차세대 이동통신시스템을 위한 SON (Self-Organizing Networks) 기술 동향

Self-Organizing Networks for Next-Generation Wireless Communication Systems

강민석 · 정방철 · 손규호 · 이 융, 정 송
Min Suk Kang · Bang Chul Jung · Kyuho Son · Yung Yi · Song Chong

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템에서 필수적인 기술로 인식되고 있는 Self-Organizing Networks(SON) 기술의 동향을 검토하고 이동통신 시스템에 적용가능한 상하향링크 자동구성 네트워크 기술을 소개한다. 최근 표준화가 진행되고 있는 IEEE 802.16m 시스템과 3GPP-LTE 시스템에서도 자동구성 네트워크 기술을 시스템의 필수적인 기술로 정의하고 있으며 자동구성 네트워크 실현을 위하여 많은 기술들이 제안되었다. 본 논문에서는 셀룰라 네트워크의 하향링크를 위하여 제안된 Adaptive Multi-Pattern Reuse(AMPR) 기술을 설명한다. AMPR 기술은 매시간 슬롯마다 스케쥴링을 수행하되 간섭 정보 등 네트워크를 최적화하기 위한 정보는 간헐적으로 교환하므로써 셀 전체 성능을 최적화하기 위한 신호 오버헤드는 최소화하는 방식이다. 또한 셀룰라 상향링크를 위하여 제안된 Decentralized Uplink Intercell Interference Coordination(DUIC) 기술을 설명한다. DUIC 기술은 각 셀 경계 지역에 위치한 사용자가 자신이 영향을 줄 기지국으로부터의 광대역 채널 정보를 습득하여 자신이 간섭을 강하게 미칠 주파수 밴드에 데이터를 nulling하는 기술로서 사용자들이 자체적으로 특정 주파수 밴드의 데이터 전송여부를 결정하므로 매우 효과적으로 구현될 수 있는 SON 기술로 볼 수 있다.

주제어: 차세대 이동통신 시스템, 자동구성 네트워크, 인접셀 간섭

In this paper, we summarize the Self-Organizing Networks(SON) technique which is considered as a key technology for next-generation wireless communication system and propose two SON technique for uplink and downlink of cellular network. Recently, IEEE 802.16m and 3GPP-LTE systems also regarded SON technique as a key technology and many proposals were submitted for standardizaiton. We introduce an Adaptive Multi-Pattern Reuse(AMPR) technique for cellular downlink, which enables system optimization with reduced signal exchange among different cells. We also introduce a Decentralized Uplink Intercell interference Coordination(DUIC) technique for cellular uplink, which improves the edge-user throughput with distributed transmission control of users.

Keywords: Next-generation wireless communication systems, Self-organizing networks, Intercell interference

강민석, 정방철, 손규호, 이융, 정송: KAIST

I. 서 론

우리는 우리가 살아가는 많은 영역에서 Self-Organizing한 특징을 이미 갖고 있는 많은 시스템을 볼 수 있다. 어떠한 물고기들은 큰 떼를 이루어 군집 활동을 하는데 그 중 어떠한 물고기도 인솔자로서 역할하거나 전체 군집의 모습을 관찰하지 않고 모든 물고기 각자가 주변 상황을 인지하여 지역적으로 상호작용하면서 군집을 이루어간다. 이렇듯 Self-Organizing한 특징은 자연계가 가지는 큰 특징 중 하나로써 물리학, 화학, 생물학, 경제학 등의 수많은 영역에서 발견되는 특징이다. Self-Organizing Networks(SON)은 어떠한 외부적인 요인이나 중심의 역할이 되는 제어부없이 조직된 시스템을 의미한다[1]. 이러한 SON은 정의에서도 알 수 있듯이 분산형(distributed)의 특징을 갖으며 전체가 아닌 지역적인 상호작용을 하는 지역적(localized)인 특징을 갖는다. 또한 이러한 시스템은 주어진 환경의 변화에 대해 적응적으로 대응할 수 있는 적응성(adaptability)을 갖고 있으며 시스템의 고장이나 손상에 강인한(robust) 특징을 갖는다. 마지막으로 SON은 개체의 수가 크게 증가해도 그 역할과 구조가 정상동작하는 확장성(scalability)를 갖는다[2].

1. 통신 시스템과 Self-Organizing Networks

일반적으로 SON은 분산성, 지역성, 적응성, 강인성, 확장성 등의 특징을 갖는다. 일반적인 통신 ㅅ스템은 이러한 SON의 특징을 일부는 이미 소유하고 있고 일부는 아직 적용되지 않았지만 궁극적으로 지향하는 목표 중 하나이다. 많은 통신 시스템들의 목표는 사용자에게 최대한의 통신 성능을 제공하면서 네트워크 환경설정에 부담을 최소한으로 하고 새로운 형태의 통신망 구조를 형성하는데에 있다.

역사적으로 볼 때 통신 시스템은 첫 시작부터 중앙집중적인 형태로 조직되었으며 현대의 이동통신 시스템에서도 상당히 많은 부분이 중앙집중적인 구조와 기능을 띤다. 하지만 4세대 이동통신 시스템이 개발되며 통신 시스템의 구조가 혁신되고 유비쿼터스 통신이 도입되는 등의 변화에 따라 시스템을 운영하는데 드는 비용이 급증하고 있으며 시스템의 성능을 최적화하고 이를 유지하는데 어려움을 겪고 있다. 따라서 최근의 경향을 관찰해 보면 통신 시스템이 점차 Self-Organizing의 기능을 갖는 시스템으로 변모해 가고 있음을 알 수 있다.

통신 시스템에서 바라보는 SON은 크게 Self-Planning/Configuration, Self-Optimization, Self-Healing의 세가지로 분류가능하다. *Self-Planning/Configuration*은 큰 범위에서 보면 네트워크의 논리적/물리적 구조를 각각의 개체들의 상호작용으로 결정짓는 것이다. 통신 시스템에서 Self-Planning/Configuration 기능이 적용되었을 때의 장점이 크기 때문에 애드혹(Ad Hoc) 네트워크를 중심으로 다양한 연구가 진행되어 왔다[3]~[5]. 애드혹 네트워크의 특성상 네트워크의 구조가 분산적, 지역적으로 이루어져야 하며 이것이 최적의 시스템 성능을 보장해야 하고 새로 네트워크에 접속하는 개체가 중앙의 관리없이도 망에 안전히 접속해야 하기 때문에 애드혹 네트워크에서 주로 Self-Planning/Configuration 관련 연구들이 이루어져왔다.

