

논문 2007-44TC-3-7

# 셀룰러 OFDMA 시스템을 위한 간섭의 집중화

(Interference Localization for Cellular OFDMA Systems)

임 민 중\*

(Minjoong Rim)

## 요 약

셀룰러 OFDMA 시스템에서는 인접 셀 간섭이 각 부반송파별로 다른 값을 가진다. 만일 각 부반송파의 간섭의 양의 추정이 가능하다면 채널 복호기에 입력되는 데이터의 크기를 간섭의 양에 반비례하도록 조절함으로써 성능을 향상시킬 수 있다. 전통적인 셀룰러 시스템들이 셀간 간섭의 영향을 완화시키기 위하여 간섭의 평균화 기술을 선호하는데 반해서 본 논문에서는 셀간 간섭 추정이 가능하다고 가정할 때 적은 수의 부반송파에 간섭을 집중시킴으로써 시스템 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보인다. 셀간 간섭의 추정이 이루어지지 않는 경우, 특정 부반송파에 큰 간섭이 오지 않도록 간섭을 평균화하는 것이 유리한 반면, 셀간 간섭의 추정이 가능한 경우에는 간섭의 평균화를 사용하는 것보다 간섭의 집중화를 사용하는 것이 더 이득을 얻을 수 있다.

## Abstract

Cellular OFDMA systems may suffer from various amounts of inter-cell interferences according to subcarriers. If it is possible to estimate the interference level of each subcarrier, the performance can be improved by adjusting the magnitude of channel decoder input signals inversely proportional to the interference amounts. While conventional cellular systems prefer to use interference averaging techniques for mitigating inter-cell interferences, this paper shows that localizing inter-cell interferences to the reduced number of subcarriers can significantly improve the system performance assuming that interference estimation can be employed. If interference estimation is not used, it is more favorable to use interference averaging techniques to avoid excessive interference levels to certain subcarriers. On the other hand, if interference estimation can be employed, interference localization is more beneficial than interference averaging.

**Keywords:** Inter-cell Interference, Interference Averaging, Interference Localization, OFDMA, Cellular

## I. 서 론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 주파수 선택적 페이딩 환경에서 구현상의 복잡도가 크지 않으면서 우수한 성능을 나타내므로 광대역 무선통신 시스템에 널리 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. OFDM이 셀룰러 이동통신 시스템에 적용이 될 때에는 인접 셀로 미치는 간섭의 영향을 최소화하기 위한 방법이 필요하며, 셀 간의 간섭을 평균화하기 위해서

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)<sup>[2,3]</sup>, FH-OFDM (Frequency Hopping OFDM)<sup>[4,5]</sup>, MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access)<sup>[5,6]</sup> 등의 형태를 취하고 있다. MC-CDMA의 경우 주파수축에서의 대역확산을 통해서, 그리고 FH-OFDM에서는 부반송파 호핑을 통해서 부반송파의 간섭이 평균화되도록 한다. OFDMA 시스템의 경우에도 데이터를 전체 주파수축에 걸쳐 선택된 여러 부반송파에 흩어져 전송하거나 또는 주파수축에서 신호를 반복시킴으로써 셀간 간섭을 평균화시킬 수 있다.

셀룰러 OFDMA 시스템에서는 각 부반송파에 따라서 주변 셀로부터 오는 간섭의 양이 다르다. 만일 부반송파별로 간섭의 양을 정확히 측정할 수 있다면 채널 복

\* 정희원, 동국대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University)  
접수일자: 2007년 2월 8일, 수정완료일: 2007년 3월 14일

호기에 데이터를 입력할 때 간섭의 양에 반비례하도록 데이터의 크기를 조절함으로써 성능을 향상시킬 수 있다<sup>[7]</sup>. 셀간 간섭 추정을 고려하지 않은 셀룰러 OFDMA 시스템들은 셀간 간섭이 특정 부반송파에 집중이 될 경우 간섭으로 인한 성능의 감소가 발생할 수 있으므로 간섭이 평균화되도록 (Interference Averaging) 시스템을 설계하였다. 그러나 정확한 셀간 간섭 추정이 이루어져 각 부반송파별로 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)의 추정이 가능하다면, 간섭을 평균화하지 않고 일부 부반송파에 간섭을 집중화함으로써 (Interference Localization) 오히려 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 셀간 간섭 추정을 통해서 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보이고 셀간 간섭 추정이 이루어지는 시스템에서는 간섭의 평균화보다 간섭의 집중화가 이득이 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 셀간 간섭을 고려한 채널 보상 방법을 설명하며, III장에서는 셀간 간섭 추정이 가능하다고 할 때의 간섭 집중화 개념에 대해서 살펴본다. IV장에서는 모의실험을 통해 제안하는 방법이 OFDMA 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보이며 V장에서는 논문의 결론을 맺는다.

