

# 순방향 직교 주파수분할 다중접속 시스템에서 부분적 채널정보 궤환을 이용한 전송방식의 비교분석

정회원 윤 석 현\*

## A Comparison of Opportunistic Transmission Schemes with Reduced Channel Information Feedback in OFDMA Downlink

Seokhyun Yoon\* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 부분적 채널 피드백 정보를 이용하는 다중사용자 직교 주파수 분할다중화 시스템의 하향링크 전송성능을 고려한다. 특히, 두 종류의 부분적 채널 정보 궤환 방식을 고려하는데 첫째는 부분송파 당 1비트의 정보만을 이용하는 1비트(1bit per sub-carrier) 궤환 방법과 선택적으로 채널정보를 궤환하는 선택적 궤환(selective feedback) 방법을 비교 분석한다. 사용자당 주어진 피드백 비트 수에 대한 절대적인 비교 분석은 매우 어려우므로 대신에 각 방법에서의 설계 파라미터에 따른 성능 곡선을 분석함으로써 실제 시스템에의 적용에 필요한 정보를 제공하고자 한다.

**Key Words** : OFDMA, 동적 자원할당, 부분적 궤환 (Partial feedback)

ABSTRACT

In this paper, we consider downlink throughput performances of multiuser orthogonal frequency division multiplexing with reduced channel information feedback schemes. Specifically, two types of reduced feedback schemes, namely, 1-bit per sub-carrier and selective feedback scheme are considered and compared with each other in terms of average network throughput. Since the strict throughput comparison for given number of feedback bits per user is quite difficult, rather we compare their general behaviors in various system configurations with different system parameters, which can give us an insight into practical system design with those reduced feedback schemes.

### I. 서 론

직교 주파수 분할다중화 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 시스템에 대한 최근의 결과<sup>[1-4]</sup>로 현재 다중사용자이득은 OFDM이 갖는 대표적인 장점으로 받아들여지고 있다. 이는 기본적으로 “기회주의적” (opportunistic) 접근 방식으

로 다수의 사용자중 채널 상태가 제일 좋은 사용자가 우선권을 가지고 전송하는 방법이다. 이러한 형태의 접근방법은 다중안테나 시스템과 관련하여 [5]와 [6]에서 많은 연구결과가 제시되었으며, 특히, [6]에서는 다중사용자이득이 점근적으로 시스템 내 사용자수  $K$ 의  $\log \log$ 에 비례한다 것이 밝혀졌다. [1-4]와 [5,6]에서의 차이점은 [5,6]에서는 주파수 비

※ 이 연구는 2006학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

※ 본 논문은 부분적으로 PIMRC 2007에 발표되었음.

\* 단국대학교 전자전기공학부(syoon@dku.edu)

논문번호 : KICS2008-01-006, 접수일자 : 2008년 1월 3일, 최종논문접수일자 : 2008년 6월 23일

선택적 채널이 고려된 반면, [1-4]에서는 주파수 선택적 채널을 고려하여 OFDM기반 전송시스템을 가정하였다는 것이다. 한편, OFDM의 경우 다중의 부반송파가 사용되므로 최적의 성능을 위해서는 기지국이 모든 사용자에 대하여 각 부반송파의 채널 정보를 모두 알고 있어야 하는데 이는 일반적으로 주파수 분할 듀플렉싱(FDD)를 사용하는 이동통신시스템에서는 역방향 링크를 통한 채널 정보의 전송에 많은 부담으로 작용할 수 있어 이를 줄이기 위한 노력이 필요하다.

실제로, 네트워크의 수율(throughput) 성능에서 약간의 손해를 감수하면서 역방향 링크의 부담을 줄이기 위한 방안으로 많은 연구가 이루어졌으며<sup>[8-14]</sup>, 이들은 크게 1비트 교환 방법<sup>[9-13]</sup>과 선택적 교환 방법<sup>[14]</sup>의 두 가지로 분류될 수 있다. 첫 번째는 각 부반송파의 채널 품질을 미리 주어진 네트워크 파라미터 값과 비교하여 이보다 큰지 작은지에 대한 1비트정보만을 기지국에 알려주는 방법으로 여기서 네트워크 파라미터 값은 전체 네트워크 수율이 최대가 되도록 설정된다. [11-13]에서 보여준 바와 같이, 1비트 교환 방법은 이상적인 경우와 마찬가지로 네트워크 수율이 점근적으로  $\log \log K$ 에 비례하여 증가한다. 두 번째 방법은 전체 부반송파 중 채널 품질이 좋은  $M$ 개의 부반송파에 대해서만 선택적으로 채널 정보를 교환시켜 주는 방법으로 모든 부채널에 대한 정보가 교환되지 않기 때문에 시스템 내의 사용자 수가 작은 경우 “빈 채널(empty channel)”이 생기게 되어 네트워크 수율에서 손실이 생기게 된다.

