

애드훅 네트워크의 용량 증대 기법 및 구현 이슈 동향

홍 비, 임여희, 최 완, 김석기
한국과학기술원, 한국전자통신연구원

요약

현재 이용되고 있는 셀룰러 이동통신에서는 여러명의 사용자의 트래픽을 동시에 처리하는 것은 자원의 직교적인 분할을 통해서 이루어지고 있으며 이는 사용자가 많아질 경우 각 사용자의 개별 용량이 매우 작아지는 결과를 낳고 있다. 이러한 문제는 스마트폰등의 무선 모바일기기의 활성화와 함께 더욱 심화되고 있다. 본고에서는 이러한 문제를 해소할 수 있는 기법으로 각광 받고 있는 애드훅 네트워크에서의 계층적 협력 통신 기술을 바탕으로 관련 기법에 대해서 알아본다.

I. 서론

현재 스마트 폰과 태블릿등의 개인 무선 통신 기기의 발전에 더불어 모바일 데이터의 통신의 사용이 증가하는 것은 주변에서의 활용 정도만을 보더라도 쉽게 예측이 가능하다. 글로벌 네트워크 장비업체인 Cisco가 2013년 2월 발간한 VNI(Visual Network Index) Forecast 보고서에 [1] 따르면 이미 2011년에 비해서 2012년말에는 모바일 데이터 트래픽이 매달 520 페타바이트에서 885페타 바이트로 70%가량 증가 했으며 이와 같은 증가 추세는 앞으로도 더욱 가속화 될 것이라고 추정된다. 이와 같은 모바일 데이터의 증가는 2017년에는 11.2 엑사바이트로 2012년에 비해 13배 이상 증가 될 것으로 예상된다.

이러한 모바일 트래픽의 대부분은 스마트폰과 태블릿등이 차지할 것으로 예상된다. 현재 3GPP등의 표준화기구에서 셀룰러 네트워크에서 CA(Carrier Aggregation)과 CoMP(Coordinated Multi Point transmission)등의 기술 등을 LTE-A (Long Term Evolution - Advanced)에 도입하기 위해 표준화 작업을 수행중이나 통상적으로 통신사업자가 사용할 수 있는 주파수 대역인 100Mhz 이내로는 2015년경에는 망 포화 상태로 진입할 것으로 예상된다. 또한 통신기기의 숫자가 늘어남에 따라 통신자원을 나눠서 쓰는 현재의 구조로는 폭발

적으로 증가하는 통신기기의 숫자에 대한 트래픽요구를 감당할 수 없을 것으로 예상된다.

따라서 통신 사용자 및 통신 기기가 증가함에 따라서 셀룰러 네트워크의 자원을 직교적으로 나눠 쓰는 현재의 통신 구조를 초월한 새로운 통신 기법의 요구가 절실 해졌으며 학계에서는 기존의 단일 통신링크의 성능 향상이 아닌 여러 개의 통신노드들이 존재하고 이 상황에서의 전체 네트워크의 용량에 관심의 초점이 맞춰져 연구가 진행되어 왔다.

현재 네트워크 성능저하의 가장 큰 요인으로 지목되고 있는 것은 다중 사용자 통신에서의 사용자 간 간섭이다. 이러한 간섭을 제어하는 것이 전체 네트워크의 용량입장에서는 매우 큰 영향을 미친다. 가장 간단하게 간섭을 제어하는 방법은 현재 사용되고 있는 시간을 나눠 사용하는 시간 분할 다중접속(TDMA: Time Division Multiple Access)이나 주파수를 나눠 쓰는 주파수 분할 다중접속(FDMA: Frequency Division Multiple Access)가 있다. 하지만 이러한 방법은 한 번에 한 사용자의 통신만을 지원하므로 대역효율(Spectral Efficiency)이 매우 낮고 전체적인 용량 관점에서는 사용자의 숫자에 관계없이 성능의 향상을 이뤄낼 수 없는 단점이 있다.

