

다중셀 SC-FDMA를 위한 무선자원 관리기법에 관한 연구[†]

(A Study on Radio Resource Management for
Multi-cell SC-FDMA Systems)

정 용 주*
(Yong Joo Chung)

요 약 본 연구는 SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 접속기술을 사용하는 LTE(Long Term Evolution) 상향링크의 성능을 최대화하기 위한 무선자원관리(radio resource management) 기법을 제안한다. 셀간의 상호작용을 고려해야 하는 다중셀(multi-cell) 시스템을 대상으로 하여 단일셀 대상의 기존 SC-FDMA 관련 연구와는 차별화된다. 본 연구는 무선자원관리를 무선자원 계획단계(planning phase)와 운용단계(operation phase)로 구분하여 정의한다. 계획단계는 마스터 eNB(evolved-NodeB)가 소속된 eNB에 연속적인 무선자원(RB; radio bearer)를 배정하기 위한 것이고 운용단계는 eNB가 마스터 eNB로부터 배정받은 RB를 단말기에 할당하기 위한 것이다. 두 단계에 대하여 각각 최적화 문제를 모형화하고 각 모형에 대한 탐색적 해법을 제시한다. 제시하는 해법은 인접해중에서 목적함수 개선치가 가장 높은 방향으로 이동하는 일반적인 형태를 띄고 있다. 다수의 실험결과를 통하여 두 알고리즘의 성능과 특징을 분석하였다. 본 연구는 다중셀 SC-FDMA 시스템을 대상으로 효율적인 무선자원 관리 기법을 개발하기 위한 연구에 선구자적인 역할을 할 것으로 기대된다.

핵심주제어 : 무선자원관리, 최적화, 차세대 이동통신, SC-FDMA, LTE

Abstract This study proposes a radio resource management scheme to maximize the performance of the LTE(Long Term Evolution) uplink, using SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access). Rather than the single-cell SC-FDMA system the existing studies are mainly concerning, this study focuses on multi-cell system which needs considering the interaction among cells. Radio resource management is divided into two phases, planning and operation phases. The former is for the master eNB(e-NodeB) to allocate RBs(radio bearer) to eNB, the latter for eNB to assign RBs to the mobiles in the cell. For each phase, an optimization model and greedy algorithm are proposed. Optimization models aim to maximize the system performance while satisfying the constraints for both QoS and RB continuity. The greedy algorithms, like generic ones, move from a solution to a neighboring one having the best objective value among neighboring ones. From the numerous numerical experiments, the performance and characteristics of the algorithms are analyzed. This study is expected to play a volunteering role in radio resource management for the multi-cell SC-FDMA system.

Key Words : Radio Resource Management, Optimization, SC-FDMA, LTE

[†] 이 논문은 2009년도 부산외국어대학교 교수연구년제도지원에 의해 연구되었음

* 부산외국어대학교 e-비즈니스학과

1. 서 론

한정된 자원인 무선주파수를 사용하는 이동통신 시스템에서 어떤 단말기(사용자)에게 어떤 무선주파수자원을 할당할 것인가 하는 무선자원 관리(radio resource management) 문제는 시스템의 용량과 성능을 좌우하는 아주 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히, 고품질의 이동통신 서비스가 목표인 차세대 이동통신(IMT-Advanced)에서 무선자원의 효율적 사용을 통한 고속의 데이터 통신의 실현이 필수적이다[1].

3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 차세대 이동통신을 위한 후보기술로 표준화되고 있는 LTE(Long Term Evolution)는 상, 하향링크의 다중접속 방식으로 각각 SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access)와 OFDMA(Orthogonal FDMA)를 사용한다[1][4][5][6][18]. 이러한 기술은 3G 이전에 사용하던 접속방식과는 전혀 다른 것으로 차별화된 접근법을 요구하고 있다. 즉, 이전 이동통신 시스템에서의 무선자원은 주파수(frequency), 타임슬롯(time slot), 코드(code) 등으로 정의되고 일반적으로 한 단말기에게 하나의 무선자원을 배정하는 형태이다. 또한 기지국간 간섭이 발생하지 않도록 각 기지국에 무선자원이 고정적으로 배정되어 있기 때문에 가용한 임의의 무선자원을 단말기에게 할당할 수 있고 따라서 기지국내 자원할당문제는 이슈가 되지 않는다. 반면, OFDMA와 SC-FDMA는 공통적으로 가용 주파수자원을 여러 개의 부반송파(subcarrier) 또는 부반송파의 묶음인 RB(Radio Bearer)로 나누어 한 단말기에게 다수의 부반송파를 동시에 사용할 수 있도록 한다. 또한, 모든 자원을 모든 기지국이 공유하여 인접 기지국의 자원사용에 영향을 받기 때문에 한 기지국내에서 각 단말기가 경험하는 무선 환경이 부반송파별로 서로 다르다.

