

기지국간 동기오차를 고려한 TD-CDMA 시스템 성능 분석

정회원 한진규*, 권동승**, 이명원*, 박한규*

Performance Analysis of TD-CDMA Systems with Cell Synchronization Error

Jin-Kyu Han*, Myoung-Won Lee*, Dong-Seung Kwon**, Han-Kyu Park* *Regular Members*

요약

IMT-2000에서 TDD 모드를 지원하도록 제안되어 있는 TD-CDMA 시스템은 CDMA 뿐 아니라 TDMA, TDD 등을 융합한 기술을 이용하고 있다. TD-CDMA 시스템 성능 분석을 위해서는 CDMA 기술에서 고려해야 하는 간섭 뿐 아니라 TDMA와 TDD 기술에서 발생할 수 있는 간섭에 대한 모델링이 필수적이다. 특히 TDD 모드에서는 FDD 모드와는 달리 기지국간 간섭과 이동국간 간섭이 발생하는 특징을 갖는다. 본 논문에서는 TD-CDMA 시스템 성능 분석을 위한 간섭 모델링을 제시하고 프레임 내 슬롯 할당 방법에 따른 성능 분석을 수행하였다. 또한 기지국간의 동기오차를 고려할 수 있도록 간섭 모델링을 확장하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 인접 기지국간에 동기오차가 적고 유사한 슬롯 구조를 가질수록 성능이 향상됨을 확인하였다.

ABSTRACT

TD-CDMA is based on a combination of CDMA, TDMA, and TDD technologies, and it is proposed to support TDD mode for IMT-2000 service. To analyze the performance of TD-CDMA, we have to establish a modeling technique that takes into account the interference that can occur in each scheme. There is special interference in TDD mode, e.g. interference from base station to base station and from mobile to mobile. In this paper, we present an interference model for analyzing the performance of TD-CDMA systems and the slot allocation strategies. This model includes the cell synchronization error. As a result, this paper shows that almost equal slot allocation and low cell synchronization error guarantee desirable performance in TD-CDMA.

I. 서론

3세대 이동통신은 음성, 고품질 음향 및 영상 서비스, 데이터, 무선 인터넷 등의 다양한 서비스를 지원할 것으로 기대된다. 3세대 이동통신의 표준화 작업은 3GPP (Third Generation Partnership Project)와 3GPP2에 의해서 수행되어 왔으며, DS (Direct Sequence)-CDMA (Code Division Multiple Access)와 MC (Multi Carrier)-CDMA, TD (Time

Division)-CDMA 등의 기술이 표준으로 논의되었다. DS-CDMA와 MC-CDMA 기술은 각각 3GPP와 3GPP2에서 논의되는 것으로 FDD (Frequency Division Duplex) 방식에 기반을 두고 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 TD-CDMA 기술은 3GPP에서 제안되었으며 TDD (Time Division Duplex) 방식에 기반을 두고 있다. TD-CDMA는 UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) TDD 모드로 불리기도 한다.

* 연세대학교 전기전자공학과 전파통신연구실 (untuchbl@yonsei.ac.kr)

** 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 (dskwon@etri.re.kr)

논문번호 : 010201-0725, 접수일자 : 2001년 7월 25일

TDD 시스템은 순방향 링크와 역방향 링크를 동일한 주파수 대역에서 서비스하는 것이다. TD-CDMA 시스템은 TDD 기술과 기존 2세대 이동통신 시스템의 양대 기술이었던 TDMA (Time Division Multiple Access)와 CDMA (Code Division Multiple Access)를 융합한 기술을 이용한다. 따라서 TD-CDMA 시스템에서는 이들 세 기술이 갖는 장점을 모두 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다^[1,2]. TDD 기술은 필요에 따라 순방향 링크와 역방향 링크의 비율을 유연하게 조정할 수 있을 뿐 아니라, 순방향 링크와 역방향 링크의 무선 채널 응답이 동일하다는 특성을 이용하면 송신기가 송신 채널을 빠르게 추정할 수 있는 장점이 있다. TDMA 기술을 이용하면 간섭을 피해 채널을 할당할 수 있다. 또한 CDMA 기술은 가용 자원을 유연하게 사용할 수 있게 한다. 높은 품질을 요구하는 사용자에게 대해서는 multi-code 방식을 적용하여 데이터 전송속도를 높일 수 있으며, 확산 계수를 유연하게 적용하여 필요이상으로 자원을 낭비하는 것을 방지한다.

TD-CDMA 시스템의 성능 분석에 앞서, TDD 시스템은 FDD 시스템과는 다른 간섭 상황이 발생한다는 사실을 고려해야 한다. FDD 시스템에서는 반송파 주파수가 격리되어 있어 순방향 링크의 신호가 역방향 링크에 간섭으로 작용하는 상황이 발생하지 않지만, TDD 시스템에서는 이러한 간섭이 발생할 수 있다^[3]. 즉, 인접 기지국이 다른 기지국의 수신에 간섭으로 작용하거나, 인접 셀의 이동국이 다른 셀의 이동국 수신에 간섭으로 작용하는 현상은 TDD 시스템에서만 나타나는 것이다. 따라서 FDD 시스템보다 더 일반화된 간섭 모델링이 필요하다. 이러한 TD-CDMA 시스템 교유의 간섭 모델을 고려하여 TD-CDMA 시스템의 슬롯 할당 방법에 대한 비교 분석이 연구되었으며^[4], TD-CDMA 시스템과 FDD 방식 시스템간의 간섭에 따른 성능 분석이 수행되었다^[5].