이러한 간섭채널은 정보이론 관점에서 매우 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대표적으로 다중화 이득을 최대화 하는 용량 증대 기법인 간섭정렬(IA: Interference Alignment)기법이 활발하게 연구되어 왔다. 간섭정렬방식의 경우는 전체 사용자가 많아진다고 하더라도 다중화 이득은 1/2을 얻을 수 있어 전체 사용자의 숫자가 늘어남에 따라 네트워크의 전체 용량이 일정하지 않고 오히려 늘어나는 결과를 얻을 수 있다[2][3]. 하지만 이러한 전송 기법은 매우 복잡도가 높은 기법을 요구할 뿐만 아니라 송신 단에서 관련된 모든 채널을 알아야 하는 단점이 있어 실제적으로 구현하기에는 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

간섭정렬과는 별개로 전체 네트워크 용량의 대략적인 증가 추세인 용량의 스케일링을 구하는 방법 또한 2000년대초를 기점으로 활발하게 연구되어 왔다. 스케일링이란 전체 네트워크의 통신 노드의 개수를 n 개라고 하면 전체 네트워크의 용량이 어떻게 통신노드가 늘어남에 따라 변화하는 가를 보는 측정방식

이다. 엄밀한 전송용량이나 다중화 이득을 구하는 것에 비해 용량의 증가 추이를 보는 것이 수월한 이유 또한 관련 연구들을 촉발 시켰다. 기존의 시간 분할 다중접속이나 주파수 분할 다중접속의 경우는 전체 네트워크 용량의 스케일링은 늘어나지 않기 때문이라고 볼 수 있다. 용량의 스케일링을 구하는 연구는 애드혹 네트워크 (Ad-hoc network) 에서 이뤄져 왔으며 현재 까지 크게 2가지의 주목할만한 결과가 연구 되었다. 바로 멀티홉(Multihop) 기법과 계층적 협력(Hierarchical cooperation) 이다. 멀티홉 기법은 전체 네트워크의 스케일링이 $O(\sqrt{n})$ 이며, 계층적 협력의 경우 애드혹 네트워크의 종류에 따라 $O(n)$ 의 스케일링을 달성하는 것으로 알려져 있다. 위의 두 가지 기술을 사용하게 되면 기본적으로 전체네트워크의 용량이 통신노드의 숫자가 늘어남에 따라서 전체 용량이 일정하게 유지되는 것이 아니라 오히려 늘어나게 된다. 현재의 통신 방식은 아무리 통신 성능의 향상을 시킨다고 해도 자원을 나눠 쓰는 구조이기 때문에 전체 네트워크 용량 입장에서는 이득이 없고, 통신노드가 늘어나는 경우 각 통신노드의 용량은 이에 반비례해 감소할 수밖에 없다. 따라서 멀티홉 기법이나 계층적 협력 기법은 현재의 폭증하고 있는 모바일 네트워크의 트래픽을 분산시키는데 유용하게 쓰일 것으로 예상된다.

본 고에서는 위에서 언급한 두 종류의 애드혹 네트워크 용량 향상 기법 중 비교적 최신의 연구인 계층적 협력을 중점적으로 살펴본다. 계층적 협력을 통해서 얻을 수 있는 애드혹 네트워크의 전체 네트워크 용량 스케일링 달성의 핵심 아이디어와 예시를 소개하고 이를 통해서 얻을 수 있는 스케일링을 살펴본다. 또한 애드혹 네트워크의 종류와 채널감쇄 상수에 따라 멀티홉 통신과의 성능을 비교하며, 실제적인 구현의 한계점과 개선여지가 있는 부분에 대해서 살펴본다. 2장에서는 애드혹 네트워크의 개념과 기존 연구였던 멀티홉 통신에 대해서 간단히 살펴보고 3장에서는 계층적 협력의 개념과 동작원리를, 4장에서는 구현상의 문제점과 개선점에 대해서 알아본다.

