

하향링크 사용자 용량 개선을 위한 통계적 다중화기반의 RFH-OFDMA

정희원 정 방 철*, 이 형 진*, 성 단 근*

Statistical Multiplexing Based RFH-OFDMA System for Improving Downlink User Capacity

Bang Chul Jung*, Hyung Jin Lee*, Dan Keun Sung* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 하향링크에서 사용자 용량 증가를 위하여 통계적 다중화에 기반한 RFH-OFDMA (Random Frequency Hopping-Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식을 제안한다. 사용자 용량은 한 셀에서 주어진 기본 데이터 전송률로 데이터 전송이 가능한 최대 사용자의 수를 의미한다. 본 논문에서는 제안된 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 방식의 하향링크 사용자 용량과 기존 FH-OFDMA 방식에서의 하향링크 사용자 용량을 비교한다. 사용자 용량은 부반송파 개수와 인접 셀 간섭에 의하여 제한되며 수신 SINR이 가장 열악한 환경에서의 시스템 용량을 상호 비교하기 위하여 사용자는 모두 셀 경계에 있다고 가정하고 인접 셀 간섭은 최대 값을 갖는다고 가정한다. 시뮬레이션 결과를 통하여, 사용자의 채널 활성도가 0.1, 수신단에서 요구되는 Eb/I0가 6 dB, 3-sector 안테나가 사용된 경우에 제안된 RFH-OFDMA 방식이 262명을 수용한 반면에 기존의 FH-OFDMA 방식의 경우 51명의 사용자를 수용할 수 있음을 보여준다.

Key Words : RFH-OFDMA, User capacity, Statistical multiplexing

ABSTRACT

We propose a random frequency hopping orthogonal frequency division multiple access (RFH-OFDMA) system based on statistical multiplexing for improving downlink user capacity. User capacity is defined as the maximum number of users served with a given basic data-rate in a cell. We compare the downlink user capacity of the proposed RFH-OFDMA system with that of the conventional frequency hopping OFDMA (FH-OFDMA) systems in the worst case where all users are located at the cell boundary. User capacity is limited by either the number of subcarriers or other-cell interference (OCI). Simulation results show that the proposed RFH-OFDMA system can accommodate 262 users in a 3-sector cell, while the conventional FH-OFDMA systems can accommodate 51 users, when the user channel activity and the required Eb/I0 are 0.1 and 6 dB, respectively, and all users are assumed to be located at the cell boundary.

* 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 통신망 연구실({bcjung, dksung}@ee.kaist.ac.kr),

논문번호 : KICS2004-11-263, 접수일자 : 2004년 11월 5일

※ 본 연구는 하나로 텔레콤의 “2.3GHz 휴대 인터넷 서비스를 위한 통계적 다중화 기반의 효율적인 자원 관리 방안 연구” 위탁과제 연구비 지원에 의해 수행되었음.

I. 서론

최근 이동 통신 시스템을 통하여 서비스되는 데이터 트래픽의 양이 급속도로 증가하고 있다. 이러한 경향으로부터, 데이터 트래픽은 향후 이동 통신 시스템의 주요 트래픽이 될 것으로 기대된다. 데이터 트래픽은 내재적으로 버스티 (bursty)한 특성을 갖고 이는 사용자의 채널 활성도가 낮은 결과를 낳는다. 또한 데이터 트래픽의 경우 상향링크보다는 하향링크에서 더 많은 양이 존재한다. 무선 채널을 통하여 데이터 통신을 가능하게 하기 위하여 최근 다양한 이동통신 시스템이 제안되었다^{1)~3)}.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술은 주파수 선택적 페이딩 환경에서 효과적으로 데이터를 전송하는 기술로 알려져 있다. 또한, OFDM 기술에 기반한 OFDM-TDMA, OFDM-FDMA, OFDM-CDMA, FH-OFDMA 등 다양한 다중접속방식이 제안되었다⁴⁾. 특히 FH-OFDMA의 경우, 인접 셀 간섭을 평균화시키고 셀 내 간섭을 일으키지 않아 셀룰라 이동 통신 시스템에 적합하다. FH-OFDMA에서 각 사용자는 고유의 도약 패턴을 이용하여 각 심벌마다 부반송파를 옮겨가며 데이터를 전송하고 기지국은 호 설정 시 각 사용자에게 서로 직교하는 도약 패턴을 할당하게 된다. 따라서 다수의 사용자들은 서로 동일한 시간에 동일한 부반송파를 점유하지 않는다.

각 사용자의 채널 상황을 이용하여 최적의 데이터 전송율을 보장하는 주파수 영역에서 사용자를 스케줄링하는 기법⁵⁾과 OFDM 기술을 사용하면서 동적 채널 할당기술과 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식을 결합한 기법⁶⁾ 등이 제안되었다. 그러나 이러한 기술들은 사용자의 채널상황을 기지국이 매순간 관리해야 하므로 상향링크로의 피드백 정보의 양이 매우 많고 만약 채널이 빠르게 변하는 상황에서는 그 성능을 보장할 수 없다. 게다가, 이러한 스케줄링에 기반하여 동작하는 기술들은 소수의 사용자가 비교적 고속의 데이터 서비스를 요구하는 상황에 적합하다. 만일, 낮은 채널 활성도를 갖는 저속의 데이터 서비스를 요구하는 다수의 사용자가 시스템에 들어오면, 기지국은 부반송파 할당, 사용된 변조 및 부호화, 전송되는 프레임내 특정 사용자의 데이터의 유무 등 각 사용자의 호 유지에 관련된 많은 제어 정보를 각 사용자에게 전송해야 한다. 이러한 정보는 셀 내의 모든 사용자가 알아야 하는 시스템 정보와 프레임의 기본 정보이므로, 셀

경계에 위치하는 사용자에게까지 신뢰성있게 전달되어야 하고, 따라서 낮은 부호율로 전송되어야 한다. 결국, 이러한 제어 정보들은 그 정보의 양에 비하여 많은 양의 무선 자원을 요구하게 된다.