본 논문에서는 TD-CDMA 시스템에서 발생할 수 있는 간섭 상황을 모델링하고 이에 따른 전력제어 방법을 제시하였다. 성능 평가는 최적의 전력제어 해가 존재할 확률을 살펴보는 방법을 이용하였으며, 최적의 전력제어 해는 집중식 전력제어 (centralized power control)^[6,7] 방법을 통해 구했다. 시변 채널에서 페이딩에 적응하기 위한 전력제어 방식으로 주로 분산식 전력제어 (distributed power control)를 이용하지만, 본 논문에서는 전력제어 해의 존재 여부를 살피는 데에 목적을 두고 있으므로 집중식 전

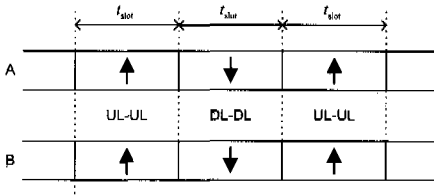
력제어 방식을 이용하였다. 그리고 각 슬롯에 링크를 할당하는 방법에 따른 성능을 분석하고 기지국간의 동기 오차가 시스템 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. TD-CDMA의 시스템 성능 분석 결과는 효율적인 링크 할당 방법을 제안하는 데에 이용될 수 있다.

II. TD-CDMA에서 프레임 구조에 따른 인접 셀 링크 관계

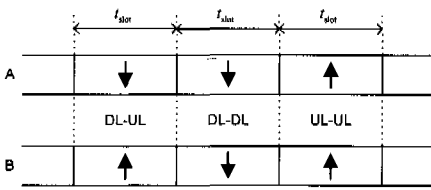
TDD 시스템은 순방향 링크와 역방향 링크가 모두 동일한 주파수를 사용하기 때문에 간섭의 양상이 FDD 시스템에서 발생하는 것과 다른 형태를 갖는다. FDD 시스템에서는 기지국에서 송신한 신호가 다른 셀의 이동국에 수신되는 간섭 (MS←BS 간섭) 또는 이동국에서 송신한 신호가 인접 셀 기지국에 수신되는 간섭 (BS←MS 간섭)과 같은 인접 셀 간섭만을 고려하면 된다. 그러나 TDD 시스템에서는 FDD 시스템에서 발생하는 형태의 인접 셀 간섭 뿐 아니라 기지국에서 송신한 신호가 다른 셀의 기지국에 수신되는 간섭 (BS←BS 간섭)과 이동국에서 송신한 신호가 인접 셀의 이동국에 수신되는 간섭 (MS←MS 간섭)이 발생하게 된다. 왜냐하면 동일한 시간에 한 셀에서는 순방향 링크 서비스를 하고 다른 셀에서는 역방향 링크 서비스를 할 가능성이 있기 때문이다.

그림 1은 프레임 구조에 따른 인접 셀 링크 관계를 나타낸 것이다. 프레임 내의 슬롯은 순방향 링크 (downlink, DL) 또는 역방향 링크 (uplink, UL)용으로 사용되기 때문에 인접 셀의 프레임 구조가 어떤가에 따라 간섭의 양상이 다르게 나타내게 된다. 그림 1(a)는 두 셀 A와 B에서 동일한 프레임 구조를 갖고 동기가 일치한 경우를 나타낸 것이다. 이 경우에는 임의의 시간에서 두 셀은 모두 순방향 링크 또는 역방향 링크 서비스를 하게 된다. 따라서 간섭의 양상은 FDD 시스템의 경우와 동일하다. 그림 1(b)는 두 셀이 서로 다른 프레임 구조를 갖고 동기가 일치한 경우를 나타낸 것이다. 이 경우에는 어떤 시점에서는 두 셀이 서로 다른 링크 서비스를 하는 경우가 발생한다. 첫 번째 슬롯을 보면 A 셀은 순방향 링크인데 B 셀은 역방향 링크임을 알 수 있다. 그림 1(c)는 동기가 일치하지 않은 경우이다. t_{off} 는 두 셀 사이의 시간 동기 오차를 의미한다. 이 경우에는 두 셀이 동일한 프레임 구조를 가졌다 할지라도 두 셀이 서로 다른 링크 서비스를

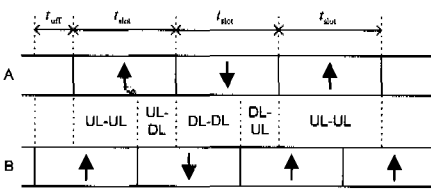
하는 경우가 발생한다. t_{off} 의 값에 따라 두 셀이 서로 다른 링크 서비스를 하는 경우가 발생할 확률이 변하기 때문에 t_{off} 는 TD-CDMA 시스템의 간섭 상황을 설명하는 파라미터로 이용된다.