II. 시스템 모델과 기존 연구

1. 시스템 모델

기본적으로 송신단과 수신단이 n 개의 쌍이 있고 일정 영역에 균일하게 분포하고 있는 애드혹 네트워크를 가정한다. 이러한 채널 모델은 정보이론적인 관점에서는 n -사용자 간섭채널 (Interference channel)이라고 볼 수 있다. 각 수신단이 자신의 송신단으로부터의 정보만을 받을 수 있다면 이상적인 환경이

되겠지만 이러한 시스템 모델은 일반적으로 다른 모든 송신단으로부터의 간섭 신호가 오기 때문에 사용자가 많아질수록 간섭의 영향이 커지게 되며 이로 인해 원하는 정보를 얻지 못하는 상황이 빈번히 발생한다.

각 링크간에는 정해진 신호 감쇄 상수 (α), 파장, 안테나를 통한 채널 이득 만이 영향을 미치며 확률적인 페이딩은 고려되어 있지 않다. 스케일링관점에서 살펴보는 애드혹 네트워크는 전체 사용자의 숫자가 늘어나는 방식에 따라서 크게 밀집 네트워크 (Dense network)와 확장된 네트워크(Extended network) 두 가지로 나뉜다. 밀집 네트워크의 경우는 네트워크의 전체 면적이 고정된 상태에서 전체 사용자의 숫자가 늘어나는, 바꿔 말하면 네트워크에 사용자가 매우 밀집된 상태이다. 이와 반대로 확장된 네트워크의 경우는 네트워크의 밀도가 유지되는 경우로서, 전체 면적과 사용자 수가 같은 비율로 증가하는 네트워크이다. 멀티홉 기법과 계층적 협력의 경우 네트워크 전체의 모양이 원형과 정사각형으로 다소간의 차이가 있으나 애드혹 네트워크의 특성 관점에서는 거의 동일하다고 볼 수 있다.

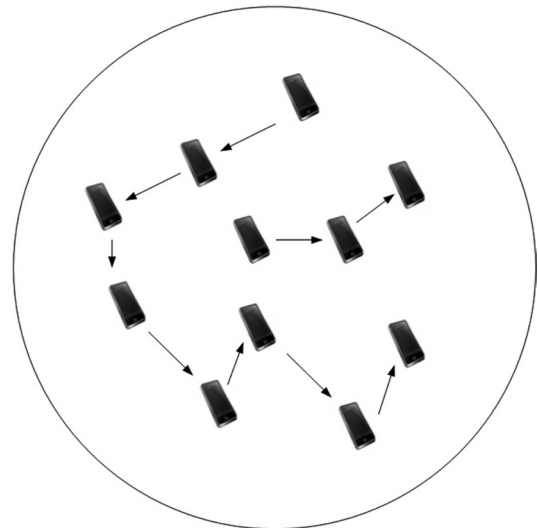


그림 1. 멀티홉 통신의 동작 개념도

2. 멀티홉 통신

기존의 멀티홉 통신을 확장하여 애드혹 네트워크에 적용한 방식이다 [5]. Gupta와 Kumar가 제안한 이 방식은 <그림 1>과 같이 송신단에서 수신단 까지의 직접 전송을 하는 것이 아닌 주변 노드로 데이터를 전달하는 릴레이 방식으로 데이터를 전송하는 방법이다. 이 방식의 경우 단일 사용자 복호 (Single user decoding)를 통해서 최대 $O(\sqrt{n})$ 이하의 전체 네트워크 용량 스케일링을 달성할 수 있으며, 가장 가까운 이웃 노드들로의 멀티홉 전송을 통해서 $\Theta(\sqrt{n}/\log n)$ 의 스케일링을 달성 할 수 있

음을 보였다. 이후 Franceschetti 등의 연구자들이 침투이론(percolation theory)을 통해 앞선 연구자들이 밝혔던 스케일링의 상한선인 $\Theta(\sqrt{n})$ 을 달성할 수 있음을 증명하였다[6].

