

Hybrid Division Duplex 시스템을 위한 통합 무선 자원관리 기법

준회원 김 필근*, 정회원 강 충구*

Unified Radio Resource Management for Hybrid Division Duplex System

Pil-geun Kim* Associate Member, Chung-gu Kang* Regular Member

요 약

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템에서 고려할 수 있는 새로운 형태의 채널 이중화를 위한 Hybrid Division Duplex (HDD) 방식의 개념과 구현 이슈를 살펴보고, 이에 따른 통합 무선 자원관리 기법을 제안한다. HDD는 TDD와 FDD의 장점을 동시에 수용하며, 멀티미디어 서비스의 상하향 비대칭적 트래픽 특성에 따라 나타나는 인접 셀 간 상호 간섭을 효과적으로 제어할 수 있는 구조를 갖는다. HDD는 각각 TDD와 FDD로 동작하는 2개의 대역을 이용하며, 이때 하향링크는 TDD 모드로만 동작을 하고, 상향링크는 단말의 위치에 따라 TDD 모드 또는 FDD 모드로 동작할 수 있다. 따라서 HDD 방식에서는 상향링크의 이중화 모드와 비대칭적 멀티미디어 서비스에 따른 상 하향 링크의 비율을 결정하고, 이에 따른 상호 간섭을 완화하기 위한 통합적 무선 자원관리 기법이 요구된다. 본 논문은 HDD 시스템의 효율적인 운용을 위한 통합 자원관리 기법으로서 인접 셀 간 간섭을 최소화 하면서, TDD 대역 자원을 효율적으로 사용함으로써 시스템의 효율성을 극대화할 수 있는 분산적 적응 제어 기법을 제시한다.

Key Words : Hybrid Division Duplex, Radio Resource Management

ABSTRACT

In this paper, we first review a concept of hybrid division duplexing (HDD) scheme, which has been proposed as a new type of duplexing scheme useful for a next generation mobile communication system, and its implementation issues, including the unified radio resource management for HDD scheme. The HDD scheme maintains the advantages of both TDD and FDD at the same time while providing a useful structure to control the inter-cell interference, caused by an asymmetric traffic load of multimedia services over uplink and downlink in the TDD scheme. Employing two frequency bands, one for TDD scheme and the other for FDD scheme, uplink is operating under the TDD scheme only, while downlink is operating under the TDD or FDD scheme, depending on the location of mobile station. In the HDD scheme, therefore, it must determine a type of duplexing scheme to employ in the downlink and furthermore, a ratio of uplink and downlink duration to meet a given traffic load of asymmetric service, which requires some unified radio resource management for handling the subsequent inter-cell interference. In this paper, we propose a distributed adaptive control approach as a means of unified radio resource management for a HDD system that maximizes the overall system efficiency by fully utilizing the resource in TDD band, while minimizing the inter-cell interference.

※ 본 연구는 고려대학교 특별연구비와 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: R01-2003-000-10155-0(2005))지원으로 수행되었습니다.

* 고려대학교 전파공학과 무선정보시스템공학 연구실 (kknife@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-06-255, 접수일자 : 2006년 6월 1일, 최종논문접수일자 : 2006년 11월 9일

I. 서론

최근에 차세대 이동통신 시스템을 위한 다양한 형태의 이중화 방식이 제안된 바 있다^{[1][2][3]}. 이들 방식들은 기존의 TDD 및 FDD 이중화 방식의 장단점을 접목하여 주파수 효율성을 극대화하고 상하향 링크간의 비대칭적 멀티미디어 서비스를 지원하기 위한 구조를 가진다.

[2]는 기존의 FDD와 같이 상하향 링크를 위해서로 다른 주파수 대역을 사용하며, 일정 주기마다 상하향 링크 대역을 번갈아 가면서 사용한다. 이 방식은 일정 주기마다 전체의 주파수 대역을 모두 사용하기 때문에 TDD 방식의 특징을 가지며, 또한 항상 2개의 주파수 대역이 활성화되기 때문에 FDD 방식의 특성을 동시에 갖기도 한다. 그러나 2개의 주파수 대역을 고정 할당하기 때문에 비대칭적 트래픽 특성을 유연하게 수용할 수 없는 단점이 있다.

한편, [3]은 높은 전송률을 보장하기 위한 wide-band (WB) 스펙트럼 블록과 단말의 전력 소모 문제를 해결하기 위한 narrow-band (NB) 스펙트럼 블록을 혼용하는 구조이다. 기존의 FDD와 같이 2개의 주파수 대역을 사용하며, 각각의 주파수 대역에서 TDD 형태로 시분할하여 상하향 링크를 지원한다. 즉, 상하향 링크를 위해 총 4개의 자원 영역이 존재할 수 있다. 이 방식은 각 주파수 대역 별로 충분한 비대칭적 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있으나, 기존의 TDD 이중화 방식에서 나타나는 셀 간의 동일채널 간섭(co-channel interference: CCI) 문제가 상존하고 있다. 즉, 이는 각 셀마다 상하향 구간이 상이할 때 이들이 겹치는 구간에서 단말과 기지국에서 발생하는 간섭 문제이다. 또한 WB/NB 스펙트럼 블록이 시분할 되어 사용되기 때문에 FDD를 연속적으로 지원할 수 없는 단점이 있다.