(a) 동일한 프레임 구조를 갖고 동기가 일치한 경우



(b) 서로 다른 프레임 구조를 갖고 동기가 일치한 경우



(c) 동기가 일치하지 않은 경우

그림 1. 프레임 구조에 따른 인접 셀 링크 관계

III. TD-CDMA 시스템의 간섭 상황

1. TD-CDMA 시스템의 신호 및 간섭 링크 정의

그림 2는 두개의 기지국 A와 B가 존재하는 상황에서 원하는 신호의 링크와 간섭으로 작용하는 신호의 링크를 나타낸 것이다. A와 B는 셀을 나타내는 변수로도 사용할 수 있다. 그리고 고려하는 TD-CDMA 시스템은 N개의 슬롯으로 구성되어 있

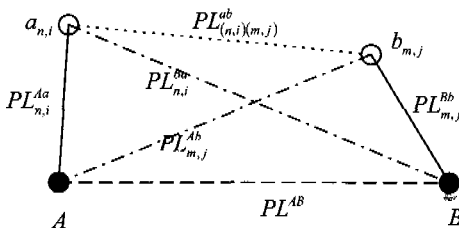


그림 2. TD-CDMA 시스템에서 두 기지국에 대한 신호 및 간섭 링크 정의

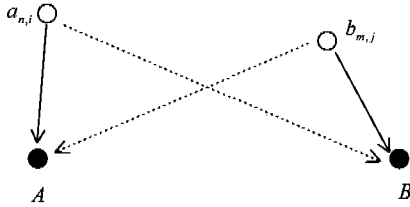
다고 가정한다. 기지국 A는 n번째 슬롯에서 K_n^A 개의 채널을 할당하고 있으며, 기지국 B는 K_n^B 개의 채널을 할당하고 있다. $a_{n,i}$ 는 기지국 A와 연결되어 있는 n번째 슬롯에서의 i번째 이동국을 나타낸다. 마찬가지로 $b_{m,j}$ 는 기지국 B와 연결되어 있는 m번째 슬롯에서의 j번째 이동국을 나타낸다. 만약 기지국간의 동기가 정확히 맞추어져 있다면 $m(≠n)$ 번째 슬롯의 $b_{m,j}$ 링크는 $a_{n,i}$ 에 간섭으로 작용하지 않는다. 그러나 기지국간의 동기가 일치하지 않을 경우 $m(=n-1$ 또는 $n+1)$ 번째 슬롯의 $b_{m,j}$ 링크는 $a_{n,i}$ 에 간섭으로 작용하게 된다.

PL은 각 링크의 채널 이득을 나타낸다. $PL_{n,i}^{Aa}$ 는 이동국 $a_{n,i}$ 이 송신하고 기지국 A가 수신하는 링크에 대한 채널 이득을 나타낸다. $PL_{n,i}^{aA}$ 는 기지국 A가 송신하고 이동국 $a_{n,i}$ 이 수신하는 링크에 대한 채널 이득이며, TDD 시스템에서 채널의 가역성에 근거하여 $PL_{n,i}^{aA} = PL_{n,i}^{Aa}$ 인 관계가 성립한다. 마찬가지로 $PL_{m,j}^{Ab} (= PL_{m,j}^{bA})$ 는 이동국 $b_{m,j}$ 과 기지국 A간 링크에 대한 채널 이득, $PL_{(n,i)(m,j)}^{ab} (= PL_{(m,j)(n,i)}^{ba})$ 는 이동국 $b_{m,j}$ 과 이동국 $a_{n,i}$ 간 링크에 대한 채널 이득을 나타낸다. 그리고 $PL^{AB} (= PL^{BA})$ 는 기지국 A와 B간 링크에 대한 채널 이득을 나타낸다. 채널 이득은 경로 손실에 의해 계산되는데 이동국과 이동국, 이동국과 기지국간의 링크에서는 경로 손실 PL이 $PL \propto r^{-4}$ 의 관계를 가지고 기지국과 기지국간의 링크에서는 $PL \propto r^{-2}$ 의 관계를 가진다고 가정한다. 여기서 r은 송수신단 사이의 거리를 나타낸다. 기지국과 기지국 사이에는 장애물이 적어서 LOS (line of sight) 환경으로 가정할 수 있기 때문에 자유공간 손실과 같은 방법으로 경로 손실을 계산할 수 있다.

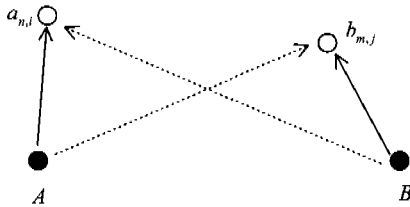
2. TD-CDMA 시스템에서 발생 가능한 간섭상황

TDD 시스템은 서로 다른 셀이 각각 어떠한 링크 서비스를 하고 있는지에 따라 간섭 상황이 결정된다. 그림 3은 두 셀이 동일한 링크 서비스를 할 때의 간섭 상황을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 두 셀이 동일하게 역방향 링크 서비스를 하고 있는 경우이며, 그림 3(b)는 두 셀이 동일하게 순방향 링크 서비스를 하고 있는 경우이다. 각각 BS←MS 간섭과 MS←BS 간섭이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 두 셀이 서로 다른 링크 서비스를 할 때의 간섭 상황을 나타낸 것이다. 이 경우에는 TDD

시스템에서만 나타나는 간섭 상황을 살펴 볼 수 있다. 이동국 $a_{n,i}$ 가 기지국 A에 송신한 신호가 $b_{m,j}$ 에 수신되는 MS←MS 간섭과 기지국 B가 이동국 $b_{m,j}$ 에 송신한 신호가 기지국 A에 수신되는 BS←BS 간섭을 확인할 수 있다.