## II. 채널보상과 간섭의 고려

### 1. 간섭을 고려하지 않은 채널보상

OFDMA 시스템에서 전송되는 데이터 심벌을  $X_k$ , 해당되는 주파수 응답을  $H_k$ , 간섭 및 잡음을  $W_k$ 라고 하자. 이 때 수신된 신호  $R_k$ 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$R_k = H_k X_k + W_k \quad (1)$$

수신된 데이터는 채널보상된 값에 SINR 가중치를 적용하여 연평정 값을 얻고 채널복호기로 입력한다. 채널추정이 완벽하다고 가정하였을 때 연평정 값을 얻기 위한 채널보상된 신호  $Y_k$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Y_k = \frac{R_k}{H_k} \text{SINR}_k \quad Y_k = \frac{R_k}{H_k} \text{SINR} \quad (2)$$

주변 셀에 의한 간섭이 없거나 측정이 어려운 경우, 잡음의 분산은 모든 부반송파에 동일하다고 가정하며 SINR은 다음과 같이 채널 이득에 비례한 값을 사용한다.

$$\text{SINR}_k \propto |H_k|^2 \quad (3)$$

따라서 셀간 간섭을 고려하지 않을 때의 채널보상은 다음과 같이 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 가중치를 적용하는 수식을 이용한다.

$$Y_k = \frac{R_k}{H_k} |H_k|^2 = H_k^* R_k \quad (4)$$

### 2. 간섭을 고려한 채널보상

OFDMA 셀룰러 시스템에서는 주변 셀에 의한 간섭의 양이 부반송파마다 다를 수 있으므로 셀간 간섭을 고려한 채널보상이 필요하다. 수신된 신호  $R_k$ 에 해당하는 잡음 및 간섭의 양이  $\sigma_k^2$ 라면 SINR의 값은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\text{SINR}_k \propto \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \quad (5)$$

따라서 식 (2)는 다음과 같이 주어진다.

$$Y_k = \frac{R_k}{H_k} \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} = \frac{H_k^*}{\sigma_k^2} R_k \quad (6)$$

식 (6)에서 채널값  $H_k^*$ 은 채널추정을 통해서, 그리고 잡음 및 간섭의 양  $\sigma_k^2$ 은 간섭 추정을 통해서 얻는다<sup>[7]</sup>.

### 3. 간섭을 고려할 때의 성능

채널값과 셀간 간섭의 양을 정확히 예측할 수 있다면 이를 이용하여 SINR 가중치를 주는 것이 SNR 가중치를 주는 것보다 우수한 성능을 얻는다. 만일 충분한 수준의 채널부호화가 적용이 되었다면  $K$ 개의 블록을 통해서 전송되는 패킷은 부호화 디버시티 (coded diversity) 효과를 얻게 되며, 특히 채널부호화율이 작다면 그 성능은 심볼 결합의 경우와 유사한 성능을 보인다<sup>[8]</sup>. 전송된 심벌  $X$ 가  $K$ 개의 페이딩 채널을 통과하여 수신이 된다고 가정하자.

$$R_k = H_k X + W_k, \quad k = 1, \Lambda, K \quad (7)$$

SINR 가중치 기반의 심볼 결합은 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \sum_{k=1}^K H_k^* R_k = \left( \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \right) X + \sum_{k=1}^K H_k^* W_k \quad (8)$$

각 채널에서의 송신 신호의 신호전력이  $1/K$ 이라고 가정하면 식 (8)의 신호대잡음비는 다음과 같다.

$$SNR_{SNR\ Weighting} = \frac{1}{K} \frac{\left( \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \right)^2}{\sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2} \quad (9)$$

한편, SINR 가중치 기반의 심볼 결합은 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \sum_{k=1}^K \frac{H_k^*}{\sigma_k^2} R_k = \left( \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \right) X + \sum_{k=1}^K \frac{H_k^*}{\sigma_k^2} W_k \quad (10)$$

식 (10)에서의 신호대잡음비는 다음과 같다.

$$SNR_{SNR\ Weighting} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \quad (11)$$

식 (9)와 식 (11)을 비교하기 위하여 다음과 같은 성분을 가지는 벡터  $a$ 와  $b$ 를 정의하자.

$$\begin{aligned} a_k &= H_k \sigma_k \\ b_k &= \frac{H_k}{\sigma_k} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에 Schwarz 부등호  $\langle a, b \rangle^2 \leq \langle a, a \rangle \langle b, b \rangle$ 를 적용하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\left( \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \right)^2 \leq \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \quad (13)$$

식 (13)에 의해서 가중치 방식에 따른 SNR 값은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$SNR_{SNR\ Weighting} \leq SNR_{SINR\ Weighting} \quad (14)$$

식 (14)에서 등호는  $\sigma_k^2$ 이 모두 같은 값을 가질 때 성립한다. 간섭이 모든 부반송파에 동일하지 않다면 간섭 추정을 통해서 성능을 향상시킬 수 있다.

#### 4. 셀간 간섭 추정

그림 1의 WiBro 상향링크의 타일 구조나<sup>[3]</sup> IEEE802.20 MBTDD (Mobile Broadband Time Division Duplexing)의 블록과 같이<sup>[4]</sup> 인접 셀간의 충돌이 블록 단위로 일어난다면, 블록에 포함되어 있는 파일럿을 이용하여 각 블록이 겪는 잡음의 크기를 추정할

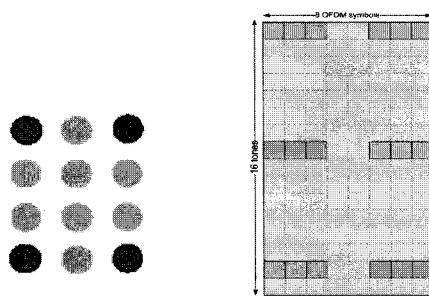


그림 1. WiBro 상향링크 타일과 MBTDD 블록 구조  
Fig. 1. WiBro uplink tile and MBTDD block structures.