[1]의 경우에는 하나의 시스템에서 TDD/FDD 계층적 셀 구조를 유지하는 Hybrid Division Duplex (HDD) 방식을 제안하였다. HDD는 TDD와 FDD의 장점을 수용하여 하나의 시스템에서 TDD와 FDD를 번갈아 가면서 운용된다. TDD-FDD 이중 모드(overlay) 시스템과 비교하면, HDD 기법은 하나의 시스템에서 운용되기 때문에 수직적 핸드오버(vertical handover)에 따른 추가적인 메시지 전송이 필요 없고, 기반 구조 구축(Infrastructure deployment) 비용을 줄일 수는 장점이 있다. 또한 HDD는 TDD 구조에서 비대칭적 멀티미디어 서비스를 지원할 경우 발생하는 인접 셀 간 CCI 문제를 완화할 수 있는

구조를 갖는다. 그러나 이와 같은 HDD 시스템의 장점에도 불구하고, 이를 실용화하기 위하여 단말의 분포와 트래픽 부하 등이 지속적으로 변하는 상황에서 TDD와 FDD 동작을 총체적으로 제어할 수 있는 구체적인 통합 자원 관리 방안이 지금까지 제시된 바가 없다. 본 논문에서는 HDD 구조에서 효율적으로 비대칭적 멀티미디어 서비스를 지원하고 동일 채널 간섭 문제를 고려한 자원 관리 기법을 제안하며, 이를 통해 HDD 기반 시스템의 성능을 극대화할 수 있는 구체적인 접근 방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 HDD 방식의 구조 및 동일채널간섭 완화 메커니즘을 설명한다. 3장에서는 HDD 방식에 적용될 수 있는 통합 자원관리 기법에 대해 설명하고, 4장에서는 제안된 알고리즘에 대한 시스템 레벨 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. HDD 시스템 구조

2.1 주파수 할당 및 셀 구조

HDD는 각각 TDD와 FDD로 동작하는 2개의 대역을 이용하며, 이때 하향링크는 TDD 모드로만 동작을 하고, 상향링크는 단말의 위치에 따라 TDD 모드 또는 FDD 모드로 동작한다. HDD 방식의 주파수할당 구조는 그림 1(a)와 같다. 여기서, t-band는 TDD로 동작하는 상하향 링크(TDD-DL/TDD-UL)를 위한 대역이며, f-band는 FDD로 동작하는 상향링크(FDD-UL)를 위한 대역이다. 일반적으로 광대역 이동 인터넷엑세스를 고려한 멀티미디어 서비스의 하향 및 상향링크간의 비대칭적인 트래픽 부하에 따라 하향링크를 위해 더 많은 주파수 대역을 필요로 하기 때문에^[4] HDD 방식에서 t-band는 f-band보다 더 커야 한다.

HDD 방식의 주파수 할당을 고려하여, 각 셀을 두 개의 영역(A, B)으로 나누고, 각 영역별로 서로 다른 유형의 이중화 모드를 사용한다. 그림 1(b)는 HDD 방식을 고려한 셀 구조를 나타낸다. A 영역(inner zone)에서는 t-band를 이용하여 상하향 링크의 통신이 이루어진다. 한편, B 영역(outer zone)에서는 상향과 하향링크의 통신이 각각 f-band와 t-band를 통해 이루어진다.

2.2 동일채널 간섭 완화 메커니즘

다중 셀 환경에서 비대칭적 멀티미디어 서비스를 지원할 때 TDD를 이용할 경우 셀마다 상하향 구간

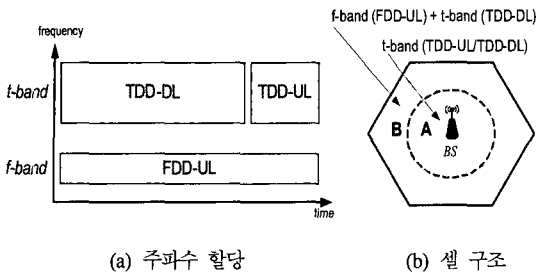


그림 1. HDD 시스템 구조

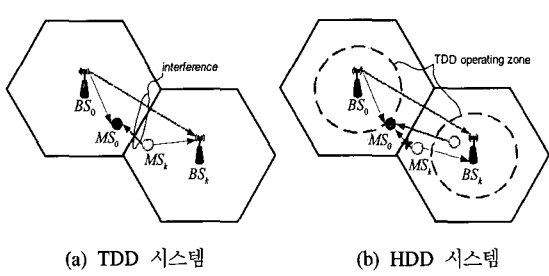


그림 2. TDD/HDD 시스템의 CTS 간섭

에서 시분할 슬롯(time slot)의 비율이 다를 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 각 셀마다 상이한 비대칭성으로 인하여 상하향 구간이 겹칠 수 있으며, 이로 인하여 인접 셀 간 간섭이 발생할 수 있다. 이와 같이 TDD 방식에서 셀 간 상호 간섭이 발생하는 구간을 CTS(Cross Time Slot)라고 부르고, 이에 해당하는 간섭을 CTS 간섭이라고 부른다. 그림 2(a)는 BS₀의 셀이 하향링크로 전송하고 BS_k의 셀이 상향링크로 전송할 때의 상황을 예시한 것이다. 이때 MS₀의 하향링크 수신은 MS_k의 상향링크 전송으로 인하여 CTS 간섭을 겪게 되고, BS_k의 상향링크 수신은 BS₀의 하향링크 송신으로 인하여 CTS 간섭을 겪게 된다^[5].