또한 *Self-Optimization* 기술은 통신 시스템에서 성능 개선을 위한 중요한 기술로 여겨져 왔으며 관련된 다양한 종류의 연구가 진행되어 왔다. 다수의 송신자와 수신자간의 통신 사이에 상호 영향이 없는 단순한 통신 시스템에서는 각각의 통신 링크에 대한 최적화가 이루어지면 그것이 최종적으로는 시스템 전체의 최적화를 의미하지만 현재의 통신 시스템은 다수의 사용자들의 통신 사이에 상호간섭이 존재하는 복잡한 시스템이므로 시스템 전체의 성능을 최적화하려는 노력이 필요하다. 하지만 현대의 통신 시스템은 하나의 사용자가 전송 전력 등의 파라미터를 변경하면 주변 다른 사용자들에게 직접적인 영향을 크게 미치는 경우가 많으므로 시스템 전체의 성능을 최적화하는 문제는 보통 non-convex 문제로 정의되고 쉽게 해결되지 않는다. 이러한 네트워크 환경을 혼란한(chaos) 무선 네트워크라고 하기도 한다[6]. 이러한 혼란한 무선 네트워크 환경을 위하여 [6]에서는 최종 사용자의 성능을 보장하는 자동 송신 전력 제어 기술을 제안하였다. 한편 분산적인 최적화를 통해 네트워크의 성능을 최적화하기 위한 방법으로써 게임이론(Game Theory)가 사용되기도 한다[7]~[9]. 게임이론을 적용한 네트워크 사용자는 각자에게 최선이 되는 전송 전략을 적응적으로 선택하도록 설계된다. 이로써 네트워크 전체적인 성능향상을 꾀하는 것이 게임이론을 통한 최적화 기법이다. 마지막으로 게임이론과는 다르게 이타적인 철학을 갖고 각각의 네트워크 개체가 운영되도록 설계된 기술이 있다[10],[11]. 이러한 연구들을 통해 분산적으로 각각의 개체가 자신에게 이로운 전송방식보다는 이타적인 전송방식을 취할 때 오히려 네트워크 전체적으로는 더 좋은 성능을 얻을 수 있다는 연구 결과가 있다.

마지막으로 통신 시스템에서 고려하는 *Self-Healing* 분야에서도 여러 연구가 진행되었다. 기존의 유선 네트워크에서는 Self-Healing 기술을 고려하여 네트워크의 신뢰도를 높이는 연구가 오래전부터 진행되었다[12]~[14]. 최근 미국방고등연구계획국(DARPA)에서는 이러한 Self-Healing 기능을 네트워크의 coverage hole 또는 routing hole을 없애기 위한 주요한 기능을 보고 이를 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks, WSN)가 가져야 할 중요한 기능으로 정의하였다[15]. 무선 네트워크는 내재적으로 유선 네트워크보다 링크의 안정성이 취약한 단점이 있으므로 Self-Healing 기능에 대한 필요성이 더욱 부각되고 있다. 최근에는 무선 네트워크에서도 Self-Healing의 개

념을 도입하여 무선 네트워크의 신뢰도를 높이는 연구가 진행중이다[16],[17]. 무선 센서 네트워크 노드에 문제가 발생하여 주변 통신이 마비될 경우 이동성이 지원되는 모바일 센서 노드가 통신의 재개를 위한 최적의 위치를 찾아 이동하여 Self-Healing하는 기술이 [16]에서 제안되었다. 또한 자연적으로 Self-Healing 기능을 지닌 자연계에서부터 영감을 받아 무선 네트워크의 Self-Healing 기술을 고안한 연구가 [17]에 소개된다. [17]에서는 자연계로부터 고안된 Neural Network 및 Ant Colony Optimization 기법을 사용하여 무선 네트워크에 문제가 발생했을 때 무선 네트워크가 스스로 최적의 라우팅을 선택하는 Self-Healing 라우팅 기술을 제안하였다.

2. 셀룰러 이동통신 시스템에서의 SON

전통적으로 셀룰러 이동통신 시스템은 철저한 중앙집중적인 설치, 관리 및 운영이 이루어져왔다. 이는 시스템 설치에 소모되는 비용이 커서 정교한 최적화 과정을 거친 설치를 하기 때문이다. 또한 이동통신 시스템은 모든 사용자에게 최소한의 QoS를 보장해 주어야 하기 때문에 보다 조심스러운 성능 최적화 작업이 필요하다. 마지막으로 과금 및 운영체계가 중앙에서 관리되는 것이 사업자 관점에서 이롭기 때문이다.

하지만 이전에는 중앙집중적인 바업을 통해서 망관리가 능 최적화된 상태로 운영가능했으나 최근에는 이동통신 시스템의 성능에 대한 요구사항이 증가하면서 네트워크 구조 및 환경 파라미터가 급격히 변화되면서 이러한 중앙집중적인 시스템 운영이 점점 어려워지고 있다[18]. 최근의 이동통신 시스템은 시스템 운영과 관련된 파라미터들이 급증한 결과 중앙에서의 관리의 복잡도가 증가하였다. 또한 2세대 이동통신부터 4세대 이동통신이 공존하여 운영됨으로써 GSM/UMTS/LTE/SAE 등의 시스템을 동시 운영해야 하고 이로인한 운영복잡도도 증가하였다. 그리고 결정적으로 중계기 또는 Femtocell과 같은 새로운 기술들이 도입되면서 이동통신 시스템의 네트워크 구조가 다계층 구조로 변화되었고 시스템에서 관리해야 할 개체의 개수가 기하급수적으로 증가하게 되면서 중앙집중적인 관리가 원천적으로 불가능해지는 환경이 되었다. 셀룰러 이동통신 네트워크에서의 SON은 크게 Self-Configuration, Self-Optimization, Self-Maintenance로 구분된다.

II. 4세대 셀룰러 이동통신 시스템에서의 SON 기술 동향

최근 4세대 셀룰러 이동통신 시스템을 위한 핵심 원천기술 연구 및 표준화 제정이 활발하게 이루어지고 있다. 4세대 셀룰러 이동통신 시스템으로 가장 주목받고 있는 IEEE 802.16m 시스템과 3GPP LTE 시스템 모두 SON 기능을 시스템 주요 기능으로 삼고 있다.

3GPP LTE 시스템은 2008년 12월 Release 8 표준을 종료하였으며 2009년 1월에는 ASN.1 code를 종료하였다. LTE 시스템 표준은 하드웨어 칩셋이 설계될 수 있을 정도로 거의 종료되었으며 테스트용 시제품 및 기지국이 전시되고 있는 수준이다. 반면 IEEE 802.16m 시스템은 2009년 7월 현재 표준화가 활발히 진행중이며 올해 안에 표준을 완성한다는 목표를 가지고 진행중이다. 본 절에서는 두 시스템에서 고려하고 있는 SON 기능에 대해 알아본다.

1. IEEE 802.16m 시스템에서의 SON 기술 동향

4세대 이동통신 시스템의 큰 축으로써 기대를 모으고 있는 IEEE 802.16m 시스템은 현재 시스템의 구조와 기능에 대한 개요를 정의하는 SDD(System Description Document)의 작업을 1차적으로 마무리한 상태이며 실제 표준문서가 되는 Amendment 문서를 작성하는 중이다. 현재 계획된 바에 의하면 Amendment 문서는 2009년 내에 일차적인 마무리를 거칠 것으로 예상된다.

802.16m은 시스템 요구사항을 정의하는 SRD (System Requirements Document)에서부터 SON 기능을 명시적으로 언급하여 802.16m 시스템이 SON의 기능을 기반으로 하는 시스템임을 말하고 있다[19]. 802.16m의 SRD에서 소개된 SON 기능은 크게 Self-Configuration과 Self-Optimization의 두가지로 나뉜다. 802.16m에서 말하는 Self-Configuration 기능은 네트워크에 새롭게 설치도는 개체가 진정한 plug-and-play 기능을 지원하며 네트워크에 문제가 발생했을 때 빠르게 망 구조를 스스로 재구성하는 기능을 포함하는 것으로 일반적으로 말하는 Self-Healing의 기능을 포함하고 있다. 또한 802.16m의 Self-Optimizatiion은 자율적인 최적화를 통해 서비스 효용, QoS, 네트워크 효율성, 용량 등을 개선하는 것을 포함한다.

