

주파수 오프셋이 존재하는 상향 OFDMA 시스템을 위한 다중 접속 간섭 제거 기법

*원유준 **김정우 ***서보석

충북대학교

heracleo@cbnu.ac.kr

Multuser Interference Cancellation for OFDMA uplink System with frequency offsets

*Won Yu-Jun **Kim, Jung-Woo ***Seo, Bo-Seok

Chungbuk National University

요약

이 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 접속방식(orthogonal frequency division multiple access : OFDMA)을 이용한 상향 링크 시스템에서 수신된 신호에 주파수 오프셋이 존재할 때 나타나는 영향을 보상하는 방법을 제안한다. OFDMA에서 각 사용자가 전송한 신호에서 발생하는 주파수 오프셋은 다중 접속 간섭(multi-user interference : MUI)을 발생시킨다. 이러한 다중 접속 간섭은 OFDMA 시스템의 성능을 저하시키는 주요한 원인 중에 하나이다. 이 논문에서는 시간영역에서 특정 사용자의 신호에 대한 주파수 오프셋의 보상을 한 뒤, 주파수 영역에서 일반적인 채널간간섭 제거 방법을 적용하여 다중 접속 간섭에 의한 영향을 효과적으로 제거하는 방법을 제안한다. 또한 부반송파에 위치에 따라 달리 나타나는 다중 접속 간섭의 크기에 따라 간섭 제거 방법을 달리하여 보다 적은 계산량으로 간섭을 제거하는 방법을 제안한다.

1. 서론

직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing : OFDM)전송방식은 채널을 여러 개의 부채널로 분할함으로써 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)의 영향을 보상하는 것이 쉽다. 또한 보호구간을 삽입하여 다중경로 채널에 의한 심볼간 간섭(intersymbol interference : ISI)영향을 쉽게 제거할 수 있으며, 부채널의 스펙트럼을 서로 겹쳐서 전송하기 때문에 대역효율이 좋다는 장점이 있다. OFDM방식을 기반으로 한 다중 접속(multiple access)방법중에 하나로써 직교 주파수 분할 다중 접속(orthogonal frequency division multiple Access : OFDMA)이 있다. OFDMA는 각 사용자마다 서로 다른 부반송파를 분배하는 방식으로, 부반송파의 자유로운 분배를 통한 주파수의 효율적인 분배가 가능하다는 장점이 있다[1]. 따라서 WMAN(wireless metropolitan area networks)[2], 위성 통신 시스템[3] 및 유선 텔레비전 시스템(cable television system : CATV)[4]의 통신 규격으로 제안되었다. 그러나 OFDM은 송신기와 수신기 사이에 주파수 오프셋이 발생하면 부반송파간의 직교성이 깨져 인접한 부채널로부터 간섭신호가 들어오는 채널간간섭(interchannel interference : ICI)이 발생한다. 더욱이 여러 사용자가 하나의 OFDM 심볼을 이루는 OFDMA의 경우 각각의 사용자 신호는 수신기와 서로

다른 주파수 오프셋이 발생하게 된다. 이 경우 다른 사용자의 신호로부터 간섭신호가 들어오는 다중 접속 간섭(multi-user interference : MUI)이 발생한다[5]. Huang & Letaief는 주파수 영역에서 순환 컨볼루션(circular convolution)을 이용하여 간섭신호를 계산한 후 인접한 부반송파에서 간섭신호를 제거하는 방법을 제안하였다[6]. 그러나 이 방법은 수신기에서 DFT 이후에 순환 컨볼루션을 위한 추가적인 계산이 필요하다. Manohar & Sreedhar는 원하는 사용자의 신호에 대한 주파수 오프셋을 시간영역에서 보상한 후, 주파수 영역에서 WLPIE(weighted linear parallel interference cancellation)을 적용하여 간섭신호를 제거하는 방법을 제안하였다[5]. 그러나 이 방법은 일반적인 PIC에 비해 계산량이 많고, 또한 모든 부반송파에 대하여 동일한 처리를 하여 비교적 간섭신호 성분이 적은 내부 부반송파에 대해서는 비효율적인 계산량을 가진다.