HDD 방식은 앞서 살펴본 TDD 방식에서 발생할 수 있는 CTS 간섭을 극복하는 구조를 지닌다. 그림 2(b)는 HDD 구조에서 CTS 간섭을 완화시키는 메커니즘을 예시한 것이다. BS₀가 하향링크로 송신하고 BS_k가 상향링크로 수신할 때, BS_k의 outer zone에 속한 단말은 FDD 모드로 동작하기 때문에 BS₀에서 수신하는 단말에게 간섭을 미치지 않는다. 또한 BS_k의 inner zone에서 송신하는 단말은 BS₀에서 수신하는 단말에게 CTS 간섭을 미칠 수 있지만, outer zone에 의해 공간적으로 분리되기 때문에 TDD 시스템에서 발생할 수 있는 CTS 간섭을 완화시킬 수 있다.

III. 통합 무선 자원 관리

3.1 자원 관리 시나리오 및 문제 정의

HDD 시스템의 운용을 위해서는 각 단말에 적용될 상향링크의 이중화 모드와 t-band에서 비대칭적 멀티미디어 서비스의 지원을 위한 상하향 링크의 비율을 각각 결정해야 한다. 다중 셀 환경에서 셀마다 상이한 상하향 트래픽 특성을 고려할 때, 시스템

전체의 수율을 극대화하기 위해서는 다수의 변수가 연루된 복합적인 최적화 문제로 정식화된다.

본 시스템에 전체 N_c 개의 셀이 있다고 가정하자. 셀 j 의 i 번째 단말의 상하향 링크에서 요구되는 트래픽 부하를 각각 $\lambda_{up}^{(i,j)}$ 및 $\lambda_{down}^{(i,j)}$ 로 나타내고 자원 할당 시점에 셀 j 에서 TDD-UL, FDD-UL, TDD-DL로 동작하는 각 단말의 집합을 각각 $\mathbf{U}_j^{(1)}$, $\mathbf{U}_j^{(2)}$, $\mathbf{U}_j^{(3)}$ 라 하자. 또한, 셀 j 에서 TDD 프레임의 상하향 구간 길이를 각각 $T_{up}^{(j)}$ 와 $T_{down}^{(j)}$ 라고 하면 TDD의 상하향 경계를 결정하는 두 구간의 비율을 b_j 로 나타내고, 이는 $b_j = T_{down}^{(j)} / T_{up}^{(j)}$ 로 정의된다.

한편, 셀 j 에서 단말의 평균수율은 모든 셀의 상하향 구간 비율과 어떤 단말이 상향링크에서 어떤 이중화 모드를 적용하느냐에 따라 달라지므로, i 번째 단말의 평균 수율은 $\{b_j\}_{j=1}^{N_c}$ 와 $\{(\mathbf{U}_j^{(1)}, \mathbf{U}_j^{(2)}, \mathbf{U}_j^{(3)})\}_{j=1}^{N_c}$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 표기의 편의상, 모든 셀에서의 상하향 구간 비율을 $\mathbf{b} \triangleq (b_1, b_2, \dots, b_{N_c})$ 와 같이 하나의 벡터로 나타내고, 모든 셀에서 전송 모드에 따라 구분된 사용자의 집합을 $\mathbf{U} \triangleq \{(\mathbf{U}_j^{(1)}, \mathbf{U}_j^{(2)}, \mathbf{U}_j^{(3)})\}_{j=1}^{N_c}$ 로 정의하면 셀 j 의 i 번째 단말의 평균 수율은 \mathbf{b} 와 \mathbf{U} 의 함수로서 $\bar{R}_i^j(\mathbf{b}, \mathbf{U})$ 이라고 나타낼 수 있다.

한편, 모든 단말의 채널 상태를 고려한 패킷 스케줄링에 의해 다중 사용자 다이버시티 이득이 정해지며, 이에 따라 각 사용자의 평균 수율은 패킷 스케줄링 방식에 따라 달라질 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 접근의 단순화를 위해 패킷 스케줄링을 별도의 문제로 분리한다. 즉, 각 셀에서의 상하향 구간 비율과 단말의 전송 모드에 따라 시스템 전체

의 수율을 극대화하는 문제와 패킷 스케줄링 알고리즘에 의해 수율을 극대화하는 문제로 구분한다. 트래픽 부하 $\{\lambda_{up}^{(i,j)}\}$ 및 $\{\lambda_{down}^{(i,j)}\}$ 가 주어졌을 때 시스템 전체의 수율을 극대화하기 위해 상하향 구간 비율과 단말의 전송 모드를 결정하는 문제는 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$\max_{\{b_j, i, (U_j^{(1)}, U_j^{(2)}), j\}_{j=1}^{N_c}} \left[\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i \in U_j^{(1)} \cup U_j^{(2)} \cup U_j^{(3)}} \bar{R}_j(\mathbf{b}, \mathbf{U}) \right] \quad (1)$$

(1)에 의해 상하향 구간 비율과 단말의 전송 모드가 결정되면, 이 주어진 조건에서 단말의 채널상태를 고려한 패킷 스케줄링 알고리즘이 추가적으로 수행되는 것을 가정한다. 실제로는 (1)의 문제와 패킷 스케줄링 문제가 동시에 고려되어야 하나, 본 논문에서는 (1)의 문제에만 초점을 맞추도록 한다. (1)의 최적화 문제는 모든 셀의 TDD 프레임 상하향 경계를 결정하기 위한 변수 $\{b_j\}_{j=1}^{N_c}$ 와 모든 단말에 적용 가능한 이중화 모드의 조합에 대해서 목적 함수를 최대로 하는 결정변수 값을 결정해야 하므로 전체단말의 수에 따라 복잡도는 기하급수적으로 증가하게 된다.