이러한 시스템 요구사항을 만족시키기 위해 SDD 문서에는 따로 Support for Self-Organization라는 장을 따로 떼어 정리하였다[2]. 먼저 Self-Configuration 기능은 Base Station(BS)의 초기화 및 설정을 최소한의 인간의 개입없이 자동적으로 수행케하는 것이라 정의했다. Self-Configuration 기능에 대한 세가지 세부기능이 정의되었다. Cell initialization은 cell 초기화 과정에 있어 BS의 MAC, PHY 파라미터들이 중앙 네트워크로부터 자동 전송되거나 BS가 스스로 탐지하는 것을 의미한다. Neighbor discovery 기능은 neighbor list를 중앙 네트워크로부터 자동 전송받는 것을 의미한다. 이때 neighbor list는 BS, MS, 중앙 네트워크간의 상호 signalling을 통해 갱신되고 저장된다. 마지막으로 Neighbor macro BS discovery 기능은 기존의

macro BS의 추가 설치 및 제거에 따른 neighbor macro BS list를 자동으로 관리하는 기능을 한다. 이것은 Macro BS에 관련된 많은 파라미터(BSID, BS의 절대위치, sector Bearing, sector의 방향, OFDM 파라미터 등)을 서로간에 주고받는 모든 시그널링을 포함한다.

SDD에 정의된 Self-Optimization은 BS와 MS로부터 수집된 SON measurement의 분석을 통해 BS의 파라미터를 최적화하여 네트워크 전체의 QoS, 효율성, 용량, 셀 범위 등을 최대화하는 기술을 의미한다. Self-Optimization을 위해 측정되는 SON measurement는 BS와 MS에 의해 측정될 수 있으며 다음과 같은 정보를 갖는다(다음의 정보에 제한적이지는 않음).

- Signal quality of serving BS and neighbor BSs
- Interference level from the neighbor BSs
- BSID of neighbor BS
- Status of mobility management(HO)
- Time and location information of MS at a measurement
- Load information of neighbor BS

self-Optimization의 기능도 세부 기술 몇개로 분류된다. Converage and capacity optimization 기능은 음영지역에 있는 MS로부터 관련 보고를 받고 BS가 자동으로 음영 지역 해소를 위해 파라미터를 변경하는 기술이다. Interference management and optimization 기술은 새로운 BS가 설치되었을 때 주변의 MS 또는 BS에게 허용가능한 정도의 interference를 발생하도록 조절하는 기능으로써 SON 기능을 통해 BS의 파라미터가 자동설정되도록 한다. Load management and balancing는 각 BS의 load를 안정화시키기 위해 자체적으로 MS를 핸드오버시키는 과정을 수행할 수 있도록 한다. 마지막으로 Self-Optimizing FFR(Fractional Frequency Reuse) 기능은 FFR 기술을 적용할 때 BS에서 사용하는 주파수 영역과 전송 전력을 자동적으로 선택하게 하는 기능이다.

앞서 설명되었듯이 IEEE 802.16m의 표준문서인 Amendment[21]는 현재 진행중이며 SON과 관련된 기고는 2009년 9월 표준화 회의때부터 본격적으로 논의될 예정이다.

2. 3GPP LTE 시스템에서의 SON 기술 동향

3GPP 주도하에 진행되는 LTE 시스템에서도 SON 기술이 상세하게 고려되어 있음을 알 수 있다. LTE 시스템에서의 SON 기술은 Self-Configuration, Self-Optimization, Self-Healing 크게 세가지로 나뉜다[22].

Self-Configuration 과정은 새롭게 설치된 eNodeB(evolved NodeB)가 자동 설치 과정을 통해 자동으로 설정되는 것을 의미한다. 이러한 Self-Configuration 과정을 통해 eNB는 시스템 설정에 필수적인 정보들을 얻어오게 된다. 전반적인 정의 및 기능은 IEEE 802.16m 시스템에서 정의된 내용과 크게 다르지 않다. Self-Optimization 과정은 UE와 eNB에서 측정된 측정값들과 성능 측정값들이 네트워크를 자동조정하는데 사용되는 과정을 의미한다. Self-Healing 과정은 자동으로 네트워크에 발생한 문제점들을 검출하고 해결하는 과정을 의미한다.

3GPP에서는 일찍이 SON 기능에 대한 다양한 쓰임새(Use Case)를 정의하여 각각에 대한 해결책을 탐구를 촉진한 바 있다[24]. 이때 정의된 쓰임새는 다음과 같이 9개로 나뉜다.

- Converage and capacity optimization
- Energy Savings
- Interference Reduction
- Automated Configuration of Physical Cell Identity
- Mobility robustness optimisation
- Mobility Load balancing optimisation
- RACH Optimisation
- Automatic Neighbour Relation Function
- Inter-cell Interference Coordination

이상의 9개의 SON 기술의 쓰임새 중 IEEE 802.16m 시스템에서는 주요하게 고려되고 있지 않으나 LTE 시스템에서는 주요하게 고려된 쓰임새는 Energy Savings과 RACH Optimisation 쓰임새이며 나머지는 대부분 IEEE 802.16m 시스템에서도 유사하거나 진보된 방식으로 시스템에 적용중인 쓰임새이다.

Energy savings 쓰임새에서는 LTE 전체적인 네트언크의 사용 전력을 최소화하는 것을 목표로 한다. 이는 시스템의 크기가 커지면서 시스템 사용 전력에 의한 운영비용이 무시하지 못할 비중을 차지하게 되었기 때문이다. 이러한 전력최소화를 위해 LTE에서는 네트워크에 의해서 지원되는 용량이 사용자 트래픽을 수용할 수 있는 데이터 총량과 조화롭게 조절되도록 SON 기능을 고려한다[24].

RACH optimisaiton 쓰임새에서는 RACH 과정과 관련된 파라미터들을 시스템 환경의 변화에 따라 자동적으로 적응적으로 변화시켜 줌으로써 RACH 과정에서 발생하는 충돌, 수신 오류 등을 감소시키는 것을 목표로 한다. RACH 과정의 성능은 LTE 시스템의 connection setup, 핸드오버, 데이터 재개 지연시간 등의 성능에 직·간접적인 영향을 미치는 중요한 과정으로써 RACH 과정의 성능에 영향을 주는 네트워크 환경은 셀 loading, call 도착율, 핸드오버 진입율, 트래픽 패턴 등에 크게 영향을 받음으로 SON 기능을 통해 이러한 환경 변화를 RACH 과정의 설정에 적응적으로 고려해주어야 한다[24].

Ⅲ. 최근 이동통신 시스템에 제안된 SON 기술 예시

1. 하향링크 SON 기술: Adaptive Multi-Pattern Reuse(AMPR)

첫번째 예로 소개할 내용은 무선 다중 셀 네트워크 하향링크에서 셀간 간섭 관리 기법에 관한 것이다. 차세대 셀룰러 네트워크에서는 넓은 대역폭을 사용하고 MIMO와 같은 고급 하위계층 기술을 도입함은 물론 적은 지역을 커버하는 기지국을 매우 촘촘하게 설치함으로써 더욱 높은 전체 용량을 제공할 수 있게 되었다. 하지만 여전히 셀 경계에 위치한 사용자는 인접 셀로부터 오는 간섭(ICI:Inter-Cell Interference)때문에 성능이 심하게 제약을 받고 있으며 이는 다중 셀 네트워크 성능의 큰 걸림돌이다.

