

수중 애드 혹 네트워크에서의 시스템 모델링 및 용량 스케일링 법칙에 대하여

정회원 신원용*, 종신회원 김아정**°

On the System Modeling and Capacity Scaling Law in Underwater Ad Hoc Networks

Won-Yong Shin* *Regular Member*, Ajung Kim**° *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 n 개의 균등하게 위치한 센서 노드를 가지는 수중 애드 혹 음향 네트워크에서의 시스템 및 채널 모델링, 그리고 이를 바탕으로 유도한 용량 스케일링 법칙을 소개한다. 특히 협 대역 모델에서 캐리어 주파수가 n 의 함수로 스케일 되는 것을 허용하는 상황을 가정한다. 가정하는 네트워크에서, 전송 거리 뿐 아니라 주파수 스케일링에도 의존하는 감쇠 변수의 특성을 분석한다. 이를 바탕으로 단일 노드 밀도를 가지는 확장 네트워크 하에서 용량 스케일링에 대한 cut-set 기반 상향 경계선을 유도한다. 상향 경계선은 감쇠 변수에 역으로 비례한다는 결과물로부터, 전 영역에 대해 전력 제한된 네트워크가 생성됨을 보인다. 뿐만 아니라 간단한 최 근거리 다중 홉 전송에 기반 하여 용량 달성 가능한 기술을 소개한다. 확장 네트워크에서 다중 홉 기술은 감쇠 변수의 함수로 표현 되는 모든 동작 영역에서 order 측면 최적임을 보인다.

Key Words : Attenuation Parameter, Capacity Scaling Law, Multi-hop(MH), Underwater Ad Hoc Acoustic Network

ABSTRACT

In this paper, we introduce system and channel modeling for an underwater ad hoc acoustic network with n regularly located nodes, and then analyze capacity scaling laws based on the model. A narrow-band model is assumed where the carrier frequency is allowed to scale as a function of n . In the network, we characterize in attenuation parameter that depends on the frequency scaling as well as the transmission distance. A cut-set upper bound on the throughput scaling is then derived in extended networks having unit node density. Our result indicates that the upper bound is inversely proportional to the attenuation parameter, thus resulting in a power-limited network. Furthermore, we describe an achievable scheme based on the simple nearest-neighbor multi-hop (MH) transmission. It is shown under extended networks that the MH scheme is order-optimal for all the operating regimes expressed as functions of the attenuation parameter.

I. 서 론

Gupta와 Kumar에 의해 소개된 선도적인 연구는

무선 라디오 애드 혹 네트워크에서의 용량 스케일링 특성 분석을 다루었다^[1]. 그들은 다중 홉 라우팅 기법이 단일 면적에서 무작위로 분포된 n 개의

※ 본 연구는 한국연구재단 논문연구과제(NRF-D00392) 지원으로 수행되었습니다.

* School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University(wyshin@seas.harvard.edu)

** 세종대학교 전자정보통신공학부(akim@sejong.ac.kr) (°: 교신저자)

논문번호 : KICS2011-01-059 접수일자 : 2011년 1월 27일, 최종논문접수일자 : 2011년 3월 22일

source-destination (S-D) 쌍들에 대해 사용될 때, 전체 용량이 $\Theta(\sqrt{n/\log n})$ 로 스케일 되는 것을 보였다.¹⁾ 위에서 언급한 연구 이후 많은 확장 연구가 진행되었는데, 다중 홉 기술은 추가적으로 개발되고 분석되었다^{2,3)}. 최근 연구는 라디오 네트워크에서 거의 선형적인 용량 (즉, 임의로 작은 $\epsilon > 0$ 에 대하여 $\Theta(n^{1-\epsilon})$)이 계층적인 협력 기법을 사용함으로써 취득 가능함을 보였다⁴⁾.