SC-FDMA는 또한 한 단말기에게 연속적인 부반송파만을 할당할 수 있다는 점에서 OFDMA과 큰 차이점이 있다[1][4][5][6][18]. 이는 SC-FDMA 시스템을 대상으로 하는 최적 무선자원 할당을 위한 최적화 모형과 할당 메커니즘은 OFDMA를 대상으로 한 기존 연구들[10][12][13][14][15][16]과는 다른 접근법을 필요로 한다는 것을 의미한다.

SC-FDMA가 최근에 개발되고 LTE의 상향링크에 처음으로 도입되어 SC-FDMA에서의 무선자원관리에

대한 연구는 OFDMA에 비하여 상대적으로 덜 진행된 상태이다. 기존의 SC-FDMA와 관련된 연구들은 주로 단일 셀을 대상으로 모든 단말기에서 낼 수 있는 총 처리율(throughput)을 최대화하기 위한 무선자원할당 문제를 다루고 있다. 구체적으로 문제의 복잡도 등 문제 자체의 분석[1] 또는 문제를 위한 탐색적 해법(greedy algorithm) 개발에 주력하고 있다[4][5][6].

본 연구에서는 다중셀 SC-FDMA 시스템을 대상으로 하는 무선자원 관리문제를 정의하고 그에 대한 해법을 제시한다. 먼저 다중셀 SC-FDMA 시스템 대상의 무선자원관리 문제를 두 단계로 구분하여 정의하였다. 첫 번째는 마스터 eNB¹⁾가 무선자원의 단위인 RB를 셀에 배정하는 무선자원 계획단계(planning phase)이고 두 번째는 마스터 eNB로부터 배정받은 RB를 각 eNB가 소속 단말기에 할당하는 무선자원 운용단계(operation phase)이다. 두 단계는 공통적으로 연속적인 RB 할당을 제약조건으로 포함하고 있다. 또한, 복잡도가 높은 두 최적화 문제에 대하여 목적함수의 한계치가 가장 높은 방향으로 수요처(셀 또는 단말기)에 자원을 주는 탐색적 기법을 제시한다.

단일셀 SC-FDMA 시스템을 대상으로 하는 무선자원 할당에 대한 연구도 초보단계에 있지만 SC-FDMA의 특성과 더불어 셀간의 상호작용을 고려해야 하는 다중셀 시스템에 대한 연구는 더욱 찾아보기 어려운 개척분야이다. 따라서 본 연구는 다중셀 SC-FDMA 시스템 대상의 무선자원관리와 관련된 연구에 있어서 선구자적인 역할로써 의의가 깊다.

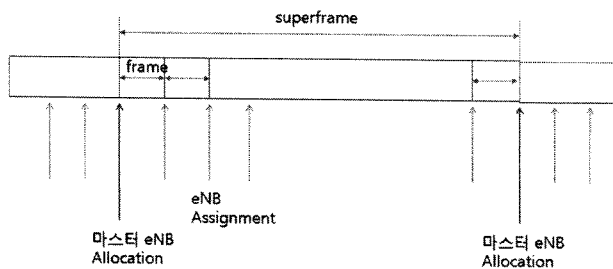
2장에서는 두 단계의 무선자원관리와 관련된 두 개의 문제를 정의하고 수리적인 최적화 모형으로 표현한다. 3장에서는 두 문제에 대한 탐색적 해법을 제시하고 실험결과를 분석한다.

2. 무선자원 관리 및 최적화 모형

LTE를 포함한 대부분의 이동통신 시스템의 무선링크는 <그림 1>과 같이 무선자원의 시간축을 프레임

1) LTE에서는 WCDMA의 기지국 제어기(RNC)의 기능을 eNB에서 수행한다. 본 연구에서는 마스터 eNB가 무선계획과 관련하여 다른 eNB들을 통제하는 것으로 가정한다. 또한 셀(cell)은 eNB가 서비스하는 영역을 지칭하지만 여기서는 셀과 eNB를 혼용한다.

(frame) 단위로 구분하고 있다. 연속된 다수의 프레임을 슈퍼프레임(super frame)이라 부른다. 이러한 메커니즘을 바탕으로 기존 연구[7][8]에서는 다중 셀 OFDMA 시스템을 대상으로 하는 두 단계의 무선자원 관리 방법을 제안하였다. 마스터 eNB는 각 슈퍼프레임 시작시점에 자신과 연결된 eNB들에게 RB를 배정(allocation)²⁾하고 eNB는 각 프레임 시작시점에 마스터 eNB로부터 배정받은 RB들 중에서 셀 내에 있는 단말기에게 할당(assignment)한다. 따라서 마스터 eNB는 장기적인 관점에서 eNB에 무선자원을 분배하고, 반면에 eNB는 단기적인 관점에서 마스터 eNB로부터 배정받은 무선자원을 단말기에 직접 할당한다.