수 있으며 이를 통해 성능 향상을 얻을 수 있다<sup>[7]</sup>. 간섭의 추정은 반복되는 파일럿이 얼마나 유사한가를 통해서 알 수 있으며 이 때 단말의 이동속도, 지연확산, 주파수 오차, 타이밍 오차 등에 대한 영향을 제거하고 순수한 간섭의 영향만을 추정하여야 한다. MBTDD의 블록의 경우 파일럿이 인접하여 위치하므로 쉽게 간섭추정이 가능하며 WiBro의 타일은 조금 더 복잡한 알고리즘이 필요하다<sup>[7]</sup>. WiBro 하향링크 시스템과 같이 블록 단위의 전송이 이루어지지 않고 불규칙한 부반송파 패턴을 사용하는 경우에도 인접 셀의 프리앰블 패턴 및 프리앰블 신호의 크기와 FCH (Frame Control Header)에 포함되어 있는 부반송파 그룹의 사용에 대한 정보를 얻을 수 있다면 각 부반송파에 대해서 대략적인 간섭의 양을 추정할 수 있다. 간섭의 정확한 추정은 성능 향상에 도움이 되므로 간섭의 추정이 용이하도록 시스템의 설계 및 운용이 이루어져야 한다.

### III. 간섭의 평균화와 집중화

#### 1. 간섭의 평균화와 집중화

간섭의 양에 의한 성능을 분석하기 위해서 각 채널의 잡음 및 간섭의 최소값이 정해져 있으며 전체 양은 다음과 같이 고정이 되어 있다고 가정하자.

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &\geq \eta > 0 \\ \sum_{k=1}^K \sigma_k^2 &= K\eta + K\gamma \end{aligned} \quad (15)$$

간섭을 채널에 어떻게 분포시키는가에 따라서 성능에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 간섭에 의한 영향을 고려하기 위해 다음과 같은 두 가지 경우를 고려하여 보자. 한 경우는 간섭이 모든 채널에 평균화되도록 분포시키는 것이며 다음과 같이 주어진다고 하자.

$$\sigma_k^2|_{\text{Interference Averaging}} = \eta + \gamma \quad 1 \leq k \leq K \quad (16)$$

다른 한 가지 경우는 간섭이 특정 채널에 집중화되도록 결정하는 것이며 다음과 같이 주어진다고 하자.

$$\sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}} = \begin{cases} \eta + K\gamma & k = 1 \\ \eta & 2 \leq k \leq K \end{cases} \quad (17)$$

간섭이 평균화되는 경우 모든 부반송파에 비슷한 양의 간섭이 오게 되며, 간섭이 집중화되는 경우 특정 부반송파들은 매우 간섭이 크고 나머지는 적은 양의 간섭을 가진다.

## 2. 주변 셀의 채널 크기에 따른 간섭 할당

만일 주변 셀의 채널의 크기에 대해서 알 수 있고 이에 따른 채널 할당을 할 수 있다고 가정한다면 주변 셀에 미치는 간섭의 분포를 조절함으로써 주변 셀의 성능을 향상시킬 수 있다. 수식 전개를 간단히 하기 위해서  $|H_k|^2$ 가 가장 작은 값을 가지는  $k$ 는 1이라고 가정하자. 먼저 SNR 가중치를 적용할 때의 간섭의 할당의 영향을 보기 위해서 식 (9)를 고려해보자.

식 (15)를 만족하면서 식 (9)를 최대화하는 잡음 및 간섭의 양은 식 (17)과 같이 주어진다. 식 (9)의 분모는 식 (15)를 만족하는 임의의 간섭을 식 (17)의 경우와 비교하여 보자.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 - \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}} \\ &= \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 - \left( |H_1|^2 \gamma + \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \eta \right) \\ &= \sum_{k=1}^K (|H_k|^2 - |H_1|^2) (\sigma_k^2 - \eta) \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)은  $|H_k|^2 \geq |H_1|^2$  과  $\sigma_k^2 \geq \eta$  을 이용하였다. 식 (9) 및 식 (18)에 의해서 다음의 식이 성립한다.

$$\operatorname{argmax}_{\sigma_k^2} \{ \text{SNR}_{\text{SNR Weighting}} \} = \sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}} \quad (19)$$

다음은 SINR 가중치를 적용하는 경우를 고려하여 보자. 식 (11)에 식 (17)을 대입하였을 때와 식 (15)를 만족하는 임의의 간섭을 대입하여 비교하였을 때 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}}} - \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \\ &= \left( \frac{|H_1|^2}{\eta + K\gamma} + \sum_{k=2}^K \frac{|H_k|^2}{\eta} \right) - \sum_{k=1}^K \frac{|H_k|^2}{\sigma_k^2} \\ &= \sum_{k=2}^K |H_k|^2 \left( \frac{1}{\eta + \sum_{j=1}^{k-1} (\sigma_j^2 - \eta)} - \frac{1}{\eta + \sum_{j=1}^k (\sigma_j^2 - \eta)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)에서  $|H_k|^2 \geq |H_1|^2$ 이며  $k \geq 2$ 인 경우에 대해서 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\sigma_k^2} \geq \frac{1}{\eta + \sum_{j=1}^{k-1} (\sigma_j^2 - \eta)} - \frac{1}{\eta + \sum_{j=1}^k (\sigma_j^2 - \eta)} \quad (21)$$