III. 에드혹 네트워크에서의 계층적 협력

1. 계층적 협력의 개념과 동작원리

에드혹 네트워크에서 최적의 용량 증대는 네트워크의 노드 수에 대해서 선형적으로 증가하는 것이며, 이러한 특징을 달성할 수 있는 기법에 대한 연구가 진행되어 왔다. 네트워크의 전체 넓이는 변하지 않고 전체 송수신단 쌍의 수 n 이 증가하는 밀집 네트워크와 네트워크의 노드 밀도는 변하지 않고 넓이가 증가하는 확장된 네트워크에 대한 이전 연구 중 최적 조건에 가장 근접한 결과는 Aeron과 Saligrama에 의한 밀집 네트워크 용량 [4], 그리고 Xie와 Kumar에 의해 얻어진 확장된 네트워크에서의 멀티홉 전송이었다. [5] 이에 대해 Özgür, Lévêque, 그리고 Tse가 제안한 계층적 협력 통신기법 [7]은 밀집 네트워크에서 노드의 수가 늘어남에 따라 용량이 선형적으로 증가하는 최적의 결과를 달성하여 기존에 제시된 연구들을 개선하고 멀티홉 기법보다 더 나은 스케일링을 이루었다.

용량의 선형적 증가를 이루는 기법 중 하나인 MIMO 기술은 다수의 송수신 안테나를 이용하여 정보 신호를 여러 공간 스트림으로 나누고 동시에 전송함으로써 다중화 이득을 얻는다. 그런데 이러한 기술은 실용적인 측면에서 고려했을 때 작은 단말기 내에 다중 안테나를 설치해야 하므로 어려움이 따른다. 따라서 이러한 기법을 네트워크에 적용하는 접근법으로는 다수의 송신 노드와 목적지 노드가 클러스터를 형성하고 협력 통신을 함으로써 다중 송수신 안테나 배열의 효과를 얻어내는 방법이 있다. 이러한 방식을 취할 경우 이전의 다른 방식에서 성능을 저하했던 노드 간의 간섭 신호가 오히려 유용한 자원으로 이용되며 수신 클러스터에서 복원함으로써 다중화 이득을 얻게 된다. 계층적 협력 통신에서는 우선 이러한 MIMO 통신이 작은 크기의 국지적 클러스터에서 일어난 뒤 계층 내의 다음 레벨인 더 큰 클러스터 간에 또 다른 협력 통신이 이루어지도록 한다. 이와 같은 단계를 반복함으로써 아주 넓은 범위를 걸친 신뢰성 있는 협력 통신이 가능하도록 한다.

Özgür, Lévêque, 그리고 Tse가 제안한 계층적 협력 통신 기법에 대하여 먼저 밀집 네트워크를 다룬 뒤 확장된 네트워크에 대해 살펴보고자 한다. 이 연구에서는 다음과 같은 가정을 제시한다. 신호 감쇄는 원거리장 전자파 가정을 토대로 한다. 노드 사이

의 거리 r 은 캐리어의 파장과 비교했을 때 훨씬 큰 값을 가지며 전력이 $r^{-\alpha}$ 에 비례하는 간단한 신호 감쇄모델을 적용할 수 있다.

채널 이득의 위상은 이격 거리와 캐리어의 파장의 관계에 따라 결정되는데 앞에서 언급했듯이 노드의 이격 거리는 캐리어의 파장에 비해 훨씬 크므로 위상은 랜덤 변수이며 독립적인 성질을 갖게 된다.

이 기법에서는 다중 경로에 의한 영향을 무시하고 LOS(line of sight)전송만을 고려한다.

계층적 협력 통신에서는 $\alpha > 2$ 일 때 임의의 작은 값을 가지는 $\epsilon > 0$ 에 대하여 전체 네트워크 용량 $T(n)$ 이 1에 가까운 확률로

$$T(n) = K_{\epsilon} n^{1-\epsilon}$$

을 만족하도록 하는 n 에 독립적인 상수 K_{ϵ} 이 존재한다는 것을 보임으로써 실제로 네트워크 용량이 노드 수에 대해 거의 선형적으로 증가하는 것을 말한다. 이러한 성질은 계층적 협력 통신 기법을 이루는 3 단계와 재귀적인 동작 원리에 의해 얻을 수 있다.