[8-14]에서의 연구와는 독립적으로 [15-17]에서는 보다 직접적인 방안이 고려되었는데, 여기서는 전체 부반송파를 다수의 그룹으로 나누어 부채널로 정의하고 이를 채널정보 교환 및 전력/사용자 할당의 단위로 사용한다. [15]에서는 각 부채널에 대해 하나의 대표값만을 사용하더라도 다중사용자 이득이 점근적으로  $\log \log K$ 에 비례하여 증가한다는 것을 보였으며, 한편, [16-17]에서는 하나의 부채널 내에서도 각 부반송파의 채널 품질이 다르며 이에 의한 효과를 고려하기 위해 각 부채널의 채널 품질을 라이스 분포로 모델링하고 두 개의 라이스 분포 파라미터를 교환하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는, 앞서 언급한 두 가지 방법, 즉 1비트 교환 방법과 선택적 교환 방법에 대해 다중사용자 이득의 행태를 비교/분석하고자 한다. 그러나, 이러한 비교분석은 엄밀한 의미에서의 비교 (주어

진 교환 정보의 비트수에 따른 성능의 비교)는 아니며 주어진 파라미터의 설정에 따라 각각의 방법에 대한 성능이 어떻게 변화하는가에 대한 고찰로 보아야 할 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선, 다음의 II절에서는 채널 모델과 성능의 한계(bound)로서 완전한 채널품질 정보를 사용하는 이상적 시스템의 다중사용자 이득을 제시한다. III절에서는 1비트 교환 방법과 선택적 교환 방법의 동작 및 성능 분석을 수행하며 IV절에서는 모의실험 결과를 포함하여 두 가지 방법의 성능을 비교하고, V절에서 결론을 제시한다.

## II. 시스템 및 채널 모델

OFDM 시스템은 직교 복소 지수함수 집합과 Cyclic Prefix(CP)를 이용하여 단일 반송파의 주파수 선택적 채널을 다수의 주파수 비선택적 채널로 변환하는데 이는 수신단에서의 신호처리를 단순화할 뿐 아니라 적절한 전력/사용자 할당을 통한 이득을 가능하게 해준다. 일반적으로 OFDM 심볼길이(FFT크기)는 실효 채널의 최대지연에 상응한 CP길이보다 훨씬 크게 설계하므로 인접 부반송파의 채널품질은 서로 높은 상관값을 갖게 되며 사실상 몇 개의 부반송파에 대해서는 채널품질이 일정하다고 가정할 수 있다. 이러한 상황을 고려하여 높은 상관관계가 유지되는 인접 부반송파들의 집합을 부대역(sub-band)로 정의하고 전체 신호대역 내의 이러한 부대역의 개수를 주파수 다중화 지수(Frequency diversity order)로 정의한다. 실제 시스템에서는 CP의 사용으로 인한 데이터 전송율의 손실을 줄이기 위해 CP길이를 OFDM심볼 길이보다 훨씬 작게 설정하는데, 이를 감안하면 일반적으로 실효 주파수 다중화 지수는 전체 부반송파의 개수 보다 훨씬 작다고 가정할 수 있다.

본 논문에서는 분석의 단순화를 위하여 하나의 부대역에 해당하는 부반송파 집합을 채널 상태정보 교환 및 전력/사용자 할당의 기본 단위인 부채널로 정의하고 하나의 부채널에 속하는 모든 부반송파는 동일한 채널 품질을 갖는다고 가정한다. 물론, 실제 시스템에서는 하나의 부채널에 속하는 부반송파의 채널품질이 서로 다른 값을 가지며 이러한 채널품질의 변동은 다중사용자 이득을 감소시키는 요인이 되지만<sup>[16,17]</sup>, 본 논문에서 수행하고자 하는 두 가지 교환 방법에 대한 단순화된 성능분석을 위해서 이

러한 채널품질의 변동에 기인한 손실은 따로 고려하지는 않을 것이다.