식 (11), (20), (21)에 의해서 다음의 식이 성립한다.

$$\operatorname{argmax}_{\sigma_k^2} \{ \text{SNR}_{\text{SINR Weighting}} \} = \sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}} \quad (22)$$

만일 인접 셀의 채널을 정확히 알 수 있고 주변 셀의 성능을 극대화하기 위해서 채널 할당을 한다면 간섭을 가장 채널값이 작은 부반송파에 할당함으로써 인접 셀의 성능을 최대화할 수 있다. 실제적으로는 인접 셀의 성능을 높이기 위해서 인접 셀에 채널에 맞추어 가장 채널값이 작은 부분송파에 간섭을 집중시킨다는 것은 간단한 일이 아니며, 평균적으로 인접 셀에 대한 간섭의 영향이 최소화되도록 간섭을 할당하는 것이 필요하다.

## 3. 간섭 추정을 하지 않을 때를 위한 간섭의 평균화

주변 셀의 순간적인 채널 상태를 고려하지 않고 평균적인 간섭이 최소화되도록 간섭을 할당하는 것을 고려하여 보자. 수신기에서 SNR 가중치를 적용할 때의 식 (9)에서 분모만이 간섭과 상관이 있으므로 분모의 평균 및 분산을 살펴보자. 식 (17)의 간섭 집중화를 하였을 때의 식 (9)의 분모의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E \left\{ \sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2|_{\text{Interference Localization}} \right\} \\ &= E \left\{ |H_k|^2 \right\} (K\eta + K\gamma) \end{aligned} \quad (23)$$

식 (16)의 간섭 평균화를 하였을 때의 식 (9)의 분모의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E\left\{\sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 \right|_{\text{Interference Averaging}} \} \\ & = E\left\{|H_k|^2 \right\} (K\eta + K\gamma) \end{aligned} \quad (24)$$

분모의 평균이 같다는 것이 식 (9)의 평균이 같다는 것을 뜻하지는 않지만 평균적인 성능에서는 커다란 차이가 없을 것으로 예측할 수 있다.

평균이 유사하더라도 불능률(outage)은 분산에 따라 크게 차이를 가질 수 있다. 식 (17)의 간섭 집중화를 하였을 때 식 (9)의 분모의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & V\left\{\sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 \right|_{\text{Interference Localization}} \} \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} ((\eta + K\gamma)^2 + (K-1)\eta^2) \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} (K\eta^2 + 2K\eta\gamma + K^2\gamma^2) \end{aligned} \quad (25)$$

식 (16)의 간섭 평균화를 하였을 때의 식 (9)의 분모의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & V\left\{\sum_{k=1}^K |H_k|^2 \sigma_k^2 \right|_{\text{Interference Averaging}} \} \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} K(\eta + \gamma)^2 \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} (K\eta^2 + 2K\eta\gamma + K\gamma^2) \end{aligned} \quad (26)$$

식 (25)와 식 (26)을 비교하면 간섭 집중화를 할 경우 식 (9)의 분모의 분산이 커지며 따라서 식 (9)의 분산이 커질 것임을 예측할 수 있다. SNR 가중치를 적용하지 않는 경우에는 주파수축에서 부반송파를 골고루 사용하여 간섭의 평균화를 이루어야 한다. 특히 셀 경계에 있는 사용자의 경우 신호를 주파수축에서 반복시키며 이를 통해 주파수 다이버시티와 간섭의 평균화 효과를 동시에 얻도록 한다.

#### 4. 간섭 추정을 할 때를 위한 간섭의 집중화

수신기에서 SINR 가중치를 적용할 때의 식 (11)의 평균과 분산을 살펴보자. 식 (17)의 간섭의 집중화를 적용하였을 때 식 (11)의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \} \\ & = E\left\{|H_k|^2 \right\} \left( \frac{1}{K\eta + K^2\gamma} + \left( \frac{K-1}{K} \right) \frac{1}{\eta} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

만일  $K \gg 1$ 이라면 식 (27)은 다음과 같이 근사화된다.

$$\begin{aligned} & E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \} \\ & \approx E\left\{|H_k|^2 \right\} \frac{1}{\eta} \quad (K \gg 1) \end{aligned} \quad (28)$$

식 (16)의 간섭의 평균화를 적용하였을 때의 식 (11)의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Averaging}} \} \\ & = E\left\{|H_k|^2 \right\} \frac{1}{\eta + \gamma} \end{aligned} \quad (29)$$

식 (28) 및 식 (29)를 비교할 때 간섭의 집중화와 간섭의 평균화를 하였을 때의 신호대잡음비의 평균의 비는 다음과 같다.

$$\frac{E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \}}{E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Averaging}} \}} \approx \frac{\eta + \gamma}{\eta} \quad (30)$$

식 (30)에서 간섭의 집중화와 간섭의 평균화는  $\gamma \gg \eta$ 일 때, 즉 간섭의 집중화가 많이 이루어질 때 커다란 성능 차이를 보인다는 것을 볼 수 있다. 식 (17)의 간섭의 집중화를 적용하였을 때의 식 (11)의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & V\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \} \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} \left( \frac{1}{K(\eta + K\gamma)^2} + \left( \frac{K-1}{K} \right) \frac{1}{\eta^2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