이러한 셀간 간섭문제를 해결하기 위해 2세대 이동통신 시스템때부터 사용해 온 가장 간단한 방법은 주파수/시간 재사용 계수를 1보다 크게 설정하는 것이다. 조금 더 발전된 방식으로 서로 다른 위치에 있는 사용자들에게 서로 다른 재사용 계수를 줄 수 있는 FFR(Fractuibak Frequency Reuse) 및 이와 유사항 방식들이 WiMAX를 비롯한 여러 표준단체에서 제안되었다[25]. 하지만 이들은 여전히 오프라인에서 서비스 사업자가 미리 값을 설정하는 방식이기 때문에 동적인 네트워크 환경에 적응할 수 없고 따라서 다중 셀 네트워크에서 얻을 수 있는 최적의 성능과는 거리가 멀 수 밖에 없다.

최근에 다중 셀 네트워크에서 궁극적인 성능을 얻기 위한 연구들이 많이 진행되었다[26]~[29]. 이러한 방식들은 약간씩 차이가 있긴 하나 기본적으로 매 slot마다 central coordinator가 스케쥴링 및 간섭 관리 알고리듬을 동시에 푸는 식으로 되어 있다. 하지만 이들은 네트워크 전체에 있는 모든 사용자들의 채널 정보를 얻어와야할 뿐만 아니라 매우 복잡한 계산을 필요로 한다. 게다가 정보 피드백, 알고리듬 계산, 결정된 결정을 각각에 기지국에 다시 전달하는 일련의 과정들이 한 slot 내에 이뤄져야 한다는 제약조건 때문에 이러한 최적 알로리듬의 실제 구현은 거의 불가능하다.

따라서 우리는 높은 성능과 구현가능성의 2가지 목적을 동시에 달성하기 위하여 Adaptive Multi-Pattern Reuse(AMPR) 방식을 소개한다[30]. 기본적인 아이디어는 간접 관리를 굳이 fast fading을 따라가면서 하지않고 macroscopic한 네트워크 환경-예를 들면 사용자들의 분포 및 트래픽 로드, 사용자의 평균채널-에 따라서 천천히 하겠다는 것이다. 하지만 여전히 스케쥴링은 매 slot마다 다중 사용자의 fast fading 채널을 활용할 수 있으며 각각의 기지국에서 독립적으로 수행된다. 이어지는 시뮬레이션 결과에서도 확인하겠지만 이렇게 천천히 네트워크 변화에 따라가는 것만으로도 충분히 높은 성능을 얻을 수가 있다.

제안된 AMPR 방식은 매 slot마다 각각의 기지국이 독립적으로 스케쥴링을 수행한다. 또한 간섭 관리에 필요한 정보를 관리하며 가끔씩 이러한 정보를 클러스터를 이루는 central coordinator 또는 대표 기지국에 모음으로써 간섭 관리 패턴 비율을 업데이트한다. 제안된 방식은 가끔씩 최소한의 coordination만을 필요로 하는 partially distributed 알고리듬이며 위에서 언급했던 여러 네트워크 환경의 변화에 따라 간섭 관리 패턴을 최적으로 적응시켜 나가는 self-optimizing 특성을 가지고 있다. 하지만 완벽한 fully distributed 알고리듬은 아니기 때문에 궁금적인 의미의 SON으로 가기 위한 중간 단계 정도로 볼 수 있을 것이다. 진정한 SON을 설계하는 문제는 아직 open issue이며 앞으로도 많은 연구가 필요할 것이다. 본 논문에서는 AMPR 방식[30]을 SON의 일례로서 소개하는 것이 목적이므로 간단히 개념 및 동작만 설명하도록 하겠다. 기본적으로 AMPR 방식은 서로 다른 time-scale에서 동작하며 상호작용을 하는 2개의 알고리듬으로 이루어진다.

- 패턴 비율 업데이트 알고리듬: 첫번째 알고리듬은 느린 time-scale로 동작하는 패턴 비율 업데이트 알고리듬이다. 여기서 패턴이란 각 기지국의 송신파워의 ON/OFF 조합을 나타내는 것으로 스케쥴링될 사용자가 받게될 ICI의 정도를 조절한다. 패턴 비율 업데이트 알고리듬의 동작은 다음과 같다. 먼저 매 T_P slot마다 클러스터에서의 대표 기지국이 각 기지국으로부터 계산된 $D_P^{(n)}$의 정보를 받는다. 이를 위해 필요한 3가지 변수는 각각 ① $\overline{R_k}(t)$: 사용자 k의 t시간까지의 평균 throughput ② $\overline{\pi_{kp}}(t)$: 사용자 k가 패턴 p에서 서비스받은 평균 시간 비율 ③ $\overline{r_{kp}}(t)$: 사용자 k가 패턴 p에서 서비스될 때의 얻게 되는 순간 데이터 전송률의 평균이며 기지국들이 사용자 스케쥴링 알고리듬을 수행하면서 관리하는 변수들이다.

$$D_P^{(n)} = \sum_{k \in \kappa_n} D_k^{'}(\overline{R_k}) \cdot \left(\frac{\overline{\pi_{kp}}}{\pi_p} \overline{r_{kp}} \right) \tag{1}$$

여기서 $U_k(\cdot)$는 사용자 k의 만족함수이다.

대표 기지국은 개별 기지국으로부터 얻어진 정보를 합하여 $D_P = \sum_{k \in \mathrm{N}} D_P^{(n)}$, gradient projection 알고리듬에 사용될 편미분 벡터 $\mathbf{D} = (D_1, D_2, \cdots, D_P)$를 계산하고 다음과 같이 패턴 비율을 업데이트한다.

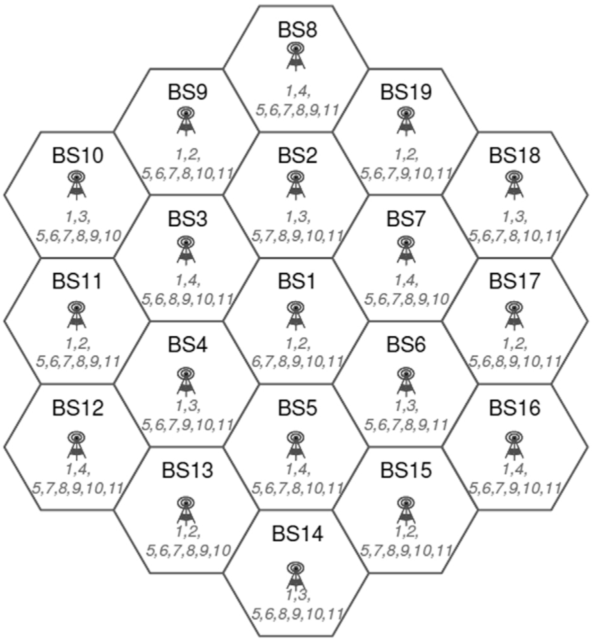


Figure 1. 시뮬레이션에 사용한 네트워크 모델, N = 19

$$\pi \leftarrow Proj(\pi + \gamma \mathbf{D}). \qquad (2)$$

마지막으로 업데이트된 패턴 비율을 만족하도록 다음 T_p slot 동안 사용할 패턴을 미리 결정해 둔다.