실제로 (1)의 문제를 풀기 위해서는 모든 단말의 위치를 정확하게 알아야 하고, 또한 중앙 집중적인 제어가 요구되므로 실제 상황에서는 이를 구현하는 것은 매우 비현실적이다. 실제 상황에서 모든 기지국들이 분산적으로 (1)의 문제를 풀기 위해서 단말의 상대적인 위치를 반영할 수 있는 척도로서 각 단말에서 측정할 수 있는 신호 대 간섭비(Carrier to Interference and Noise Ratio: CINR)를 고려할 수 있다. 모든 단말들은 링크 적응적 송수신을 위해 일정한 주기로 CINR 값을 측정하여 채널 상태를 기지국으로 통보하기 때문에, 이 정보를 이용하여 단말들의 상향링크 모드(FDD-UL 또는 TDD-UL)를 결정할 수 있다. 즉, 단말이 측정한 평균 CINR 값이 기지국과의 상대적인 거리를 반영할 수 있으므로, 상향링크의 이중화 모드선택을 위한 기준이 될 수 있다. 예를 들어, CINR 값이 사전에 결정된 임계값보다 클 경우에는 inner zone에 있다고 판단하여 TDD-UL 모드로 동작하고, 그렇지 않을 경우에는 outer zone에 있다고 판단하여 FDD-UL 모드로 동작한다. 이때 셀 j에서의 CINR 임계값을 $CINR_m^{(j)}$ 라고 하고, 이 셀의 i번째 단말이 측정한

평균 CINR을 $CINR_{ij}$ 라고 하자. 이에 따라 상향링크에 대해 다음과 같이 inner zone과 outer zone에 속하는 단말의 집합을 각각 정의할 수 있다.

$$\mathbf{V}_j^{(1)} \triangleq \{i \mid CINR_{ij} \geq CINR_m^{(j)}\} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_j^{(2)} \triangleq \{i \mid CINR_{ij} < CINR_m^{(j)}\} \quad (3)$$

따라서, $\{CINR_m^{(j)}\}$ 에 의해 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 과 $\mathbf{V}_j^{(2)}$ 가 정해지며, 이에 따라 TDD 상향링크 구간과 FDD 구간에 부과되는 부하가 달라진다. 나아가, 이들 각 구간에 부과되는 부하에 따라 TDD에서의 상하향 구간의 비율 $\{b_j\}$ 가 결정된다. 이에 따라 CTS 간섭이 수율 성능에 미치는 정도가 달라질 것이며, 이는 다시 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 과 $\mathbf{V}_j^{(2)}$ 를 결정하는데 영향을 미치게 된다. 결국 이와 같은 상호 작용을 고려할 때 b_j 는 $\{CINR_m^{(j)}\}$ 의 함수로 볼 수 있으며, 이에 따라 i번째 단말의 평균 수율을 $\bar{R}_j(\mathbf{b}(CINR_m^{(1)}, CINR_m^{(2)}, \dots, CINR_m^{(N_c)}))$ 로 나타낼 수 있다. 따라서, (1)의 최적화 문제는 다음과 같이 새로이 정식화될 수 있다.

$$\max_{\{CINR_m^{(j)}\}} \left[\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i \in \mathbf{V}_j^{(1)} \cup \mathbf{V}_j^{(2)} \cup \mathbf{V}_j^{(3)}} \bar{R}_j(\mathbf{b}(CINR_m^{(1)}, CINR_m^{(2)}, \dots, CINR_m^{(N_c)})) \right] \quad (4)$$

(4)의 최적화 문제를 풀기 위한 부최적 접근 방법 중의 하나는 모든 셀에 걸쳐 상향링크 단말의 이중화 모드를 결정하기 위해 필요한 CINR 임계값을 결정하는 문제와 TDD 상하향 구간의 비율을 결정하는 문제로 분리하여 이들을 순차 반복적으로 풀어나갈 수 있다. 즉, $\{CINR_m^{(j)}\}$ 이 주어졌을 때 TDD 상하향 구간의 비율을 다음과 같이 각 셀에서 요구되는 하향링크와 상향링크 트래픽 부하의 비율로 결정할 수 있다.

$$b_j = \sum_{i \in \mathbf{V}_j^{(2)}} \lambda_{down}^{(i,j)} / \sum_{i \in \mathbf{V}_j^{(1)}} \lambda_{up}^{(i,j)} \quad (5)$$

(5)에서 결정된 $\{b_j\}$ 를 가지고 (4)를 풀 수 있으며, 이를 통해 결정된 $\{CINR_m^{(j)}\}$ 를 가지고 다시 (4)를 푸는 과정을 순차적으로 반복할 수 있다. 그러나, 트래픽 부하와 단말의 분포가 지속적으로 변동

하는 실제 상황에서는 (4)의 복잡도를 고려할 때 이와 같은 부최적의 접근 방법조차도 구현이 어렵고, 또한 중앙에서 모든 계산이 이루어져야 하는 중앙 집중적인 제어 구조가 요구되므로 현실성이 없다고 봐야 한다. 따라서, 다음에서는 (4)의 문제를 직접 풀지 않고 실제 상황에 적용 가능한 형태의 분산적 적응 제어 기법을 통해 (4)의 최적화를 간접적으로 실현할 수 있는 방안을 논의한다.