<그림 1> LTE에서의 두 단계 자원관리

본 연구에서도 이와 같은 두 단계 접근법을 따른다. 본 연구에서는 마스터 eNB가 소속 eNB에 RB를 배정(allocation)하는 과정을 무선자원 계획단계라 하고 eNB가 단말기에 할당(assignment)하는 과정을 무선자원 운용단계라 부른다.

2.1 마스터 eNB의 무선자원계획/최적화 모형

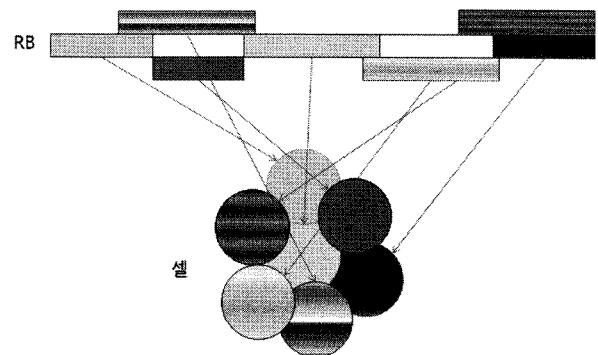
마스터 eNB 수준에서의 무선자원 계획은 마스터 eNB가 전체 처리율(마스터 eNB에 속한 eNB의 처리율의 합)로 표현되는 시스템의 성능을 최대화하도록 소속된 eNB에 RB를 배정하기 위한 것이다. 이는 기존 이동통신 시스템에서 셀들의 수요에 따라 탄력적으로 채널을 배정하는 동적채널배정(Dynamic Channel Allocation)[20]과 유사한 구조를 가진다.

본 연구에서의 무선자원 계획은 eNB의 처리율이 일

2) 논문 전개의 편의상 마스터 eNB가 셀(eNB)에 RB를 주는 것을 배정이라 하고 eNB가 단말기에 주는 것을 할당이라 하고 통합한 개념을 관리(management)라 한다.

정수준 이상이 되어야 하는 것과 연속적인 RB만 eNB에 할당될 수 있다는 제약 조건을 포함하고 있다.

먼저 eNB의 최소 처리율 제약은 단말기들이 eNB 가까이 밀집되어 있는 eNB에 무선자원을 몰아주는 불평등한 배정을 막기 위한 것이다. 또한, 다른 접속 기술과는 달리 단말기에 연속적인 RB를 할당해야 하는 제약을 고려해야 하는데 본 연구에서는 <그림 2>에서와 같이 마스터 eNB가 eNB에게 RB를 배정할 때도 연속된 RB 구간을 할당한다고 가정한다. 이는 eNB가 연속적이지 않은 RB를 배정받게 되면 운용단계에서 eNB가 단말기에 RB를 할당하는데 많은 어려움이 있기 때문이다.

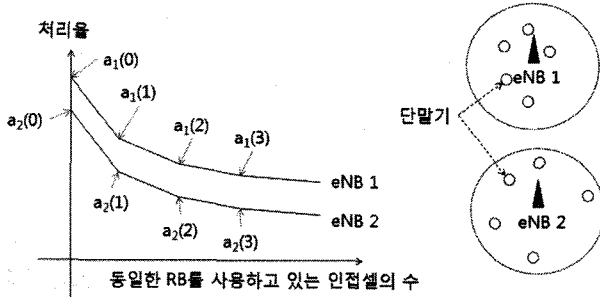


<그림 2> 마스터 eNB 수준에서 무선자원 계획 (eNB에 대한 연속적인 RB 배정)

그리고 무선자원 계획은 다중셀을 대상으로 하기 때문에 셀간 상호작용 즉, 서로 다른 셀에 있는 단말기 간섭에 따른 처리율 변화를 고려해야 한다. 처리율은 신호대 간섭비(Signal to Noise Ratio; SNR)의 함수이고 SNR은 단말기와 eNB간 신호감쇠가 얼마나 발생하느냐 그리고 주변셀에서 그 RB를 얼마나 사용하여 어느 정도의 간섭을 주느냐에 의해 결정된다. 현실적으로는 신호 감쇠와 간섭요소가 시시각각 변하기 때문에 처리율도 시간에 따라 변하고 주파수 고유한 특성들로 인하여 다른 조건은 같더라도 RB에 따라 처리율도 달라진다. 그러나 시시각각 변하는 무선환경 특성에 재빠르게 적응하는 것은 eNB의 운용단계에서 고려해야 할 요소이다.