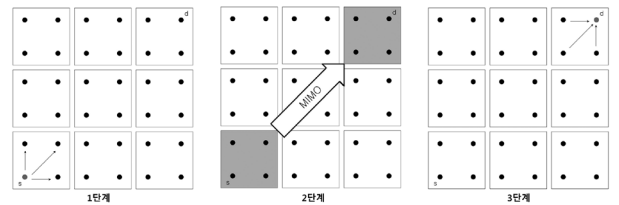


그림 2 계층적 협력의 각 단계

이 기법의 구성은 네트워크 내의 노드를 클러스터로 구분하고 클러스터 간에 MIMO 방식으로 전송하는 것을 기반으로 한다. 이 기법에서 모든 노드는 각각 송신 노드이며 목적지 노드이며 M 개의 노드들이 하나의 클러스터를 구성한다. 이들 중 하나의 특정 송신 노드 s 와 이에 해당하는 목적지 노드 d 에 대해 집중적으로 살펴본다. 송신 노드 s 는 3 단계를 거쳐서 M 비트를 목적지 노드 d 로 전송한다. 먼저 송신 노드 s 가 그 노드를 포함한 클러스터의 모든 M 개의 노드에게 1 비트씩 총 M 비트를 보낸다. 다음으로, 송신 노드를 포함한 이 클러스터의 노드들은 MIMO 전송의 다중 송신 안테나 역할을 하기 위해 목적지 노드가 있는 클러스터로 M 비트를 동시에 보낸다. 이제 목적지 클러스터에 있는 M 개의 노드들이 MIMO 전송을 받고 데이터를 양자화한 뒤 목적지 노드인 d 에게 M 비트를 전달한다. 이러한 과정을 모든 n 개의 송신-목적지 노드 쌍에 동시에 적용시킴으로써 네트워크 내의 협력 통신을 이룰 수 있다. 이러한 과정들은 아래와 같이 3 단계로 정리된다.

1단계. 송신 협력 통신: 이 단계는 모든 송신 클러스터에 대해서 평행하게 진행된다. <그림 2>의 1단계와 같이 한 클러스터

내에서 각 M개의 송신 노드가 그 클러스터 안의 모든 노드에게 1 비트씩 전송해야 하므로 $M(M - 1) \approx M^2$ 비트의 전송량이 필요로 한다. 그런데 네트워크 용량 T(n)의 스케일링이 n^b 로 얻어진다고 가정하면 이 단계에서의 네트워크 용량은 M^b 가 되고 따라서 1단계에 필요한 단위 시간은 $M^2/M^b = M^{2-b}$ 가 되게 된다.

2단계. MIMO 전송: 이전 단계를 마치면 클러스터마다 모든 노드들이 송신 노드로부터 얻은 M 비트를 가지고 있게 된다. 다음으로 <그림 2>의 2단계에서와 같이 n가지의 송신-목적지 노드 쌍에 대해서 한번에 하나씩 장거리 MIMO 전송을 실행한다. 각 쌍에 대해서 소스 클러스터로부터 목적지 클러스터로 M 비트를 MIMO 기법으로 보내고 이를 모든 송신-목적지 쌍에 대해서 반복함으로써 데이터들이 해당하는 목적지 클러스터에 도달하도록 하며 n 단위시간이 소요된다.

3단계. 복원을 위한 협력 통신: 이 단계에서는 1단계에서와 마찬가지로 모든 클러스터에 대해서 평행하게 진행되며 <그림 2>의 3단계에 나타나 있다. 각 클러스터에 있는 M 노드들은 M 비트를 전송받았으며 M개 목적지 노드들에게 각각 1비트씩 보내기 위한 것이다. 이 데이터들을 각각 Q 비트만을 이용하여 양자화한 뒤 목적지 노드로 돌려보낸다고 하면 한 클러스터 내에서 요구되는 비트는 모두 QM^2 이 되며 따라서 QM^{2-b} 단위시간이 이용된다.