3.2 CINR 임계값의 효과

본 소절에서는 (4)의 정식화와 연계해서 CINR 임계값이 시스템의 성능에 미치는 효과를 살펴보고자 한다. CINR 임계값이 너무 크게 설정되었을 경우 inner zone은 작아지는 반면, outer zone의 증가로 인해 HDD 시스템은 FDD 시스템처럼 동작하게 된다. 이때 CTS 간섭은 줄어들지만, 대부분의 상향링크 단말을 FDD-UL 모드로 서비스하기 때문에 상향링크 단말의 불능비율(outage rate)이 커지게 된다.

한편, CINR 임계값이 너무 작게 설정되었을 경우에는 HDD 시스템은 TDD 시스템처럼 동작하게 된다. 즉, inner zone의 영역이 커지게 되어, 대부분의 상향링크 단말이 t-band 에서 할당이 이루어진다. HDD 시스템은 비대칭 멀티미디어 서비스를 지원할 때 나타나는 CTS 간섭을 줄이는 특징을 가지는 구조이지만 완전히 CTS 간섭을 해결하지는 못한다. 특히, inner zone이 outer zone 보다 훨씬 클 경우에는 TDD 시스템과 유사한 CTS 간섭을 야기한다. 따라서 CINR 임계값이 너무 작을 경우에는 CTS 간섭의 영향이 커지게 되어 시스템의 성능 열화가 발생하게 된다.

따라서 CINR 임계값은 (4)의 정식화에 따라 각 셀마다의 트래픽 요구 사항을 만족시키고 CTS 간섭을 최소화하도록 적절하게 선택되어야 한다. 그러나 다중 셀 환경에서 셀마다 주어진 트래픽 요구 사항을 만족시키고 CTS 간섭을 최소화하는 최적의 CINR 임계값을 찾는 것은 복잡도가 상당히 크며, 인접 셀의 CINR 임계값에 따른 간섭의 변화로 인해 CINR 임계값을 결정하는 것은 쉽지 않다. 특히, 중앙 집중적인 제어 구조에 의존하지 않고, 각 기지국들의 독립적인 분산 제어가 가능해야만 실제 상황에서 적용이 가능할 것이다. 본 논문에서는 각 기지국들이 독립적인 네트워크의 상황에 따라 지역적인 상호협력에 의해 CINR 임계값을 적응적으로 추적할 수 있는 분산적 적응 제어 기법을 제안하며, 이는 HDD 시스템을 고려한 실용적 통합 무선자원

제어 기법으로 활용될 수 있다.

3.3 CINR 임계값의 분산적 적응제어 기법

CINR 임계값을 제어하는 첫 번째 기준은 인접 셀의 간섭 정보를 이용하는 것이다. 그림 3은 CINR 임계값 제어에 따른 한 가지 상황을 예시한 것이다. 그림 3(a)에서 BS_0 와 MS_0^{UL} 는 각각 기준셀(Target cell)의 기지국과 상향링크 단말이고, BS_k 와 MS_k^{DL} 는 각각 k번째 셀의 기지국과 하향링크 단말이다. 기준셀은 TDD-UL이 활성화 되어 있고, 셀 k는 TDD-DL이 활성화 되어있다고 가정한다. 이 때 기준셀의 MS_0^{UL} 는 인접 셀인 셀 k의 MS_k^{DL} 에게 상향링크 구간에서 CTS 간섭을 야기하게 된다. 만약 MS_k^{DL} 에서 측정되는 CINR 값이 시스템에서 요구하는 $CINR_{target}$ 을 만족하지 못하는 경우(즉, $CINR < CINR_{target}$ 일 경우), MS_k^{DL} 는 BS_k 에게 CTS 간섭에 대해 보고하게 된다. 보고를 받은 BS_k 는 BS_0 에게 CTS 간섭을 줄일 것을 요청하게 되며, BS_0 는 그림 3(b)와 같이 CINR 임계값을 증가시켜 TDD-UL로 동작하는 inner zone을 줄인다. 따라서 MS_0^{UL} 는 FDD-UL 모드로 동작하게 되어 셀 k에 있는 MS_k^{DL} 에 미치는 CTS 간섭을 줄일 수 있다.

이와 같은 과정을 구현하기 위해 기준셀의 CINR 임계값을 다음과 같이 제어한다.

$$\Delta CINR_{inner}^{UL} = \begin{cases} +\delta & \text{if } U \leq D_{th} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

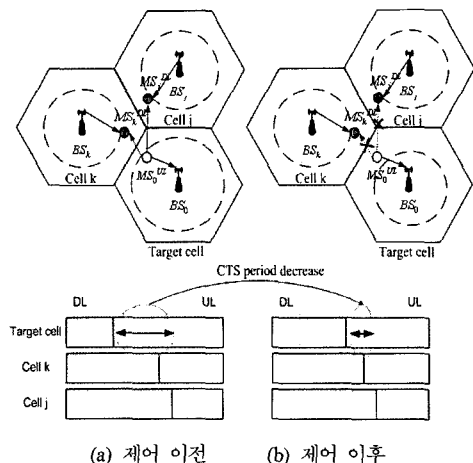


그림 3. CINR 임계값의 제어: 기준셀이 상향링크 CTS 간섭을 미칠 경우

여기서 δ 는 CINR 임계값의 증감 단위이고, U 는 0과 1사이의 균일한 분포를 갖는 확률변수이다. 또한, (6)의 D_{th} 는 다음과 같이 정의되는 제어 기준값이다.

$$D_{th} = \max_{k \in S} (I_k \cdot \omega_k) \quad (7)$$

S 는 기준셀로부터 간섭을 받는 셀들의 집합이며, I_k 는 셀 k 가 느끼는 간섭 정도를 나타내는 값으로 CTS 구간에서 $CINR_{target}$ 을 만족하지 못하는 비율로 정의된다. ω_k 는 기준셀이 인접 셀 k 에 간섭을 미치는 정도를 나타내는 값으로서, 기준셀과 인접한 셀 k 간 CTS 구간의 비율을 나타낸다. 즉, 기준셀의 임계값은 인접 셀에 미치는 간섭량 중에서 가장 큰 값을 기준으로 간섭을 주는 정도(D_{th})에 따라 식 (6)과 같이 제어된다.