(a) BS←MS 간섭 (A: 역방향 링크, B: 역방향 링크)



(b) MS←BS 간섭 (A: 순방향 링크, B: 순방향 링크)

그림 3. 두 셀이 동일한 서비스를 할 때의 간섭 상황

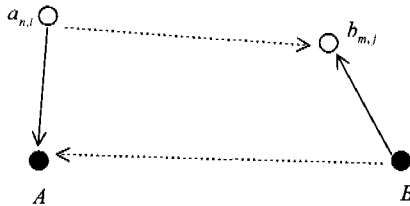


그림 4. 두 셀이 서로 다른 서비스를 할 때의 간섭 상황, MS←BS 간섭, MS←BS 간섭 (A: 역방향 링크 B: 순방향 링크)

IV. 간섭 모델링 및 이상적인 전력제어 방법 유도

1. 기지국간의 동기가 일치한 경우

기지국간의 동기가 일치할 경우 인접 슬롯 간섭은 발생하지 않기 때문에 동일 셀 간섭, 인접 셀 간섭만을 모델링하면 된다. 다음은 기지국간 동기가 일치한 경우에 발생하는 간섭을 간섭의 종류 별로 나타낸 것이다.

$$I_{n,i}^{Aa} = \sum_{k=1}^{K^A} PL_{n,k}^{Aa} P_{n,k}^a \quad (1)$$

$$I_{n,i}^{Aa} = (1-F) PL_{n,i}^{Aa} \sum_{k=1}^{K^A} P_{n,k}^a \quad (2)$$

$$I_{n,i}^{Ab} = \sum_{k=1}^{K^B} PL_{n,k}^{Ab} P_{n,k}^b \quad (3)$$

$$I_{n,i}^{Ab} = PL_{n,i}^{Ab} \sum_{k=1}^{K^B} P_{n,k}^b \quad (4)$$

$$I_{n,i}^{AB} = PL_{n,i}^{AB} \sum_{k=1}^{K^B} P_{n,k}^b \quad (5)$$

$$I_{n,i}^{ab} = \sum_{k=1}^{K^A} PL_{(n,i)(n,k)}^{ab} P_{n,k}^b \quad (6)$$

(1)과 (2)는 동일 셀 간섭을 나타낸다. (1)은 역방향 링크의 경우 ($A \leftarrow a$)이고 (2)는 순방향 링크의 경우 ($a \rightarrow A$)에 해당된다. (3)~(6)은 인접 셀 간섭을 나타낸다. (3)은 두 셀이 모두 역방향 링크를 서비스하는 경우 ($A \leftarrow b$)이고, (4)는 모두 순방향 링크를 서비스하는 경우 ($a \rightarrow B$)이다. (5)는 A 셀에서는 역방향 링크 B 셀에서는 순방향 링크를 서비스하는 경우, A 셀 기지국이 받는 간섭 ($A \leftarrow B$)을 나타내며, (6)은 A 셀에서는 순방향 링크, B 셀에서는 역방향 링크를 서비스하는 경우 A 셀 이동국이 받는 간섭 ($a \rightarrow b$)을 나타낸다. 그리고 $P_{n,i}^a$ 와 $P_{n,i}^b$ 는 A 셀에서 이동국 $a_{n,i}$ 의 서비스를 위해 각 기지국과 이동국이 송신하는 전력의 크기를 나타내고, F 는 직교성(orthogonality)을 나타낸다.

이렇게 유도된 간섭 모델링을 토대로 각 셀의 서비스 종류에 따라 수신 E_b/N_0 를 유도할 수 있다. 식 (7)은 n 번째 슬롯 i 번째 사용자의 수신 E_b/N_0 를 나타낸다.

$$\Gamma_{n,i} = \frac{W}{R_{n,i} \beta N} \frac{PL_{n,i} P_{n,i}}{I_{n,i}^{SC} + I_{n,i}^{OC} + \eta} \quad (7)$$

단, W 는 확산 대역폭, $R_{n,i}$ 는 서비스 데이터율, η 는 기지국 열잡음 크기를 나타낸다. $I_{n,i}^{SC}$ 는 동일 셀 간섭이고 $I_{n,i}^{OC}$ 은 인접 셀 간섭을 나타낸다. $I_{n,i}^{SC}$ 와 $I_{n,i}^{OC}$ 는 슬롯의 서비스 종류에 따라 (1)~(6)에서 선택하여 적용한다.