이와 같이 3단계로 구성되는 계층 협력 통신을 수행한 뒤의 표준화된 네트워크의 전체의 용량은

$$T(n) = \frac{nM}{M^{2-b} + n + QM^{2-b}}$$

와 같이 얻어지며 $n^{1/(2-b)}$ 로 정할 경우 네트워크 용량이 $n^{1/(2-b)}$ 에 비례하여 증가하는 스케일링을 얻게 된다. 이 값은

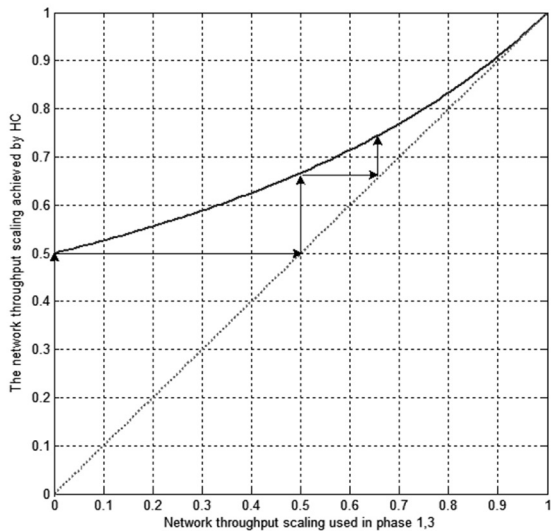


그림 3. 기존 기술을 활용한 경우의 계층적 협력의 용량 스케일링

위에서 가정했던 n^b 스케일링보다 더 개선된 결과를 보여주고 있다. 따라서 계층 협력 통신의 3단계를 재귀적으로 반복함으로써 전체 네트워크 용량 T(n)이 네트워크 노드 수에 선형적으로 비례하는 스케일링 법칙에 점점 근접하게 된다는 사실을 알 수 있다. 이러한 과정은 <그림 3>에 자세하게 나타나 있다.

이러한 재귀적 구성을 <그림 4>와 같이 고려하여서 계층적 기법을 얻을 수 있다. 먼저 계층 내의 가장 낮은 레벨에서는 작은 국지적 클러스터가 TDMA 기법으로 데이터를 주고받도록 한다. 계층의 다음 레벨에서는 더 큰 범위의 클러스터로 확장하여 제안된 계층 협력 통신 방식으로 클러스터 간에 MIMO 전송을 실행한다. 그리고 마지막 레벨에 대해서는 가장 큰 범위의 클러스터를 구성하여 장거리 MIMO 전송이 실행된다.