반면, 그림 4와 같이 기준셀에서 TDD-DL이 활성화되어 있고 인접 셀이 TDD-UL이 활성화되어 있을 경우에는 다음과 같이 CINR 임계값을 줄임으로써 CTS 간섭을 최소화한다.

$$\Delta CINR_{inter}^{DL} = \begin{cases} -\delta, & U \leq D_{th} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

기준셀은 인접 셀에 미치는 상방향 CTS 간섭 정도에 따라 최종적으로 (9)식을 통해 CINR 임계값의 증감 단위를 결정한다.

$$\Delta CINR_{inter} = \Delta CINR_{inter}^{UL} + \Delta CINR_{inter}^{DL} \quad (9)$$

인접 셀 간섭 측면에서 보면 CINR 임계값은

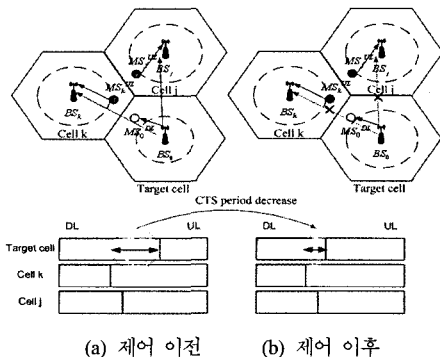


그림 4. CINR 임계값의 제어: 기준셀이 하향링크 CTS 간섭을 미칠 경우

CTS 구간을 최소화하는 방향으로 제어된다. 즉, 상향 CTS 간섭을 인접 셀에 미칠 경우(인접 셀보다 TDD 하향링크 구간이 작은 경우) CINR 임계값의 증가를 통해 TDD 하향링크 구간을 늘리고, 반면 하향 CTS 간섭을 인접 셀에 미칠 경우(인접 셀보다 TDD 하향링크 구간이 큰 경우) CINR 임계값의 감소를 통해 TDD 하향링크 구간을 줄이게 되어 결국 CTS 구간이 최소화 되도록 조절되는 것이다. 이 알고리즘을 통해 CTS 간섭량을 최소화 할 수는 있지만 각 셀마다 상이한 상하향 트래픽 부하를 만족시키지 못하게 된다. 즉, 트래픽의 비대칭적 특성을 반영하지 못하게 된다. 따라서 각 셀마다 주어지는 비대칭적 트래픽 요구 사항을 최대화하도록 임계값을 제어하는 과정이 추가로 필요하다. CINR 임계값을 제어하는 두 번째 기준으로 각 셀 내에서 무선 자원의 이용률(utilization)을 고려한 상하향 링크간의 load balancing을 적용한다. 하향링크와 상향링크에서의 순시적인 자원 이용률을 각각 ρ^{DL} 과 ρ^{UL} 로 나타내고, 이를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\rho^{(DL \text{ or } UL)} = \lambda_s^{(DL \text{ or } UL)} / \lambda_r^{(DL \text{ or } UL)} \quad (10)$$

여기서, λ_s 와 λ_r 는 각각 해당 링크 트래픽의 실제 서비스된 부하와 요구 부하를 나타낸다. (10)의 정의에 따라 각 셀 내에서의 CINR 임계값을 다음과 같이 제어한다.

$$\Delta CINR_{intra} = \begin{cases} -\delta & \text{if } \rho^{DL} > \rho^{UL} \text{ and } U \leq 1 \cdot \frac{\rho^{UL}}{\rho^{DL}} \\ +\delta & \text{if } \rho^{DL} < \rho^{UL} \text{ and } U \leq 1 \cdot \frac{\rho^{DL}}{\rho^{UL}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 δ 는 CINR 임계값의 증감 단위이고, U 는 0과 1사이의 균일한 분포를 갖는 확률변수이다. 즉, (11)의 과정은 주어진 상하향 링크 트래픽의 비율에서 과도하게 벗어나지 않도록 t-band의 상하향링크 구간의 비율을 제어하기 위한 것이다.