• 사용자 스케쥴링 알고리듬: 두번째 알고리듬은 빠른 time-scale로 동작하는 사용자 스케쥴링 알고리듬으로 매 slot t마다 패턴 $p(t)$를 사용하는 기지국들이 다음과 같이 서비스할 사용자를 선택한다.

$$k_n^*(t) = \arg\max\ U_k^{'}(\overline{R}_k(t\text{-}1))\ r_{kp}(t), \qquad (3)$$

그리고 나중에 패턴 비율 업데이트 알고리듬에 전해 주기 위하여 3가지 변수를 다음과 같이 관리한다.

$$\overline{R}_k \leftarrow (1-\beta_1)\overline{R}_k + \beta_1 I_k(t) r_{kp}(t),$$

$$\overline{\pi}_{kp} \leftarrow (1-\beta_2)\overline{\pi}_{kp} + \beta_2 I_k(t) r_{kp}(t),$$

$$\overline{r}_{kp} \leftarrow \begin{cases} (1-\beta_3)\overline{r}_{kp} + \beta_3 r_{kp}(t), & \text{if } I_k(t) = 0 \\ r_{kp}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

• 시뮬레이션 결과: 우리는 그림 1과 같이 19개로 이루어진 다중 셀 네트워크에서 11개의 패턴을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 보다 자세한 시뮬레이션 파라미터들은 [30]에서 확인할 수 있다.

본 논문에서 소개하는 AMPR 방식(Proposed)을 기존의 universal reuse(Universal) 뿐만 아니라 최적방식(Optimal)과 비교하였다. 비교 성능 지표로는 모든 사용자들 throughput의 기하평균(GAT: Geometric Average of user Throughputs)[1)]과 기지국으로부터 0.8×(셀반경)이상 떨어져 있는 가장자리 사용자들 throughput의 평균(AET: Average of Edge user Throughputs)을 고려하였다. 또한 다양한 사용자 분포 상황에서 성능을 분석하기 위하여 우리는 기지국으로부터 사용자간 최소한의 거리를 ρ×(셀반경)으로 조절하는 user distribution offset ρ를 도입하였다. 이값이 0이면 사용자는 전체 셀에 균등하게 분포하게 되며 이값이 1에 가까워질수록 셀 가장자리에 사용자가 모이게 된다.

그림 2는 사용자 분포에 따른 3가지 기술의 throughput 성능을 보여주고 있다. 제안방식은 구현을 가능케하기 위해 중앙집중형 알고리듬을 어느 정도 탈피하고 느리게 패턴을 관리함으로써 최적방식에 비해

1) 본 논문에서는 사용자의 효용함수를 로그함수로 사용하였기 때문에 GAT가 높을 수록 네트워크 전체의 효율이 높아진다.

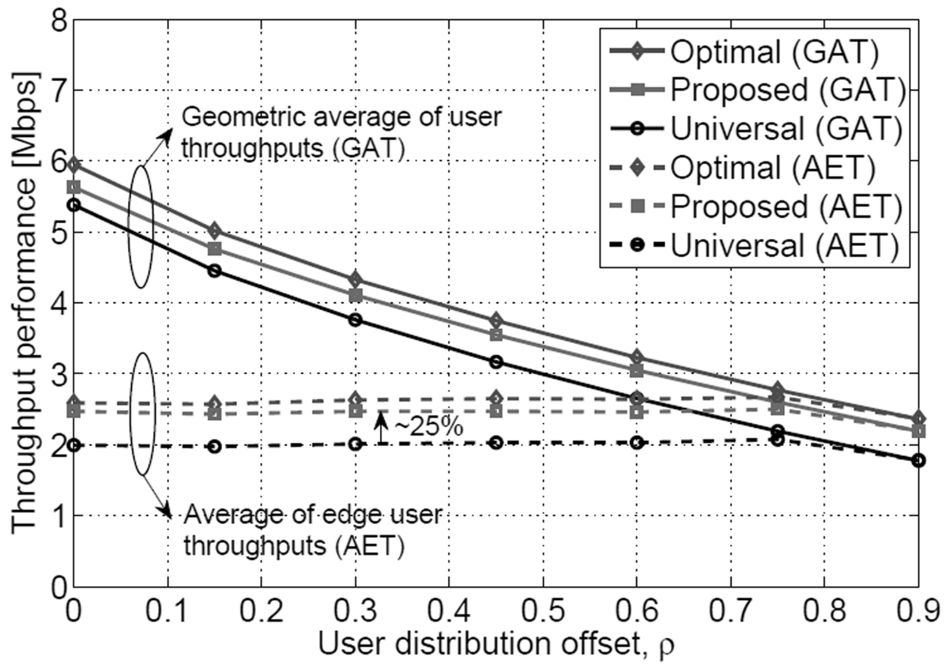


그림 2. 사용자 분포에 따른 최적기술(Optimal), 제안기술(Proposed), 기존기술(Universal)의 throughput 성능 비교

어느 정도 성능 차이가 약간 있을 수 밖에 없다. 하지만 여전히 universal reuse 대비해서 GAT 측면에서는 약 5~25%, AET 측면에서는 약 25% 정도의 성능 이득을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 최적방식이 universal reuse 대비 얻는 이득의 절반에서 2/3 수준을 달성하는 것으로 최적방식이 매 slot마다 복잡한 계산과 많은 양의 정보 피드백이 필요하고 중앙집중형 알고리듬으로 거의 구현이 불가능함을 생각해 볼 때 실용적이며 효과적인 방식이라고 생각할 수 있다.

2. 상향링크 SON 기술: Decentralized Uplink Intercell Interference Coordination(DUIC)

두번째로 소개할 내용은 무선 다중 셀 네트워크 상향링크에서 셀간 간섭 저감기법에 대한 것이다. 앞선 예에서도 언급했듯이 차세대 셀룰러 네트워크의 성능 개선에 큰 장애요소 중 하나인 인접 셀 간섭(ICI)를 해결하기 위한 방법으로써 다양한 기술들이 제안되었는데 이들을 크게 분류하면 인접 셀 간섭 무작위(intercell interference randomization), 인접 셀 간섭소거(intercell interference cancellation), 인접 셀 간섭조정(ICIC, intercell interference coordination) 방법으로 나눌 수 있다[31]. 인접 셀 간섭 무작위 방식은 간섭을 무작위화하여 processing 이득을 획득하는 방법이고 인접 셀 간섭소거 방식은 다중 안테나 혹은 IDMA(Interleaved Division Multiple Access) 기반의 간섭제거 기술을 사용한다. 마지막으로 실제적으로 차세대 셀룰러 네트워크에서 가장 많이 고려되고 있는 인접 셀 간섭조정(ICIC) 기술은 주로 FFR 기술을 고려한다. FFR은 앞선 예에서 언급되었듯이 다중 셀 환경에서 큰 이득을 보인다고 알려져 있다[32]~[34].