만일  $K \gg 1$ 이라면 식 (30)은 다음과 같이 근사화된다.

$$\begin{aligned} & V\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \} \\ & \approx V\left\{|H_k|^2 \right\} \frac{1}{\eta^2} \end{aligned} \quad (32)$$

식 (32)를 식 (28)의 평균으로 정규화시키면 다음과 같다.

$$\frac{V\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \}}{E\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Localization}} \}} \approx \frac{V\left\{|H_k|^2 \right\}}{E\left\{|H_k|^2 \right\}} \quad (33)$$

식 (16)의 간섭의 평균화를 적용하였을 때 식 (11)의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & V\left\{SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right|_{\text{Interference Averaging}} \} \\ & = V\left\{|H_k|^2 \right\} \frac{1}{(\eta + \gamma)^2} \end{aligned} \quad (34)$$

식 (34)를 식 (29)의 평균으로 정규화시키면 다음과 같다.

$$\frac{V \left[ SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right]_{\text{Interference Averaging}}}{E \left[ SNR_{SINR \text{ Weighting}} \right]_{\text{Interference Averaging}}} \approx \frac{V \left[ |H_k|^2 \right]}{E \left[ |H_k|^2 \right]} \quad (35)$$

정규화된 분산의 식 (33)과 식 (35)는  $K \gg 1$  일 경우 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 간섭의 집중화를 적용하면 간섭의 평균화 대비 신호대간섭비의 평균은 대폭 증가하지만 정규화 된 분산은 증가하지 않음으로 인해 평균 데이터 전송률 및 불능률의 양 측면에서 획기적인 개선이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 간섭의 추정을 바탕으로 한 SINR 가중치를 적용하는 경우에는 SNR 가중치를 적용하는 경우와는 달리 간섭의 집중화가 성능 향상에 커다란 도움이 된다.

## 5. 자원의 관리

지금까지의 시스템들은 셀간 간섭 추정에 대한 고려가 부족하여 수신기에서 SNR 가중치를 적용한다고 가정하였으며 특정 부반송파에 간섭이 집중되지 않도록 하기 위하여 간섭의 평균화를 하였다. 그러나 성능을 향상시키기 위해서는 셀간 간섭의 추정이 용이하도록 시스템이 설계되어야 하며 수신기에서는 SINR 가중치에 기반한 채널보상을 하여야 한다. 시스템이 셀간 간섭의 추정 및 SINR 가중치의 적용이 가능하도록 설계된다면 충분한 다이버시티가 확보가 되는 경우에는 간섭의 평균화가 아니라 간섭의 집중화가 이루어져야 한다.

현재의 OFDMA 시스템들은 셀 경계에 있는 사용자에 대해서 신호를 여러 개의 부반송파에 반복시켜 대역확산 효과를 얻도록 한다. 신호 전력을 여러 부반송파에 나누는 것은 주파수 다이버시티와 간섭의 평균화 효과를 얻도록 한다. 간섭의 평균화는 셀간 간섭 추정을 하지 않는 시스템에서는 불능률을 떨어뜨려 성능을 향상시키지만 셀간 간섭 추정을 할 수 있는 시스템에서는 성능의 저하를 가져온다. 앞으로의 OFDMA 시스템들은 성능 향상을 위해서 셀간 간섭의 추정이 가능하도록 설계되어야 하며 이 때 성능을 극대화시키기 위하여 간섭의 평균화가 아니라 간섭의 집중화가 이루어져야 한다.

## IV. 실험 및 토의

### 1. 간섭 집중화에 의한 신호대집음비의 변화

먼저 식 (9)와 (11)의 특성을 살펴보기 위해서 잡음 및 간섭의 분산을 증가시키면서 SNR의 변화를 관측하였다. 실험은 12개의 독립적인 Rayleigh 페이딩 채널을 사용하였고, 잡음 및 간섭은 6개의 채널에 대해서는  $1 + \alpha$ 를, 나머지 6개의 채널에 대해서는  $1 - \alpha$ 를 사용하면서  $\alpha$  값을 늘려나가면서 성능을 확인하였다. 이것은 인접 셀간의 충돌이 발생하는 부반송파의 수가 일정수 이하가 되도록 Reed-Solomon 부호 등의 체계적인 부반송파 할당 패턴을 사용한다고 가정한 것이다. 그림 2는  $\alpha$  값에 따른 SNR의 평균 및 하위 2%의 값을 보여준다. 그림의 X축은  $\alpha$  값이며 0인 경우가 간섭이 완전히 평균화되어 있는 경우이고 오른쪽으로 갈수록 간섭의 집중화가 되는 경우이며 Y축은 SNR을 나타내고 있고 값이 클수록 우수한 성능을 가진다. SNR 가중치를 적용하는 경우 간섭의 집중화가 진행되면서 평균 SNR의 개선은 없지만 하위 2% SNR 값은 감소하며, 이는 불능률을 겪는 단말의 수가 증가할 수 있음을 의미한다. 그러나 SINR 가중치를 적용하는 경우에는 간섭의 집중화가 되면서 평균 SNR 및 하위 2% SNR 값이 모두 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 SNR 가중치를 적용하는 경우에는 간섭의 평균화가 유리하며 SINR 가중치를 적용하는 경우에는 간섭의 집중화가 유리하다.

