

LTE-Advanced 시스템의 반송파 집성(Carrier Aggregation)을 고려한 셀간 협력 스케줄링 기법

양 찬 석*, 조 구 민*, 류 탁 기**, 강 충 구^o

Inter-Cell Cooperative Scheduling with Carrier Aggregation in LTE-Advanced System

Chan S. Yang*, Kumin Cho*, Takki Yu**, Chung G. Kang^o

요 약

3GPP LTE-Advanced 시스템(Release 10)의 Carrier Aggregation (CA) 규격은 고속의 전송률을 지원하기 위해 다수의 주파수 밴드를 통합하면서, 이를 고려한 다양한 배치 시나리오를 제시하고 있다. 본 논문에서는 각 주파수 밴드 별로 상이한 방향성 섹터 안테나를 사용하는 배치 시나리오를 고려하며, 이때 단말이 인접 셀의 주파수 밴드를 선택 가능하게 함으로써 셀 경계 사용자의 수율 성능을 향상할 수 있는 셀 선택 방식을 제안한다. 그리고 이러한 방식 하에 셀 간에 비례공정성(proportional fairness)이 확보될 수 있도록 하는 분산 방식의 셀간 협력 스케줄링 알고리즘을 제시하며, 이를 통해 기존 방식보다 셀 경계 사용자의 수율이 약 50% 향상되는 것을 확인한다.

Key Words : LTE-Advanced, Carrier Aggregation, Inter-cell cooperation, Proportional fair packet scheduling

ABSTRACT

3GPP LTE-Advanced (Release 10) system specifies carrier aggregation (CA) to enable high data rate on using multiple frequency bands, including the variout CA-specific deployment scenarios. Considering one of those scenarios in which the different directional sector antenna is employed by each frequency band, we propose a per-carrier cell selection scheme that can improve the average throughput of the cell-edge users by allowing each user equipment (UE) to select the frequency band of the adjacent cell. Furthermore, a distributed algorithm for inter-cell cooperative scheduling in this scheme is proposed to support proportional fairness among the cells. It has been shown that the proposed scheduling algorithm for the per-carrier cell selection scheme improves the cell-edge user throughput roughly by 50% over that of the conventional scheme.

I. 서 론

3GPP LTE Release 10 규격에서는 2개 이상의 상

이한 여러 밴드를 집적하여 가상적으로 하나의 광대역 밴드로 통합 관리함으로써 전송률을 증대할 수 있는 반송파 집성(Carrier Aggregation: CA) 기술을 채

* This work is supported in part by the Seoul R&BD Program [WR080951, Establishment of Bell Labs in Seoul/Research of Services & Application for Broadband Convergent Networks and their Enabling Sciences].

♦ First Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, hello828@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, ccgkang@korea.ac.kr, 종신회원

* 고려대학교 전기전자전파공학부 무선정보시스템공학 연구실, kumin84@korea.ac.kr, 학생회원

** SK 텔레콤 Network 기술원, takki.yu@sk.com

논문번호: KICS2013-12-553, Received December 27, 2013; Reviewed February 5, 2014; Accepted March 10, 2014

택하고 있다^[1]. CA에 채용되는 각 밴드를 component carrier (CC)라고 한다. 이때 기존 셀룰러 통신과 달리 다수의 CC를 활용할 수 있으므로 이를 활용한 새로운 셀 & 섹터 토폴로지가 고려될 수 있으며^[2], 이에 적합한 셀 선택 및 자원 할당 방식이 요구된다.

본 논문에서는 [2]에서 제시된 시나리오 중에서, 각 CC의 안테나 중심 방향이 일치하는 경우(overlaid 시나리오)와 안테나 중심 방향이 60° 만큼 차이를 두는 경우(directional 시나리오)를 고려한다. [2]에 따르면 directional 시나리오에서는 인접 셀 간에 서로 다른 CC를 중심으로 섹터가 구성되고, 섹터 경계 사용자의 입장에서는 채널 상태가 좋은 CC가 적어도 한 개는 보장될 수 있기 때문에 기존 overlaid 시나리오 대비 셀 및 섹터 경계에서의 수율 향상을 기대할 수 있다. 그러나 기존 방식에 따르면, directional 시나리오에서는 overlaid 시나리오에 비교하여 하위 5% 단말의 수율이 오히려 떨어지는 현상이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 성능 저하의 원인을 설명하고, 이를 해결하기 위한 방법으로서 비례 공정 스케줄링 (proportional fair scheduling)에 근거한 분산 방식의 셀간 협력 스케줄링 방식을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1 장에서 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 제시한다. 또한 본 논문에서는 자원 할당 방식으로 비례공정 스케줄링을 고려하기 때문에 2.2 장에서 CA에서 최적의 비례 공정 스케줄링을 위한 메트릭을 수식적으로 유도한다. 3장에서는 특정 CA 시나리오에서 셀 선택 방식에 따라 발생하는 문제점을 제시하고, 이를 해결하기 위한 단말의 셀 선택 방법 및 셀간 협력 스케줄링을 제시한다. 4장에서는 제한한 셀간 협력 스케줄링의 성능을 기존 방식이 적용되었을 때와 비교함으로써 셀간 협력 스케줄링의 우수성을 보인다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 반송파 집성(Carrier Aggregation) 및 구현 시나리오

LTE-A Release 10에서 단말은 CA를 통하여 주파수 대역폭(1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz)을 최대 5개까지 통합하여 사용이 가능하며, 각 CC의 위치에 따라 그림 1과 같은 다양한 형태의 조합이 가능하다^[1]. 한편 단말이 셀로부터 데이터를 전송 받기 위해서는 서비스 받을 셀과 그 하위의 섹터를 선택하고, 선택한 섹터에 의해 자원이 스케줄링 된다. CA에서 사용자가

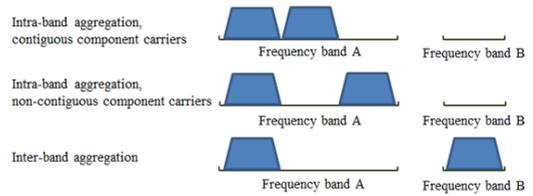


그림 1. CA의 종류
Fig. 1. Types of carrier aggregation

서비스 받을 셀과 섹터를 선택할 때 일차적으로 하나의 CC를 사용하여 신호가 가장 좋은 셀 및 섹터를 선택한다^[3]. 이렇게 일차적으로 RRC 연결을 맺기 위해 사용된 CC를 PCC (Primary Component Carrier)라 하며, 이때 선택한 섹터를 P-cell (Primary Cell)이라고 한다. 추가적인 CC를 연결할 때에는 PCC로 RRC연결이 형성된 서비스 셀 내에서 RRC reconfiguration 메시지를 통하여 신호가 가장 좋은 섹터를 선택한다. 이때 추가된 CC를 SCC (Secondary Component Carrier)라 하며, 이 때 선택한 섹터를 S-cell이라 한다. 즉, 3GPP Release 10에서 단말이 사용하는 모든 CC는 PCC를 통해 형성된 하나의 RRC 연결을 사용하여 동일한 셀을 통해 서비스를 받게 된다. 이와 같이 각 CC가 서로 다른 RRC 연결을 통해 각기 다른 셀에 접속하지 않는 것은 기존의 3GPP 규격과 동일한 절차를 유지하기 위한 것이며, 또한 추가적인 복잡도를 야기하지 않기 위한 것으로 판단된다.