위의 가정 하에, 하나의 기지국과  $K$ 명의 사용자로 구성된 단일 셀 OFDM기반 순방향 데이터 전송을 고려하자.  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부채널의 주파수 이득을  $h_n^{(k)}$ 라 하면  $h_n^{(k)}$ 는 복소 가우시언 랜덤 변수로 다음과 같이 모델링 한다.

$$h_n^{(k)} \sim CN(0, \sigma_s^2) \quad \forall k, n \quad (1)$$

여기서  $CN(a, b)$ 는 평균  $a$ , 분산  $b$ 인 복소 가우시언 분포를 나타낸다. (1)로부터, 채널품질  $\gamma_n^{(k)}$ 는  $h_n^{(k)}$ 의 절대제곱으로 정의하며 이에 대한 확률분포는 다음과 같은 지수함수 분포를 갖는다.

$$\gamma_n^{(k)} \equiv |h_n^{(k)}|^2 \sim \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \quad \forall n, k \quad (2)$$

여기서  $\Gamma$ 는 평균 신호대잡음비(SNR)이다. 총  $N$ 개의 부채널과  $K$ 명의 사용자에 대한 전체 채널품질 정보의 집합은  $H = \{\gamma_n^{(k)} | n = 0, 1, \dots, N-1, k = 1, 2, \dots, K\}$ 로 주어지며  $H$ 의 각 요소는 서로 통계적으로 독립이라고 가정한다.

2.1 완전한 채널정보를 이용한 경우의 성능 한계  
 성능비교의 척도로서 우선 완전한 채널정보를 이용한 경우의 성능 한계를 정의한다. 기지국이 채널 정보  $H$ 에 대한 완전한 정보를 알고 있는 경우의 시스템 수율은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$R_{fullCSI} = E_H \left[ \max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \log(1 + p_n \gamma_n^*) \right] \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=0}^{N-1} p_n = P_T$$

여기서, (2)로부터,  $\gamma_n^* = \max_{k: 1 \leq k \leq K} \gamma_n^{(k)}$ 이며 이의 누적분포함수(CDF)는 다음과 같다.

$$F_K(x) \equiv \Pr \{ \max_{k: 1 \leq k \leq K} \gamma_n^{(k)} < x \} = (1 - e^{-\gamma/\Gamma})^K$$

$N, K \rightarrow \infty$ 임을 가정하면 임의의 주어진  $H$ 에 대한  $\gamma_n^{(k)}$ 의 도수분포(empirical distribution)는 이의 확률 분포함수로 수렴된다고 가정할 수 있으므로 식(3)은 다음과 같이 단순화 된다<sup>[17]</sup>.

$$R_{fullCSI} = \max_{\lambda(\cdot)} \int_0^\infty \log(1 + \lambda(\gamma)\gamma) dF_K(\gamma) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \int_0^\infty \lambda(\gamma) dF(\gamma) = P_T/N$$

식(4)의 함수  $\lambda(\cdot)$ 에 대한 최대화 문제의 해는 잘 알려진 것처럼 물채우기(Water-Filling) 해로 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda(\gamma) = \begin{cases} 1/\gamma_0 - 1/\gamma & \text{for } \gamma \geq \gamma_0 \\ 0 & \text{for } \gamma < \gamma_0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, 상수  $\gamma_0$ 는 식(4)의 구속조건에 의해 주어진다. [13] 및 [17]에서 보여진 바와 같이, 물채우기 형태의 전력분배는 다중사용자 이득에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으며 대개의 경우 (SNR이 어느 정도 큰 경우) 동일 전력으로 분배를 하더라도 식(3)에서의 전송용량의 대부분을 얻을 수 있는데 이 경우 식(4)는 [11] 및 [12]에서 보인 것처럼  $p_n = 1 \forall n$ 에 대해 점근적으로 다음과 같이 간략화될 수 있다.

$$R_{fullCSI} = \log_2 \Gamma + \log_2 \log K$$

여기서, 우변의 두 번째 항  $\log_2 \log K$ 은 다중사용자 이득에 해당된다.

### III. 성능 분석

#### 3.1 1비트 케환 방법의 동작 및 성능

1비트 케환 방법은 각 사용자가 부채널 당 1비트의 채널정보를 기지국에 알려주고 이에 기초하여 전력 및 사용자 할당을 수행한다. 1비트 케환 방법은 [11-13]에서 성능분석이 수행되었으나 본 논문에서는 선택적 케환 방법과의 비교를 위해 보다 실제적인 시스템에 대하여 전력 분배 효과를 포함한 성능 분석을 수행하고자 한다. 1비트 케환 방법의 동작은 다음과 같다.

사용자 케환 정보: 각 사용자, 예를 들면  $k$ 번째 사용자는 각 부채널의 채널 품질정보  $\gamma_n^{(k)}$ 을 미리 정해진 네트워크 파라미터  $\alpha_n$ 과 비교하여 채널 정보  $b_n^{(k)}$ 을 다음과 같이 생성한다.

$$b_n^{(k)} = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma_n^{(k)} \geq \alpha_n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, 문턱값 벡터  $\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}]^T$ 는 기지국에서 순방향 방송채널을 통해 각 사용자에게 전달되며 일반적으로 각 부채널마다 다른 값이 설정될 수 있으나 본 논문에서는 모든 부채널에 대해 동일한 값을 사용한다고 가정한다.