통계적 다중화는 각 사용자가 보낼 패킷이 존재할 경우만, 주어진 통신 링크를 사용하는 다중화 방식이다. 결과적으로 통계적 다중화를 통하여 통신 링크는 간헐적으로 링크를 사용하는 다수의 사용자를 효율적으로 수용할 수 있다. 통계적 다중화 기술은 그 특성상 링크를 사용함에 있어서 제어 정보를 필요로 하지 않기 때문에, 스케줄링에 기반한 기술과 대조적이다. 본 논문에서는 하향링크 사용자 용량 증가를 위하여 통계적 다중화 기반의 RFH (Random Frequency Hopping)-OFDMA 방식을 제안한다. 사용자 용량은 셀 내 주어진 기본 데이터 전송율 이상으로 데이터를 전송할 수 있는 사용자의 최대 수를 의미한다. 제안된 방식을 통하여 사용자의 채널 활성도가 낮은 경우, 셀 내 사용 가능한 부반송파의 개수보다 많은 수의 사용자를 효과적으로 수용할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 사용 가능한 부반송파의 개수, 인접 셀 간섭, 사용자의 채널 활성도를 고려한 FH-OFDMA 시스템의 하향링크 사용자 용량을 분석하고 3장에서는 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템을 제안하고 제안된 시스템의 하향 링크 사용자 용량을 분석한다. 4장에서는 제안된 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하고 제안된 시스템과 기존 시스템의 사용자 용량을 분석한다. 5장에서는 결론을 도출한다.

II. FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량

FDMA 시스템의 사용자 용량 계산에 대한 기존의 접근 방식은 주파수 재사용율과 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio; SNR)에 기초하고 있다⁷⁾. 기존의 용량 분석에서는 인접 셀들의 모든 주파수 채널이 사용 중이라고 가정하였다. 이러한 가정은 홈 셀 사용자가 점유하고 있는 주파수 채널을 인접 셀의 다른 사용자도 사용하고 있다는 가정인데, 협대역 통신 시스템에서 시스템의 부하가 시스템 용량보다 작더라도 발생할 수 있는 상황이다. 따라서 이러한 시스템에서 사용자 용량은 최악의 상황에 맞추어 설정된 주파수 재사용률에 의해 결정된, 셀 내 사용가능한 주파수 채널의 수와 같다. 또

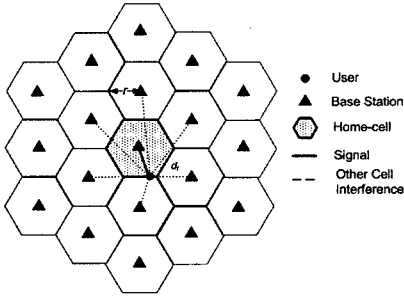


그림 1. 시스템 모델

한 상기 기술한 사용자 분석 방식은 셀 내의 호를 설정한 사용자의 채널 활성도를 1이라 가정하였다. 이는 상대적으로 높은 0.5 정도의 채널 활성도를 갖는 음성 서비스를 이루는 시스템에서는 타당하다. 하지만 데이터 서비스가 주를 이루는 시스템에서 사용자의 채널 활성도는 대략 0.2 이하일 것이다. 이러한 경우 각 사용자는 하향 링크의 대부분의 시간 동안 데이터를 전송하지 않을 것이다.

그림 1은 FH-OFDMA 시스템의 하향 링크 시스템 모델을 나타낸다. 이 모델에서는 셀 반경을 r , 주파수 재사용율을 1로 가정하였다. 또한, 섹터 안테나가 사용될 수 있다. 그림 1에서 사용자는 셀 경계에 위치하고, 실선은 홈 셀 기지국으로부터 수신되는 신호를 의미하고 점선은 외부 간섭 셀로부터의 인접 셀 간섭 신호(other cell interference; OCI)를 의미한다.

하향 링크에서 사용자 용량 분석을 위하여 먼저 각 사용자의 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비(signal-to-interference-and-noise ratio; SINR)가 분석되어야 한다. 또한, 홈 셀 사용자의 채널 활성도와 인접 셀의 시스템 부하가 고려되어야 한다. FH-OFDMA 시스템의 하향링크 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{S}{I_0 + N_0} \geq \frac{P_T \cdot r^{-\alpha} \cdot X_0}{\left\{ \lambda \left(\frac{\bar{v}k + \rho M}{M} \right) \sum_{i=1}^{i_0} P_T \cdot d_i^{-\alpha} \cdot X_i \right\} + N_0} \quad (1)$$

식 (1)에서 사용된 변수들은 다음과 같이 정의된다.