하지만 기존의 FFR 기술은 자원 사용에 있어서 몇 가지 단점을 갖고 있다. FFR 기술 적용시 사용자는 그 위치에 따라 사용할 수 있는 무선 자원을 할당받게 되고 이로인해 trunking efficiency가 낮아지는 단점이 있다. 또한 주파수 자원에 대한 자유도가 줄어들게 되어 주파수 diversity에 따른 이득이 감소한다. 그리고 자원할당이 사용자의 지리적인 위치에 의존하므로 셀 구조가 변화하거나 새로운 셀이 설치될 때에 빠른 대응이 어렵게 된다. 특히 기존의 FFR이 상향링크에 적용될시에는 더더욱 실제적인 구현이 어려워지는 단점이 있다. 왜냐하면 상향링크 스케쥴링은 하향링크 스케쥴링보다 더 긴 feedback loop을 겪게 되고 이로인해 각각의 사용자 단말에게 적합한 주파수 reuse 계수를 결정하여 공지하는데 어려움이 있다.

- Adaptive Sub-band Exclusion(ASE) 기법: 다중 셀 상향링크 ICIC 기술의 하나로써 최근 Self-Organizing한 특성을 갖는 상향링크 인접 셀 간섭 조정(ICIC) 기술이 제안되었다[11]. 저자들은 [11]에서 다중 셀 상향링크 환경에서 인접 셀 간섭을 단말 각자가 스스로 주변 셀에게 자신이 야기시키는 인

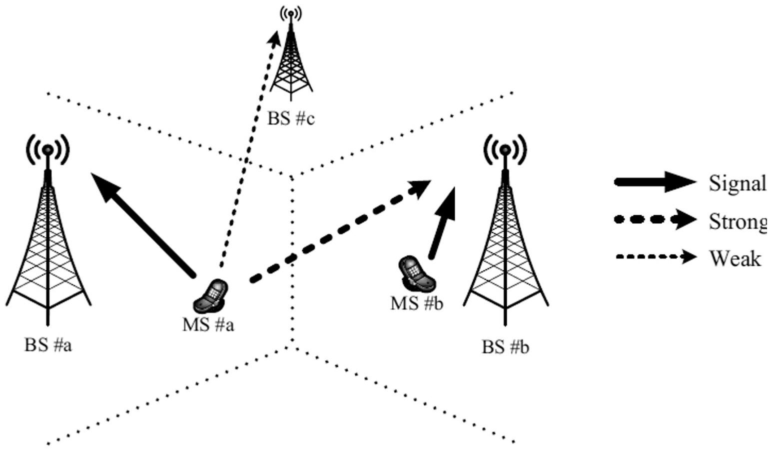


그림 .3. 다중셀 상향링크 ASE 기법 시스템 모델

접 셀을 측정하고 그 측정결과로부터 자신이 사용할 수 있는 무선 자원의 양과 위치를 이타적으로 결정하는 기술로써 다양한 ICIC 기술 중 SON적인 특징을 크게 가지고 있는 기술 중 하나에 속한다.

그림 3은 제안된 ASE이 동작하는 시스템 환경을 나타낸다. 각 단말은 다중 셀 환경에서 인접 셀 기지국들로부터 수신되는 premble을 분석하여 이들 사이의 채널 정보를 측정할 수 있다. 각 무선 채널은 large-scale 페이딩과 small-scale 페이딩을 겪게 되며 페이딩 계수는 각 링크별로 독립적으로 주어진다. 네트워크 전체적인 상향링크 용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C = \sum_{k=1}^{N_{sub}} C(k)\text{bits/Hz}, \quad (4)$$

여기서 N_{sub}은 OFDM sub-band의 개수를 나타낸다. 단말이 셀 #0에 위치하고 k번째 sub-band에 전력을 송신하지 않는다면 $C(k)=0$bits/Hz과 같은 용량이 해당 sub-band에서 획득된다. 반면 그 단말이 k번째 sub-band에 P_{TX}의 전송전력을 할당한다면 k번째 sub-band의 용량 $C(k)$는 다음과 같이 획득된다.

$$C(k) = \log_2\left(\frac{S^0(k)}{N_0 + \sum_{n\in A(k),\, n\neq 0} I_n^0(k)}\right)\text{bits/Hz}, \quad (5)$$

여기서 $A(k)$는 k번째 sub-band에 자원을 할당하여 전송하는 단말들의 인덱스를 모든 집합이며 N_0은 열잡음 전력밀도를 나타낸다. 또한 k번째 sub-band에서 셀 #0이 수신하는 간섭은 I m n(k)로 정의되고 다음과 같은 값을 갖는다.

$$S^0(k) = P_{TX} \times G_0^0 \times F_0^0(k), \quad (6)$$

$$I_n^m(k) = P_{TX} \times G_n^m \times F_n^m(k), \quad (7)$$

위의 수식에서 P_{TX}는 sub-band별 고정적인 전송전력을 의미하며 G_n^m은 n번째 셀에서 선택된 사용자와 m번째 셀의 기지국 사이의 largescale 채널 이득값을 의미하고 $F_n^m(k)$은 n번째 셀에서 선택된 사용자와 m번째 셀의 기지국 사이에서의 k번째 sub-band의 small-scale 채널 이득값을 의미한다.

이러한 셀룰러 환경에서 제안된 ASE 기법은 세가지 단계로 진행된다. 제1단계에서는 각 단말기는 자신이 가장 큰 인접 셀 간섭을 야기시키는 인접 셀 기지국을 찾는다. 제1단계를 거친 각 단말기는 자신으로부터 가장 큰 피해를 보는 최대의 피해자(victim) 기지국을 선택하게 되는 것이다. 제2단계에서는 각 단말기는 제거비율(exclusion ratio)$\alpha(0\le\alpha\le1)$을 선택한다. 각 단말은 이 제거비율에 의거하여 자신이 사용하게 될 자원양을 결정하게 된다. 제거비율을 결정하는데 있어서 단말은 자신의 채널 정보보다는 자신과 최대의 피해자 기지국 사이의 평균 채널 이득을 참고하여 결정한다. 즉 최대의 피해자 기지국에게 큰 인접 셀 간섭을 야기하는 단말은 적은 자원을 스스로 할당하여 사용하고 반대로 최대의 피해자 기지국에게 적은 간섭을 야기한다면 더 많은 자원을 스스로 할당하는 것이다. 단말이 제거비율