본 연구에서는 어떤 셀에 하나의 RB를 할당했을 때의 처리율은 실제로 할당받는 단말기의 위치 등에 따라 다르지만 주변셀의 RB 배정상황에만 영향을 받는

것으로 단순화한다. 구체적으로 한 셀에 하나의 RB를 배정했을 때의 가능한 처리율은 그 RB를 사용하고 있는 인접셀 개수의 함수로 나타낸다. 이는 인접셀에서 오는 간섭량이 전체 간섭량의 대부분을 차지하고 인접셀 간섭에는 동일한 RB를 배정받은 인접셀의 수가 절대적인 영향을 미치기 때문이다.



<그림 3> 단말기 위치 및 동일 RB를 사용하는 인접셀의 수에 따른 처리율 변화

단말기 위치 및 동일 RB를 사용하는 인접셀의 수에 따른 처리율을 변화는 마스터 eNB가 확보하고 있는 정보로써 여기서는 $a_b(i)$ 로 나타낸다. 즉, $a_b(i)$ 는 eNB b 에 하나의 RB를 배정했는데 eNB b 의 i 개 인접 셀에서 그 RB를 사용하고 있을 때의 처리율이다. 각 eNB가 $a_b(i)$ 를 계산하여 마스터 eNB로 전송할 수 있기 때문에 마스터 eNB가 이 정보를 가지고 있다는 가정에 현실적인 무리가 적다. $a_b(i)$ 는 일반적으로 <그림 3>에서와 같이 동일 RB를 사용하는 인접셀이 많아짐에 따라 감소하고 셀내에 있는 단말기들의 위치가 통신하고 있는 eNB에 가까워 신호감쇠가 적을수록 큰 값을 가진다.

OFDMA를 대상으로 하는 [8]에서의 무선자원 계획 단계에서는 단말기의 무선환경 특징(위치, 기지국과의 감쇠 등) 및 RB의 주파수 특성을 고려하여 단말기 및 RB별로 서로 다른 처리율을 가정하고 있다. 이에 따라 계획단계에서도 RB를 기지국이 아닌 단말기에 할당하고 있다. 하지만 이 할당은 운용단계에서 완전히 무시되고 새로운 기준으로 RB를 단말기에 할당하는 모순을 내포하고 있다.

본 연구에서는 단말기의 무선환경 특징 및 RB의 주파수 특성에 의한 처리율 차이를 운영단계에서만 고려하고 있다. 따라서 계획단계에서의 처리율은 단말기

및 RB별로 다른 것이 아니라 오직 RB의 배정상황에 의해서만 결정되고 RB는 단말기가 아닌 셀에 배정된다. 또한 단말기에 RB를 할당하는 것은 운용단계에서 이루어지게 된다.

계획단계를 수리적으로 모형화하기 위하여 다음과 같이 정의한다.

eNB 집합 : $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$

RB 집합 : $R = \{1, 2, \dots, |R|\}$

eNB b 의 인접 eNB 집합: $NB(b)$

eNB b 에서 요구되는 최소 처리율 : Q_b

마스터 eNB 수준에서의 무선자원 계획을 위한 최적화 모형(PP)은 다음과 같이 표현된다.

문제 (PP)

$$\begin{aligned} & \max \sum_b \sum_r a_b \left(\sum_{n \in NB(b)} x_{nr} \right) \\ & \text{s.t.} \\ & (1) \text{ eNB에 연속적인 RB할당} \\ & (2) \sum_r a_b \left(\sum_{n \in NB(b)} x_{nr} \right) \geq Q_b, b \in B \\ & (3) x_{br} = \{0, 1\}, b \in B, r \in R \end{aligned}$$

문제 (PP)의 결정변수는 x_{br} 로서 eNB b 에 RB r 를 배정하게 되면 $x_{br} = 1$ 이다. x_{br} 변수만으로는 한 eNB에는 연속적인 RB만 배정할 수 있다는 제약은 수리적으로 표현할 수 없기 때문에 (1)번 제약식과 같이 서술하였다. 목적함수에서 $a_b \left(\sum_{n \in NB(b)} x_{nr} \right)$ 는 eNB b 에 RB r 를 배정했을 때의 처리율이다. 따라서 제약식 (2)는 셀 b 의 처리율이 요구수준(Q_b) 이상 되어야 한다는 것을 의미한다.