**자원 할당:** 일단 모든 사용자로부터 채널 정보  $b_n^{(k)}$ 를 수신하면 기지국은 각 부채널에 대해  $b_n^{(k)} = 1$ 인 사용자 중에서 랜덤하게 혹은 라운드 로빈(round robin) 방식으로 하나의 사용자를 선택하여 그 부채널에 할당을 하고 전체 전송율이 최대가 되도록 전력  $p_n$ 을 각 부채널에 할당한다. 여기서, 각 사용자의 전송율  $R_n(p_n)$ 은 주어진 전력  $p_n$ 에 대해 지원 가능한 최대의 MCS(Modulation and coding scheme), 즉, 최대의 변조크기와 채널 부호화를 곱을 선택함으로써 결정되는데 무오류 전송을 위해서 각 부채널의 전송율은 순시 채널용량 보다 작게 설정되어야 한다. 즉,  $n$ 번째 부채널에 대해  $R_n(p_n) \leq C(\gamma_n^{(k)}) \equiv \log_2(1 + p_n \gamma_n^{(k)})$ 을 만족하도록 해야 한다. 그러나 1비트 제한 방법에서, 기지국은 채널 품질  $\gamma_n^{(k)}$ 을 알지 못하므로 각 부채널의 전송율은  $R_n(p_n) = \log_2(1 + p_n \alpha_n)$ 이 되도록 설정된다. 현실적으로, 전송율  $R_n$ 은 주어진 목표 오류율 내에서 지원 가능한 변조크기와 채널 부호화율 곱의 최대값으로 설정되지만 분석의 단순화를 위해 본 논문에서는 전송오류를 고려하지는 않을 것이며  $R_n \leq C(\gamma_n^{(k)})$ 가 만족되도록 전송율을 설정하면 전송오류는 발생하지 않는다고 가정한다. 만약 주어진 부채널에 대해  $b_n^{(k)} = 1$ 인 사용자가 없는 경우 기지국은 그 부채널에는 전력을 할당하지 않고 이를 다른 부채널에 나누어줌으로써 다른 부채널에 보다 높은 전송율을 할당하는 것이 가능하다. 이러한 채널정보 제한 방법에 기초하여  $n$ 번째 부채널에 대해  $b_n^{(k)} = 1$ 인 사용자의 수를  $K_n$ 으로 나타내면 전체 전송율은 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{1}_{K_n > 0} \log(1 + p_n \alpha_n) \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{p} = [p_0, p_1, \dots, p_{N-1}]^T$ 은 전력할당 벡터이고  $\mathbf{1}_{K_n > 0}$ 은  $K_n > 0$ 인 경우 1이고 그렇지 않은 경우 0이 되는 함수이다.

**성능분석:** 식(5)로부터, 시스템 수율은 랜덤 채널  $H$ 에 대한 식(7)의 앙상블 평균으로 다음과 같이 주어진다.

$$R_{1bit}(\alpha) = E_H \left[ \max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{1}_{K_n > 0} \log(1 + p_n \alpha_n) \right] \quad \text{s. t.} \quad \sum_{n=0}^{N-1} p_n = P_T \quad (8)$$

여기서,  $E_H[X]$ 는 랜덤변수  $X$ 의 기대값으로 모든 가능한  $H$ 에 대한 앙상블 평균을 나타낸다. 상수의 문턱값  $\alpha_n = \alpha(\text{const.}) \forall n$ 을 가정하고  $K_n > 0$ 인 부채널의 수를  $N$ 로 나타내면 (여기서,  $N \leq N$ ) 1비트 제한 방법에서의 전력할당은

$$p_n = \begin{cases} P_T/N & \text{if } K_n > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

로 표현 될 수 있으며, 따라서, 식(8)은 다음과 같이 단순화된다.

$$R_{1bit}(\alpha) = \sum_{n=0}^{N-1} \Pr\{N = n\} \frac{n}{N} \log\left(1 + \frac{\alpha P_T}{n}\right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \Pr\{N = n\} &= \binom{M}{n} q^{N-n} (1-q)^n \\ q &= \Pr\{K_n = 0\} = (1 - e^{-\alpha/\Gamma})^K \end{aligned}$$

한편, 문턱값  $\alpha$ 는 식(10)이 최대화가 되도록 설정되므로 1비트 제한 방식의 성능은

$$\max_{\alpha} R_{1bit}(\alpha) \quad (11)$$

로 주어지며 이에 대한  $\alpha$ 값은  $\partial R_{1bit}(\alpha)/\partial \alpha = 0$ 를 풀어 얻어진다.