그림 2는 단말이 사용하는 CC가 기지국과 연결된 후, 기지국이 모든 CC를 통합하여 단말 별로 자원 스케줄링을 수행하는 구조를 도시한 것이다. CA에서 자원 스케줄링은 기지국이 단말이 사용하는 모든 CC를 통합하여 수행하나, HARQ 과정은 각 CC별로 독립적으로 진행된다.

CA를 통해 다수의 CC를 활용할 수 있음에 따라 3GPP LTE-Advanced 규격에서는 2개의 CC를 사용할 때, 각각 CC별 섹터 안테나의 방향과 주파수 대역

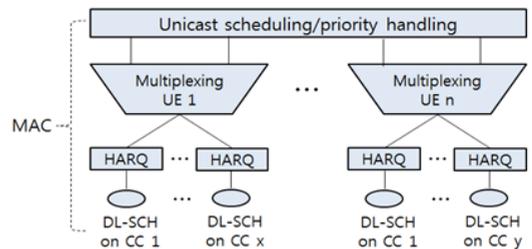


그림 2. CA를 위한 하향링크 구조
Fig. 2. Downlink structure for CA

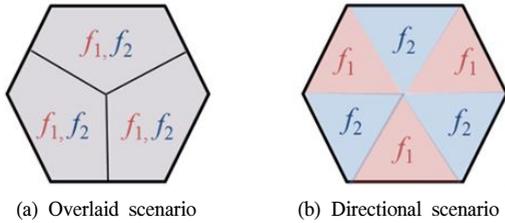


그림 3. CA 배치 시나리오
Fig. 3. CA deployment scenario

의 전파 감쇄 정도 등에 따라 다섯 가지 형태의 셀과 섹터 배치 시나리오를 제시하고 있다^[2]. 이들 시나리오 중에서 CC가 모두 동일한 방향의 섹터 안테나를 사용하는 상황을 overlaid 시나리오하자. 그리고 각 CC의 섹터 안테나 방향이 60° 엇갈리게 배치되는 상황을 directional 시나리오라고 하자. 그림 3은 overlaid 시나리오와 directional 시나리오를 각각 예시한 것이다. 여기서 보는 바와 같이 overlaid 시나리오의 경우에는 3개 섹터로 구분되는 반면, directional 시나리오의 경우에는 각 CC별로 3개 섹터의 방향이 서로 엇갈리기 때문에 가상적으로 6개의 섹터가 형성되는 것을 알 수 있다.

위와 같은 CA 배치 시나리오를 고려할 때, 단말의 위치 및 각 시나리오에 따라 단말의 수율 성능이 달라질 수 있다. 그림 4는 2개의 상이한 대역을 통해 CA를 구현할 때, 동일한 위치에 있는 단말들이 시나리오에 따라 성능 차이가 발생하는 것을 예시하고자 한다.

미. 이 때 인접 셀의 간섭은 고려하지 않았으며, 인접 셀 간섭이 단말에 성능에 미치는 영향은 III절에서 논의하고자 한다. 따라서 위의 예시에 따르면, overlaid 시나리오에서 섹터의 경계에 존재하는 사용자는 2개의 CC로부터 낮은 안테나 이득이 발생하므로 이에 의한 수율 감소를 겪게 된다. 그림 4(a)에서 이러한 상황을 예시하였으며, 여기서 보는 바와 같이 섹터의 경계에 있는 사용자는 2개 대역에 걸쳐 모두 낮은 채널 이득을 겪게 된다. 반면, directional 시나리오의 경우에 2개의 CC가 동시에 채널 이득이 낮은 상황은 존재하지 않으며, 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 단말의 위치에 따라 채널 이득이 높은 대역이 적어도 하나가 존재한다. 따라서 overlaid 시나리오에서 섹터의 경계에 존재하는 사용자에게 대비하여 수율이 증가될 것으로 예상된다. 즉, directional 시나리오의 경우에는 CA에 의한 2개 대역에 걸쳐 인위적으로 주파수 선택적인 채널 특성이 확보되는 것을 알 수 있다.

2.2 CA를 고려한 비례 공정 스케줄링

본 논문에서는 하향 링크에서 서로 다른 대역에 존재하는 2개 CC를 모두 사용하는 inter-band CA를 고려하며, 각 CC의 섹터 안테나 방향이 60° 엇갈리게 배치되는 directional 시나리오를 고려한다. 한편, 단말간에 공정하게 자원을 할당하기 위한 방식으로 비례 공정 스케줄링을 적용한다. CA는 기존 셀룰러 시스템과 달리 다수의 주파수 대역을 통합하여 사용하기 때

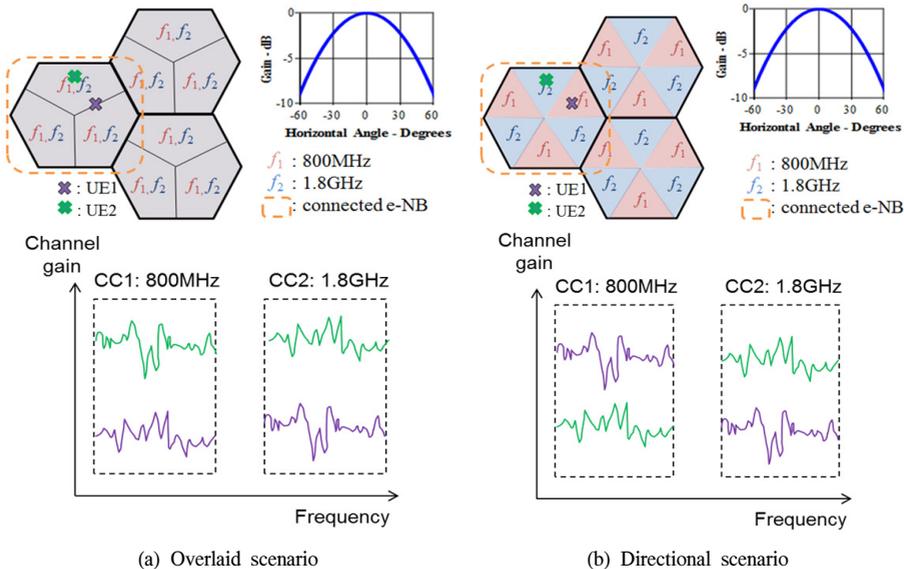


그림 4. Directional scenario와 overlaid scenario의 비교 예시
Fig. 4. Overlaid vs. directional scenario: Example