2.2 eNB의 무선자원 운용/최적화 문제

eNB 수준에서의 무선자원 운용은 eNB가 각 프레임의 시작시점에 마스터 eNB로부터 배정받은 RB들 중에서 요구하는 단말기에 할당하는 문제이다. 이때 RB의 연속성에 대한 제약을 만족하면서 실제로 전송되는 비트의 수를 최대화하도록 한다. 여기서 단말기에

서 전송되는 비트 수는 할당된 RB의 전송속도로 한 프레임동안 전송가능한 비트수와 단말기의 버퍼에 전송대기된 비트 수중에서 작은 값이다.

eNB는 각 단말기의 버퍼 상태에 대한 실시간 정보를 가지고 있어야 한다. 또한, 단말기 m 에 RB r 를 할당했을 때 한 프레임동안 전송할 수 있는 비트 수 (a_{mr})는 eNB가 실시간으로 측정된 값을 사용한다.

수리적 모형을 위하여 다음과 같이 정의한다.
eNB b 에 연결되어 있는 단말기 집합 : $M_b = \{1, 2, \dots, |M_b|\}$

eNB b 에 배정된 RB 집합 : $R_b = \{1, 2, \dots, |R_b|\}$
단말기 m 에 RB r 를 할당했을 때 한 프레임동안 전송할 수 있는 비트수: a_{mr}

단말기 m 에서 한 프레임동안 전송할 수 있는 비트수:
 $a_m = \sum_r a_{mr} y_{mr}, y_{mr} = \{0, 1\}, m \in M_b, r \in R_b$

단말기 m 의 버퍼에 전송대기중인 비트수 : c_m

eNB 수준에서의 무선자원 운용을 위한 최적화 모형 (PO)은 다음과 같이 표현된다.

문제 (PO)

$$\begin{aligned} & \max \sum_m \min \{a_m, c_m\} \\ & \text{s.t.} \\ & (4) \text{ 각 단말기에 연속적인 RB 배정} \\ & (5) a_m = \sum_r a_{mr} y_{mr} \\ & (6) y_{mr} = \{0, 1\}, m \in M_b, r \in R_b \end{aligned}$$

문제 (PO)의 결정변수는 y_{mr} 로서 단말기 m 에 RB r 를 할당하게 되면 $y_{mr} = 1$ 이다.

3. 탐색적 해법 및 실험결과

3.1 탐색적 해법

문제 (PP)와 문제 (PO)는 모두 NP-complete 문제 로써 해를 구하기 위해서는 시간 효율적인 알고리즘

을 필요로 한다[1][4][5]. 따라서 본 연구에서도 두 문제에 대하여 탐색적 해법을 제안한다.

가. 문제 (PP)에 대한 해법

일반적으로 자원할당 관련 기존의 연구들 ([2][4][5][6][10][14][15])의 탐색적 해법은 일반적으로 자원을 수요처에 할당했을 때 한계효율을 최대화하는 할당을 선택하는 방식을 취하여 자원할당을 하나씩 늘려 가는 방식(add heuristic)을 사용하고 있다. 하지만 문제 (PP)는 초기에 각 셀에 어떤 RB를 선택할 지에 대한 기준을 설정하기 어렵기 때문에 이 방식을 적용할 수 없다.

본 연구에서는 초기해를 구하는 단계, RB를 이동하는 단계 그리고 RB를 추가하는 세 단계의 해법을 제시한다.

먼저 단계 1는 초기해를 구하기 위한 것으로 전체 셀을 상호간섭이 없는 그룹으로 분할하고 그룹별로 RB를 배정한다. 즉, 동일한 그룹에 속한 셀들간에는 간섭이 적어 동일한 RB를 할당할 수 있다. (그룹의 전체 처리율/그룹의 전체 요구량)의 최소값을 최대화하도록 그룹에 배정하는 RB의 개수를 하나씩 늘린다. 다음으로 각 그룹에 속한 셀에게는 RB의 배정된 개수 만큼 실제 RB를 배정한다. 따라서 한 그룹에 속한 셀에는 동일한 RB가 배정된다.

단계 2에서는 인접셀간 RB를 이동한다. 단계 1에서의 결과가 실행불가능할 경우 제약조건을 만족하지 못하는 셀을 찾아 그 인접셀로부터 RB를 이동한다. 이때 현재 처리량이 최소요구량에 가장 못 미치는 셀을 찾아 인접한 RB를 할당받은 인접셀로부터 RB를 이동시킨다. 물론 RB를 넘겨주는 셀의 처리량은 RB를 넘겨주어도 최소 요구량은 만족하여야 한다.

단계 1 또는 2에서 실행가능한 해를 구했을 경우 전체 처리량을 최대화하도록 인접한 셀간에 RB를 이동한다. RB를 이동하더라도 인접한 두 셀에 대하여 연속적인 RB할당 제약이 만족되어야 한다.