### 3.2 선택적 제한 방법의 동작 및 근사적 성능

선택적 제한 방법은 전체 부반송파 중 채널 품질이 좋은  $M$ 개의 부반송파에 대해서만 선택적으로 채널 정보를 제한시켜 주는 방법으로 본 논문에서는 특히 “빈 부채널(empty sub-channel)”이 존재하는 경우의 성능 향상을 위해 전력할당 역시 고려할 것이다. 즉, [14]에서와 같이 빈 부채널에 과거의 전력할당 값을 평균하여 할당하는 대신 이의 전력을 다른 부채널에 분산하여 나눠주는 방법을 고려한다.

**사용자 제한 정보:** 각 사용자는 전체  $N$ 개의 부채널 중에서  $M$ 개의 가장 좋은 부채널만을 선택하여 이의 부채널 인덱스 집합  $I^{(k)} = \{i_m^{(k)}; m=0, 1, \dots, M-1\} \in [0, N-1]^M$ 와 그에 대한 채널 품질 정보 집합  $\Theta^{(k)} = \{\gamma_n^{(k)}; n \in I^{(k)}\} \in R^M$ 을 기지국에 알려준다.

현실적으로 볼 때, 기지국에 전달되는 각 부채널의 채널 정보는 실수가 아닌 양자화된 값으로 추정된 채널 품질 값과 변조크기 및 채널 부호화를 짝을 매핑시켜 주는 참조 테이블 등을 이용하여 얻어지는 값이지만 분석의 편의를 위해 채널 품질 값 자체를 케환해 주는 것으로 가정한다. 물론, 적응적 변조 및 채널부호화 (AMC)의 적절한 동작을 위해서 채널 품질 값과 변조크기 및 채널부호화를 짝을 매핑시켜 주는 참조 테이블의 설계는 매우 중요한 이슈이지만 본 논문에서는 고려하지 않을 것이다.

**자원 할당:** 일단 모든 사용자로부터 채널 정보를 수신하면 기지국은 각 부채널에 대해 최대의 채널 품질을 갖는 사용자를 할당하고 전체 부채널에 대한 사용자 할당이 이루어지면 전체 전송율이 최대가 되도록 전력  $p_n$ 을 각 부채널에 할당한다. 만약, 어떤 부채널이 빈 상태로 남아 있는 경우 1비트 케환 방법에서와 마찬가지로 기지국은 그 부채널에 전력을 할당하지 않고 이를 다른 부채널에 나누어 줌으로써 다른 부채널에 보다 높은 전송율을 할당하는 것이 가능하다. 이러한 선택적 케환 방식에 기초하여,  $n$ 번째 부채널에 대해 이를  $M$ 개의 가장 좋은 부채널 중 하나로 선택한 사용자의 수를  $K'_n$ 이라 하고 이들 사용자 인덱스의 집합을  $J_n = \{j_k; k=1,2,\dots,K'_n\}$ 로 나타내면 전체 전송율은 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{1}_{K'_n > 0} \log(1 + p_n \max_{k \in J_n} \gamma_n^{(k)}) \quad (12)$$

**성능분석:** 시스템 수율은 랜덤 채널  $H$ 에 대한 식(12)의 앙상블 평균으로 다음과 같이 주어진다.

$$R_{select}(M) = E_H \left[ \max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{1}_{K'_n > 0} \log(1 + p_n \max_{k \in J_n} \gamma_n^{(k)}) \right] \quad \text{s. t. } \sum_{n=0}^{N-1} p_n = P_T \quad (13)$$

식(13)의 평가는 매우 어려운데 그 이유는 우선 랜덤 변수  $K'_n$ 들이 서로 통계적으로 독립이지 않고 따라서 각 사용자에 대한  $M$ 개의 채널 품질  $\gamma_n^{(k)}$ ,  $k \in J_n$ 의 확률 분포가 각 분포함수의 복합(mixture)로 주어지기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 프로토콜을 약간 변형하여 근사적인 분석방법을 도입하고자 한다.

**근사화:** 여기서 논의할 근사화는 기본적으로 각 부채널에 대한 채널 품질을 통계적으로 독립이 되도록 만들어 성능 분석을 단순화하기 위한 근사화이다. 이를 위해 우선 선택적 케환 방식의 프로토콜을 약간 수정하는데 수정된 시나리오에서는, 1비트 케환 방법에서와 유사하게, 실수의 채널 품질 정보를 기지국에 케환 전송할 것인지 말 것인지를 결정하는데 사용되는 네트워크 파라미터인 문턱값을 정의한다. 그러나, 1비트 케환 방법에서와 달리 문턱값 보다 큰지 작은지의 1비트 정보만을 케환하지 않고 문턱값 보다 큰 값의 채널 품질을 갖는 부채널 모두에 대해 이들의 부채널 인덱스와 채널 품질 값을 모두 케환한다. 또한, 이 문턱값은, 1비트 케환 방법에서처럼 네트워크 수율이 최대화 되도록 설정되는 대신, 평균적인 케환 정보의 수 (케환될 부채널의 평균 개수)가 주어진 수  $M$ 이 되도록 설정된다. 즉, 문턱값을  $\alpha$ 라 하면 이에 해당하는 평균 케환 정보의 수  $M(\alpha)$ 는

$$M(\alpha) = N \Pr \{ \gamma_n^{(k)} > \alpha \} = N e^{-\alpha/\Gamma}$$

로 주어지는데, 이에 따라, 주어진 평균 케환 정보의 수  $M$ 에 대한 수정된 선택적 케환 방법에서의 문턱값은 다음과 같다.