- α : 경로 감쇄 상수
- d_i : i 번째 간섭 셀 기지국과 사용자 사이의 거리
- I_0 : 사용자의 수신기에서의 인접 셀 간섭
- i_0 : 고려하는 인접 셀의 개수
- k : 각 셀의 사용자의 평균 수

λ : 섹터 안테나 변수($\lambda = 1$: omni-antenna, $\lambda = 1/3$: 3-sector antenna)

ρ : 전체 부반송파 중 동기 및 채널 추정을 위해 사용되는 부반송파의 비율

M : 각 셀에 할당된 부반송파의 수

N_0 : 수신기 열잡음

P_T : 각 부반송파의 전송 전력

r : 셀 반경

\bar{v} : 평균 사용자 채널 활성도

X_i : i 번째 인접 셀 기지국으로부터의 log-normal shadowing 값

X_0 : 홈 셀 기지국으로부터의 log-normal shadowing 값

식 (1)에서는 모든 셀에 동일한 수의 사용자가 존재하며, 각 사용자의 채널 활성도는 동일하다고 가정한다. 또한, 최악의 상황을 고려하기 위하여 모든 사용자는 셀 경계에 위치한다. 파일럿, 동기 등을 위하여 사용되는 제어 채널용 부반송파들은 채널 활성도가 1이라 가정하고 각 셀에서 사용가능한 부반송파 개수를 의미하는 M 은 주파수 재사용율에 의하여 결정된다. 만약 수신기의 열잡음을 무시할 정도로 높은 전력으로 신호가 전송된다면 수신 E_b/I_0 는 다음식과 같이 표현된다.

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{S/I_0}{R^{FEC} \cdot \mu} \quad (2)$$

식 (2)에서 R^{FEC} 와 μ 는 각각 채널 부호화율과 변조방식계수이다. 예를 들어, μ 가 2이면 QPSK, 4이면 16QAM을 의미한다. 만약 log-normal shadowing 값이 1이라 가정하면, 식 (2)는 다음과 같이 근사화된다.

$$\frac{E_b}{I_0} \approx \frac{\beta q^\alpha}{6\mu\lambda R^{FEC} \left(\frac{\bar{v}k + \rho M}{M} \right)} \quad (3)$$

식 (3)에서

$$q = \frac{D}{r}, \quad \beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^\alpha + \left(\frac{1}{\sqrt{4}}\right)^\alpha + \left(\frac{1}{\sqrt{7}}\right)^\alpha + \dots} \quad (4)$$

이다. D 는 홈 셀 기지국과 첫 번째 계층(tier)의 인접 셀 기지국간의 거리를 가리킨다. 사용자 용량의

최소 값은 사용자들이 모두 셀 가장 자리에 위치하고 인접 셀 간섭이 최대 일 때 얻어진다. 여기서 인접 셀 간섭의 최대 값은 인접 셀에 존재하는 모든 부반송파에 사용자 데이터가 실리는 경우에 해당한다. 따라서 인접 셀 간섭으로 인해 제한되는 사용자 용량은 다음과 같이 근사화된다.

$$C_{OCI, FH} \approx \left\{ \frac{\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_{maxOCI}}{\bar{v} \left(\frac{E_b}{I_0} \right)_{required}} \right\} (1 - \rho) M$$

$$= \frac{\beta q^\alpha (1 - \rho) M}{6 \mu \lambda R^{FEC} \left\{ \bar{v} \left(\frac{E_b}{I_0} \right)_{required} \right\}}$$
(5)

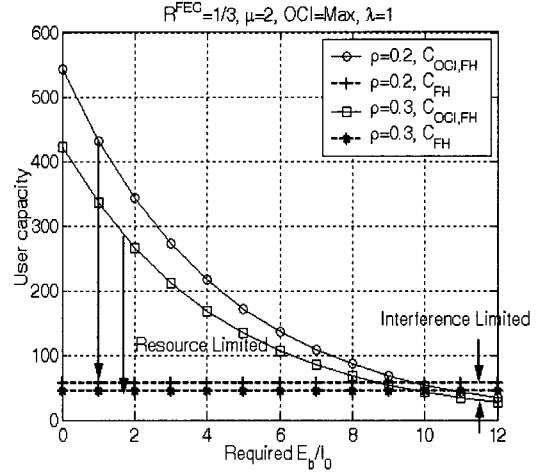
식 (5)에서 $\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_{required}$ 는 주어진 데이터 전송율을 보장하기 위해 수신단에서 필요한 E_b/I_0 를 의미한다. 또한, 한 셀에서 사용자의 데이터 전송을 위하여 사용 가능한 부반송파의 개수는 다음과 같다.

$$C_{FH} = (1 - \rho) M$$
(6)