안정된 서비스의 품질을 유지하기 위해서 $\Gamma_{n,i}$ 는 요구 E_b/N_0 인 $\gamma_{n,i}$ 보다 작지 않아야 한다. 전력 제어에 의해 이 조건을 만족시키면서 총 송신 전력을 최소화하기 위해서는 $\Gamma_{n,i} = \gamma_{n,i}$ 이어야 한다. 이를 수식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\frac{PL_{n,i} P_{n,i} W}{\gamma_{n,i} R_{n,i} \beta N} - I_{n,i}^{SC} - I_{n,i}^{OC} = \eta \quad (8)$$

위 식을 해당 슬롯 내 모든 사용자에게 대해 확장하면 다음과 같은 행렬식으로 표현 할 수 있다.

$$H_n P_n = \eta, \quad (9)$$

$$p_n = \begin{bmatrix} p_n^1 \\ \vdots \\ p_n^c \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} \eta_n^1 \\ \vdots \\ \eta_n^c \end{bmatrix}, \quad H_n = \begin{bmatrix} H_n^{11} & \cdots & H_n^{1c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_n^{c1} & \cdots & H_n^{cc} \end{bmatrix}$$

단, $p_n^c = [P_{n,1}^c \cdots P_{n,K_n^c}^c]^T$ 는 c 번째 셀 송신기의 송신 출력으로 구성된 벡터이고, η^c 은 c 번째 셀 수신기의 열잡음으로 구성된 벡터이다. H_n^{cc} 은 c 번째 셀의 동일 셀 간섭 링크 이득으로 구성되어 있는 행렬이고, H_n^{cd} 는 d 번째 셀의 송신 신호가 c 번째 셀 수신기에 끼치는 인접 셀 간섭 링크 이득으로 구성되어 있는 행렬이다.

예를 들어 두 셀 A와 B가 존재하고 두 셀이 모두 역방향 링크 서비스를 하고 있는 경우 H_n 을 구성하는 부행렬 중 A 셀 수신기에 대한 동일 셀 간섭 링크와 인접 셀 간섭 링크 행렬은 각각 식 (10a)와 (10b)와 같다.

$$H_n^{Aa}(i, j) = \begin{cases} \frac{PL_{n,i}^{Aa}W}{\gamma_{n,i}^{Aa}R_{n,i}^{Aa}N}, & \text{for } i=j \\ -PL_{n,i}^{Aa}, & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (10a)$$

$$H_n^{Aa}(i, j) = -PL_{n,i}^{Aa} \quad (10b)$$

만약 A 셀은 역방향 링크를 B 셀은 순방향 링크를 서비스하는 경우 동일 셀 간섭에 대한 행렬은 (10a)와 같고, 인접 셀 간섭 (BS←BS)에 대한 행렬은 (11)과 같다.

$$H_n^{AB}(i, j) = -PL^{AB} \quad (11)$$

만약 두 셀이 모두 순방향 링크를 서비스하고 있다면 식 (12a)와 (12b)와 같다.

$$H_n^{Aa}(i, j) = \begin{cases} \frac{PL_{n,i}^{Aa}W}{\gamma_{n,i}^{Aa}R_{n,i}^{Aa}N}, & \text{for } i=j \\ (F-1)PL_{n,i}^{Aa}, & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (12a)$$

$$H_n^{Aa}(i, j) = -PL_{n,i}^{Aa} \quad (12b)$$

만약 A 셀은 순방향 링크를 B 셀은 역방향 링크를 서비스하는 경우 동일 셀 간섭에 대한 행렬은 (12a)과 같고, 인접 셀 간섭 (MS←MS)에 대한 행렬은 (13)과 같다.

$$H_n^{ab}(i, j) = -PL_{(n,i)(n,j)}^{ab} \quad (13)$$

2. 기지국간의 동기가 일치하지 않는 경우

기지국간 동기 오차가 존재하는 경우, B 셀의 슬롯은 A 셀을 기준으로 t_{off}^{AB} 의 동기 오차를 갖는다고 가정한다. 역으로 A 셀의 슬롯은 B 셀을 기준으로 t_{off}^{BA} 의 동기 오차를 가지며 $t_{off}^{AB} = -t_{off}^{BA}$ 의 관계를 갖는다. 만약 t_{off}^{AB} 이 양수라면 B 셀의 n 번째 슬롯은 A 셀의 n 번째 슬롯과 $n+1(=m)$ 번째 슬롯으로부터 인접 슬롯 간섭을 겪게 된다. 반대로 t_{off}^{AB} 이 음수라면 B 셀의 n 번째 슬롯은 A 셀의 n 번째 슬롯과 $n-1(=m)$ 번째 슬롯으로부터 인접 슬롯 간섭을 겪게 된다. 식 (14)는 인접 슬롯 간섭을 고려하였을 경우에 대한 E_B/N_0 를 나타낸 것이다.

$$\Gamma_{n,i} = \frac{W}{R_{n,i}N} \frac{PL_{n,i}P_{n,i}}{I_{n,i}^{SC} + \delta I_{m,i}^{OS} + (1-\delta)I_{n,i}^{OC} + \eta} \quad (14)$$

단, $I_{m,i}^{OS}$ 은 인접 셀 인접 슬롯 간섭을 나타내고 $\delta = t_{off}/t_{slot}$ 이다. $I_{m,i}^{OS}$ 와 $I_{n,i}^{OC}$ 는 해당 슬롯에 대해 다른 셀에서 어떠한 서비스를 하고 있는가에 따라 다른 값이 정의된다.