$$\alpha = \Gamma \log(N/M) \quad (14)$$

채널 품질이 문턱값 보다 작은 부채널에 대한 정보는 실제로 기지국에 전달되지 않으므로 기지국의 입장에서 이들의 채널 품질은 단순히 0인 것으로 가정하고 전력 및 사용자 할당이 이루어지는데, 따라서, 기지국에서 본, 실효 채널 품질은

$$\bar{\gamma}_n^{(k)} = \begin{cases} \gamma_n^{(k)} & \text{if } \gamma_n^{(k)} \geq \alpha_n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

로 정의될 수 있으며, 이의 누적 확률 분포함수는

$$\Pr \{ \bar{\gamma}_n^{(k)} < x \} = \begin{cases} 1 - e^{-x/\Gamma} & \text{if } x \geq \alpha_n \\ 1 - e^{-\alpha/\Gamma} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

로 주어진다. 그러므로, 식(15)와 (16)를 이용하면, 수정된 선택적 케환 방식의 성능은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_{modified}(M) = E_H \left[ \max_{\mathbf{p}} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \log(1 + p_n \bar{\gamma}_n^{(k)}) \right] \quad (17)$$

여기서,  $\tilde{\gamma}_n^* = \max_{1 \leq k \leq K} \tilde{\gamma}_n^{(k)}$ 이며, 이의 누적 확률 분포함수는

$$\begin{aligned} \tilde{F}_K(x) &= \Pr\{\tilde{\gamma}_n^* < x\} \\ &= \begin{cases} (1 - e^{-x/\Gamma})^K & \text{if } x \geq \alpha \\ (1 - e^{-\alpha/\Gamma})^K & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

이다. 식(17)은 식(13)에 비해 훨씬 쉽게 수치화될 수 있는데 이는 각각의  $\tilde{\gamma}_n^*$  이 서로 통계적으로 독립이기 때문이다. 식(3)에서와 마찬가지로  $N \rightarrow \infty$ 을 가정하고 임의의  $H$ 에 대한  $\tilde{\gamma}_n^*$ 의 도수분포가 이의 확률분포함수로 수렴된다고 가정하면, 식(17)은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} R_{modified}(M) &= \\ \max_{\lambda(\cdot)} \int_{\alpha}^{\infty} \log(1 + \lambda(\gamma)\gamma) d\tilde{F}_K(\gamma) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $\alpha=0$ 으로 놓으면 식(18)은 식(3)과 같아지는데 이는 당연한 결과로 문턱값을 0으로 놓는다는 것은 모든 부채널의 채널품질 정보를 모두 케환한다는 것이며 (식(14)로부터  $M=N$ 인 경우  $\alpha=0$ 가 됨), 따라서 기지국은 완전한 채널정보를 가지고 자원 할당을 수행할 수 있어 식(3)으로 주어진 성능과 같아져야 하는 것은 당연하다.

#### IV. 수치적 성능 비교

본 절에서는 앞서 언급한 두 종류의 부분적 채널 정보 케환 방식에 대해 시스템 수율 성능을 비교한다. 그림 1에 두 종류의 부분적 채널 정보 케환 방