단계 3에서는 셀에 RB를 추가한다. 어떤 셀에 RB를 추가하게 되면 이 셀의 처리율은 증가하지만 추가된 RB와 동일한 RB를 사용하고 있는 인접 셀의 처리율은 감소한다. 이전의 결과가 실행불가능할 경우 제약조건을 만족하지 못하는 셀을 찾아 RB를 추가하고 실행가능한 해를 구했을 경우 처리율을 가장 크게 하는 셀에 RB를 추가한다. 이 경우에도 연속적인 RB배

정제약은 유지되어야 하므로 셀에 배정된 최소 RB 보다 1이 적거나 최대 RB보다 1이 큰 RB만이 추가의 검토 대상이 된다.

<문제 PP를 위한 휴리스틱 (HP)>

0. 전체 셀을 그룹단위로 분할
1. 그룹단위로 RB배정: 그룹에 RB가 하나 추가되었을 때 (그룹의 전체 처리율/그룹의 전체 요구량)의 최소값을 최대화하도록 각 그룹에 RB 개수 배정. 각 셀에 그룹배정 개수만큼 실제 RB를 배정. 각 셀의 제약조건을 만족하면 단계 2-2로 이동, 아니면 단계 2-1로 이동.
2. RB 이동
 - 2-1: 처리량에 대한 최소 요구량을 만족하지 못한 셀에 인접셀로부터 RB 이동. 모든 셀의 제약조건이 만족하면 단계 2-2로 간다. 더 이상 이동할 수 있는 셀이 없으면 단계 3-1로 이동.
 - 2-2: 전체 처리율을 최대화하도록 인접한 RB가 배정되어 있는 인접셀간 RB 이동. 더 이상 이동할 셀이 없으면 단계 3-1로 이동.
3. RB 추가
 - 3-1: 최소 요구량을 만족하지 못하는 셀에 RB를 추가
 - 3-2: 전체 처리율을 최대화하도록 셀에 RB를 추가.

나. 문제 (PO)에 대한 해법

문제 PO를 위한 휴리스틱(HO)에서는 RB를 할당했을 때 목적함수의 증가치가 가장 큰 단말기와 RB를 찾아 할당하는 추가 휴리스틱을 제안한다. 물론 추가와 이동의 검토대상은 연속적인 RB 제약조건을 만족하는 것에 한한다.

<문제 PO를 위한 휴리스틱(HO)>

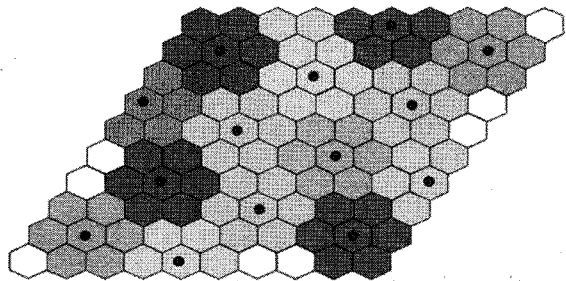
1. RB 추가 : 가능한 모든 할당에 대하여 목적함수의 증가치를 계산하고 증가치가 가장 큰 할당을 실행. 모든 RB가 할당되었으면 단계 2로 이동.

2. RB 이동 : 처리율(a_m)이 버퍼에 있는 데이터 크기(c_m)보다 큰 단말기에 할당된 RB의 일부분을 인접 RB를 할당받은 단말기로 이동했을 때 목적함수 개선이 있을 경우 이를 실행.

3.2 실험 결과

가. 문제 (PP)에 대한 실험결과

본 연구에서는 <그림 4>에서와 같이 100개의 셀과 50개의 RB로 구성된 시스템을 대상으로 무선자원 계획문제를 실험하였다. 전체 셀을 7개의 그룹으로 분할하였고 점으로 표시된 셀들이 그룹의 한 예이다. 각 셀의 처리율에 대한 최소 요구량(Q_b)과 각 셀에서 인접 셀의 RB배정 상황에 따른 RB의 처리율($a_b(i)$)은 랜덤하게 생성하였다. $a_b(i+1) = \alpha \times a_b(i)$, $0 < \alpha < 1$ 로 설정하여 동일한 RB를 사용하는 인접셀의 수가 많아지면 처리율이 감소하도록 하였다.



<그림 4> 10x10 시스템 및 그룹의 예(점으로 표시된 셀 집합)

<표 1>은 왼쪽 상단에 있는 7개의 셀(셀번호는 0에서부터 가로로 1씩 증가한다)에 대한 단계별 배정상황을 나타낸다. 표에서 보듯이 단계 1을 통한 RB 배정은 50개의 RB가 7개의 셀에 골고루 분산되고 있으며 단계 2를 통하여 인접셀간 RB 이동이 발생하고 있다. 단계 3을 거치면서 인접셀의 제약조건을 어기지 않는 범위내에서 목적함수 개선효과가 높은 셀(1번 셀과 21번셀)에 RB를 몰아주고 있다.