내륙 라디오 네트워크에 대한 연구와 더불어, 음향 통신 기술에 대한 최근 진보로 인해 수중 네트워크의 연구에 대한 관심이 증가하고 있다^{5,6)}. 수중 음향 통신 시스템에서는 대역폭과 수신 전력이 심하게 제한되는데, 이는 전송 거리에 따른 지수적인 거리손실 감쇠와 주파수 의존적 감쇠 특성 때문이다. 이 부분이 무선 라디오 링크와 수중 시스템을 구분 짓는 중요한 특성 중 하나이다. 이러한 특성에 기반 하여 네트워크 코딩 기술이 수중 음향 채널에 대해 제안되었다⁶⁻⁸⁾. 이제 생각할 수 있는 자연적인 의문점은 과연 음향 채널을 통해 다수 개의 S-D 쌍들을 지원하는 수중 네트워크의 근본적인 용량 한계는 무엇인가 하는 점이다. 이 문제를 해결하기 위해 단일 면적을 가진 수중 네트워크에 대한 용량 스케일링이 분석되었는데⁹⁾, n 개의 노드가 단일 면적의 평면 디스크에 임의로 위치해 있고, 캐리어 주파수가 n 과는 무관한 상수로 고정되어 있다고 가정하였다. 그 연구에서는 Gupta와 Kumar¹¹⁾에 의한 논문에서 소개된 물리적 모델을 기반으로 노드 당 용량에 대한 상향 경계선을 보였다. 유도한 상향 경계선은 $n^{-1/\alpha} e^{-W_0(\theta(n^{-1/\alpha}))}$ 로 스케일링 하는데, 이 때 α 는 수중 채널의 확산 요소를 나타내고, W_0 는 Lambert 함수의 branch 0를 나타낸다.²⁾

본 논문에서는 수중 네트워크에 대한 시스템 및 채널 모델링을 소개하고, 이를 바탕으로 유도한 용량 스케일링 법칙을 분석한다. 본 연구에서는 단일 노드 밀도를 가지는 확장 네트워크에 초점을 맞춘다. 특히, 헵 대역 모델에서 캐리어 주파수가 n 에 대한 특정 함수로 스케일 되는 경우를 가정한다. 이러한 가정은 감쇠 특성으로 인하여 스케일링 행동

을 크게 변화시키게 된다. 최근에는 캐리어 주파수와 노드 수 n 사이의 관계에 의해 결정되는 동작 영역에 따라 무선 라디오 네트워크의 최적 용량 스케일링이 어떻게 표현되는지가 연구되었다¹⁰⁾. 본 논문에서의 주파수 스케일링 시나리오는 이와 본질적으로 같은 의미를 가진다. 용량 스케일링을 유도하기 위해, 정보이론 관점에서의 상향 경계선 및 달성 가능한 스케일링 용량 (즉, 하향 경계선)을 보이는 것이 본 연구의 목적이다. 이러한 연구는 수중 네트워크에서 한 번도 수행된 적이 없는 시도라 할 수 있다.

먼저 전송 거리 뿐 아니라 캐리어 주파수에도 의존하는 감쇠 변수의 특성을 구체적으로 분석한다. 이를 바탕으로 n 개의 균일하게 분포된 노드를 가지는 네트워크에 대하여 전체 용량 스케일링에 대한 상향 경계선을 보인다. 이 때 상향 경계선은 전력 제한 영역에서의 특성⁴⁾에 기반 하여 유도가 되고, cut-set 경계선이 사용된다. 확장 네트워크에서, 상향 경계선은 감쇠 변수에 역으로 비례한다는 결과물로부터, 감쇠 변수의 함수로 표현되는 전 동작 영역에 대해 전력 제한된 네트워크가 생성됨을 보인다. 흥미 있는 사실은 무선 라디오 네트워크의 경우와는 다르게, 유도된 상향 경계선은 감쇠 변수에 심하게 의존하지만, 무선 채널에서 거리 손실 지수에 대응하는 확산 요소에는 의존하지 않는다는 점이다. 추가로 확장 균일 네트워크에서 용량 달성 가능한 기술을 보이기 위해 약간의 수정을 취한 기존 최단거리 다중 홉 전송¹¹⁾을 기술하고, 이 때 달성 가능한 용량을 분석한다. 확장 네트워크 하에서 다중 홉 라우팅 기술 기반 용량은 전 동작 영역에 대해 유도한 상향 경계선과 거의 일치함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장과 III장에서 시스템 및 채널 모델을 각각 설명한다. IV장에서는 용량에 대한 cut-set 상향 경계선 유도를 보인다. V장에서는 달성 가능한 용량 스케일링이 분석되고, VI장에서 본 논문을 요약 및 마무리 한다.

논문 전개의 간략화를 위해 본 논문에서 주어지는 4가지 Lemma의 증명 과정은 생략하도록 한다.