인접 슬롯 간섭을 고려하여 $Hp = \eta$ 형태의 행렬 방정식을 만들 경우 식 (15)와 같이 슬롯 단위의 부행렬을 이용하여 표현할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & \cdots & H_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1N} & \cdots & H_{NN} \end{bmatrix} \quad (15)$$

단, H_{nm} 은 n 번째 슬롯이 m 번째 슬롯으로부터 받는 간섭을 행렬식으로 표현한 것이다. m 은 동기 오차에 따라 $n-1$ 이거나 $n+1$ 일 수밖에 없으므로 인접 슬롯이 아닌 경우에는 부행렬이 영행렬로 표현된다.

3. 전력 제어

앞에서 다중 셀 환경에서 인접 슬롯 간섭을 고려하여 서비스 가능 조건을 만족시키는 상황을 행렬식 $Hp = \eta$ 으로 표현하는 것을 살펴보았다. p 벡터는 각 사용자의 서비스가 가능하기 위한 송신 전력으로 구성되어 있다. 해당 사용자가 순방향 링크를 사용한다면 기지국 송신 전력을 의미하며, 역방향 링크의 경우 이동국의 송신전력을 의미한다. 이상적인 전력제어 수행을 위해 $p = H^{-1}\eta$ 인 전력을 각

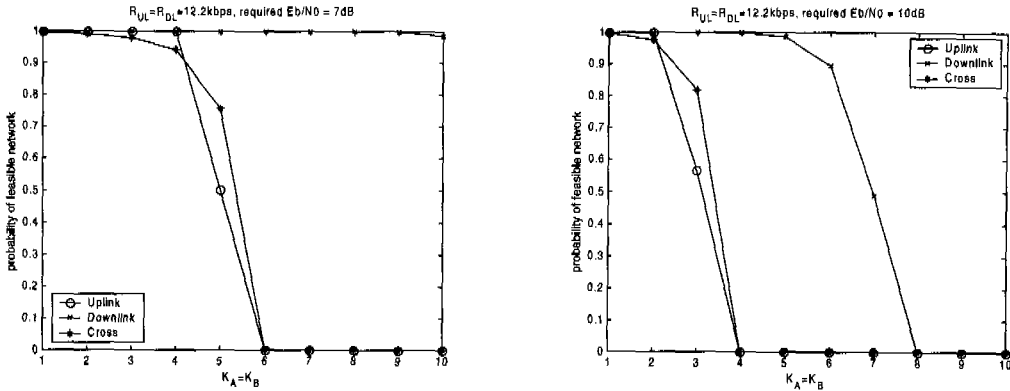


그림 5. 동기 오차가 없을 때 사용자 수에 따른 TD-CDMA 시스템 성능 ($F = 0.7$)

링크에 할당하면 된다. 그러나 만약 p 벡터의 원소 중 하나라도 0 이하의 값을 갖는다면 이는 이 상황에서 모든 사용자의 서비스를 만족시키는 최적의 전력제어 해를 찾을 수 없음을 의미한다. 만약 전력제어의 해가 존재한다면 다음과 같은 방법으로 전력 제어를 수행할 수 있다^[6,7].

$$p(t+1) = (I - H)p(t) + \eta \tag{16}$$

V. 시뮬레이션 결과

Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 이용하여 최적의 전력제어 해가 존재할 확률을 살펴보는 방법으로 TD-CDMA 시스템의 간섭을 분석한다. 시뮬레이션의 간략화를 위해 두개의 기지국이 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 셀 반경은 1로 설정하였으며 사용자는 셀 내 균일하게 분포한다. 경로 손실은 기지국과 기지국 사이에서 $PL = r^{-2}$ 이고, 이외의 경우에 대해서는 $PL = r^{-4}$ 로 설정하였다. 그리고 열 잡음의 크기는 1로 표준화하였다. 따라서 셀 반경에서 간섭이 전혀 없는 상황이라면 송신 전력이 1일 때 $CNR = 0\text{dB}$ 이다. 슬롯당 사용자 수는 순방향과 역방향 링크에 대해 동일하게 두었으며, 한 프레임을 구성하는 슬롯의 개수는 15로 설정하였다. 최적의 전력제어 해가 존재하는지 판별하는 방법으로 요구 송신전력이 하나라도 음수가 되면 해가 존재하지 않는다고 가정하였으며 송신전력의 상한치는 설정하지 않았다.