인접 셀간의 충돌이 발생하는 부반송파의 수가 일정

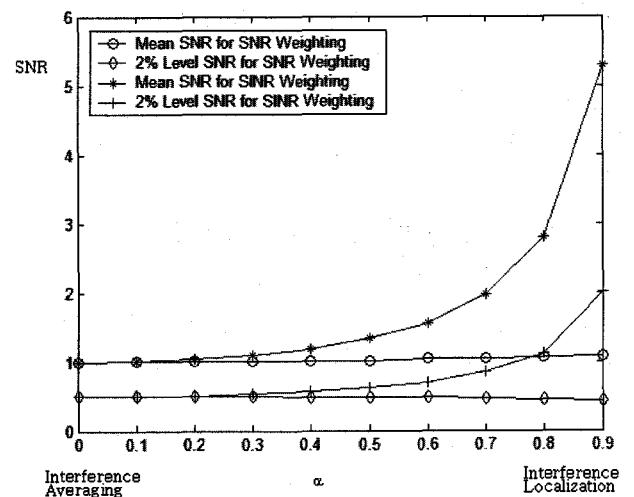


그림 2. 체계적인 할당 방식을 사용하였을 때의 간섭 집중화의 영향

Fig. 2. The effects of interference localization with structured subcarrier allocation.

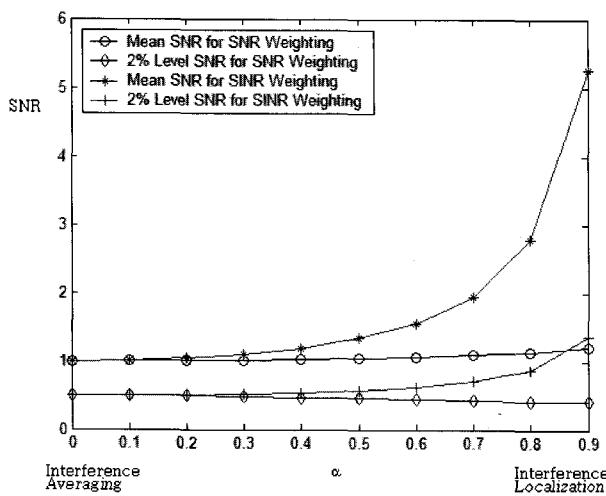


그림 3. 랜덤 할당 방식을 사용하였을 때의 간섭 집중화의 영향

Fig. 3. The effects of interference localization with random subcarrier allocation.

수 이하가 되도록 체계적인 부반송파 할당 패턴을 사용할 경우와는 달리, 인접한 셀들이 랜덤한 형태의 부반송파 할당 패턴을 사용한다면 간섭의 총량의 변화가 발생하며 불능률이 증가할 수 있다. 그림 3은 그림2의 실험과 같은 조건에서 각 채널에 대해서  $1/2$ 의 확률로  $1 + \alpha$ ,  $1/2$ 의 확률로  $1 - \alpha$ 를 사용할 때의 성능이다. 그림 2에 비해서 SINR 가중치를 적용할 때의 하위 2% SNR 값이 다소 떨어지지만 여전히  $\alpha$  값에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. SINR 가중치를 적용할 때 충돌 단위의 블록의 수  $K$ 가 충분히 큰 경우에는 체계적인 부반송파 할당 패턴을 사용하지 않더라도 평균 및 하위 2% SNR 값은 간섭 집중화에 의해 큰 이득을 얻는 것이 가능하다.

## 2. 간섭 평균화와 간섭 집중화

간섭 평균화 및 집중화의 영향을 관찰하기 위하여  $1/4$  부하의 경우(전체 부반송파의  $1/4$ 에 해당하는 부반송파를 임의로 선택)와, 같은 환경에서 모든 단말이 신호를 주파수축에서 4번 반복을 시켰을 때(모든 부반송파 사용)의 경우를 비교하였다. 모든 셀의 모든 단말이 신호를 4번 반복시키면 신호의 전체 전력이 증가하지만 간섭도 같은 양만큼 증가하므로 신호대잡음비의 직접적인 이득은 없다. 그러나 4번 반복시킬 경우 주파수 다이버시티 이득이 커지며 간섭이 평균화되는 효과가 있다. 주파수 다이버시티의 증가는 성능을 향상시키는 방향으로 작용하지만 간섭의 평균화는 어떤 방식의 가중치를 적용하는지에 따라 다른 효과를 가져올 수 있다.

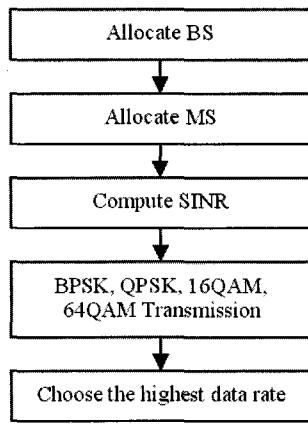


그림 4. 실험 방법

Fig. 4. Simulation method.