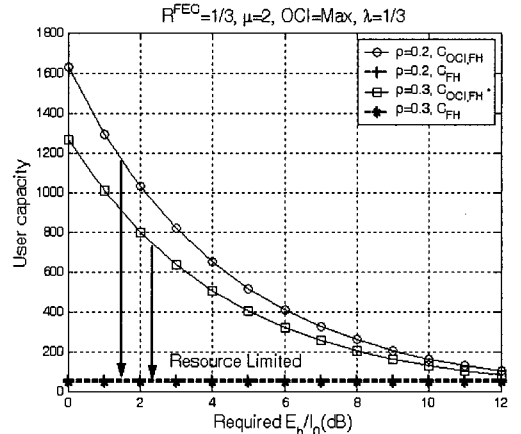
따라서 FH-OFDMA 시스템에서 사용자 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{FH-OFDMA} = \min \{ C_{OCI, FH}, C_{FH} \}$$
(7)

그림 2는 FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량을 필요한 E_b/I_0 에 대한 그림이다. 홈 셀에서 사용 가능한 부반송파 개수(M)는 64이고 각 사용자는 기지국과의 통신을 위하여 1개의 부반송파를 사용한다. 또한, 주파수 재 사용율은 1로 가정한다. 그림에서 알 수 있듯이, 사용자 용량은 수신단에서 요구되는 E_b/I_0 이 높을 경우 인접 셀 간섭에 의하여 제한될 수 있다(interference limited). 그러나 수신단에서 요구되는 E_b/I_0 이 낮을 경우 사용자의 용량은 부반송파의 개수로 제한된다 (resource limited)^[8]. 만약 사용자 용량이 인접 셀 간섭으로 제한될 경우, 시스템은 가용한 부반송파가 존재하더라도 새로운 사용자들을 수용할 수 없다. 이는 새로운 사용자의 수용이 인접 셀에 간섭을 키우는 것이 되기 때문이다. 반대로 사용자 용량이 부반송파의 개수로 제한될 경우, 시스템은 인접 셀 간섭이 충분히 작더라도 더 이상의 사용자들을 수용할 수 없다. 이는 사용 가능한 주파수 자원이 모두 할당되어 사용 중이기 때문이다.



(a) $\bar{v} = 0.2, \lambda = 1$



(b) $\bar{v} = 0.2, \lambda = 1/3$

그림 2. FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량

이러한 resource limited 상황은 사용자의 채널 활동도(\bar{v})가 낮을수록, 인접 셀 간섭의 양이 적을수록, 수신단에서 요구되는 E_b/I_0 이 작을수록 주로 발생된다.

III. 통계적 다중화 기반의 Random Frequency Hopping (RFH)-OFDMA

3.1 RFH-OFDMA

기존의 FH-OFDMA 시스템에서는, 기지국은 동일한 시간에 동일한 부반송파를 복수 사용자에게 할당하지 않는다. 따라서 한 셀 내에는 C_{FH} 개의 서로 직교하는 주파수 도약 패턴이 존재할 수 있다. 각 사용자에게 할당된 주파수 도약 패턴은 기존

FH-OFDMA 시스템의 통신 채널이 된다. 만약 사용자 용량이 자원의 수에 의하여 제한된다면, 더 많은 사용자를 수용하기 위하여 통신 채널의 증가가 필요하다. 특히, 만약 사용자 채널 활성화도가 낮은 상황이라면 각 사용자에게 할당된 주파수 도약 패턴의 사용 효율(utilization)은 현저히 떨어진다. 기존 시스템과는 달리 제안된 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템에서는, 복수의 사용자가 동일한 시간에 동일한 부반송파를 사용하는 것을 허용한다. 기지국은 호 설정 시, 각 사용자에게 무작위적 도약 패턴을 할당한다. 이 때, 도약 패턴은 사용자 단말의 ESN(electronic serial number) 번호 등의 사용자별 고유 식별자를 이용하여 생성된다.

그림 3은 제안된 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템에서 주파수 도약 패턴을 나타낸다. 여기서 T_s 는 cyclic prefix를 포함한 OFDM 심벌의 시간을 의미한다. 각 사용자는 주파수 도약 패턴에 따라 각 OFDM 심벌마다 사용하는 부반송파(SC : subcarrier)를 바꾸고 사용자별로 동일한 부반송파를 점유하는 경우 도약 패턴의 충돌이 일어날 수 있다. 그러나 사용자들의 채널 활성화도가 낮은 환경에서 대부분의 사용자는 비활성(inactive) 상태이다. 그림 3에서 '사용자 #b'와 '사용자 #d'는 비활성 상태이다. 하지만 그들은 세션(session)이 열려있는 동안 자신의 도약 패턴을 유지하게 된다. 이 경우, 활성 상태의 사용자와 비활성 상태의 사용자 간 도약 패턴의 충돌은 실제 데이터를 전송하는 활성화(active)된 사용자의 성능에 영향을 주지 않는다. 그림 3에서 어두운 색으로 표시된 블록이 이런 경우의 충돌을 나타낸다.