실제로 100개의 예제에 대한 실험을 통하여 단계별 총 처리율의 증가 상황을 분석해본 결과 평균적으로 단계 2의 RB이동으로 총 처리율이 3%정도 증가하고

단계 3의 RB 추가로 15% 정도 개선되는 것을 확인하였다. 물론 이 수치는 총 셀 구조, RB의 개수, 처리율 분포 등의 모수(parameter)에 따라 달라진다.

<표 1> 계획단계에서의 RB의 배정 예

셀 번호	Q_b	$a_b(0)$	RB 배정상황/처리율		
			단계 1	단계 2	단계 3
0	247	49	0~6/345	0~5/296	0~5/271
1	334	62	7~13/434	6~13/496	5~21/992
10	301	43	14~20/302	14~20/302	14~20/302
11	106	20	21~27/142	21~26/121	21~26/111
12	198	40	28~34/278	27~32/238	27~32/218
21	470	68	35~41/477	35~41/476	34~44/613
22	167	27	42~49/219	42~49/219	42~49/178

RB가 셀에 배정되는 밀집도는 $a_b(i)$ 와 $a_b(i+1)$ 간의 차이에 의해 결정된다. 즉, 어떤 셀에 RB를 추가하게 되면 동일한 RB를 사용하고 있던 인접셀에서는 그 RB를 사용하는 인접셀의 수가 늘어나게 된다. 따라서 추가된 셀의 처리율은 증가하고 인접셀의 처리율은 감소하는데 이때 감소되는 양이 적을 경우 즉, $a_b(i)$ 와 $a_b(i+1)$ 간의 차이가 적을 경우에 RB추가로 목적함수의 개선을 기대할 수 있다. 실제로 $a_b(i+1) = 0.1 \times a_b(i)$ 일 때 모든 셀에 배정된 총 RB의 개수보다 $a_b(i+1) = 0.4 \times a_b(i)$ 일 때가 10% 정도 많게 나타났다.

나. 문제 (PO)에 대한 실험결과

문제 (PP)를 통하여 각 셀에 연속적인 RB를 배정한 후 각 셀을 대상으로 문제 (PO)를 적용시켜 각 단말기에 연속적인 RB를 할당한다. 본 연구에서는 7개의 단말기와 20개의 RB가 배정되어 있는 셀을 대상으로 알고리즘 HO를 적용하였다. 단말기와 RB에 따른 처리율(a_{mr})은 SC-FDMA에서의 다중반송파 페이딩(multi-carrier fading)을 고려하여 생성하였다[19].

<표 2>는 해법 HO에 따른 RB할당의 예를 나타낸다. RB 이동으로 목적함수의 개선되는 것을 확인하였다. 예를 들어 RB 11은 RB 추가시에는 단말기 0에 할당되었지만 RB이동 과정에서 단말기 6으로 이동되면서 목적함수가 더 개선된다.

4. 결론

본 연구에서는 SC-FDMA를 사용하는 LTE의 상향링크를 대상으로 다중셀 시스템의 성능을 최대화하기 위한 무선자원관리기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 무선관리 기법은 단말기에 연속적인 무선자원을 할당해야 하는 SC-FDMA의 고유한 특징과 셀간의 상호작용이라는 다중셀의 요구사항도 고려하고 있다. 따라서 단일셀을 대상으로 하는 기존의 SC-FDMA 대상 무선자원관리 연구와는 차별화된다.

먼저 무선자원관리를 기존의 다중셀을 대상으로 하는 연구들[7][8]과 유사하게 마스터 eNB가 소속된 eNB에 연속적인 RB를 배정하기 위한 무선자원 계획 단계와 eNB가 마스터 eNB로부터 배정받은 RB를 단

<표 2> 운용단계에서의 RB 할당 예

m	c_m	a_m	a_{mr} 과 할당된 RB (색칠된 부분)																			
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	61	216	40	50	70	46	45	61	66	43	48	57	65	98	62	32	31	34	24	21	13	17
1	94	82	66	82	45	60	32	20	14	12	15	15	16	14	20	14	9	7	9	11	6	4
2	98	80	53	29	40	40	24	20	11	10	13	14	12	7	10	9	11	8	7	6	6	8
3	63	44	37	21	17	9	11	14	11	8	5	3	4	4	5	8	5	4	5	5	6	4
4	50	262	43	47	51	50	69	43	55	70	88	44	36	43	43	60	79	101	114	153	220	262
5	60	56	56	46	25	27	37	34	22	23	17	22	29	21	15	13	14	10	13	10	10	14
6	124	151	68	44	43	48	26	22	27	37	29	38	45	39	22	18	10	14	20	14	18	26