문에 이에 맞는 새로운 비례 공정 스케줄링 메트릭이 요구되며, 다음에서는 비례 공정의 정의에 따라 CA에 최적화된 스케줄링 메트릭을 유도한다.

M 명의 사용자에게 Resource Block (RB) 단위로 자원을 할당한다고 하자. 스케줄링 방식 S 가 적용된 시스템에서 L 개의 CC가 존재할 때, n 번째 타임 슬롯에서 i 번째 단말의 평균 전송률을 $\bar{R}_i^{(S)}[n]$ 이라고 하자. $(n-1)$ 번째 타임 슬롯에서 i 번째 단말에서의 CC j 에 의해 발생된 평균 전송률과 n 번째 타임 슬롯에서 i 번째 단말의 순시 전송률을 각각 $\bar{R}_{i,j}[n-1]$ 과 $r_i^{(S)}[n]$ 이라고 하면, 평균 전송률 $\bar{R}_i^{(S)}[n]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{R}_i^{(S)}[n] = (1-1/t_c) \cdot \sum_{j=1}^L \bar{R}_{i,j}[n-1] + 1/t_c \cdot r_i^{(S)}[n], \quad t_c \geq 1 \quad (1)$$

(1)에서 t_c 는 moving window의 크기(시분할 슬롯 단위)로서, (1)은 기하급수적 가중치를 갖는 이동 평균(exponentially weighted moving average)을 통해 동적으로 변화하는 전송률을 평균 전송률에 반영하는 계산이다. 한편, i 번째 단말에게 j 번째 CC의 k 번째 RB가 할당 되었을 경우 1, 그렇지 않을 경우 0으로 정의되는 지시자 $I_{i,j,k}^{(S)}[n]$ 에 의해 순시 전송률 $r_i^{(S)}[n]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i^{(S)}[n] = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{RB_j} r_{i,j,k}[n] I_{i,j,k}^{(S)}[n] \quad (2)$$

(2)에서 $r_{i,j,k}[n]$ 는 n 번째 타임 슬롯에서 단말 i 가 j 번째 CC의 k 번째 RB를 사용할 때 순시 전송률을 나타내고, RB_j 은 j 번째 CC에서의 RB 개수이며, $\sum_{i=1}^M I_{i,j,k}^{(S)}[n] = 1$ 이다. 따라서 비례공정 스케줄링의 정의에 따라 CA에서의 스케줄링은 다음과 같은 최적화 문제로 정식화할 수 있다⁴⁾.

$$\max_{S=1}^M \sum \log(\bar{R}_i^{(S)}[n]) \quad (3)$$

(3)은 (2)의 $I_{i,j,k}^{(S)}[n]$ 에 의해 결정 되므로, 이를 원소로 하는 벡터를 $\mathbf{I}^{(S)}[n]$ 로 나타내면 (3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(\mathbf{I}^{(S)}[n]) = \sum_{i=1}^M \log(\bar{R}_i^{(S)}[n]) \quad (4)$$

$U(\mathbf{I}^{(S)}[n])$ 는 log 함수의 선형 결합이므로 오목함수이고 subgradient 특성에 따라 최적의 스케줄러 S^* 에 대해 다음과 같은 부등식이 성립한다⁵⁾.

$$U(\mathbf{I}^{(S^*)}[n]) - U(\mathbf{I}^{(S)}[n]) \geq \nabla U(\mathbf{I}^{(S^*)}[n])^T (\mathbf{I}^{(S^*)}[n] - \mathbf{I}^{(S)}[n]) \quad (5)$$

(5)에서 우변의 값이 0보다 크면 최적의 스케줄러 S^* 에 의해 결정된 유틸리티 값이 다른 임의의 스케줄러 S 에 의해 결정된 목적함수 값보다 크게 된다. 각 RB는 1명의 사용자에게만 할당 가능하다고 가정하고, 최적의 스케줄러 S^* 에 의해 사용자 i^* 가 k 번째 RB를 할당 받았다면, (5)에서 우변의 값이 0보다 크다는 조건은 다음과 같은 식과 동치를 이루게 된다⁴⁾.

$$\log'(\bar{R}_{i^*}^{(S^*)}[n]) \cdot r_{i^*,j,k}[n] \geq \log'(\bar{R}_i^{(S^*)}[n]) \cdot r_{i,j,k}[n], \quad \forall i \neq i^* \quad (6)$$

따라서 (6)의 조건에 따라 각 RB 별로 다음과 같이 사용자를 선택할 수 있다.

$$i^* = \arg \max_i \left\{ \frac{r_{i,j,k}[n]}{\left((1-1/t_c) \cdot \sum_{j=1}^L \bar{R}_{i,j}[n-1] \right)^{|\forall j|} + (1/t_c) \cdot r_i^{(S^*)}[n]} \right\} \quad (7)$$

Log 함수의 증가량은 $r_i^{(S^*)}[n]$ 에 의해 결정되므로 (7)의 최적 해를 찾기 위해서는 모든 가능한 스케줄링 방식에 대해 비교해야 한다. 하지만 (1)의 moving window 크기가 매우 크다면(즉, $t_c \rightarrow \infty$ 이면), 현재 슬롯에서의 $r_i^{(S^*)}[n]$ 이 스케줄링 메트릭에 미치는 영향이 없어지게 되므로 다음과 같이 각 RB 단위의 독립적 스케줄링과 동일해진다.

$$i^* = \arg \max_i \left\{ \frac{r_{i,j,k}[n]}{\sum_{j=1}^L \bar{R}_{i,j}[n-1]} \right\} \quad (8)$$