만약 활성화된 사용자간 도약 패턴의 충돌이 발생하였을 경우, 기존 FH-CDMA 시스템에서는 그것을 제어할 수 없는 셀 내 사용자간 간섭(hit)으로 간주하였다. 왜냐하면 사용자간 동기가 맞추어지지 않았다고 가정했기 때문이다⁹⁾. 그러나 하향링크 환경에서는 모든 사용자가 동기화된 송수신이 가능하므로 사용자간 도약 패턴 충돌은 기지국에 의하여 검출될 수 있다. 만약 활성화된 사용자간 도약 패턴의 충돌이 발생하면, 기지국은 충돌을 일으킨 사용자들의 데이터를 비교하고 모든 데이터가 같으면 모든 충돌된 데이터를 제어 없이 전송한다(상승, synergy). 이를 통해 충돌된 모든 사용자의 데이터를 한 심벌 에너지로 전송하게 되어 에너지 이득이 생긴다. 반대로 충돌을 일으킨 사용자들의 데이터가

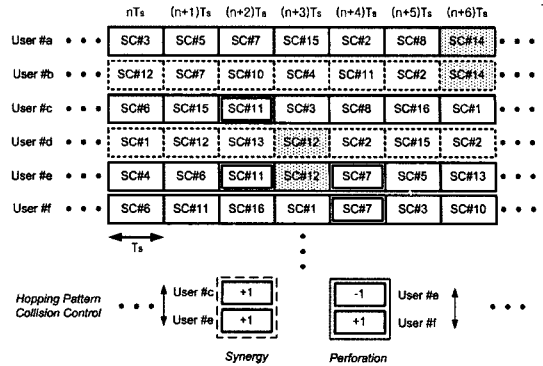


그림 3. 제안된 RFH-OFDMA 시스템에서의 주파수 도약 패턴

모두 동일하지 않을 경우, 충돌을 일으킨 사용자들의 데이터를 모두 천공(perforation)하고 그 심벌 구간동안 어떤 신호도 전송하지 않는다. 따라서 제안된 시스템에서는 도약 패턴의 충돌은 셀 내 간섭을 일으키지 않는다. 다만 충돌 확률에 따른 정보의 손실이 일어난다. 하지만 이러한 정보의 손실은 송신단에서 추가 에너지와 수신단에서 채널 복호기로 복구가 가능하다.

제안된 시스템에서 도약 패턴의 충돌 확률은 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_c = 1 - \left\{ 1 - \frac{\bar{v}}{(1-\rho)M} \right\}^{K-1} \quad (8)$$

식 (8)에서 K 는 셀내 모든 사용자의 수를 의미하고 이것은 사용 가능한 부반송파 수(M)보다 클 수도 있다. 주어진 사용자 채널 활성화도(\bar{v})에서 충돌 확률은 셀 내 사용자의 수가 증가함에 따라 함께 증가한다. 식 (8)은 활성화된 사용자간 도약 충돌만을 포함한다⁸⁾.

3.2 사용자 용량 (User Capacity)

앞서 언급한 것과 같이 제안된 시스템에서 도약 패턴 충돌이 발생하면 충돌이 발생한 심벌은 충돌을 일으킨 사용자들의 데이터의 동일성 여부에 따라 상승 또는 천공으로 제어된다. 상승은 수신단에 에너지 이득을 제공하고 천공은 전송되는 정보의 손실을 일으키고 결과적으로 수신단에서 요구하는 E_b/I_0 를 증가시켜 에너지 손실을 가져온다. 그러므로 인접 셀 간섭으로 인해 제한되는 제안된 시스템의 사용자 용량은 앞의 FH-OFDMA 경우와 같이 셀 가장 자리에 사용자들이 배치되어 있는 최악의 환경하에서는 식 (5)와 유사한 형태로 표현된다.

$$C_{OCI,RFH} \approx \frac{\beta \alpha^{\alpha} (1-\rho) M}{6\mu\lambda R^{FEC} \left\{ \bar{v} \left(\frac{E_b}{I_0} \right)_{required} + \Delta P \right\}} \quad (9)$$

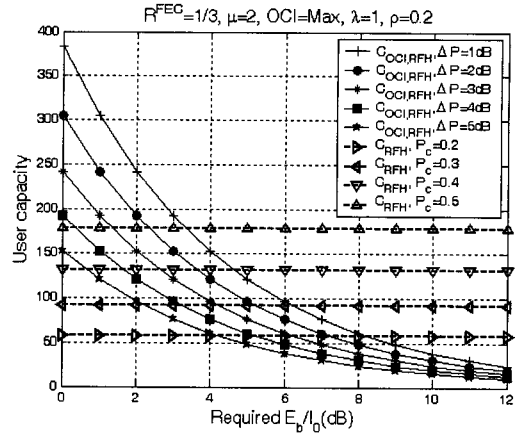
식 (9)에서 ΔP 는 도약 패턴 충돌로 인하여 손실된 정보를 복구하기 위하여 필요한 추가적 에너지를 의미한다. 추가적 에너지는 도약 패턴 충돌 확률(P_c) 이 높아질수록 증가하고 사용자 용량($C_{OCI,FEC}$)은 감소한다. 또한, 제안된 시스템에서 사용자 용량이 무선 자원의 수에 의하여 제한될 때, 수용 가능한 무선 자원(주파수 도약 패턴)의 수는 수신단에서 복구 가능한 도약 패턴 충돌 확률에 의하여 결정된다.

$$C_{RFH} = 1 + \frac{\log(1 - P_c)}{\log\left\{1 - \frac{\bar{v}}{(1-\rho)M}\right\}} \quad (10)$$