II. 시스템 모델

단일 노드 밀도를 가진 정사각형에서 n 개의 노드로 구성된 2차원 수중 네트워크를 고려한다. 이 때 확장 네트워크에서 두 개의 인접한 노드는 서로 거리 1만큼 떨어져 있다고 가정한다. 즉, 균일 네트

1) 다음의 기호법이 사용된다. i) $f(x) = O(g(x))$ 는 모든 $x > c$ 에 대하여 $f(x) \leq Cg(x)$ 가 되는 상수 C 와 c 가 존재함을 의미한다. ii) $g(x) = O(f(x))$ 이면 $f(x) = \Omega(g(x))$ 이다. iii) $f(x) = O(g(x))$ 이고 $g(x) = O(f(x))$ 이면 $f(x) = \theta(g(x))$ 이다.
2) Lambert W 함수는 함수 $z = W(z)e^{W(z)}$ 의 역으로 정의되고, $W(z) \geq -1$ 을 만족하는 branch는 $W_0(z)$ 로 표기된다.

워크^{[1], [2]}가 사용된다. 각 노드는 정확히 한 source 의 destination이 되도록 무작위로 S-D 쌍들의 조합을 선택한다. 각 노드는 평균 송신 전력 제한 P (상수)를 가지고, 채널 상태 정보는 모든 수신 단에서는 취득 가능하지만, 송신 단에서는 가능하지 않다고 가정한다. $T(n)$ 이 네트워크의 전체 용량을 나타낼 때, 각 노드는 $T(n)/n$ 의 용량으로 전송한다고 가정한다.

III. 채널 모델

다음으로 채널 모델링에 대해 다룬다. 캐리어 주파수 f 를 중심으로 하는 대역폭 W Hz의 주파수 비 선택적 채널에서 $f \gg W$ 를 만족하는 협 대역 모델을 가정한다. 이러한 매우 간략화 된 모델은 그림에도 불구하고 용량 스케일링을 통제하는 근본적 메커니즘을 보이기엔 충분하다고 할 수 있다. 모든 노드가 완전히 방향성 전송을 취한다고 가정함으로써 다중경로 전달 특성을 무시할 수 있다.

수중 음향 채널은 노드 i 와 k ($i, k \in \{1, \dots, n\}$) 사이의 거리 r_{ki} , 그리고 신호 주파수 f 에 의존하는 감쇠에 의해 특성화되고, 아래 식과 같이 주어진다.

$$A(r_{ki}, f) = c_0 r_{ki}^\alpha a(f)^{r_{ki}} \quad (1)$$

여기에서 $c_0 > 0$ 는 n 과 무관한 상수이고, α 는 확산 요소, 그리고 $a(f) > 1$ 는 흡수 계수를 나타낸다^[5]. 확산 요소는 전달의 기하학적인 부분을 묘사하며, 일반적으로 $1 \leq \alpha \leq 2$ 이다. 무선 네트워크에서의 존재하는 채널 모델은 일반적으로 $a(f) = 1$ (혹은 n 과 무관한 양수)과 $\alpha > 2$ 인 경우에 대응하게 된다.

$a(f)$ 에 대한 일반적인 실험적 모델은 주파수 f (kHz)에 대한 함수로써 dB/km 단위로 아래와 같이 나타내어진다^[5].

$$10 \log a(f) = a_0 + a_1 f^2 + a_2 \frac{f^2}{b_1 + f^2} + a_3 \frac{f^2}{b_2 + f^2}$$

여기에서 $\{a_0, \dots, a_3, b_1, b_2\}$ 는 n 과 무관한 상수이다. 이전에 언급되었듯이 캐리어 주파수 f 는 n 과 함께 스케일 되는 일반적인 경우를 허용한다. 특히, 주파수가 n 에 관해 임의의 증가율로 스케일 되는 상황을 가정한다. 이 때 흡수 계수 $a(f)$ 는 f 의 증가함수이고 아래와 같이 주어진다.

$$a(f) = \theta (e^{c_1 f^2}) \quad (2)$$

여기에서 $c_1 > 0$ 은 n 과 무관한 상수이다.