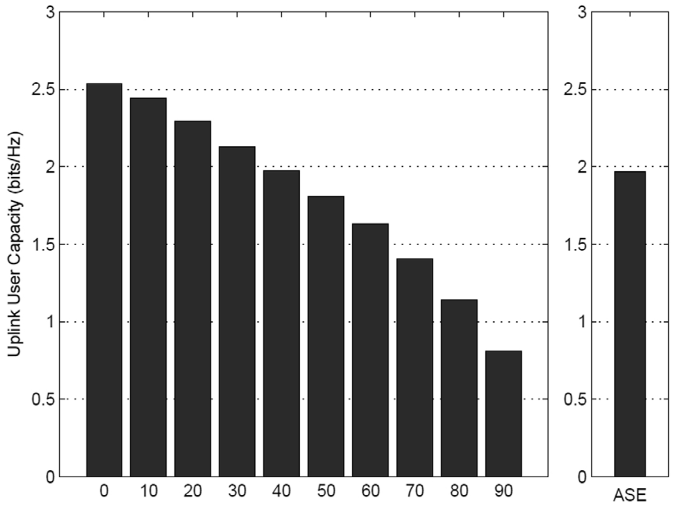


그림 .4. 다양한 제거비율에 따른 상향링크 평균 사용자 용량 및 제안된 ASE 기법의 성능 비교

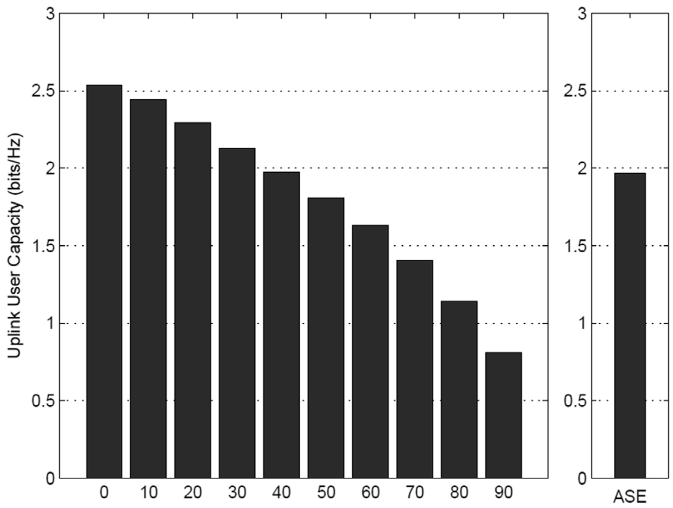


그림 .5. 셀 가장자리 사용자(5-percentile user) 환경에서 다양한 제거비율에 따른 상향링크 평균 사용자 용량 및 제안된 ASE 기법의 성능 비교

을 결정하고 나면 제3단계에서는 제거할 자원을 결정한다. 제거할 자원을 결정함에 있어서도 단말은 최대의 피해자 기지국으로부터의 무선 채널의 주파수 채널 정보 $F_n^m(k)$를 기반으로 하여 간섭을 더 크게 미치는 부분을 먼저 제거하는 이타적인 자율 자원 할당방식을 취한다.

이렇게 총 세단계의 ASE 기법을 거친 단말은 스스로 자원할당량을 조정하게 되어 진정한 의미의 Self-Organizing한 분산형 ICIC 기술이 구현된다고 할 수 있다.

• Adaptive Sub-band Exclusion(ASE) 기법의 시뮬레이션 결과: 저자들은 [11]에서 IEEE 802.16m 시스템의 Evalulation Methodology Document[35]를 따라 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 4는 자원 제거 비율(exclusion ratio)에 따른

상향링크 용량을 나타낸다. 먼저 좌측의 막대 그래프는 네트워크 전체의 단말들이 모두 같은 제거비율을 가지고 상향링크 전송을 수행할 때의 네트워크의 용량이다. 더많은 자원을 제거하고 전송할수록 네트워크 차원의 용량은 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 우편의 제안된 ASE 기법을 통한 네트워크 용량은 그 어떤 자원 제거도 하지않은 경우의 성능보다 감소된 것을 확인할 수 있다. 이렇게 네트워크 전체적인 성능만을 본다면 제안된 ASE 기법이 기존의 기법보다 열등하다고 생각될 수 있지만 차세대 셀룰러 네트워크에서 가장 중요하게 생각하는 요소 중 하나인 셀 가장자리 사용자 용량의 관점에서 보면 ASE 기법이 갖는 장점을 확인할 수 있다.

그림 5는 사용자 중 아래 5%에 해당하는 상향링크 용량을 획득한 사용자들의 평균 용량을 나타낸다. 앞선 그림과 같은 x-축으로 구성된 이 그림을 보면 제안된 ASE 기술을 통해 상향링크 전송시 셀 가장자리 사용자 용량은 최대 8배까지 증진된 것을 볼 수 있다. 이는 사용자 단말들이 셀 가장자리에 갈수록 주변 기지국에게 더 큰 인접셀 간섭을 야기하게 되고 이때 ASE를 적용하여 자율적으로 이러한 인접셀 간섭을 최소화하는 방향으로 상향링크 전송을 수행할 때 네트워크 전체적인 상향링크 용량이 개선되는 것이다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템을 위한 Self-Organizing Networks(SON) 기술에 대한 동향을 검토하고 이동통신 시스템에 적용가능한 상하향링크 SON기술을 설명했다. Self-Organizing은 우리 자연계가 가진 고유한 특성으로 다양한 다학제적 연구가 수행된 분야이다. 통신 시스템의 발생과 역사를 볼 때 근본적으로 이동통신 시스테은 시스템 설치에서부터 관리까지 모든 부분에서 시스템 운영자의 절대적인 관리하에 운영되는 시스템이었다. 하지만 통신 서비스에 대한 사용자의 니즈가 변화하고 이에 따라 이동통신만의 근본적인 구조가 변화하면서 점차 Self-Organizing한 특성을 갖도록 요구되고 있다. 본 눈문에서는 이러한 SON 기능이 IEEE 802.16m, 3GPP LTE 등의 최근 이동통신 시스템 표준화에 미치는 영향을 정리했다. 또한 본 논문에서 소개된 AMPR 기술과 DUIC 기술은 각각 상 · 하향링크 간섭 저감 기술으로써 기존의 중앙집중형 간섭 관리방식과는 달리 단말이 분산적으로 간섭 저감기법을 수행함으로써 네트워크의 Self-Organizing한 특징을 극대화하였다. 이로 인해 AMPR 기술과 DUIC 기술은 다양한 이동통신망의 환경 변화에 빠르고 안전하게 적응할 수 있게 된다. 소개된 기술들의 성능 또한 기존의 중앙집중형 간섭 관리방식보다 더 월등한 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

자연계에서 볼 수 있는 완전한 SON을 통신 시스템에서 완벽히 구현하는 것이 하나의 최종 목표라 보았을 때 현재 개발중인 차세대 이동통신 시스템에서 고려중인 SON 기능들은 아직 최종의 목표와는 거리가 멀다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이동통신 시스템 요구사항 및 시장구조의 변화에 따른 내 · 외부적인 강한 요인으로 인해 SON 기능이 시스템에 빠르게 적용되어 가고 있는 시점이므로 앞으로 개발될 이동통신 시스템에는 더욱 많은 SON 기능이 고려될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업[2009-F-045-01, 미래형 초소형셀 무선 자율 네트워크 기술 개발],[2007-F-038-03, 미래인터넷 핵심기술 연구] 및 기초기술연구회의 지원으로 수행하였음

[참고문헌]

[1] C. Prehofer and C. Bettstetter, "Self-Organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No. 7. 2005.

[2] Article "Self-organization," in Wikipedia. Address: http://en.wikipedia.org/wiki/Self-organization

[3] Self-Organization in Mobile Ad Hoc Networks - The Approach of Terminodes.pdf

[4] H.M.N. Bandara, A.P. Jayasumana, and T.H. Illangasekare, "Cluster Tree Based Self Organization of Virtual Sensor Networks," *IEEE GLOBECOM Workshops*, Nov. 2008.

[5] S. Khan and L.N. Tokarchuk, "Interest-Based Self Organization in Group-Structured P2P Networks," *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* Jan. 2009

[6] A. Akella, G. Judd, S. Seshan, and P. Steenkiste, "Selfmanagement in chaotic wireless deployments," *In Proceedings of the 11th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking*, Sep. 2005.

[7] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory in communications: motivation, explanation, and application to power control," *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2001.