이는 모든 L 개의 CC를 동시에 고려한 스케줄링(joint scheduling)을 하는 것이며, 각 RB 단위의 개별적인

스케줄링으로써 (7)의 최적의 스케줄링에 근사화됨과 동시에 (7)에 대비하여 그 복잡도가 매우 낮다. 한편, 이 joint scheduling은 $\arg \max \{r_{i,j,k}[n]/\bar{R}_{i,j}[n-1]\}$ 와 같이 각 CC별로 독립적으로 스케줄링(independent scheduling)하는 경우와 비교되어야 한다. Joint scheduling은 다수의 CC를 하나의 밴드로 고려하는 것이므로 각 CC별로 독립적으로 스케줄링 하는 경우에 대비하여 큰 주파수 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

III. CA를 고려한 셀간 분산 협력 스케줄링

본 절에서는 다중셀 환경을 고려하였을 때 CA의 directional 시나리오에서 현재 구현되고 있는 셀과 섹터의 선택 과정에서 발생하는 문제점을 설명하고, 이에 대한 해결책으로 분산 방식의 셀간 협력 스케줄링 방식을 제시한다. Directional 시나리오에서 2개의 CC를 가정하고, PCC와 SCC에 해당하는 대역을 각각 f_1 과 f_2 로 나타내자. II.1절에서 설명한 바와 같이, 각 단말은 PCC를 기준으로 신호가 가장 좋은 셀 및 섹터를 선택한다. 그림 5(a)에서 이러한 상황을 예시하고 있으며, 단말은 1번 셀을 기준으로 안테나 중심 방향에 위치해 있으므로 1번 셀의 섹터가 P-cell이 될 것이다. 일단 PCC를 기준으로 서빙 셀과 섹터가 선택되면, SCC는 채널 상태와 상관없이 동일한 셀에 의해 스케

줄링 된다. 이 때 단말은 선택한 셀 내에서 f_2 대역을 사용하는 섹터를 기준으로 안테나 경계 방향에 위치해 있으므로 매우 약한 신호를 받게 된다. 또한 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 셀 경계 사용자의 입장에서는 인접 셀의 f_2 섹터를 기준으로 안테나 중심방향에 위치해 있으므로 인접 셀의 SCC가 강한 간섭원으로 존재하게 된다. 따라서 현재의 셀 선택 방식에서 셀 경계의 사용자는 SCC로부터 매우 낮은 신호대 간섭비를 갖게 되어 수율이 낮아진다. 이와 같이 단말이 그림 5(a)와 같은 위치에서 PCC와 SCC가 모두 동일한 서빙 셀을 선택하게 되면 일반적으로 하위 5% 단말이 낮은 수율 성능을 겪게 될 것으로 예상된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서 기존 규격과 달리 단말이 사용하는 각 CC는 독립적으로 신호가 좋은 셀과 섹터를 선택해야 하는 것을 고려할 수 있다. 이는 각 CC가 연결되는 다수의 셀이 단말에게 협력적으로 서비스를 제공해야 하는 것을 의미한다. 셀 경계의 단말이 각 CC에서 독립적으로 셀과 섹터를 선택할 수 있다면, 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 단말이 셀 경계에 위치해 있을 경우에 단말은 1번 셀 내의 섹터와 2번 셀 내의 섹터를 각각 P-cell과 S-cell로 선택할 수 있다. 즉, 단말이 P-cell을 선택할 때에는 단말은 1번 셀 내의 섹터를 기준으로 안테나 중심 방향에 위치해 있으므로 1번 셀 내의 섹터를 P-cell로 선택하고, S-cell을 선택할 때에는 2번 셀 내의 섹터를 기준으로 안테나 중심 방향에 위치해 있으므로 2번 셀 내의 섹터를 선택하게 된다. 이와 같이 directional 시나리오에서 각 CC가 수신 신호 세기를 기준으로 셀을 독립적으로 선택하게 되면 각 CC가 동일한 서빙 셀을 선택하는 기존 방식에서 셀 경계 단말의 SCC의 신호대 간섭비(SINR)이 크게 저하되는 문제를 해결할 수 있다. 즉, 단말의 PCC와 SCC는 각각 다른 셀의 섹터에 할당된 대역이 될 수 있으며, 따라서 단말은 자신의 수신 채널 상태에 따라 2개의 서빙 셀을 가질 수 있다. 이때, 단말의 PCC와 SCC가 서로 다른 셀의 대역이 되는 경우, 해당 단말의 데이터를 이들 셀들 간에 적절히 분배할 수 있어야 한다.

단말이 자기 다른 셀에 의해 2개의 대역에 걸쳐 서비스 받을 수 있을 때, 스케줄링도 이들 2개 대역을 동시에 고려하여 수행되어야 한다. 즉, (8)식의 RB 별 반송과 집성 비례공정 스케줄링(joint PF scheduling)을 중앙에서 수행할 수 있다. 그러나, PCC와 SCC를

선택한 2개 셀 간에 서로 평균 전송률 $\sum_{j=1}^2 \bar{R}_{i,j}[n-1]$

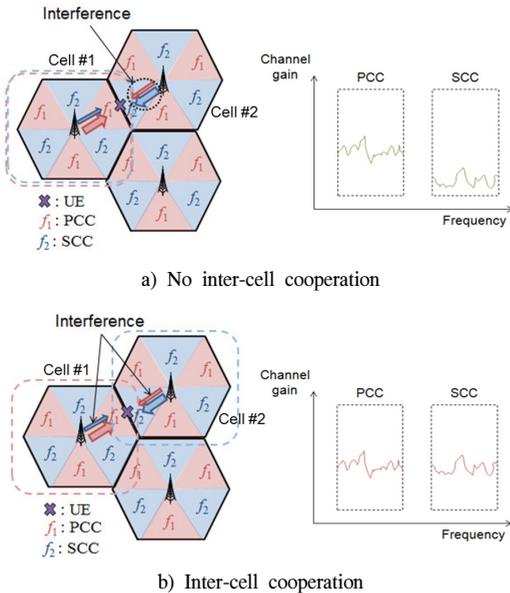


그림 5. CA directional 시나리오에서의 간섭 상황 예시
Fig. 5. Example for inter-cell interference in CA directional scenario

을 교환할 수 있다면, 각 셀에서 독립적으로 스케줄링을 수행할 수 있다. 즉, PCC와 SCC의 CC 인덱스를 각각 1과 2라고 하면, 각 셀에서 분산적으로 각 CC에 대해 다음과 같이 RB 별로 비례공정 스케줄링에 의해 할당 사용자 i^* 를 결정한다.