표 1. 실험 변수

Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value
Cellular Grid	19 Cells
Cells	Hexagonal
Simulation Type	Downlink
Mobile Assignment	Nearest BS
Propagation Exponent	3.76
Shadowing Standard Deviation	8 dB
Fading	Rayleigh
Loading	1/4
# of Blocks	12 (Independent Fading)
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Channel Coding	1/2 Convolutional Coding

모의실험에서는 셀간의 간섭을 발생시키고 SNR 가중치 및 SINR 가중치를 적용한 신호를 채널 복호기로 입력하였다. 이를 위해서 시스템 레벨 시뮬레이터와 링크 시뮬레이터를 결합하여 채널값 및 셀간 간섭을 발생시키고 데이터를 전송한 후에 제공 가능한 데이터 전송률을 측정하였다.  $1/2$  부호화율로 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM 신호를 전송하고, 전송에 성공한 것 중 가장 높은 변조 방식에 해당하는 데이터 전송률을 데이터 전송률 계산에 적용하였다(그림 4 참조). 데이터 전송률은 bit/sec/Hz로 측정하였고 불능률은 BPSK 전송이 실패한 비율로 정의하였다. 본 실험에서 사용한 변수는 표 1과 같다.

표 2 및 3은 충돌이 발생하는 부반송파의 수가 일정 수 이하가 되도록 체계적인 할당을 할 경우와 랜덤 할당 방식을 사용할 경우의 데이터 전송률 및 불능률 성능을 나타낸다. 블록의 수가 충분히 크므로 두 개 사이의 성능 차이는 크지 않다. 실험 결과를 보면 SINR 가중치의 적용은 SNR 가중치를 적용한 경우에 비해서 항상 좋은 성능을 나타내고 있다. 그러나 두 방법은 간섭의

표 2. 체계적인 할당 방식을 사용하였을 때의 데이터 전송률 및 불능률 성능

Table 2. Data throughput and outage performances with structured subcarrier allocation.

Weighting	Measure	Interference Averaging	Interference Localization
SNR Weighting	Throughput	1.8526	1.7027
	Outage	0.1204	0.1217
SINR Weighting	Throughput	1.9890	2.1593
	Outage	0.0916	0.0344

표 3. 랜덤 할당 방식을 사용하였을 때의 데이터 전송률 및 불능률 성능

Table 3. Data throughput and outage performances with random subcarrier allocation.

Weighting	Measure	Interference Averaging	Interference Localization
SNR Weighting	Throughput	1.8591	1.7261
	Outage	0.1188	0.1219
SINR Weighting	Throughput	1.9888	2.1605
	Outage	0.0884	0.0374

평균화 및 집중화의 영향에서 큰 차이를 가진다. SNR 가중치를 적용하는 경우에는 주파수축에서 반복 전송하여 간섭의 평균화를 하는 것이 다이버시티 효과에 의해서 데이터 전송률의 향상 및 불능률 개선을 가져오지만, SINR 가중치를 적용하는 경우에는 간섭의 집중화를 하는 것이 더 성능을 향상시킨다. 셀룰러 OFDMA 시스템의 성능 향상을 위해서는 SINR 가중치의 적용이 용이하도록 시스템이 설계되어야 하며 주파수축의 반복을 통한 간섭의 평균화를 하는 대신, 특정 부반송파에 전력을 집중시키는 방법을 사용하여야 한다.

### 3. 셀 경계 성능 비교

셀 경계 성능을 좀 더 확인하기 위해 셀 경계에 있는 단말이 셀간 간섭 추정을 하지 않고 SNR 가중치를 적용하는 경우와 셀간 간섭 추정을 이용하여 SINR 가중치를 적용하는 경우에 대해서 부반송파를 일부만 사용하는 경우와 데이터를 주파수축에서 반복시킨 경우의 FER(Frame Error Rate) 성능을 비교하였다. 실험은 19 셀 환경에서 단말을 세 개의 셀의 경계에 위치시키고 셀 간의 간섭을 발생시킨 뒤 FER 성능을 측정하였다. 채널추정 및 간섭추정은 완전하다고 가정하였다. 실험에서 사용된 변수는 표 4와 같다.

표 5 및 6은 동일한 데이터 전송량을 가지는 4가지 경우에 대해서 부반송파 사용량과 반복회수를 변화시켜 가면서 FER의 변화를 살펴 본 것이다. 간섭추정을 하

표 4. 실험 변수

Table 4. Simulation parameters.

Parameter	Value
Cellular Grid	19 Cells
Cells	Hexagonal
Simulation Type	Downlink
Mobile Position	Cell edge (adjacent to 3 cells)
Mobile Assignment	Nearest BS
Propagation Exponent	3.76
Shadowing Standard Deviation	5 dB
Modulation	QPSK
Channel Coding	1/2 Convolutional Coding

표 5. 체계적인 할당 방식을 사용하였을 때의 FER 성능

Table 5. FER performances with structured subcarrier allocation.

Loading	Repetition	FER	
		SNR Weighting	SINR Weighting
1	6	0.3299	0.2364
1/2	3	0.3413	0.1054
1/3	2	0.3513	0.0680
1/6	1	0.3974	0.0454

표 6. 랜덤 할당 방식을 사용하였을 때의 FER 성능

Table 6. FER performances with random subcarrier allocation.