기지국은 일정한 주기를 가지고 (9)와 (11)의 CINR 임계값 제어 알고리즘을 적용하며, 이로부터 결정된 두 가지 결과를 이용하여 최종적으로 다음과 같이 새로운 CINR 임계값이 갱신된다.

$$CINR_{th} \leftarrow CINR_{th} + \Delta CINR_{inter} + \Delta CINR_{intra} \quad (12)$$

$\Delta CINR_{inter}$ 는 인접 셀 간섭 정도에 따라 CTS 구간

표 1. 시스템 파라미터

Parameter		HDD System
Carrier Frequency		5 GHz
System Bandwidth		TDD(DL/UL): 20MHz, FDD (UL): 5 MHz
Modulation Scheme		TDD: AMC, FDD-UL: Multi-code CDMA
Multiple Access		TDD: OFDMA, FDD-UL: CDMA
Frame Length		5 ms
OFDM	FFT Size	2048
	Sampling Frequency	20MHz
	Subcarrier Spacing	9.765625kHz
	OFDM symbol length	102.4 us
	Number of subchannels per slot	DL/UL: 32:96
	Transmit power at BS	4W/20MHz
Maximum Transmit Power at MS		200mW/20MHz
CDMA	Chip Rate	3.84Mcps
	Spreading Factor	32 (Fixed)
	Maximum Transmit power at MS	200mW/5MHz
MS speed		3km/h
Traffic Model		Ethernet traffic model
Scheduling Scheme		PF scheduling
Path Loss Model		COST-231
Standard Deviation for Shadow Fading		10dB
Fast Fading		Jakes model

을 줄이는 방향으로 제어되며, $\Delta CINR_{min}$ 는 비대칭적 트래픽 특성에 따른 상하향 자원 할당의 균형을 극대화하는 방향으로 제어된다. 즉, 이 두 가지 기준에 의해 비대칭적 트래픽 특성을 최대한 반영하면서 그로 인해 나타나는 CTS 간섭을 최소화하도록 CINR 임계값이 적응적으로 제어된다.

IV. 제안 기법의 실험 및 결과 분석

4.1 시스템 모델

성능 분석을 위한 다중 액세스 방법으로 t-band는 높은 주파수 효율성과 인접 셀 간섭을 완화하기 위해 Frequency Hopping Orthogonal Frequency Division Multiple Access (FH-OFDMA) 방식을 적용하고, f-band는 인접 셀 간섭에 상대적으로 강한 CDMA 방식을 적용하여 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행한다. 다중 셀 환경에서 제안된 자원 관리 알고리즘에 대한 성능을 분석하기 위해 각 셀은 이 상적인 육각형 셀로 모델링한다. 기준셀을 중심으로 모두 2개 층(tier)까지 고려하며, 이에 따라 총 19개의 셀을 동시에 고려하게 된다. 이때 셀 경계점 영향을 제거하고 실제 상황과 유사한 간섭 수준을 반영하기 위해 셀들이 3차원 공간에서 서로 연결된 wrap-around 구조를 적용한다. 비대칭적 멀티미디어 서비스를 위해 상향링크 트래픽이 우세한 셀과 하향링크 트래픽이 우세한 셀의 비율을 50%의 확률

로 설정하였으며, 각 단말의 상하향 트래픽양을 평균 500Kbps 및 100Kbps의 트래픽 기준으로 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용한 주요 시스템 변수는 표 1과 같다^{[6][7]}.

4.2 실험 및 결과 분석

모든 셀이 동일한 CINR 임계값을 이용했을 때의 결과를 기준으로 하여 제안된 제어 기법의 성능을 비교하고자 한다. CINR 임계값은 $\delta = 0.5\text{dB}$ 단위로 증감하였으며, 사용자 수에 따른 총 평균 수율과 지연 시간 성능을 측정한다. 그림 5의 기준 결과를 보면 사용자 수가 각각 10명, 30명, 50명일 경우 총 수율(시스템 수율)이 최대가 되는 CINR 임계값은 각각 2.5dB, 5dB, 10dB이다. 즉, 예상한 바와 같이 최적의 CINR 임계값은 트래픽 부하에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 한편, 제안된 CINR 임계값 제어 기법을 적용할 경우에는 초기 CINR 임계값에 상관없이 기준 결과의 최대값에 근접하는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 기법을 통해 트래픽 부하가 변동되더라도 최적의 CINR 임계값을 적응적으로 추적할 수 있음을 보여준다. 그림 6에서 제안된 기법은 총수율을 최대화하는 최적의 CINR 임계값에서 상하향 수율의 편차가 기준 결과보다 작은 값을 유지함을 볼 수 있다. 또한 그림 7의 지연 성능은, 제안된 기법을 적용할 때 상하향 지연 성능이 유사한 수준으로 나타남을 보여준다. 이는 상하