$$i^* = \arg \max \left\{ r_{i,1,k}[n] / \sum_{j=1}^2 \bar{R}_{i,j}[n-1] \right\} \text{ for PCC} \tag{9}$$

$$i^* = \arg \max \left\{ r_{i,2,k}[n] / \sum_{j=1}^2 \bar{R}_{i,j}[n-1] \right\} \text{ for SCC} \tag{10}$$

각 CC의 서비스 기지국에서 (9)와 (10)의 스케줄링을 분산적으로 수행하기 위해서는 (9)와 (10)에서 각 메트릭의 분모값 $\sum_{j=1}^2 \bar{R}_{i,j}[n-1]$ 을 공유해야 하며, 이를 위해 각 서비스 기지국은 X2 interface를 통하여 해당 기지국에서 서비스하는 CC를 통해 단말의 평균 전송률을 상대 기지국으로 보내주어야 한다. 즉, PCC 서비스 기지국은 SCC 서비스 기지국으로 $\bar{R}_{i,1}[n-1]$ 값을 전송하고, 동시에 SCC 서비스 기지국은 PCC 서비스 기지국으로 $\bar{R}_{i,2}[n-1]$ 값을 전송한다. 이와 같이 단말이 사용하는 각 CC가 독립적으로 서비스 기지국을 선택하고, 각 CC에 대한 서비스 기지국이 (8)의 joint scheduling에 근거하여 RB 별로 독립적으로 사용자에게 할당하는 방식을 주파수 집성 기반 셀간 협력 스케줄링(inter-cell cooperative scheduling with carrier aggregation)이라 하자.

셀 경계에서의 간섭 제어를 위해 인접한 셀들이 상호간 협의 하에 시간 및 주파수 자원을 직교 시키는 방식이 존재하지만 이는 인접 셀에서 일부 자원을 사용하지 못함으로써 셀 경계에서의 수율 향상과 시스템 용량 증대와의 득실 관계를 불러온다⁶⁾. CA의 directional 시나리오에서 위와 같은 CC의 셀 선택 방식 및 셀간 협력 스케줄링이 적용된다면 directional scenario의 본래 목적인 섹터 경계 사용자의 수율 향상과 더불어, 셀 경계에 위치한 단말에 대하여 인접 셀의 간섭을 완화할 수 있게 된다. 또한 별도의 중앙 집중적 셀간 협력 없이 셀에 주어진 주어진 자원을 모두 사용하여 인접 셀간 자원 회피 스케줄링을 분산 방식으로 구현할 수 있다. 이로써 셀 경계에서의 수율 향상뿐만 아니라 시스템 전체 용량을 증대시킬 수 있

다. 이는 다음 장에서의 제안된 방식의 성능 분석을 통하여 확인할 수 있다.

IV. 성능 분석

본 절에서는 제안한 셀간 협력 스케줄링의 우수성을 검증하기 위해 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하며, overlaid 시나리오 및 directional 시나리오에서 셀간 협력 없이 joint scheduling을 적용하였을 때와의 성능을 비교하고자 한다. 시스템 레벨 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 기본적으로 3GPP Release 10 규격을 따른다⁷⁾. 세부 사항으로는 Urban Macro 환경의 하향링크에서 총 2개의 CC를 사용하였고, 각 CC는 동일한 전송 전력을 사용한다. 800MHz와 1.8GHz 대역의 2개 반송파를 집성하며, 대역폭은 각각 10MHz이다. 2 x 2 MIMO를 이용한 spatial multiplexing을 사용하였다. 각 채널은 RB 단위로 그 값을 생성하였으며, 이 때 Jakes 모델을 통해 시영역 상관관계를 반영한 후에 urban macro 환경의 cluster delay line (CDL) 모델을 적용하여 다중 경로(multi-path) 및 안테나간 공간 상관관계를 반영하였다⁸⁾. 단말은 minimum mean square estimation (MMSE) 수신기를 가정하였고, 2개의 스트림(stream)에서 발생되는 SINR 값을 하나의 effective SINR 값으로 맵핑하기 위해 RBIR (Received Bit Information Rate) 함수를 사용하였다. 단말이 겪는 shadowing 값은 CC에 관계없이 단말의 위치에 의해서만 결정된다고 가정하였다. 또한 단말은 셀 선택 시에 small-scale fading을 고려하지 않고, path-loss, 안테나 이득, 그리고 large-scale fading만을 고려한 신호세기에 근거하여 셀을 선택한다고 가정하였다. Joint scheduling 및 셀간 협력 스케줄링을 위한 moving widow의 크기는 모두 50ms로 설정 한다(즉, $t_c = 0.02$). 단말의 평균 수율 값은 각 CC가 선택한 서비스 셀이 X2 interface를 통하여 지연 없이 서로 공유되며, 또한 단말의 하향링크 트래픽이 각 서비스 기지국에 이상적으로 분배된다고 가정한다. 한편, 단말의 이동 속도는 3km/h로 가정했다. 표 1에서 본 시뮬레이션에 적용된 파라미터를 요약하였다.

본 논문에서는 제안한 방식의 성능 분석을 위해 각 CC의 SINR 분포와 단말 수율을 확인하고자 한다. 각 CC의 SINR 분포를 보는 것은 directional 시나리오에서 기존의 셀 선택 방법을 적용했을 때 SCC의 하위 5% SINR 저하를 확인하기 위한 것이다. 뿐만 아니라

표 1. 시스템 레벨 시뮬레이션을 위한 파라미터^[7,8]
Table 1. Parameters for system-level simulation^[7,8]

Cell layout	Hexagonal grid, 19 eNB wrap around, 3 sectors per eNB
Channel frequency (CC1/CC2)	800MHz/ 1.8GHz
Channel bandwidth	10MHz
Channel model	Jakes model with urban macro CDL[8]
Path loss	$128.1 + 37.6 \cdot \log_{10}(r)$ $+ 21 \cdot \log(f_c/2.0)$ (r : distance, f_c : channel frequency)
Inter-site Distance	750m
eNB power	49dBm
Noise power density	-174 dBm/Hz
Log-normal fade shadow	10dB
Channel estimation	Ideal
Control delay in scheduling & AMC	4ms
Antenna configuration	2x2 MIMO: Spatial Multiplexing
eNB antenna gain	CC1: 12dBi, CC2: 15dBi
The number of users	30 users/eNB
User noise figure	9dB
User distribution	Uniformly dropped in all eNBs
User speed	3km/h

SINR 분포가 좋아질수록 셀 용량이 증대되기 때문에 각 시나리오에서의 SINR 분포를 비교함으로써 셀 용량을 대략적으로 비교할 수 있다. 한편 directional 시나리오는 overlaid 시나리오와 달리 섹터 경계가 사라지는 효과가 생긴다. 즉, overlaid 시나리오와 달리 directional 시나리오에서는 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 2개의 CC가 모두 낮은 SINR 값을 갖는 경우가 발생하지 않음을 의미하고, 이는 overlaid 시나리오와 대비하여 하위 5% 수율의 증대를 의미한다. 하지만 각 CC의 SINR 분포를 독립적으로 보게 되면 위와 같이 단말이 실제 겪게 되는 수율은 확인이 불가능하다. 따라서 각 CC의 SINR 분포와 별개로 단말의 평균 수율 및 하위 5% 단말의 수율을 확인해야 한다.