그림 5는 동기 오차가 없을 경우 사용자 수를 증가시키면서 TD-CDMA의 성능을 살펴본 것이다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 요구 E_b/N_0 가 7dB와 10dB

인 경우에 대한 결과이다. 순방향과 역방향 링크는 동일하게 12.2 kbps 데이터율의 서비스를 제공하였다. 12.2 kbps는 3GPP에서 권고하는 순방향과 역방향 링크 모두 0번 슬롯 포맷을 사용할 경우 얻게 되는 데이터율이다^[8]. 순방향 링크는 동일 셀 간섭량이 직교성에 의해 제한되므로 역방향 링크에 비해 나은 성능을 보이고 있다. 그리고 한 셀에서는 순방향 링크를 서비스하고 다른 셀에서는 역방향 링크를 서비스하는 경우 두 셀 모두 역방향 링크를 서비스하는 경우에 비해 적은 사용자 수에서도 최적의 전력제어 해가 존재하는 확률이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 경우 두 셀 모두 역방향 링크를 서비스하는 경우보다는 완만한 기울기로 최적의 전력제어 해가 존재하는 확률이 감소하고 있다.

동기 오차가 있을 경우에는 인접 셀의 인접 슬롯 신호가 간섭으로 작용하기 때문에 프레임 내의 모든 신호를 참고하여 전력제어가 수행되어야 한다. 그림 6은 동기 오차가 있을 경우에 대한 TD-CDMA 시스템 간섭 분석의 결과를 나타낸다. 동기 오차는 $\delta = t_{off} - t_{slot}$ 으로 나타냈으며 슬롯간 보호 구간(guard period)을 설정하지 않았다. 그림 6(a)는 두 셀의 슬롯 구조가 일치한 경우에 대한 결과이다. 15개의 슬롯 중 8 슬롯은 순방향 링크에 할당되었고 7개 슬롯은 역방향 링크에 할당되어 있다. 동기 오차의 효과를 관찰하기 위해 순방향 8 슬롯을 연속적으로 배치하고 나머지를 역방향으로 배치한 경우와 순방향 2 슬롯과 역방향 2 슬롯을 교대로 반복시킨 경우, 순방향과 역방향을 1 슬롯씩 교대로 할당한 경우를 살펴보았다. 순방향 슬롯을 연속적으로 배치하고 나머지에 연속적으로 역방향 슬롯을

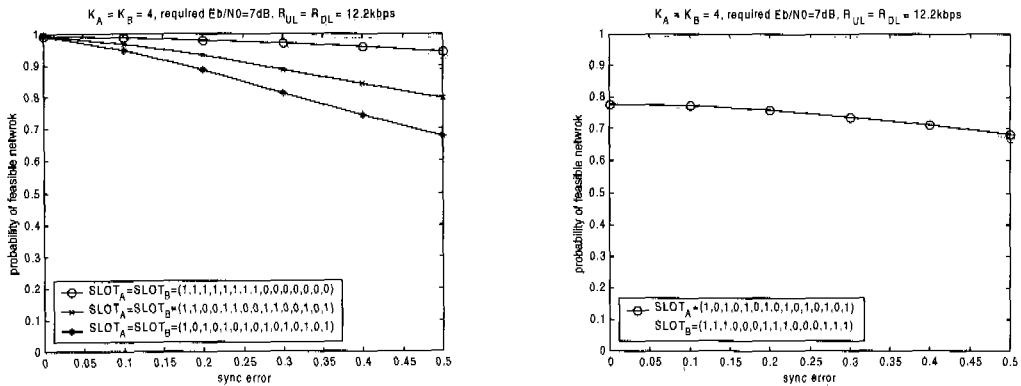


그림 6. 동기오차가 존재하는 경우에 대한 TD-CDMA 시스템 성능 ($F = 0.7$)

할당된 경우, 동기 오차가 발생하여도 1 슬롯 이내 구간동안에서만 순방향 링크와 역방향 링크가 혼재하여 TDD 시스템에서만 관찰되는 MS←MS 간섭과 BS←BS 간섭이 발생한다. 그러나 순방향과 역방향을 1 슬롯씩 교대로 할당된 경우에는 매 슬롯마다 이러한 현상이 일어나게 된다. 동기 오차가 없을 경우의 결과에서 살펴보았듯이 MS←MS 간섭과 BS←BS 간섭이 발생하는 상황은 시스템의 성능을 떨어뜨리는 효과를 야기한다. 따라서 동기 오차가 발생하는 상황에서는 동일 링크를 연속적으로 배치할수록 성능 열화를 막을 수 있다. 그림 6(a)의 결과는 이러한 현상을 보여주고 있다. 동기 오차가 커질수록 최적의 전력제어 해가 존재하는 확률이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동기 오차에 의해 순방향 링크와 역방향 링크가 혼재할 확률이 높은 슬롯 할당 방법일수록 동일한 동기 오차에서 최적의 전력제어 해가 존재하는 확률이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 6(b)는 두 셀의 슬롯 할당이 다른 경우에 동기 오차가 성능에 미치는 영향을 나타낸다. A, B 각 셀은 $SLOT_A = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1)$ 와 $SLOT_B = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1)$ 의 슬롯 할당 방법을 택하였다. 따라서 동기 오차가 없는 상황에서도 15개의 슬롯 중 5개의 슬롯은 순방향 링크와 역방향 링크가 혼재하게 된다. 이 때문에 동기오차가 전혀 없는 상황에서도 최적의 전력제어 해가 존재하는 확률이 낮게 나타나고 있다. 본 결과는 프레임 내 모든 사용자에 대해 최적의 전력제어 해가 존재하는가를 살펴보고 하나 이상의 사용자에게 최적의 전력제어 해가 존재하지 않을 경우 실패한 것으로 간주하였기 때문에 전력제어의 해가 존재할 확률은