음향 채널에서 노드 $i \in \{1, \dots, n\}$ 에서의 잡음 n_i 는 다음의 네 가지 근본 잡음을 통해 모델링할 수 있다^[5]: 교류, 선박, 파도, 열 잡음. 여기에서 n_i 는 평균 0과 전력 스펙트럼 밀도 (power spectrum density: PSD) $N(f)$ 를 가지는 순환적으로 대칭인 복소 부가 유색 Gaussian 잡음으로 가정한다. 따라서 잡음은 주파수 의존적인 성격을 가진다. 여기에서 네 가지 잡음의 전체적인 PSD는 음향 시스템의 대다수에서 사용되어 온 동작 영역인 100 Hz - 100 kHz 사이의 주파수 영역에서 log 스케일로 선형적으로 감소하는 경향을 가지고, 따라서 대략적으로 아래와 같이 주어진다^[5].

$$\log N(f) = a_4 - a_5 \log f$$

여기에서 a_4 와 a_5 는 n 과 무관한 양수이다. 위의 수식은 n 에 따라 증가하는 f 관점에서

$$N(f) = \theta \left(\frac{1}{f^{a_5}} \right) \quad (3)$$

로 표현되기 때문에 $N(f) = O(1)$ 이 성립하게 된다.

주어진 시간에 대해 노드 $k \in \{1, \dots, n\}$ 에서의 수신 신호 y_k 는 아래와 같이 주어진다.

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

여기에서

$$h_{ki} = \frac{e^{j\theta_{ki}}}{\sqrt{A(r_{ki}, f)}} \quad (4)$$

는 채널을 나타내고, $x_i \in C$ 는 노드 i 에서 전송된 신호, $I \subset \{1, \dots, n\}$ 는 동시에 전송하는 노드들의 집합을 나타낸다. 랜덤 위상 $e^{j\theta_{ki}}$ 는 $[0, 2\pi)$ 에서 균일하게 분포되어 있고 다른 i, k , 그리고 시간 인덱스에 대해 독립적이라고 가정한다. 따라서 채널 이득이 매 심볼마다 새로운 독립적인 값으로 변화하는 협 대역 시변 채널을 가정한다.

위의 채널 특성에 기반 하여, 네트워크의 동작 영역은 다음의 물리적인 변수들에 따라 확인될 수

있다. 흡수 계수 $a(f)$ 와 잡음 PSD $N(f)$. 여기에서 두 가지 변수들은 노드 수 n 에 기반을 둔 주파수 f 를 선택함으로써 활용될 수 있다. 다시 말하면 f 와 n 사이의 관계가 구체화되면, $a(f)$ 와 $N(f)$ 는 각각 수식 (2)와 (3)으로부터 n 의 특정 스케일링 함수로 주어질 수 있음을 의미한다.

IV. Cut-set 상향 경계선 유도

수중 네트워크의 근본적인 한계를 측정하기 위해 전체 용량 스케일링에 대한 cut-set 기반 상향 경계선이 정보이론 관점^[13]으로부터 분석된다. 네트워크 면적을 동일한 두 개로 나누는 cut L 을 고려한다 (그림 1 참조). Cut L 하에서 source 노드들은 왼쪽에 위치하고, destination 노드들은 오른쪽에 위치하게 된다. 이 경우 cut에 의해 분리된 노드들의 두 집합 사이에는 다중 입력 다중 출력 (multiple-input multiple-output: MIMO) 채널이 형성된다.

본 장에서는 주어진 cut L 에 대한 정보 흐름이 source 노드들로부터 받은 전체 신호 전력에 비례하는 전력 이송 률^[4]에 기반을 둔 상향 경계선이 확장 네트워크에서 수립된다. 그러나 현재 다루는 문제는 다른 채널 특성으로 인해 기존의 확장 네트워크 구조^[4]와는 확연히 다르다는 점에 주목할 필요가 있다. 그림 1에서 도시된 바와 같이 S_L 과 D_L 은 각각 확장 네트워크에서 cut L 에 대한 source와 destination 집합을 나타낸다. 집합 D_L 에 있는 모든 노드들은 전력 측면에서 왼쪽 절반 네트워크에 잘 연결되어 있지 않기 때문에, S_L 에서 D_L 로의 정보 이송은 전력 제한되어 있게 된다. 이것은 정보 이송이 D_L 에 있는 집합원의 개수보다는 전체 수신된