일차적으로 각 CC의 셀 선택 방식이 어떤 영향을 끼치는지 확인하기 위하여 스케줄링의 영향을 배제하고 하나의 단말이 주파수 전 대역의 자원을 사용하는 경우, 이 때 사용하는 자원의 SINR CDF를 그림 6에서 살펴본다. 예상한 바와 같이 directional 시나리오에서 기존의 셀 선택 방식(셀간 비협력 방식)을 사용

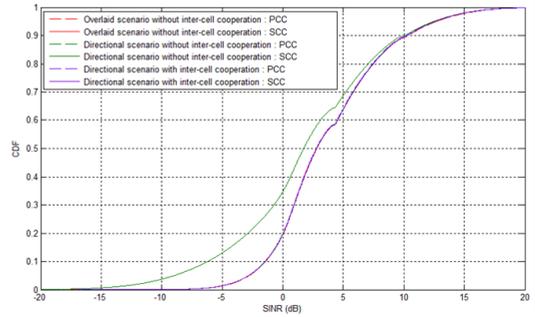


그림 6. 하나의 단말이 모든 자원을 사용했을 경우 SINR 누적분포함수 비교
Fig. 6. Cumulative distribution function (CDF) of SINR when one user uses all the resources: Comparison

하였을 경우, SCC의 SINR 분포가 overlaid 시나리오에 대비하여 크게 저하됐음을 볼 수 있다. 특히, SINR 값이 낮은 영역(즉, 하위 5% 영역)에서는 그 저하의 정도가 매우 크다. 그러나 directional 시나리오에서 제안한 셀 선택 방식(셀간 협력 방식)을 적용함으로써 이러한 문제점이 해결되는 것을 확인할 수 있다. 한편, overlaid 시나리오에서의 SINR CDF는 directional 시나리오에서 제안된 셀 선택 방식을 적용했을 때의 SINR CDF와 동일함을 알 수 있으며, 이는 셀 용량이 동일함을 의미한다. 이는 overlaid 시나리오에서 각 CC의 안테나 방향이 일치하므로 PCC와 SCC가 각각 신호 세기가 가장 좋은 기지국이 동일하고, 따라서 directional 시나리오에서 각 CC가 신호 세기가 가장 좋은 기지국을 독립적으로 선택하는 방식과 본질적으로 일치하기 때문이다.

한편, 그림 6에서와 같이 하나의 단말이 주파수의 전 대역의 자원을 사용할 경우에는 주파수 선택적 특성을 이용한 자원 스케줄링 이득을 반영하지 못한다. 셀간 협력 스케줄링에서의 주파수 선택적 특성에 따른 이득을 보여주기 위하여 full buffer 트래픽 모델에서 재전송하는 단말은 제외하고 스케줄링에 참여한 단말을 대상으로 각 단말이 할당 받은 자원에 대한 SINR 값을 제시하고자 한다. 이를 위해 RBIR 함수 값을 통해 각 단말이 할당 받은 자원에서의 SINR 값을 하나의 effective SINR 값으로 변환하였고, 이에 대한 CDF를 그림 7에 제시하였다. 예상한 바와 같이 directional 시나리오에서 셀간 협력을 하지 않은 경우에 다른 방식에 비하여 SCC의 하위 SINR 값이 낮은 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6에서의 결과와 대비하여 그 성능 저하 정도가 개선되었는데, 이는 스케줄링으로 인한 주파수 선택적 특성의 이득에 기인한 것이라고 볼 수 있다. 한편, directional 시나리오에서

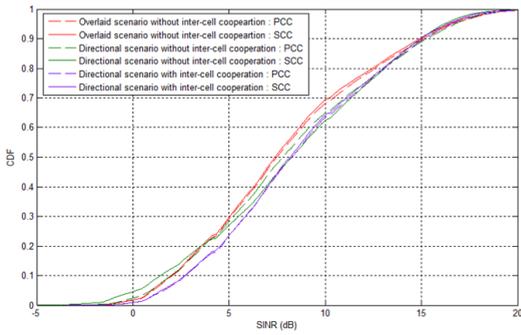


그림 7. 스케줄링 받은 자원에 대한 SINR 누적분포함수 비교
Fig. 7. Cumulative distribution function (CDF) of SINR for scheduled resources: comparison

는 overlaid 시나리오에 대비하여 그림 4(b)와 같이 주파수 선택적 특성이 나타나므로 상대적으로 SINR 값이 좋은 CC의 자원을 할당 받을 수 있고, SINR 값이 떨어지는 CC는 회피하여 사용 가능하다. 따라서 directional 시나리오에서 셀간 협력 스케줄링을 했을 경우에 overlaid 시나리오 비하여 SINR CDF의 분포가 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이는 제안하는 방식이 기존 방식과 대비하여 셀 용량이 증대하는 것을 의미한다.

제안된 방식의 성능 분석을 위해 섹터 당 일정한 평균 트래픽 부하를 가지면서 랜덤하게 패킷이 도착하는 트래픽 모델과 모든 단말에 대해서 항상 송신할 트래픽이 존재하는 full buffer 트래픽 모델에 대해서 각각 수율 성능을 분석한다. 섹터 당 제공된 평균 트래픽 부하가 낮을 경우에는 실제로 트래픽을 발생하는 단말의 수가 적기 때문에 단말이 평균적으로 사용하는 RB의 개수가 많다. 이 경우에는 스케줄링의 영향을 배제한 채 주파수 전 대역의 SINR값이 수율에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 반대로 단말에 부과된 평균 트래픽 부하가 높을 경우에는 제한된 수의 RB를 다수의 단말들이 나누어 사용해야하기 때문에 주파수 선택적 특성에 따른 스케줄링 이득을 확인할 수 있다. 그림 8과 9는 부과된 평균 트래픽 부하에 따른 단말 평균 수율 및 하위 5% 단말의 수율 성능을 보이는 그래프이다. 여기서, 패킷은 포아송 분포로 발생하며, 이때 부과된 평균 트래픽 부하는 패킷 길이와 도착률에 의해 Average offered load = packet length (bits/packet) x average packet arrival rate (packets/sec.)로 주어진다. 여기서, 패킷의 길이는 250kbytes로 가정한다. 반송파 집성에 의한 광대역화가 다중화 이득에 미치는 영향을 보기 위해 평균 수율은 각 사용자에 도착한 패킷에 대해서 자원이 할당된