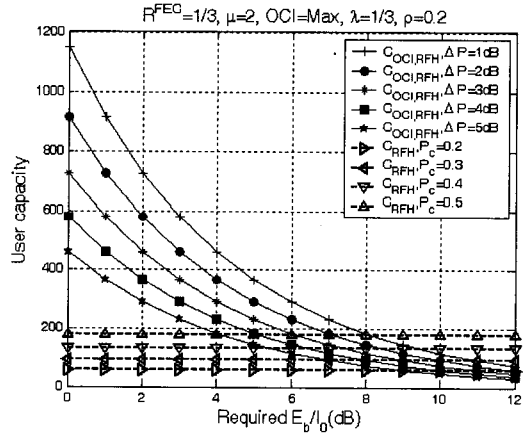
식 (10)은 식 (8)로부터 유도된다. 한 셀에서 수용 가능한 무선 자원의 수는 상수가 아니라 사용자의 채널 활성도(\bar{v})와 수신기에서 복구 가능한 도약 패턴 충돌 확률(P_c)로 인하여 변한다. 식 (10)에서 P_c 는 요구되는 FER (frame error rate) 성능과 채널 부호기의 성능에 의하여 결정된다. 따라서 제안된 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템의 사용자 용량은 다음 식과 같이 표현된다.

$$C_{RFH-OFDMA} = \min\{C_{OCI,RFH}, C_{RFH}\} \quad (11)$$

그림 4는 제안된 RFH-OFDMA 시스템에서 수용 가능한 도약 패턴 충돌 확률과 이에 따라 추가적으로 필요한 에너지에 따른 사용자 용량을 나타낸다. 한 셀에서 사용 가능한 부반송파 수는 64, 주파수 재 사용율은 1이라 가정한다. 가로축은 도약 패턴 충돌 확률이 0일 때, 요구되는 E_b/I_0 을 나타내고 세로축은 하향링크 사용자 용량을 나타낸다. 또한, 그림 4에서 실선은 $C_{RFH,OCI}$, 점선은 C_{RFH} 를 나타낸다. 사용자 용량은 $C_{RFH,OCI}$ 와 C_{RFH} 중 작은 값으로 결정된다. 도약 패턴 충돌 확률이 증가할수록 주어진 FER 성능을 만족시키기 위한 추가적 에너지(ΔP)가 함께 증가한다. 만약 주어진 도약 패턴 충돌 확률에 대한 추가적 에너지를 줄일 수 있다면 사용자 용량은 증가한다. 도약 패턴 충돌 확률이 증가하면 $C_{RFH,OCI}$ 은 감소하지만 C_{RFH} 는 증가한다. 따라서 $C_{RFH,OCI}$ 과 C_{RFH} 사이에는 trade-off가 존재한다. 제안된 RFH-OFDMA 시스템 설계에서 중요한 것은 요구되는 E_b/I_0 와 ΔP 값을 줄이는 것이다. 또



(a) $\bar{v} = 0.2, \lambda = 1$



(b) $\bar{v} = 0.2, \lambda = 1$

그림 4. 제안된 RFH-OFDMA 시스템의 사용자 용량

한 위에 기술된 변수들은 채널 부호기의 성능에 밀접히 관계된다. 4장에서는 구체적인 시스템 예를 소개한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 무선 채널은 다중 경로 페이딩 환경을 고려한다. 고려된 채널의 지연 확산은 RMS (Root Mean Square) 값이 $5 \mu s$, 최대 지연 확산 값이 $25 \mu s$ 이다. 또한 지연 전력은 지수적으로 감소하고 각 지연 값은 서로 독립적인 Rayleigh 분포를 따른다. 시뮬레이션에 사용된 OFDM에 관련된 변수는 다음과 같다.

- 중심 주파수 : 1.9 GHz
- 채널 대역 : 5 MHz
- 총 부반송파의 수 : 1024

- 사용된 부반송파의 수 : 768
- 심벌 시간 : 204.8 μ s
- 순환 확장 시간 : 25.6 μ s

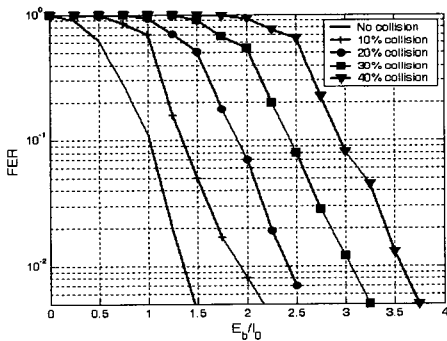
위의 변수는 셀룰라 시스템에서 10~20 Mbps를 제공하는 OFDM 시스템에 기초한 것이다^[11].

각 사용자는 한 개의 OFDM 심벌에서 12개의 부반송파를 이용하여 전송한다고 가정한다. 데이터 전송을 위하여 사용되는 768개의 부반송파를 총 12개의 그룹으로 나누고 각 사용자의 데이터는 이 그룹 당 1개의 부반송파를 이용하여 전송된다. 이 경우 각 그룹에서 사용가능한 총 부반송파의 개수(M)는 64개가 된다. 또한 변조 방식은 QPSK가 사용되고 채널 부호기는 부호율 1/3의 터보부호가 사용된다^[11]. 따라서 각 사용자가 활성화된 상태에서 전송하는 데이터 전송율은 35 kbps가 된다. 이 데이터 전송율은 시스템의 기본 데이터 전송율(basic data rate)이 된다. 수신단에서 터보부호기 기법은 최적의 수신기 알고리즘인 MAP (maximu-a-posteriori) 알고리즘이 사용되고 최대 복호 횟수는 8번으로 제한

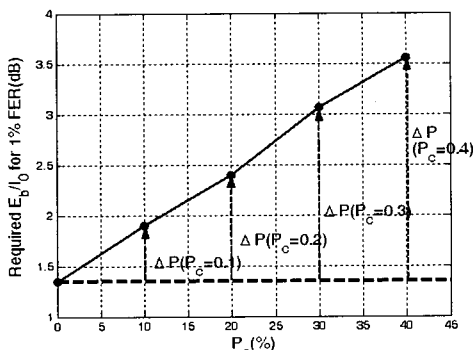
한다. 채널 부호화는 680 비트 단위로 이루어진다.