전력 이송에 의해 제한됨을 의미한다. Cut L 에 대하여 왼쪽에 위치한 source들에 의한 전체 용량 $T(n)$ 은 시변 채널 가정 하에서 S_L 과 D_L 사이의 MIMO 채널의 용량으로 제한되고, 따라서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(n) \leq \max_{Q_L \geq 0} E \left[\log \det \left(I_{n/2} + \frac{1}{N(f)} H_L Q_L H_L^H \right) \right] \quad (5)$$

여기에서 H_L 은 $i \in S_L, k \in D_L$ 에 대해 원소 $[H_L]_{ki} = h_{ki}$ 를 가진 행렬이고, $Q_L \in C^{\theta(n) \times \theta(n)}$ 은 k 번째 대각 요소가 $k \in S_L$ 에 대해 $[Q_L]_{kk} \leq P$ 를 만족하는 양의 semi-definite 입력 신호 공분산 행렬이다.

수식 (5)는 Theorem 1에서 구체화될 것이다. 그 전에 집합 D_L 의 전체 전력 이송을 얻기 위해 사용된 상향 경계선 유도 기술^[12]을 적용한다. 이 기술은 (5)에서 보인 용량에 대한 상향 경계선을 최대화하는 측면에서 최적 입력 신호 공분산 행렬 Q_L 의 설계를 포함한다. 행렬 H_L 이 독립된 원소를 가지고, 각각의 원소 h_{ki} 가 proper 복소 랜덤 변수^[15]가 되고 $-h_{ki}$ 와 같은 분포를 가진다면 ($i \in S_L, k \in D_L$), 최적 Q_L 는 대각 행렬이 된다. 즉, (5)의 최댓값은 $k \in S_L$ 에 대해 $[\tilde{Q}_L]_{kk} = P$ 와 함께 획득된다. 이 때 \tilde{Q}_L 는 대각 행렬이다. 다음의 lemma를 소개하도록 한다.

Lemma 1: 채널 행렬 H_L 의 각 원소 h_{ki} ($i \in S_L, k \in D_L$)는 proper 복소 랜덤 변수이다.

랜덤 위상 $e^{j\theta_{ki}}$ 은 $[0, 2\pi)$ 에서 균일하게 분포하기 때문에, 모든 i, k 에 대하여 h_{ki} 가 $-h_{ki}$ 와 같은 분포를 갖는 사실은 쉽게 증명 가능하다. 따라서 Lemma 1의 결과를 사용하여 다음의 결과를 얻을 수 있다.

Lemma 2: 수식 (5)를 최대화하는 최적 입력 신호 공분산 행렬 Q_L 은 유일하며 $k \in S_L$ 에 대해 원소 $[\tilde{Q}_L]_{kk} = P$ 를 가지는 대각 행렬 \tilde{Q}_L 로 주어진다.

Lemma 2로부터 수식 (5)는 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$T(n) \leq \sum_{k \in D_L} \sum_{i \in S_L} \frac{P}{A(r_{ki}, f) N(f)} \quad (6)$$

여기에서 수식 (6)은 일반화된 Hadamard 부등식 및 x 에 대하여 $\log(1+x) \leq x$ 가 성립한다는 사실

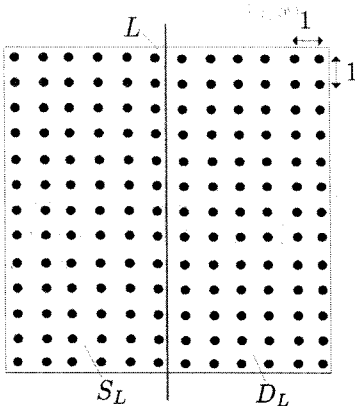


그림 1. 2차원 확장 균일 네트워크에서의 cut L

로부터 유도 가능하다. 수식 (6)은 주어진 cut L 에 대하여 source의 집합 S_L 로부터 destination 집합 D_L 로의 수신 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 총합을 나타낸다. (6)에 대한 연산을 더 수행하기 위해 다음 변수를 정의한다.

$$P_L^{(k)} = \frac{P}{c_0} \sum_{i \in S_L} r_{ki}^{-\alpha} a(f)^{-r_{ki}} \quad (7)$$

여기에서 $c_0 > 0$ 는 n 과 무관한 상수이고, 수식 (7)은 오른쪽에 있는 노드 k 에서 모든 source $i \in S_L$ 에 의해 보내진 신호로부터 받은 전체 전력 값에 대응한다 (수식 (1)과 (4) 참조). 편의상 cut L 하에서 source와 destination 노드들이 각각 $(-i_x + 1, i_y)$ 와 (k_x, k_y) 에 위치하도록 노드 위치를 인덱스화한다 ($i_x, k_x = 1, \dots, \sqrt{n}/2$, $i_y, k_y = 1, \dots, \sqrt{n}$). 그러면 (7)에서 정의된 $P_L^{(k)}$ 의 스케일링 결과는 다음과 같이 유도될 수 있다.