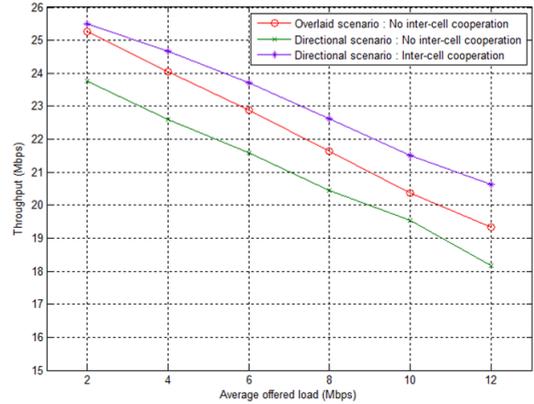


그림 8. 평균 트래픽에 따른 사용자당 평균 수율
Fig. 8. Per-user average throughput as varying the average offered load

구간에서만 측정된 것을 모든 사용자에 대해서 평균을 낸 것이다. 그림 8과 9에서 보는 바와 같이 부과된 평균 트래픽 부하가 증가하면서 사용자당 평균 수율은 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 평균 트래픽 부하가 증가하면서 각 사용자들에게 할당할 수 있는 자원의 양이 줄어들기 때문이다.

그림 8에서 부과된 평균 트래픽이 2Mbps인 지점에서는 overlaid 시나리오와 directional 시나리오에서 셀간 협력 스케줄링을 한 경우에 단말 평균 수율 값이 거의 일치하고, directional 시나리오에서 셀간 협력 스케줄링을 적용하지 않은 경우의 성능만이 떨어진다. 이는 제공된 트래픽이 낮은 지점에서는 단말이 주파수 자원의 대부분을 사용하게 되고, 따라서 그림 6에서의 해석과 동일하기 때문이다. 한편 부과된 평균 트래픽이 증가할수록 overlaid 시나리오에서의 성능과 제안된 방식의 성능 차이가 커진다. 이는 제공된 평균 트래픽이 증가하게 되면 단말 간에 자원을 나누어 쓰게 되므로 그림 7과 같이 주파수 선택적 특성에 따른 스케줄링 이득이 발생하기 때문이다.

그림 9를 보면, 제안된 방식을 통해 부과된 평균 트래픽에 관계없이 하위 5% 수율이 향상되었음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 방식이 제공된 트래픽에 관계없이 overlaid 시나리오에 대비해서 섹터가 사라지는 효과가 발생했기 때문이다. 한편, directional 시나리오에서 셀간 협력 스케줄링을 적용하지 않았을 경우에 overlaid 시나리오보다 하위 5% 수율이 저하되었음을 확인할 수 있는데, 이는 그림 6과 7에서와 같이 부과된 트래픽에 관계없이 SCC의 하위 5% SINR 값이 크게 저하되었기 때문이다.

제안한 방식의 정량적 용량 증대 효과를 확인하기

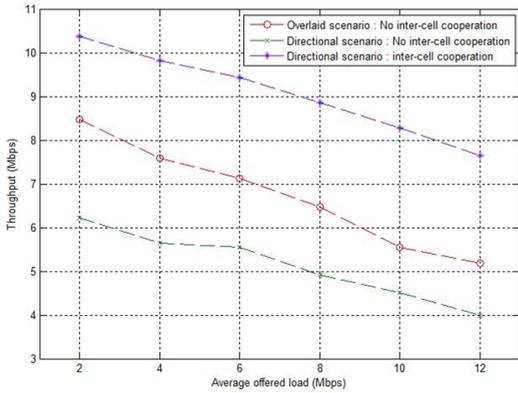


그림 9. 평균 트래픽에 따른 하위 5% 수율
Fig. 9. Per-user low 5% average throughput as varying the average offered load

위하여 모든 단말에 대해서 항상 송신할 트래픽이 존재하는 full buffer 트래픽 모델을 가정하고 단말 평균 수율 및 하위 5% 수율을 측정하였다(표 2 참조). 표 2의 결과에 따르면, directional scenario의 경우에 셀간 협력 스케줄링을 적용하였을 때 하위 5% 성능 사용자의 수율이 약 50% 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 7에서 확인한 바와 같이 제안한 방식의 단말 평균 수율이 기존 방식과 대비하여 향상 되었다.

한편, 그림 10에서는 셀간 협력 스케줄링 방식을 적용했을 경우에 하위 5% 사용자의 수율 증가에 따른 성능의 득실 관계(trade-off)가 없는지 확인하기 위하여 full buffer 모델에서 단말 수율에 따른 CDF를 살펴본다. 여기서 셀간 협력 스케줄링을 적용하였을 때 개략적으로 하위 70% 사용자의 평균 수율 분포가 기존 방식과 대비하여 증가했음을 확인할 수 있으나, 상위 10% 사용자의 평균 수율 분포가 미미하게 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 일차적으로 overlaid 시나리오

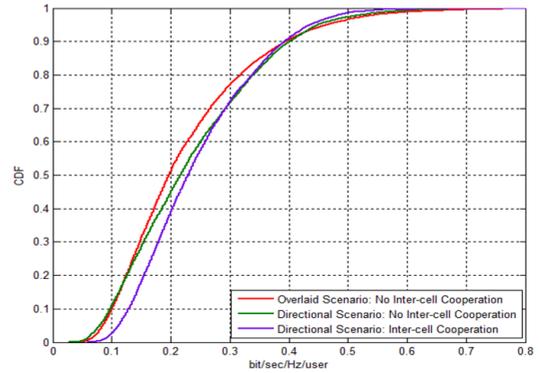


그림 10. Full buffer 트래픽 모델에서 단말의 수율 누적 분포 비교
Fig. 10. Comparison of average throughput CDF with a full buffer traffic model