그림 5(a)는 제안된 RFH-OFDMA 시스템에서 주파수 도약 패턴 충돌에 따른 FER 성능을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 충돌이 없을 경우 1% FER 성능을 위해서 1.35 dB의 E_b/I_0 가 필요하다. 하지만 도약 패턴 충돌 확률이 증가하면서 동일한 1% FER 성능을 위하여 추가적인 에너지가 필요하게 된다. 그림 5(b)는 이러한 추가적 에너지를 보여준다. 앞서 기술한 바와 같이 추가적 에너지의 양은 채널 부호기의 성능과 밀접한 관계를 갖는다. 만약 사용된 부호율보다 높은 부호율을 사용하거나 터보 부호기 보다 나쁜 성능을 갖는 부호기를 사용할 경우 추가적 에너지의 양은 증가할 것이다. 도약 패턴 충돌 확률이 0.4일 때, 1% FER 성능을 위하여 추가적으로 필요한 에너지는 약 2.5 dB이다. 따라서 이러한 경우 제안된 시스템의 사용자 용량은 채널 활성화도($\bar{\nu}$)와 ρ 는 모두 0.2이고 λ 가 1, 1/3 일 때 각각 동일하게 132명이다. 이 값은 그림 4를 통하여 얻을 수 있다. 이는 기존 FH-OFDMA 시스템이 동일한 환경에서 사용자를 대략 50명 수용하는 것과 비교하여 매우 높은 용량이다.

표 1은 기존 FH-OFDMA 시스템과 제안된 RFH-OFDMA 시스템의 사용자 용량을 채널 활성화도와 수신단에서 요구하는 E_b/I_0 에 대하여 정리한 것이다. log-normal shadowing 등의 시스템 마진(margin)을 고려하여 요구하는 E_b/I_0 가 6 dB인 경우를 나타낸다. 표 1에서는 수신단에서 수용 가능한 도약 패턴 충돌 확률을 0.4로 가정하고 이를 극복하기 위해 추가적으로 필요한 에너지를 3 dB로 가정하고 있는데, 이는 수신 채널 복호기의 성능 한계이기도 하다. 만약 충돌 확률이 0.4 이상이 되면 수신 복호기에서 추가적으로 필요한 에너지의 양이 3 dB 보다 커지기 시작하여 시스템은 다시 Interference limited 상황으로 그 용량이 제한되기 때문이다. 기존 시스템의 경우 사용자 채널 활성화도에 따라 사용자 용량이 변하지 않는 경향이 있는데 이는 사용자 용량이 인접 셀 간섭이 아니라 사용 가능한 무선 자원의 수에 의하여 제한되는 경우이기 때문이다. 표 1로부터 사용자의 채널 활성화도가 낮은 경우 제안된 시스템이 기존의 시스템에 비하여 훨씬 많은 사용자를 수용할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 시스템은 사용자의 채널 활성화도가 낮은 데이터를 주요 서비스로 하는 차세대 이동통신 시스템에 적합할 것으로 예상된다.



(a) P_c 에 따른 FER 성능



(b) 요구되는 E_b/I_0 와 P_c 에 따른 ΔP

그림 5. P_c 에 따른 제안된 RFH-OFDMA 시스템의 FER 성능

표 1. 요구되는 E_b/I_0 가 6 dB인 경우의 제안된 RFH-OFDMA 시스템과 기존 FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량 비교

$R^{FEC} = 1/3, \mu = 2, \rho = 0.2,$ $OCI = Max, P_c = 0.4, \Delta P = 3dB$				
	$\lambda = 1$		$\lambda = 1/3$	
	FH	RFH	FH	RFH
0.1	51	122	51	262
0.2	51	61	51	132
0.5	48	24	51	53
0.8	30	15	51	33