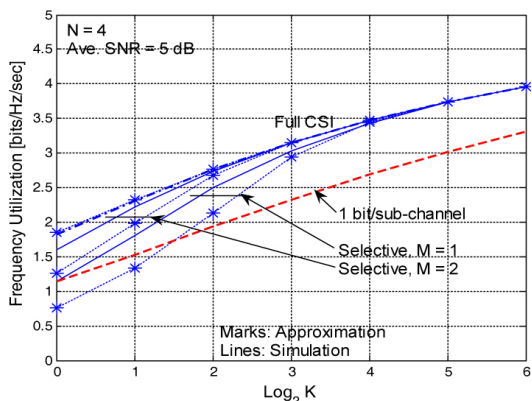


그림 1. 평균 네트워크 수율 N = 4의 경우

식에 대해 4개의 부채널을 갖는( $N=4$ ) 순방향 직교 주파수 분할 다중화 시스템의 수율 성능을 사용자 수  $K$ 의 함수로 나타내었다. 그림에서 수평축은 로그 스케일로  $\log_2 K$ 이며 여기서  $K$ 는 각각 1, 2, 4, 8, 16, 32 및 64로 놓았다. 1비트 케환 방식에 대해서는 식(11)을 수치적으로 평가하여 얻었으며 선택적 케환 방식에 대해서는  $M=1,2$ 인 두 경우에 대해 근사화된 성능(점선)과 모의 실험 결과(실선)를 모두 도시하였는데, 여기서, 근사화된 성능은 식(19)를 수치적으로 평가한 것이다. 모의 실험에서는 (1) 우선 서로 통계적으로 독립인 지수 분포의 랜덤 변수로 채널 품질정보를 여러 번 생성하여 (2) 생성된 채널 품질정보 집합  $H = \{\gamma_n^{(k)} | n=0,1, \dots, k=1,2, \dots, K\}$ 로부터 식(12)를 직접 평가하고 (3) 식(13)에 제시된 바와 이들의 평균을 취하여 성능을 얻었다. 비록, 근사적으로 분석된 결과와 모의 실험 결과는 차이를 보이고 있지만 시스템 내에 사용자수가 많은 경우 대체적인 경향은 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 1로부터 시스템 내에 사용자 수가 작은 경우 선택적 케환 방식이 불리하나 사용자 수가 전체 부채널 수보다 많아지면서 완전한 채널정보를 사용하는 이상적인 성능에 수렴하는 것을 알 수 있다. 반면, 1비트 케환 방식의 경우 전반적으로 완전한 채널정보를 사용하는 이상적인 성능과 차이를 보이기는 하지만 확실히 수율이 시스템 내 사용자수에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2는  $N=16$ 에 대하여 같은 방식으로 성능을 평가한 것을 보여주는데 선택적 케환 방식의 성능이  $N=4$ 인 경우 보다 더 나쁘게 나타났으며, 따라서, 선택적 케환 방식의 경우 시스템 파라미터  $M$ 은 실효 주파수 다중화 지수  $N$ 에 비례하여 적당한 값으로

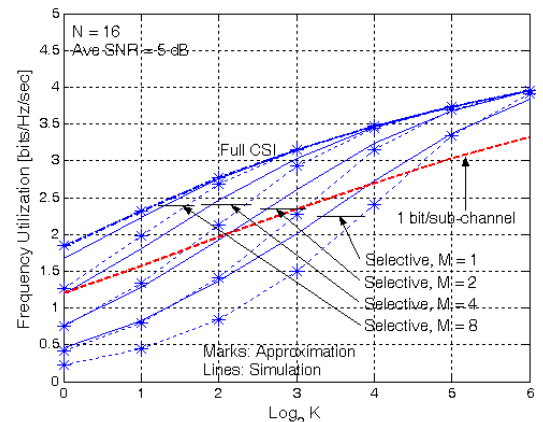


그림 2. 평균 네트워크 수율 N = 16의 경우

설정되어야 충분한 다중 사용자 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 1과 2에서 볼 수 있듯 수정된 선택적 케환 방식을 이용한 근사화된 분석 결과와 실제 선택적 케환방식을 사용하는 시스템의 성능차이는 수정된 선택적 케환방식에서 주파수 다중화지수  $N$ 에 비해 평균 케환 정보의 개수  $M$ 이 상대적으로 작으면 확률적으로 채널정보를 전혀 케환하지 못하게 되는 경우가 자주 발생하여 근사적 분석결과가 실제성능에 비해 열등하게 나타난다. 그러나, 실제 시스템에서 사용자수에 따라 케환 정보의 개수  $M$ 을 적절히 조절하여 전체 케환 오버헤드  $MK$ 를  $N$ 보다 큰 값으로 일정히 유지할 수 있도록 설정한다면 근사적 분석 결과와 실제 성능간의 차이는 본 논문의 결과 보다는 보다 좁혀질 수 있을 것으로 판단되며, 따라서, 제시된 분석법은 실제 시스템 설계의 분석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

### V. 결 론

본 논문에서는 1비트 케환 방식과 선택적 케환 방식으로 명명된 두 가지 부분적 채널 정보 케환 방식에 대한 수율 성능 특성을 비교 분석하였다. 사용자 수가 실효 주파수 다중화 지수  $N$ 보다 큰 경우 선택적 케환 방식이 작은 역방향 오버헤드로 이상적인 수율 성능을 얻을 수 있어 1비트 케환 방식에 비해 우수할 것으로 보이나 그 반대의 경우 수율 성능이 매우 낮아 문제가 될 수 있다. 한편 1비트 케환 방식의 경우 비록 이상적인 수율 성능과는 차이가 있으나 사용자 수와 상관없이 다중 사용자 이득이 얻어지므로 보다 안정적으로 사용될 수 있다. 그러나, 1비트 케환 방식에서는 문턱값의 적절한 선택이 이루어져야 하는데 이 역시 실제 구현상에서는 다분히 문제의 소지를 가질 수 있는 부분이다.