Lemma 3: 확장 네트워크에서, 수식 (7)은 아래와 같이 주어진다.

$$P_L^{(k)} = O(k_x^{1-\alpha} a(f)^{-k_x}) \quad (8)$$

여기에서 k_x 는 $k_x = 1, \dots, \sqrt{n}/2$ 에 대하여 노드 $k \in D_L$ 의 수평 coordinate을 나타낸다. 이제 확장 네트워크에서 cut-set 상향 경계선을 보이도록 한다.

Theorem 1: 단일 노드 밀도를 가지는 수중 균일 네트워크에서, 전체 용량 $T(n)$ 는 아래와 같이 제한된다.

$$T(n) \leq \frac{c_2 \sqrt{n}}{a(f)N(f)} \quad (9)$$

여기에서 $c_2 > 0$ 는 n 과 무관한 상수이다.

증명: 수식 (1), (6)-(8)로부터 전체 용량 $T(n)$ 에 대한 상향 경계선은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} T(n) &\leq \frac{1}{N(f)} \sum_{k \in D_L} P_L^{(k)} \\ &\leq \frac{1}{N(f)} \sum_{k_x=1}^{\sqrt{n}/2} \sum_{k_y=1}^{\sqrt{n}} P_L^{(k)} \\ &\leq \frac{c_3 P \sqrt{n}}{N(f)} \sum_{k_x=1}^{\sqrt{n}/2} \frac{1}{k_x^{\alpha-1} a(f)^{k_x}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{c_3 P \sqrt{n}}{N(f)} \sum_{k_x=1}^{\sqrt{n}/2} \frac{1}{a(f)^{k_x}} \\ &\leq \frac{c_3 P \sqrt{n}}{N(f)} \frac{1}{a(f)-1} \\ &\leq \frac{c_4 P \sqrt{n}}{a(f)N(f)} \end{aligned}$$

여기에서 c_3 와 c_4 는 n 과 무관한 양수이다. ■

위의 상향 경계선은 흡수 계수 $a(f)$ 와 잡음 PSD $N(f)$ 의 함수로 표현됨을 알 수 있다. 반면 무선 라디오 네트워크에 대한 상향 경계선은 오로지 상수 α 에 의존함을 확인 가능하다^[4]. 그리고 수식 (9)로부터, 상향 경계선은 감쇠 변수 $a(f)$ 에 역비례하고 $a(f)$ 와 함께 빠르게 감소하기 때문에 변수 $a(f)$ 에 관계없이 전력 제한 네트워크가 생성된다.

V. 용량 달성 가능 기술 소개

본 장에서는, 무선 라디오 네트워크에서 흔히 사용되는 전송 기술이 수중 네트워크에서 order 측면 최적임을 보인다. 단일 노드 밀도를 가지는 확장 균일 네트워크 하에서 기존 최 근거리 다중 흡 전송^[1]이 사용되고, 최적화를 보이기 위해서 이에 기반을 둔 달성 가능한 용량 스케일링이 분석된다.

다중 흡 라우팅의 기본 동작은 아래와 같이 주어진다.

- 네트워크를 단위 면적을 가지는 정사각형 라우팅 셀로 나눈다.
- S-D 쌍을 연결하는 선을 긋는다. 선을 통과하는 근처 셀들에 있는 노드들을 사용하여 source는 해당 destination에게 패킷을 전송한다.
- 최대 전력이 사용된다. 즉, 각 노드에서의 송신 전력은 P 이다.

이제 다중 흡 기술의 용량을 보이기 위해 간섭의 양을 측정하도록 한다.

Lemma 4: 단일 노드 밀도를 가지는 균일 네트워크에서 최 근거리 다중 흡 라우팅 기법이 사용된다고 가정한다. 이 때 집합 $I_C \{1, \dots, n\}$ 에 대응하는 동시에 전송하는 다른 노드들로부터의 전체 간섭 전력 P_I 는 $\Theta(1/a(f))$ 에 의해 제한된다. 여기에서 $a(f)$ 는 1보다 큰 흡수 계수를 나타낸다.

