructure," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, pp. 5088-5102, Aug. 2011.
- [7] R. Negi and A. Rajeswaran, "Capacity of ultra wide band wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, pp. 3816-3824, Oct. 2007.
- [8] X. Tang and Y. Hua, "Capacity of ultra-wideband power-constrained ad hoc networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, pp. 916-920, Feb. 2008.
- [9] H. Zhang and J. C. Hou, "Capacity of wireless ad-hoc networks under ultra band with power constraints," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Miami, FL, Mar. 2005, pp. 455-465.



신원용(Won-Yong Shin)

2002년 연세대학교 기계전자공학부 학사
2004년 KAIST 전자전산학과 석사
2008년 KAIST 전자전산학부 박사
2008년 2월~4월 Harvard University 방문연구원
2008년 9월~2009년 2월 KAIST BK 정보전자연구소 박사후연구원
2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원
2008년 8월~2009년 4월 (주)루미콤 방문연구원
2009년 5월~2011년 10월 Harvard University Postdoctoral Fellow
2011년 10월~2012년 2월 Harvard University Research Associate
2012년 3월~현재 단국대학교 국제학부 모바일시스템공학전공 조교수
※관심분야 : 정보이론, 통신이론, 신호처리, 네트워킹 이슈로의 다양한 응용