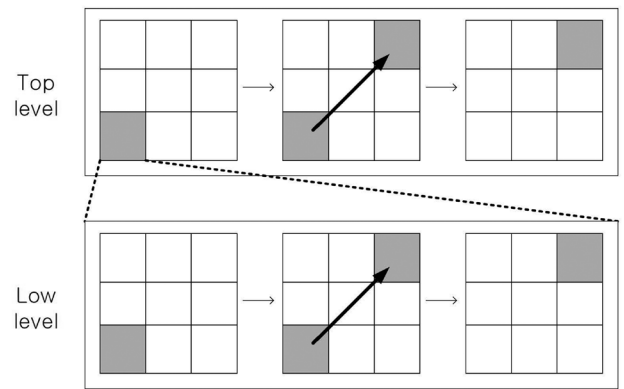


그림 4. 재귀적인 계층적 협력의 구조

2. 계층적 협력과 기존 방식의 성능 비교

애드혹 네트워크에서의 최적 용량 증대인 네트워크의 노드 수에 대한 선형적 증가를 얻기 위해 많은 연구가 진행되었으며 밀집 네트워크와 확장된 네트워크는 각각 다른 결과를 가진다. 넓이는 변하지 않고 노드의 수만 늘어나는 밀집 네트워크의 경우 계층적 협력 개념이 도입되기 전까지 기존 연구 중에서 최적 용량에 가장 근접했던 결과는 Aeron과 Saligrama가 획득한 것으로 $n^{2/3}$ [4]에 비례하는 것이었다. 그러나 본고에서 살펴본 계층적 협력 통신 기법은 밀집 네트워크에서 노드의 수가 늘어남에 따라 용량이 선형적으로 증가하는 결과를 얻음으로써 기존의 스케일링 법칙을 발전시켰다. 또한 노드 밀도는 변하지 않고 넓이만 증가하는 확장된 네트워크의 경우 이전 연구 중 가장 우수한 결과는 Xie와 Kumar에 의해 얻어진 것이며 신호감쇄 상수인 α 가 4보다 클 경우에 대해 스케일링 법칙을 구하였다. 이에 대해 계층적 협력은 $2 \leq \alpha < 3$ 일 때 용량이 $n^{2-\alpha/2}$ 에 비례하며 $\alpha \geq 3$ 일 때 \sqrt{n} 에 비례하도록 함으로써 기존에 제시된 연구들을 개선하였다. 이러한 결과들은 멀티홉 기법에 의해 구할 수 있는

네트워크 용량이 $O(\sqrt{n})$ 에 따라 증대된다는 것을 고려했을 때 계층적 협력 통신 기법이 멀티홉 통신보다 더 나은 스케일링을 이룬다는 것을 알 수 있다.

IV. 실제적인 동작에서의 문제점

계층적 협력 통신 기법이 밀집 애드혹 네트워크에서 최적의 선형 스케일링을 달성한다고 알려져 있지만 실제적으로 동작하기 위해서는 애드혹 네트워크의 클러스터링과 스케줄링의 오버헤드 문제등 구현 상 문제점들이 여러 가지 있다. 본 고에서는 분산적인 클러스터링 및 그의 실제적 구현의 문제점을 알아본다.

1. 분산적인 클러스터링 이슈

계층적 협력은 정사각 네트워크에서의 노드들의 동작을 가정하고 있으며 각 클러스터 내부에 속해 있는 노드의 숫자는 일정하다고 가정한다. 하지만 이러한 가정은 애드혹 네트워크에서는 각 통신노드가 네트워크 전체의 정보를 모두 알 수 없기 때문에 실제적으로는 이루어지기 힘든 가정이다. 따라서 이러한 경우 분산적인 정보만을 가지고 클러스터링을 하여야 하는데 이 과정에서는 각 클러스터간의 노드의 숫자를 최대한 비슷하게 맞춰주는 것이 중요하다.

분산적인 방법으로 클러스터를 구성하는 기존 알고리즘은 LEACH [8] 알고리즘 및 HEED, FLOC등의 알고리즘들 [9]이 있다. 이러한 알고리즘의 경우 클러스터 헤드를 선정하는 과정에서 노드간의 지리적인 성질을 고려하지 않아 주변 클러스터와의 거리가 유지 되지 않는 등의 문제점이 있다.

일반적으로 클러스터를 구성하는 알고리즘들에서는 클러스터 헤드를 선정하고 나머지 노드들이 가장 가까운 클러스터 헤드에 결합하는 방식으로 클러스터가 형성이 되는데 클러스터 헤드가 낮은 확률이지만 밀집해 있는 경우는 클러스터 내부의 노드 숫자가 매우 작을 수 있다. 이 경우 계층적 협력 통신의 2단계에서 일어나는 MIMO 전송에서의 스트림의 개수를 확보하지 못해 2번째 단계에서 많은 단위 통신 시간을 소비할 수 있다. 또한 반대로 클러스터의 크기가 너무 커진다면 1, 3 단계에서 일어나는 동작에서 균일하게 생성된 클러스터에 비해 많은 단위 시간이 필요해진다.