[8] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.39, No.11, Nov. 2001, pp.126-131.

[9] Sarma Gunturi and F. Paganini, "Game theoretic approach to power control in cellular CDMA," *IEEE*

Vehicular Technology Conference - Fall, Vol.4, Oct. 2003, pp. 2362-2366.
[10] Bang Chul Jung, Young-Jun Hong, Dan Keun Sung, and Sae-Young Chung, "Fixed Power Allocation with Nulling for Cellular Uplink," *IEEE Communications Letters*, Vol. 12, No. 4, Apr. 2008, pp. 253-255.
[11] Min Suk Kang and Bang Chul Jung, "Decentralized Intercell Interference Coordination in Uplink Cellular Networks using Adaptive Sub-Band Exclusion," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Apr. 2009.
[12] H. Fujii, and H. Yoshikai, "Restoration message transfer mechanism and restoration characteristics of double-search self-healing ATM network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.12, No.1, Jan. 1994, pp.149-158.
[13] R. Kawamura, and I. Tokizawa, "Self-healing virtual path architecture in ATM networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 33, No. 9, Sep. 1995, pp. 72-79.
[14] H. Toba, K. Oda, K. Inoue, F. Nosu, and T. Kitoh, "An optical FDM-based self-healing ring network employing arrayed waveguide grating filters and EDFA's with level equalizers," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 5, Jun. 1996, pp.800-813.
[15] "*BAA 07-46 LANdroids Broad Agency Announcement (BAA) for Information Processing Technology Office (IPTO) Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA),*" Washington, DC: Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), 2007.
[16] N. Vlajic, and N. Moniz, "Self-Healing Wireless Sensor Networks: Results That May Surprise," *IEEE Globecom Workshops*, Nov. 2007
[17] E. Gelenbe, P. Liu, B.K. Szymanski, M. Lisee, and K. Wasilewski, "Cognitive and Self-Healing Routing for Sensor Networks," *in Proc. First Annual Conference of the International Technology Alliance*, Adelphi, MD, Sep., 2007.
[18] Frank Lehser, T-Mobile, "Self Organising LTE/SAE Network- Operator Requirements & Examples," Presented in ITG Fachtagung 25th Sep. 2006.
[19] IEEE 802.16m-07/002r8: "IEEE 802.16m System Requirements," Jan. 2009.
[20] IEEE 802.16m-08/003r9a: "IEEE 802.16m System Description Document [Draft]," May 2009.
[21] IEEE 802.16m-09/0010r2: "Draft Amendment to IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," Jun. 2009.
[22] 3GPP TS 36.300: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN); Overall description; Stage 2"
[23] 3GPP TR 36.816: "Evolved Study on Management of Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN) and Evolved Packet Core (EPC)"
[24] 3GPP TR 36.902: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and selfoptimizing network use cases and solutions (Release 9)"
[25] WiMAX Forum, "Mobile WiMAX - Part I: A technical overview and performance evaluation," Aug. 2006.
[26] A. Gjendemsj and D. Gesbert and G. E. Oien and S. G. Kiani, "Binary Power Control for Sum Rate Maximization over Multiple Interfering Links," *IEEE Trans. Wireless Communication*, Vol. 7, No. 8, Aug. 2008, pp. 3164-3173.
[27] S. Das and H. Viswanathan and G. Rittenhouse, "Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems," *in Proc. IEEE INFOCOM 2003*, San Francisco, CA, Apr. 2003.
[28] J. Cho and J. Mo and S. Chong, "Joint network-wide opportunistic scheduling and power control in multi-cell networks," *in Proc. IEEE WoWMoM 2007*, Helsinki, Finland, Jun. 2007.
[29] K. Son and S. Chong and G. de Veciana, "Dynamic Association for Load Balancing and Interference Avoidance in Multicell Networks," *in Proc. WiOpt 2007*, Limassol, Cyprus, Apr. 2007.
[30] K. Son, Y. Yi and S. Chong, "Adaptive Multi-pattern Reuse in Multi-cell Networks," *WiOpt 2009*, Seoul, Korea, Jun. 2009.
[31] 3GPP, TR 25.814 V7.1.0, Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), Sep., 2006.
[32] IEEE 802.16m-08/003r4, The Draft IEEE 802.16m System Description Document, Jun. 2008.
[33] 3GPP, R1-050896, Description and simulations of interference management technique for OFDMA based E-UTRA downlink evaluation, Sep., 2005.
[34] Hyukmin Son and Sanghoon Lee, The Cell Planning Scheme for ICI Mitigation, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, 2007.
[35] IEEE 802.16m-08/004r2, "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)," Jun. 2008.

강 민 석
(Min Suk Kang)

2006. 2: KAIST 전기 및 전자공학과 학사
2008. 2: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
2008. 3 ~ 현재: KAIST IT 융합연구소 미래통신팀 연구원
관심분야: 차세대 이동통신, Cognitive Radio, Network Coding, Compressed Sensing
E-mail: minsuk.kang@kaist.ac.kr
Tel: +82-42-350-4297
Fax: +82-42-350-4290

정 방 철
(Bang Chul Jung)

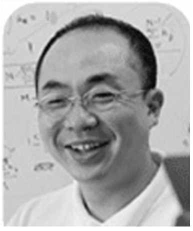
2002. 2: 아주대 전자공학과 학사
2004. 8: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
2008. 2: KAIST 전기 및 전자공학과 박사
2008. 3 ~ 현재: KAIST IT 융합연구소 미래통신팀, 지식융합팀 팀장
관심분야: 차세대 이동통신, 다중 셀 네트워크에서의 간섭관리, 무선 인지 시스템
E-mail: bcjung@kaist.ac.kr
Tel: +82-42-350-7117
Fax: +82-42-350-4290

손 규 호
(Kyuho Son)

2002. 2: KAIST 전기 및 전자공학과 학사
2004. 2: KAIST 전기 및 전자공학과 석사
2004. 8 ~ 2005. 7: The University of Texas at Austin 방문 연구원
2004. 2 ~ 현재: KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정
관심분야: 다중 셀 네트워크에서의 간섭관리, 교차 계층 최적화, 무선 인지 시스템
E-mail: skio@netsys.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-350-4445
Fax: +82-42-350-4446

이 융
(Yung Yi)

1997. 2: 서울대학교 컴퓨터공학부 학사
1999. 2: 서울대학교 컴퓨터공학부 석사
2006. 2: The University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
2006. 3 ~ 2008. 8: Princeton University 전자공학과 박사 후 연구원
2008. 9 ~ 현재: KAIST 전기 및 전자공학과 교수
관심분야: 컴퓨터 네트워크의 설계 및 분석, 무선 네트워크에서의 자원 할당, 인터넷 혼잡 제어
E-mail: yiyung@ee.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-350-3486


정 송
(Song Chong)

1988. 2: 서울대학교 제어계측공학과 학사
1990. 2: 서울대학교 제어계측공학과 석사
1995. 2: The University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
1994~1996: AT&T 벨 연구소 연구원
1996~2000: 서강대학교 전자공학과 교수
2000~현재: KAIST 전기 및 전자공학과 교수
관심분야: 무선네트워크, 미래인터넷, 인간 이동성
E-mail: song@ee.kaist.ac.kr
Tel: +82-42-350-3473
Fax: +82-42-350-4446