V. 결론

본 논문에서는 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템을 제안하고 제안된 시스템과 기존의 FH-OFDMA 시스템의 하향링크 사용자 용량을 비교 분석 하였다. FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량은 인접 셀 간섭이나 셀 내 사용 가능한 무선 자원의 수, 즉, 사용 가능한 부반송파 개수로 제한 될 수 있다. 본 논문에서는 모든 사용자가 인접 셀 간의 간섭이 최악의 환경인 셀 경계에 위치한다고 가정함으로써, 기존 FH-OFDMA 시스템과 제안된 RFH-OFDMA 시스템의 사용자 용량을 최소 값 기준에서 비교하였다. 제안된 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템은 동일한 시간에 한 명 이상의 사용자가 동일한 부반송파를 점유할 수 있도록 허용함으로써 사용가능한 무선자원의 수보다 많은 수의 사용자를 동시에 수용할 수 있다. 사용자의 채널 활성도가 낮은 환경에서 제안된 시스템은 기존의 FH-OFDMA 시스템에 비하여 훨씬 많은 수의 사용자를 수용할 수 있다. 추후 연구로 셀 내 균등하게 사용자가 분포된 환경에서의 셀 간 간섭을 고려하여 하향 링크 상의 사용자 용량을 분석 할 예정이다. 본 논문에서는 통계적 다중화 기반의 RFH-OFDMA 시스템을 제안하고 제안된 시스템과 기존의 FH-OFDMA 시스템의 하향링크 사용자 용량을 비교 분석 하였다. FH-OFDMA 시스템의 사용자 용량은 인접 셀 간섭이나 셀 내 사용 가능한 무선 자원의 수, 즉, 사용 가능한 부반송파 개수로 제한 될 수 있다. 본 논문에서는 모든 사용자가 인접 셀 간의 간섭이 최악의 환경인 셀 경계에 위치한다고 가정함으로써, 기존 FH-OFDMA 시스템과 제안된 RFH-OFDMA 시스템의 사용자 용량을 최소 값 기준에서 비교하였다. 제안된 통계적 다중화 기반의

RFH-OFDMA 시스템은 동일한 시간에 한 명 이상의 사용자가 동일한 부반송파를 점유할 수 있도록 허용함으로써 사용가능한 무선자원의 수보다 많은 수의 사용자를 동시에 수용할 수 있다. 사용자의 채널 활성도가 낮은 환경에서 제안된 시스템은 기존의 FH-OFDMA 시스템에 비하여 훨씬 많은 수의 사용자를 수용할 수 있다. 추후 연구로 셀 내 균등하게 사용자가 분포된 환경에서의 셀 간 간섭을 고려하여 하향 링크 상의 사용자 용량을 분석 할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 'Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (Release 4)', 3GPP TR25.848 V4.0.0, Mar. 2001.
- [2] 'cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification', 3GPP2. C.S0024 v.4.0, Oct., 2000
- [3] A. Harada, S. Abeta, and M. Sawahashi, "Adaptive raio parameter control considering QoS for forward link OFCDM wireless access," *IEEE VTC2002-spring*, Vol. 3, pp.1175-1179, May. 2002.
- [4] K. Fazel and S. Kaiser, *Multi-carrier and spread spectrum systems*, Wiley, 2003.
- [5] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 17, No. 10, pp. 1747-1758, Oct. 1999.
- [6] T. Ikeda, S. Sampei, and N. Morinaga "TDMA-based adaptive modulation with dynamic channel assignment for high-capacity communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 49, pp. 404-412, Mar. 2000.
- [7] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, Prentice Hall, 1996.
- [8] B. Sklar, *Digital Communications*, Prentice Hall, 2001.
- [9] E. A. Geraniotis and M. B. Pursley, "Error probability for slow-frequency-hopped spread-spectrum multipel-access communications over fading channels," *IEEE Trans. commun.*, Vol. 30, No. 5, pp. 996-1009, May 1982.

- [10] S. Park and D. K. Sung, "Orthogonal code hopping multiplexing," *IEEE Communi. Lett.*, Vol. 6, No. 12, pp. 529-531, Dec. 2002.
- [11] B. McNair, L. J. Cimini, Jr., and N. R. Sollenberger, "Performance of an experimental 384kb/s 1900MHz OFDM radio link in a wide-area high-mobility environment," *IEEE VTC'01 Fall*, pp. 475-478, Oct. 2001.

정 방 철 (Bang Chul Jung) 정회원



2002년 2월 이주대학교 전자공학부(학사)
 2004년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(석사)
 2004년 9월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
 <관심분야> 차세대이동통신시스

템, OFDM/CDMA/MIMO기반 무선통신, 무선자원관리, UWB 시스템

이 형 진 (Hyung Jin Lee) 정회원



2004년 2월 서강대학교 전자공학부(학사)
 2004년 3월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 석사과정
 <관심분야> 차세대이동통신시스템, 무선자원관리, OFDM통신 시스템

성 단 근 (Dan Keun Sung) 정회원



1975년 2월 서울대학교 전자공학부(공학사)
 1982년 8월 텍사스 주립 대학교 전기 및 컴퓨터 공학과(석사)
 1986년 5월 텍사스 주립 대학교 전기 및 컴퓨터 공학과(박사)
 <주요 경력>

1977년~1980년 한국전자통신연구원(ETRI) 전임 연구원

1986년 8월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 교수

1993년~1994년 정보통신진흥원 교환관리위원

1996년~1999년 인공위성 연구센터 소장

2002년~2003년 미국 국립표준기술연구소 방문 연구원

<학회 활동>

2000년~현재 JCN 국제저널 편집위원

2002년~현재 IEEE Communications Magazine 편집위원

2003년~현재 JCCI 학술대회 조정위원장

2003년~2005년 IEEE ICC 2005 (Seoul), General Conference Chair, TPC Vice-Chair

<관심분야> 차세대 이동통신시스템 및 이동통신망, 교환망, 차세대 WLAN, UWB 시스템 등