Loading	Repetition	FER	
		SNR Weighting	SINR Weighting
1	6	0.3330	0.2355
1/2	3	0.3394	0.1058
1/3	2	0.3518	0.0687
1/6	1	0.3894	0.0505

지 않는 경우에는 데이터를 주파수축에서 반복시켜서 부반송파 사용량을 늘리는 것이 유리하며 셀간 간섭의 추정을 한다면 데이터를 반복시키지 않음으로써 부반송파 사용량을 줄이는 것이 유리한 것을 볼 수 있다. 실험에서 비교한 4가지 경우에서 셀간 간섭 추정을 하지 않는 경우에는 모든 부반송파를 사용하면서 셀 경계에서 6번 반복시키더라도 매우 높은 오류 확률로 인해 통신이 제대로 이루어지지 못하는 반면 셀간 간섭 추정을 하는 경우에는 1/3 또는 1/6의 부반송파 할당을 사용하여 셀 경계 성능을 대폭 개선하는 것이 가능하다. 셀 전체로 방송되는 신호나 셀 경계에 있는 단말을 위해서는 각 셀들은 간섭 집중화를 통하여 인접한 셀로의 간섭의

영향을 줄이는 것이 가능하다. 많은 간섭 완화 기술들이 간섭의 회피에 초점을 맞추어<sup>[9-11]</sup> 이동통신 시스템의 주요한 부분인 방송되는 부분을 처리하기 어려운 반면 간섭의 집중화 기술은 셀 경계에 있는 단말을 위한 데이터뿐만 아니라 셀 전체로 방송되는 부분을 효과적으로 지원할 수 있다.

## V. 결 론

지금까지의 셀룰러 시스템들에서는 인접 셀로의 간섭이 특정한 부분에 집중이 되지 않도록 간섭을 평균화하는 개념을 바탕으로 시스템 설계가 이루어졌다. 이것은 지금까지의 시스템들이 셀간 간섭에 대한 고려가 부족하여 인접 셀로부터의 간섭량을 추정하여 성능을 향상시키는 것을 시스템 설계의 고려 사항에 넣지 않았기 때문이다. OFDMA 이동통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 인접 셀로부터의 간섭을 추정하여 이를 바탕으로 수신신호에 SINR 가중치를 적용하여야 한다. 셀간 간섭 추정이 가능한 경우에는 시스템의 개념이 지금까지와는 큰 차이를 가지게 되며, 간섭을 평균화하는 대신 간섭을 특정 부반송파에 집중화하도록 시스템 설계가 이루어져야 한다.

이 논문에서는 셀간 간섭 문제를 완화시키기 위하여 셀간 간섭의 추정 및 간섭의 집중화의 적용에 대해 논하였다. 셀간 간섭의 추정 및 간섭의 집중화는 표준의 설계부터 기지국 및 단말의 구현, 그리고 망 운영 등에 걸친 복잡한 문제이다. 표준에서는 간섭 추정이 용이하고 간섭 추정의 효과가 극대화되도록 블록 및 파일럿 패턴의 설계가 필요하며 간섭의 집중화가 적용할 수 있도록 지원하여야 한다. 구현에서는 기지국 및 단말이 효과적인 간섭 추정 알고리즘을 채택하고 이를 바탕으로 성능 향상이 이루어질 수 있도록 해야 한다. 시스템 및 망 운영에서는 간섭의 추정이 용이하고 간섭의 집중화가 될 수 있도록 하여야 한다. 시스템 및 망 운영은 기지국 및 단말의 구현과 밀접한 관계를 가진다. 기지국 및 단말이 간섭 추정을 하지 않는다면 간섭의 평균화가 이루어지도록 운용이 되어야 하고 간섭 추정을 한다면 간섭의 집중화가 이루어지도록 운용이 되어야 되기 때문이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Z. Wang, and G. B. Giannakis, "Wireless

Multicarrier Communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.17, No.3, pp.29-48, May 2000.

- [2] X. Pengfei, Z. Shengli, and G.B. Giannakis, "Bandwidth and Power-efficient Multicarrier Multiple Access," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.51, No.11, pp.1828-1837, November 2003.
- [3] IEEE P802.16e/D12: Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems: Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, October 2005.
- [4] IEEE802.20: QFDD and QTDD: Proposed Draft Air Interface Specification, Qualcomm, October 2005.
- [5] S. Tsumura, R. Mino, S. Hara, and Y. Hara, "Performance Comparison of OFDM-FH and MC-CDM in Single and Multi-Cell Environments," *VTC 2005-Spring*, Vol.3, pp.1730-1734, June 2005.
- [6] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," *IEEE Communications Magazine*, Vol.35, No.12, pp.126-133, December 1997.
- [7] 임민중, "셀룰러 OFDMA 상향링크 시스템의 셀간 간섭추정 알고리즘," 전자공학회논문지, 제43권 TC편 제10호, pp.55-59, October 2006.
- [8] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press 2003.
- [9] R1-050047, Alcatel, "Interference Coordination in New OFDM DL Air Interface," 3GPP RAN WG1 #41, Athens, Greece, May 2005.
- [10] R1-050808, ETRI, "Inter-cell Interference Management in Practical Environments," 3GPP RAN WG1 #42, London, UK, August 2005.
- [11] R1-050896, Qualcomm, "Description and simulations of interference management technique for OFDMA based E-UTRA downlink evaluation," 3GPP RAN WG1 #42, London, UK, September 2005.

---

저자소개

---



임민종(정회원)

1987년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업

1993년 University of Wisconsin-Madison,

Electrical and Computer Engineering 박사 졸업

1993년~2000년 삼성전자 선임연구원.

2000년~현재 동국대학교 정보통신공학과 부교수.

<주관심분야> 이동통신, 무선통신, 통신 VLSI, 통신 소프트웨어.