가정하는 네트워크에서 수신 신호 전력은 전송 거리와 함께 지수 적으로 감소함을 알 수 있다. 이것은 (1)에서의 흡수 계수 $a(f)$ 가 성능을 결정하는

데 중요한 역할을 함을 뜻한다. 또한 P_f 에 대한 상향 경계선은 확산 요소 α 에 의존하지 않음이 보여진다. Lemma 4를 사용하여, 간단히 용량 스케일링에 대한 하향 경계선을 획득 가능하며, 따라서 다음의 결과는 다중 홉 기술 하에서 달성 가능한 용량을 보여준다.

Theorem 2: 단일 노드 밀도를 가지는 수중 균일 네트워크에서 다음의 식이 달성 가능하다.

$$T(n) = \Omega\left(\frac{n^{1/2}}{a(f)N(f)}\right) \quad (10)$$

증명: 최 근거리 다중 홉 프로토콜이 사용된다고 가정한다. 용량 스케일링에 대한 하향 경계선을 얻기 위해 수신 노드 $i \in \{1, \dots, n\}$ 에서 측정된 신호 대 간섭잡음비 (signal-to-interference-and-noise ratio: SINR)는 홉수 계수 $a(f)$ 및 잡음 n_i 의 PSD $N(f)$ 의 함수로 계산된다. Gaussian이 가장 나쁜 부가 잡음이기 때문에 Gaussian 분포를 가정하는 것은 용량을 낮추는 역할을 한다. 그러므로 수신 노드에서 완전한 채널 상태 정보 취득을 가정함으로써, 수식 (1)과 (4)로부터 하나의 S-D 쌍에 대한 달성 가능한 용량은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \log(1 + \text{SINR}) &\geq \log\left(1 + \frac{P/(c_0 a(f))}{N(f) + c_5/a(f)}\right) \\ &\geq \log\left(1 + \frac{c_6 P}{N(f)a(f)}\right) \end{aligned}$$

여기에서 c_5 와 c_6 는 n 과 무관한 양수이다. 마지막 부등호는 $a(f)$ 와 $N(f)$ 사이의 관계식으로부터 얻어지는데, 결과적으로 $N(f) = \Omega(1/a(f))$ 가 된다. 작은 $x > 0$ 에 대해 $\log(1+x) = (\log e)x + O(x^2)$ 가 되는 사실로부터, 각 S-D 쌍에 대해 다음의 용량이 제공된다.

$$\Omega\left(\frac{1}{a(f)N(f)}\right)$$

S-D 쌍 별 홉 수는 $O(\sqrt{n})$ 로 주어지기 때문에, 동시에 패킷을 생성하는 $\Omega(\sqrt{n})$ 개의 source 노드가 존재하고, 따라서 최종 용량은 (10)과 같이 주어지게 된다. ■

이제 IV장에서 보인 용량 상향 경계선이 수식 (10)에서의 용량 스케일링과 얼마나 가까운지를 조

사하도록 한다.

Remark: Theorem 1과 2에 기반 하여, 전체 용량에 대한 상향 및 하향 경계선은 정확히 같은 order를 가짐을 알 수 있다. 그러므로 모든 감쇠 영역 (또는 동작 영역) 하에서 단일 노드 밀도를 가지는 균일 네트워크에서 다중 홉 기술을 사용하는 것은 order 측면 최적이다.

또한 전력 제한된 네트워크에서 심하게 성능을 저하시키는 장거리 MIMO 전송으로 인하여, 계층적인 협력 기법^[6]을 적용하는 것은 달성 가능한 용량을 증가시키는데 도움을 주지 못함을 주목할 필요가 있다. 보다 구체적으로, 계층의 최상단 레벨에서 거리 $O(\sqrt{n})$ 을 가지는 두 개의 무리 사이의 전송이 병목이 되며, 따라서 심각한 용량 저하를 야기하게 된다. 게다가 충분한 자유도 이득을 얻는 것이 가능한 랜덤 위상 모델 하에서도, 전력 제한 때문에 랜덤한 특성을 통한 이득은 활용될 수 없음을 확인할 수 있다.