한 슬롯만을 고려했을 경우보다 낮아지게 된다. 예를 들어 프레임 내의 한 슬롯에서 전력제어가 이루어질 수 없는 상황이라면 전체 프레임의 전력제어는 이루어지지 않는다고 편별하게 된다. 그림 5(a)의 결과에 따르면 사용자 수가 4이고 요구 E_b/N_0 는 7dB이며 12.2 kbps 서비스를 할 때, 해당 슬롯에서 순방향과 역방향 링크가 혼재한 환경에서는 전력제어의 해가 존재할 확률이 약 0.95이고, 순방향이나 역방향 링크만 존재하는 경우에는 1.0의 확률로 전력제어의 해가 존재하였다. 동기 오차가 전혀 없다면 각 슬롯에서의 전력제어의 해가 존재할 사건은 독립적이기 때문에, 15개의 슬롯 중 5개의 슬롯은 순방향 링크와 역방향 링크가 혼재한 상황에서 한 프레임에 대해 전력제어의 해가 존재할 확률은 $0.95^5 \times 1.0^{10} \approx 0.77$ 이다. 그림 6(b)의 결과를 보면 예측과 동일함을 확인할 수 있다. 또한 그림 6(b)의 결과를 통해 두 셀의 슬롯 할당이 다른 경우에도 동기 오차가 증가함에 따라 성능이 열화됨을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 TD-CDMA 시스템 성능 분석을 위한 간섭 모델링을 제시하고 프레임 내 슬롯 할당 방법에 따른 성능 분석을 수행하였다. 또한 기지국 간의 동기오차를 고려할 수 있도록 간섭 모델링을 확장하였다. 슬롯 할당 방법이 다르더라도 동기 오차가 증가할수록 성능이 열화 되는 현상을 볼 때 기지국간의 동기는 일치시키는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있다. 그리고 인접 셀 간에 슬롯 할당이 다르게 되어 있으면 원하는 용량과 성능을 얻

을 수 없음을 확인하였다. 따라서 인접 셀간에는 슬롯 할당이 최대한 일치하도록 배치하는 채널 할당 방안이 필요하다. TD-CDMA 시스템의 효율적인 운영을 위해서는 요구 서비스에 따라 순방향과 역방향 링크의 비율을 조절할 뿐 아니라 인접 셀과의 간섭을 고려하여 조정되어야 한다. 그리고 동기 오차가 발생할 수 밖에 없는 상황이라면 동기 오차에 의해 순방향 링크와 역방향 링크가 혼재할 확률을 줄일 수 있는 슬롯 할당이 적용되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] Harri Holma and Antti Toskala, *WCDMA for UMTS*, John Wiley & Sons, pp. 283-302, 2000.

[2] M. Haardt, et al. "The TD-CDMA Based UTRA TDD Mode," *IEEE Journal on SAC*, vol. 18, no. 8, pp. 1375-1385, August 2000.

[3] S.M. Heikkinen, H. Haas, and G.J.R. Povey, "Investigation of Adjacent Channel Interference in UTRA-TDD System," *IEE Colloquium on UMTS Terminals and Software Radio*, pp. 13/1-13/6, 1999.

[4] W.S. Jeon and D.G. Jeong, "Comparison of Time Slot Algorithm Strategies for CDMA/TDD Systems," *IEEE Journal on SAC*, vol. 18, no. 7, pp. 1271-1278, July 2000.

[5] H. Holma, G. Povey, and A. Toskala, "Evaluation of Interference between Uplink and Downlink in UTRA/TDD," in *Proc. VTC'99 Fall*, pp. 2626-2620, Sept. 1999.

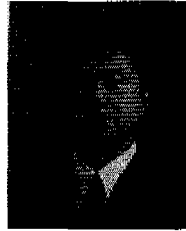
[6] J. Zander, "Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems." *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, no.1, pp.57-62, Feb. 1992.

[7] S. Grandhi, R. Vijayan, D.J. Goodman, and J. Zander, "Centralized Power Control in Cellular Radio Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 466-468, Nov. 1993.

[8] 3GPP Technical Specification 25.221 V3.5.0, Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (TDD), 1999.

한 진 규(Jin-Kyu Han) 정회원
한국통신학회 논문지, 제26권, 제7A호 참조

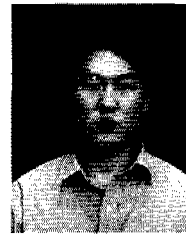
권 동 승(Dong-Seung Kwon) 정회원



1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
1988년 5월~현재 : 한국전자통신연구원 무선방송기술 연구소

1997년 8월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
<주관심 분야> 이동통신시스템, CDMA 변복조, 전파전파

이 명 원(Myoung-Won Lee) 정회원



1999년 2월 : 연세대학교 전파공학과 졸업
2001년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 석사
2001년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 적응 배열 안테나, 채널 모델링, TD-CDMA

박 한 규(Han-Kyu Park) 정회원
한국통신학회 논문지, 제26권, 제9B호 참조