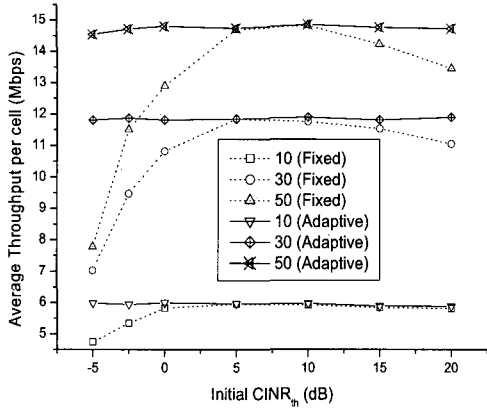


그림 5. 총 수율 성능

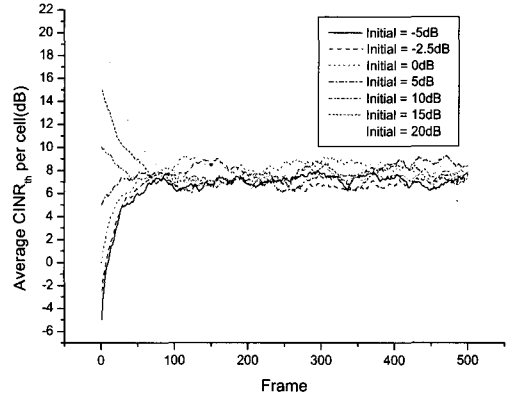


그림 8. CINR 임계값의 변화 추이

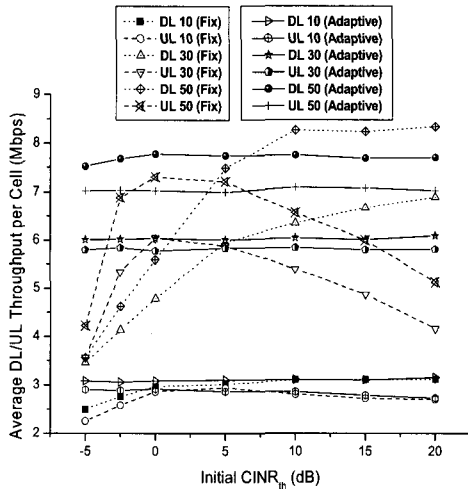


그림 6. 상하향 링크 수율 성능

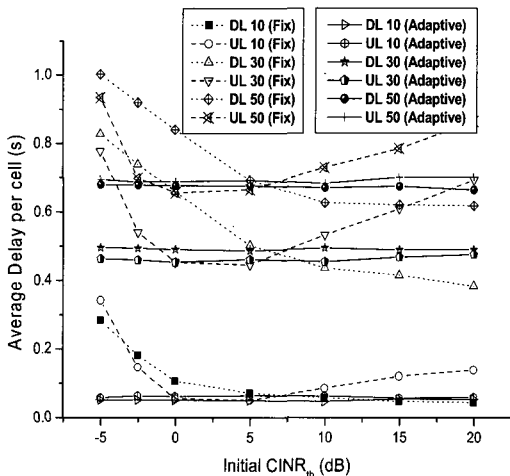


그림 7. 상하향 링크 지연 성능

향 트래픽 요구량에 맞게 자원분배가 적절하게 이루어졌다는 것을 암시한다.

그림 8에서는 사용자 수를 30명으로 고정하고 제안된 기법을 사용했을 때 CINR 임계값의 변화 추이를 보여주고 있다. CINR 임계값의 초기값이 어떤 값으로 설정되더라도, 충분한 갱신 과정 후에 특정 CINR 임계값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 수렴 특성은 제안된 기법의 증감 파라미터인 δ 값에 따라 달라질 수 있으며, 이는 별도의 모델링과 실험을 통해 최적화되어야 한다.

V. 결론

HDD 방식의 성능을 최적화하기 위해서는 인접 셀간 간섭을 최소화 하면서, TDD 대역 자원을 효율적으로 사용함으로써 시스템의 효율성을 극대화할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 CINR 임계값을 이용하여 상향링크 모드 선택을 하고, 최적의 CINR 임계값을 추적하기 위해 셀 간 상호 간섭과 무선 자원의 이용률을 동시에 고려하는 분산적 적응 제어 기법을 제안하였다. 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해 제안 기법을 통해 동적인 단말의 위치와 트래픽 부하가 변하는 상황에서도 항상 최적에 근접한 성능을 유지할 수 있음을 보였다. 여기서 제시된 기법은 패킷 스케줄링 과정을 별도의 문제로 분리하여 보고 있으나, 최적화 관점에서는 이를 통합한 접근이 고려되어야 한다. 또한, 제안된 적응적 기법의 수렴 특성을 이해하고 안정성을 확보하기 위한 이론적인 분석이 요구된다.

참고 문헌

[1] S.B. Yun, S.Y. Park, Y.W. Lee, D.Y.Park, Y.S. Kim, K.H. Kim and C.G. Kang, "Hybrid Division Duplex System for Next Generation Cellular Services," IEEE Transaction on Vehicular Technology, submitted for publication.

[2] A. Alexiou, et al., "Duplexing, resource allocation and inter-cell coordination-design recommendations for next generation systems," in proceedings of The 11th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting, June 2004.

[3] M. Rinne et al., "Dual bandwidth approach to new air interface," in proceedings of The 11th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting, June 2004.

[4] D.G. Jeong and W.S. Jeon, "CDMA/TDD system for wireless multimedia services with traffic unbalance between uplink and downlink," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.17, No.5, pp. 939-946, May 1999.

[5] W.S. Jeon and D.G. Jeong, "Comparison of Time Slot Allocation Strategies for CDMA/TDD Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No.7, July 2000.

[6] IEEE 802.16d/D5, "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," 2004.

[7] H. Holma and A. Toskala, "WDM for UMTS," John Wiley & Sons Ltd, New York, 2000.

김 필 근 (Pil-geun Kim)

준회원



2001년 2월 고려대학교 전기전
자전파공학부 졸업
2006년 8월 고려대학교 전파공
학과 석사
2006년 8월~현재 삼성전자
<관심분야> Wireless MAC Protocol,
Radio Resource management

강 충 구 (Chung-gu Kang)

중신회원



1987년 6월 Univ. of California
(San Diego), 전자공학과 졸업
1989년 12월 Univ. of California
(Irvine), 전자 및 컴퓨터공학과
박사
1992년 7월~1992년 5월 Aerospace
Corp. 연구원

1993년 4월~1994년 2월 Rockwell International 연구원
1994년 3월~현재 고려대학교 전기전자공학부 교수
<관심분야> 광대역 무선 전송 기술 및 매체접근제어 프
로토콜 설계/구현, 시스템 모델링 및 성능 분석,
Wireless PAN/LAN/MAN, 4세대 이동통신