2. 제어 오버헤드의 부재

계층적 협력은 전체 네트워크의 노드들이 긴밀하게 협력하여 동작하는 전송 프로토콜이므로 이를 제어하는 신호들이 매

우 많이 필요하다. 하지만 논문에서는 이러한 연구가 되어 있지 않다. 실제로 제어 오버헤드를 고려하지 않으면 네트워크의 전체 용량이 계속 증가하지만 제어 오버헤드를 고려한다면 오히려 네트워크의 스케일링이 감소하는 것으로 알려져 있다. [10] 따라서 실제적으로 작용하는 오버헤드에 대한 전체 용량을 최대화 하는 것이 중요함을 알 수 있으며 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 무선 데이터에 대한 수요가 폭발하고 있는 상황에서 노드의 숫자가 늘어남에 따라 네트워크의 용량을 늘릴 수 있는 방법에 대해 살펴 보았다. 애드혹 네트워크에서의 최적 용량 스케일링을 달성하는 기법인 계층적 협력의 동작과 개념, 그리고 성능에 대해 살펴보았고, 계층적 협력 통신에서 실제적 구현의 주요 이슈인 분산적 클러스터링 및 제어 오버헤드에 대한 문제를 살펴보았다. 이외에도 계층적 협력 통신의 실제로 구현을 위해서는 스케줄링등의 제어 오버헤드등을 고려한 관점에서의 연구가 진행되어야 할 것으로 여겨진다.

Acknowledgement

본 연구는 미래부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Cisco, Visual Network Index (VNI): Global mobile data traffic forecast, Feb, 2013.
- [2] S. A. Jafar and M. J. Fakhereddin, "Degrees of freedom for the MIMO interference channel," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 53 no.7, pp. 2637-2642, Jul, 2007.
- [3] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom for the K-user interference channel", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [4] S. Aeron and V. Saligrama, "Wireless ad hoc networks: Strategies and scaling laws for the fixed SNR regime," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.53, no. 6,

- pp. 2044 – 2059, Jun, 2007.
- [5] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 42, no. 2, pp. 388 – 404, Mar. 2000.
- [6] 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, no. 3, pp. 1009 – 1018, Mar. 2007.
- [7] A. Ozgur, O. Leveque, and D. Tse, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, pp. 3549-3572, Oct. 2007.
- [8] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An applicationspecific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.1, no.4, pp.660–670, Oct. 2002.
- [9] A. Abbasi and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks", *Elsevier Journal of Computer Comm.*, vol. 30, pp.2826–2841, Oct. 2007.
- [10] I. Bang, E. Chu, T. Kim, S. H. Kim, and D. K. Sung, "Aggregate throughput maximization in a hierarchical cooperation scheme under consideration of packet arrival rate, control and data overhead," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, pp.422–427, Apr. 2013.

약 력



홍 비

2010년 한국과학기술원 정보통신공학과 전자전공 학사
 2012년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 2014년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 과정
 관심분야: 다중 릴레이 협력 통신, 지리적 확률 모델 분석, 분산 저장장치



임 여 희

2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사
 2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 과정
 관심분야: 제한된 피드백 기법, 다중안테나 통신



최 완

1996년 서울대학교 전기 및 컴퓨터 공학부 학사
 1998년 서울대학교 전기 및 컴퓨터 공학부 석사
 2006년 University of Texas at Austin, ECE 박사
 2007년~2009년 한국정보통신대학교 조교수
 2009년~2011년 한국과학기술원 조교수
 2011년~현재 한국과학기술원 부교수
 IEEE Transactions on Vehicular Technology Associate Editor
 IEEE Transactions on Wireless Communications Associate Editor
 IEEE Transactions on Wireless Communications Letter Associate Editor
 관심분야: 통신이론, 정보이론



김 석 기

2007년 중앙대학교 공학사
 2009년 중앙대학교 공학석사
 2009년~현재 한국전자통신연구원
 관심분야: 이동통신, MIMO, D2D