VI. 결론

감쇠 변수를 포함한 시스템 및 채널 모델링 그리고 이에 기반을 둔 용량 스케일링 법칙이 수중 음향 네트워크의 협 대역 채널에서 분석되었다. 캐리어 주파수 f 가 노드 수 n 에 대한 임의의 비율로 스케일 할 때, 정보이론 관점에서의 상향 경계선과 달성 가능한 하향 경계선이 확장 균일 네트워크에서 감쇠 변수 $a(f)$ 의 함수로 유도되었다. 최 근거리 다중 홉 라우팅 기법이 확장 네트워크의 모든 동작 영역에서 order 측면 최적임을 보였다.

참고 문헌

- [1] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.46, pp.388-404, Mar., 2000.
- [2] M. Franceschetti, O. Dousse, D. N. C. Tse, and P. Thiran, "Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.53, pp.1009-1018, Mar., 2007.
- [3] A. El Gamal, J. Mammen, B. Prabhakar, and D. Shah, "Optimal throughput-delay scaling in wireless networks-Part I: The fluid model," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.52, pp.2568-2592,

- Jun., 2006.
- [4] 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.
- [5] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, Vol.11, pp.34-43, Oct., 2007.
- [6] D. E. Lucani, M. Medard, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic networks: Channel models and network coding based lower bound to transmission power for multicast," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.26, pp.1709-1719, Dec., 2008.
- [7] Z. Guo, P. Xie, J. H. Cui, and B. Wang, "On applying network coding to underwater sensor networks," in *Proc. Int. Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Los Angeles, CA, Sep., 2006.
- [8] D. E. Lucani, M. Medard, and M. Stojanovic, "Network coding schemes for underwater networks: The benefits of implicit acknowledgment," in *Proc. Int. Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Montreal, Canada, Sep., 2007.
- [9] D. E. Lucani, M. Medard, and M. Stojanovic, "Capacity scaling laws for underwater networks," in *Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, Oct., 2008, pp.2125-2129.
- [10] A. Ozgur, R. Johari, D. N. C. Tse, and O. Leveque, "Linear capacity scaling in wireless networks: Beyond physical limits?," in *Proc. Inf. Theory and Applications Workshop (ITA)*, San Diego, CA, Jan./Feb. 2010, pp.1-10.
- [11] L.-L. Xie and P. R. Kumar, "A network information theory for wireless communication: Scaling laws and optimal operation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.50, pp.748-767, May 2004.
- [12] A. Jovicic, P. Viswanath, and S. R. Kulkarni, "Upper bounds to transport capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.50, pp. 2555-2565, Nov. 2004.
- [13] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, New York: Wiley, 1991.
- [14] A. Ozgur, R. Johari, D. N. C. Tse, and O. Leveque, "Information theoretic operating regimes of large wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.56, pp.427-437, Jan., 2010.
- [15] F. D. Neeser and J. L. Massey, "Proper complex random processes with applications to information theory," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.39, pp.1293-1302, Jul., 1993.

신 원 용 (Won-Yong Shin)

정회원



2002년 2월 연세대학교 기계전
자공학부 학사
2004년 2월 KAIST 전자전산학
과 석사
2008년 8월 KAIST 전자전산학
부 박사
2008년 2월~4월 Harvard Uni-
versity 방문연구원

2008년 9월~2009년 2월 KAIST BK 정보전자연구
소 박사후연구원
2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터
선임급 위촉연구원
2008년 8월~2009년 4월 (주)루미콤 방문연구원
2009년 5월~현재 Harvard University Postdoctoral
Fellow
<관심분야> 정보이론, 통신이론, 신호처리, 해양 IT
관련 학제 간 융합연구

김 아 정 (Ajung Kim)

종신회원

1988년 2월 서울대학교 물리학과 학사
1994년 7월 Northwestern University 석사
1996년 12월 Northwestern University 박사
1997년 1월~12월 Northwestern University Postdoc-
toral Fellow
1998년 1월~4월 Motorola Center for Telecom.
Northwestern University Associate Researcher
1998년 4월~2003년 2월 삼성전자 종합기술원 전
문연구원
2008년 12월~2010년 8월 Harvard University 방문
교수
2003년 3월~현재 세종대학교 전자정보통신공학부 교수
<관심분야> 정보이론, 광통신, 광대역통신, 정보보안