### 참 고 문 헌

[1] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation," *IEEE J. on Selected Areas in Comm.*, Vol.17, No.10, pp.1747-1758, Oct. 1999.

[2] W. Rhee and J.M. Cioffi, "Increase in Capacity of Multiuser OFDM System Using Dynamic Sub-Channel Allocation," *Proc. of VTC'00-*

*Spring, Volume: 2*, pp.15-18 May 2000.

[3] H. Yin, H. Liu, "An efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems," *Proc. of Globecom '00, Vol.1*, pp. 103-107, San Francisco, Nov. 2000.

[4] J. Jang and K. Lee, "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol.21, No.2, pp.171-178, Feb. 2003.

[5] P. Viswanath, D.N.C. Tse and R. Laroia, "Opportunistic Beamforming using Dumb Antennas," *IEEE Trans. on Info. Theory*, Vol. 48, No.6, pp.1277-1294, June 2002.

[6] M. Sharif and B. Hassibi, "On the Capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.51, No.2, pp.506-522, Feb. 2005.

[7] A.J. Goldsmith and M. Effros, "The Capacity Region of Broadcast Channels with Intersymbol Interference and Colored Gaussian Noise," *IEEE Trans. on Info. Theory*, Vol.47, No.1, pp.219-240, Jan. 2001.

[8] P. Svedman, S.K. Wilson, L. Cimini and B. Ottersten, "A Simplified feedback and scheduling scheme for OFDM," *Proc. of VTC 2005*, pp. 1878-1882, May 17-19, 2004.

[9] D. Gesbert and S. Alouini, "Selective multiuser diversity," *Proc. of Intl. Symp. on Sig. Proc. and Info. Tech. 2003 (ISSPIT'03)*, Dec. 2003, Darmstadt, Germany.

[10] D. Gesbert and S. Alouini, "How much feedback is multi-user diversity really worth," *Proc. of Intl. Symp. on Sig. Proc. and Info. Tech. 2003 (ISSPIT'03)*, Dec. 2003, Darmstadt, Germany.

[11] S. Sanayei, A. Nosratinia and N. Aldahir, "Opportunistic dynamic subchannel allocation in multiuser OFDM networks with limited feedback," *Proc. of IEEE Info. Theory Workshop 2004 (ITW04)*, pp.182-186, Oct. 2004, San Antonio, TX.

[12] S. Sanayei and A. Nosratinia, "Exploiting multi-user diversity with only 1-bit feedback," *Proc. WCNC 2005*, pp.978-983, March. 2005, Los Angeles, CA.

[13] Somekh, O. Simeone, A.M. Haimovich and Y.

Bar-Ness, "Sum-Rate Analysis of OFDM Downlink Channels with 1-bit Feedback per Sub-carrier," *Proc. of CISS' 06*, pp.306-311, Mar. 2006.

- [14] Z. Han and Y. Lee, "Opportunistic Scheduling with Partial Channel Information in OFDMA/FDD Systems," *Proc. Of VTC'04 Fall*, Vol.1, pp.511-514, Sept. 2004
- [15] M.J. Fekhereddin, M. Sharif and B. Hassibi, "Throughput Analysis in Wideband MIMO broadcast channels with partial feedback," *Proc. of IEEE Workshop on SPAWC 2005*, pp.771-775, June 2005.
- [16] S. Yoon, C. Suh, Y. Cho, DS Park and Y. Kim, "Orthogonal Frequency Division Multiple Access with An Aggregated Sub-channel Structure and Statistical Channel Quality Measurement," *Proc. of VTC 2004 Fall*, pp.1023-1027, Sep.26-29, Los Angeles, CA.
- [17] S. Yoon, "Performance of Orthogonal Frequency Division Multiple Access with Sub-banded Structure and Statistical Channel Quality Measurement," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol.7, No.7, July 2008.

윤 석 현 (Seokhyun Yoon)

정회원



1992년 2월 성균관대학교 전자공학 학사

1996년 2월 성균관대학교 전자공학 석사

1999년 3~8월 한국전자통신연구원 선임연구원

2003년 1월 New Jersey Institute of Technology, 전기 및 컴퓨터 공학과 박사

2003년 3월~2005년 2월 삼성전자 정보통신총괄 통신연구소 책임연구원

2005년 3월~현재 단국대학교 전기전자컴퓨터 공학부 조교수

<관심분야> 무선 전송/접속, 채널부호, 다중안테나