에서는 단말이 2개의 CC로부터 안테나 중심 방향에 위치하는 경우가 존재하나, directional 시나리오에서는 그런 경우가 존재하지 않기 때문이다. 또한 이차적으로, 본 논문에서 제안하는 셀 선택 방법을 적용함으로써 directional 시나리오에서 하위 사용자의 SINR 값이 향상되었기 때문이다. 또한, 셀간 협력 스케줄링을 적용함으로써 순시 전송률이 증가하게 되므로 기존 방식과 대비하여 하위 사용자에게 더 많은 자원 할당 기회가 주어진 반면, 상대적으로 상위 사용자의 자원 할당 기회가 줄어들었기 때문이다. 하지만, 그림 8에서 확인하였듯이 부과된 평균 트래픽에 관계없이 셀간 협력 스케줄링을 적용할 때 단말 평균 수율이 기존 방식과 대비하여 증가한 점을 고려한다면, 총체적으로 단말의 수율 성능이 향상되었다고 결론을 내릴 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 3GPP LTE-Advanced 규격의 반송과 집성(carrier aggregation: CA) 방식을 적용할 때 고려할 수 있는 운용 시나리오와 각 시나리오 별로 성능에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 살펴보았다. 2개의 대역에서 섹터 안테나 방향이 60° 엇갈리게 배치하여 가상적으로 6개의 섹터를 형성함으로써 셀 전반에 걸친 수율 증대가 가능하고, CA를 고려한 셀간 협력 스케줄링을 통해 하나의 단말이 각 대역 별로 서로 다른 서빙 셀을 선택함으로써 셀 경계 사용자의 수율 성능을 향상 시킬 수 있었다. 본 논문에서는 CA를 고려한 셀간 협력 스케줄링에서 비례적 공정성을 확보하기 위한 메트릭을 제시하고, 이를 분산적으로 구현

표 2. Full buffer 트래픽 모델에서의 성능 비교
Table 2. Performance comparison with a full buffer traffic model

Scenario	Overlaid Scenario		Directional Scenario	
	No Inter-cell Cooperation	Inter-cell Cooperation	No Inter-cell Cooperation	Inter-cell Cooperation
Average throughput (Mbps/user)	4.61	4.97	4.80	4.97
Lowest 5% user throughput (Mbps/user)	1.46	1.94	1.37	1.94

할 수 있는 구조를 제안하였다. 이를 통해 섹터 경계가 더 이상 존재하지 않으면서, 동시에 인접 셀간 자원 회피 방식이 자연스럽게 구현되어 트래픽 부하에 관계 없이 단말 평균 수율 및 하위 5% 사용자의 수율이 향상되는 것을 확인하였다. 특히, full buffer 트래픽 모델의 경우에는 제안 방식을 적용했을 때 하위 5% 사용자의 수율이 약 50%까지 증가하는 것을 관찰하였다.

본 논문에서 논의한 바와 같이, 향후 트래픽의 급증에 따른 채널의 광대역화에 따라 이와 같이 다수의 대역을 집성하면서 기존 단일 대역에서 고려했던 자원 할당 및 인접 셀간 간섭 완화 방식이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 기존의 비례 공정 스케줄링도 2개 대역을 동시에 고려해서 수행되어야 하고, 대역 별 안테나의 배치에 따라 인접 셀간 간섭 완화 상황도 달라진다. 본 논문에서는 이러한 새로운 망 운용 환경에 적합한 망 설계 및 무선 자원 관리 기법의 하나를 제시하였으며, 향후 관련 연구에 필요한 새로운 이슈를 도출하였다는 점에서 의의가 있다. 한편, 향후의 연구에서는 본 논문에서 제안하는 분산 방식의 셀간 협력 스케줄링을 위해 협력 셀간에 사용자 데이터를 효율적으로 분배하고 동기화하는 방안이 고려되어야 할 것이다.

References

[1] J. Wannstrom, *LTE-Advanced* (June, 2013), Retrieved Dec., 5, 2013, from <http://www.3gpp.org/LTE-Advanced/>.

[2] 3GPP TS 36.300 v10.11.0, *3rd Generation partnership project; Technical Specification Group Radio Access Network; E-UTRA and E-UTRAN; Overall Description; stage 2* (Release 10), Sept. 2013.

[3] 3GPP TS 36.331 v10.11.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; E-UTRA; Radio Resource Control; Protocol specification* (Release 10), Sept. 2013.

[4] G. Song and Y. G. Li, "Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part 2 : Algorithm development," *IEEE Trans. wirel. commun.*, vol. 4, no. 2, Mar. 2005.

[5] R. T. Rockafellar, *Convex Analysis*, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1970.

[6] Jin W. Kim and Chung G. Kang, "Inter-cell coordinated beamforming technologies to improve the cellular bandwidth efficiency," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 30, no. 4, pp. 61-69, Apr. 2013.

[7] 3GPP TR 36.942 v10.3.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; E-UTRA; Radio Frequency System Scenarios*(Release 10), Jul. 2012.

[8] Y. J. Bultitude and T. Rautiainen. "IST-4-027756 WINNER II D1.1.2V1.2 WINNER II Channel Models," Sept. 2007.

양 찬 석 (Chan S. Yang)



2012년 8월 : 고려대학교 전기
전자전파공학부 학사
2012년 9월~현재 : 고려대학교
전기전자전파공학부 석사과정
<관심분야> 무선통신 시스템

조 구 민 (Kumin Cho)



2009년 8월 : 명지대학교 통신
공학과 학사
2010년 3월~현재 : 고려대학교 전
기전자전파공학과 석박사통
합과정
<관심분야> 무선통신 시스템

류 탁 기 (Takki Yu)



1999년 : 연세대학교 전자공학과 공학사
2001년 : 연세대학교 전기전자공학과 공학 석사
2006년 : 연세대학교 전기전자공학과 공학 박사
2006년~2009년 : 삼성전자 통신(DMC) 연구소 책임 연구원

2009년~2010년 : 미국 Stanford University 연구원
2010년~현재 : SK 텔레콤 Network 기술원 매니저
<관심분야> 이동통신 시스템, LTE-A 및 5G 시스템, 무선망 가상화/지능화, 간섭제어 및 통신 신호처리

강 총 구 (Chung G. Kang)



1987년 6월 : Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사
1993년 3월 : Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사
1992년 7월~1993년 6월 : (미) Aerospace Corp. 연구원

1993년 3월~1994년 2월 : (미) Rockwell International 연구원
2000년 9월~2001년 8월 : (미) Center for Wireless Communication, UCSD 방문 교수
1994년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부 교수
2005년 1월~2005년 12월 : 한국통신학회 이동통신연구회 위원장
2006년 1월~현재 : 한국통신학회 상임이사/학술사업 부회장
<관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용 서비스