말기에 할당하기 위한 운용단계로 구분하였다. 또한 두 단계에 대하여 각각 최적화 문제를 모형화하고 각 모형에 대한 해법을 제시하였다. 특히 셀간 복잡한 상호작용을 고려해야 하는 무선자원 계획단계에서는 현실적인 상황을 반영하여 모형을 단순화하였다. 제시하는 해법은 일반적인 탐색적 해법과 같이 목적함수가 가장 많이 개선되는 인접해로 이동하고 있지만 연속적인 RB할당이라는 제약으로 OFDMA 대상 문제보다 인접해의 수가 적으며 따라서 최종해는 초기해에 많은 영향을 받는다. 다수의 실험을 통하여 본 연구에서 제시하는 모형과 해법의 특징을 분석하였으며 의미있는 결과를 도출하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 정용주, 김후곤, "LTE 상향링크에서의 무선자원 할당", submitted to Telecommunication Review.
- [2] 정용주, 백천현, 김후곤, "다중사용자 OFDM 광대역 무선인터넷 시스템의 자원할당 방법", 32권 3호, 한국경영과학회지, 2007
- [3] 김인형, 이용훈, "선형 프로그래밍을 사용한 다중사용자 OFDM 시스템에서의 부채널 및 비트할당 방법", Telecommunication Review, 제12권 4호, 2002
- [4] Ian C. Wong, Oghenekome Oteri and Wes McCoy, "Optimal Resource Allocation in Uplink SC-FDMA System", IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 8, No.5, 2009
- [5] Luis A. M. R. de Temino, G.Berardinelli, S. Frattasi and P. Mogensen, "Channel-Aware Scheduling Algorithms for SC-FDMA in LTE Uplink", IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC), 2008
- [6] J. Noh, S. Oh, "Distributed SC-FDMA Resource Allocation Algorithm Based on the Hungarian Method", IEEE Vehicular Technology Conference, pp.1-5. 2009.
- [7] F. B. Álvarez, "Contribution to Dynamic Spectrum Assignment in Multicell OFDMA Networks", Ph.D. Dissertation, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC) of the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2010.
- [8] H. Lie and G. Li, OFDM-Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization, A John Wiley & Sons, 2005.
- [9] J. M. Keil, "On the complexity of scheduling tasks with discrete starting times", Operations Research Letters, Vol. 12, pp. 293 - 295, 1992.
- [10] H. Kim and Y. Han and J. Koo, "Optimal subchannel allocation scheme in multicell OFDMA systems", Proc. Of VTC, 2004.
- [11] T. Erlebach and Frits C.R. Spiekman, "Interval Selection : applications, algorithms, and lower bounds", Journal of Algorithms, Vol. 46, pp. 27-53, 2003.
- [12] F. D. Calabrese, M. Anas, C. Rosa, P. E. Mogensen and K. I. Pedersen, "Performance of a Radio Resource Allocation Algorithm for UTRAN LTE Uplink", IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 2007.
- [13] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, P. Beming, 3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press, 2007.
- [14] M. Ergen, S. Coleri, and P. Varaiya, "QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems", IEEE Trans. on Broadcasting, vol. 49, no. 4, pp. 362-370, 2003.
- [15] G. Li and H. Liu, "Dynamic resource allocation with finite buffer constraint in broadband OFDMA networks", IEEE Wireless Comm. and Networking, v. 2, pp. 1037-1042, March 2003.
- [16] K. Kim, Y. Han, S-L. Kim, "Joint Subcarrier and Power Allocation in Uplink OFDMA Systems", IEEE Communication Letters, Vol. 9, No. 6, 2005.
- [17] C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz, Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, Prentice Hall, pp394-395, 1982.
- [18] 3GPP TS 36.201 v8.0.0
- [19] <http://www.wirelesscommunication.nl/referencen-ence/chaptr05/ofdm/ofdmchan.htm>

- [20] A.H. Hac and C.H. Mo, "Dynamic channel assignment in wireless communication networks", International Journal of Network Management, Vol. 9, No.1, 1999



정 용 주 (Yong Joo Chung)

- 정회원
- 연세대학교 경영학과 경영학사
- 한국과학기술원 경영과학과 공학석사
- 한국과학기술원 산업경영학과 공학박사
- 부산외국어대학교 상경대학 e-비즈니스학과 부교수
- 관심분야 : 통신 시스템/네트워크, 조합 최적화, 에너지/환경

논문 접수일 : 2010년 11월 03일
1차수정완료일 : 2010년 12월 13일
게재확정일 :: 2010년 12월 15일