이 논문에서는 집중(localized) 다중화된 부반송파를 사용하는 상향 OFDMA 시스템에서 다중 접속 간섭이 발생할 때, 부반송파에 따라 간섭 신호의 제거방법을 달리하는 방법을 제안한다. 먼저 시간영역에서 특정 사용자 신호의 주파수 오프셋을 보상하고, 주파수 영역에서 남아있는 다중 접속 간섭에 대하여 비교적 간섭신호가 작은 내부 부반송파에 대해서는 비교적 간단한 SIC(Successive Interference Cancellation)을 적용하고, 간섭신호가 큰 외부 부반송파에 대해서는 PIC(Parallel Interference Cancellation)를 적용한다. 제안방법은 Manohar & Sreedhar가 제안한 방법에 비해 계산량을 효과적으로 줄일 수 있다.

※ 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

2. 시스템 모델

가. 상향 OFDMA 시스템

변조된 OFDMA 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n^{(i)} = \frac{1}{N} \sum_{k \in S_i} X_k^{(i)} e^{\frac{j2\pi nk}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

여기서 N 은 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform : DFT) 크기, $x_n^{(i)}$ 은 시간영역에서의 i 번째 사용자의 n 번째 신호이고, $X_k^{(i)}$ 는 시간영역에서 i 번째 사용자의 k 번째 부반송파 심볼을 나타낸다. S_i 는 i 번째 사용자가 할당받은 부반송파의 집합을 의미한다. 시간 및 주파수 오프셋이 없는 경우 수신된 OFDMA 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K \sum_{k \in S_i} X_k^{(i)} H_k^{(i)} + z_n \quad (2)$$

여기서 $H_k^{(i)}$ 는 i 번째 사용자와 수신기 사이의 k 번째 부반송파의 채널 이득을 의미하고, K 는 사용자의 수 그리고 z_n 은 부가성 백색 가우스 잡음(additional white gaussian noise : AWGN)을 의미한다. 수신신호의 복조는 DFT를 통해 이루어지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3)$$

나. 상향 OFDMA 시스템에서의 주파수 오프셋

식 (3)에서 주파수 오프셋이 발생한다면 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_n = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^K \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{(i)} H_k^{(i)} e^{j2\pi n(k+\epsilon_i)/N} \right] + w_n \quad (4)$$

여기서 ϵ_i 는 i 번째 사용자와 수신기 사이의 주파수 오프셋을 의미하며 부반송파 간격에 대한 실제 주파수 오프셋의 비율로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \Delta f T_s \quad (5)$$

Δf 는 실제 주파수 오프셋을 나타내고 T_s 는 OFDM의 유효 심볼 길이를 의미한다. DFT 후의 신호는 식 (3)과 (4)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_k^{(i)} = (X_k^{(i)} H_k^{(i)}) \frac{\sin \pi \epsilon_i}{N \sin(\pi \epsilon_i / N)} e^{j\pi \epsilon_i (N-1)/N} + I_{q,k} + W_k \quad (6)$$

여기에서 $X_k^{(i)} H_k^{(i)}$ 에 곱해지는 부분은 주파수 오프셋 ϵ_i 에 의해 감소되는 크기 및 위상의 회전을 의미한다. $I_{q,k}$ 는 q 번째 부반송파에서 k 번째 부반송파로 혼입되는 ICI 및 MUI를 의미한다. ICI는 특정 사용자에게 할당된 부반송파 사이에 발생하는 간섭이고 MUI는 다른 사용자 사이에 발생하는 간섭이다. 간섭신호 $I_{q,k}$ 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{k,q} = \sum_{l=1}^K \sum_{\substack{q \in S_l \\ q \neq k}} (X_q^{(l)} H_q^{(l)}) \frac{\sin(\pi \epsilon_l)}{N \sin(\pi(q-k+\epsilon_l)/N)} \cdot e^{j\pi \epsilon_l (N-1)/N} e^{-j\pi(l-k)/N} \quad (7)$$

3. 주파수 오프셋 보상 및 다중 접속 간섭 제거

가. 주파수 오프셋 보상

이 논문에서는 다중 주파수 오프셋에 대하여 MUI를 제거하기 위하여 모든 주파수 오프셋과 채널 응답을 알고 있다고 가정한다. 제안 방법에서는 여러 개의 주파수 오프셋이 동시에 존재하는 신호에서 원하는 사용자의 신호를 복원하기 위하여 우선 시간영역에서 특정 주파수 오프셋을 보상해 준다. 즉 i 번째 사용자의 신호를 복원하기 위해 수신신호에 ϵ_i 를 시간영역에서 보상하면 식 (6) 으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_n^{(i)} = y_n e^{-\frac{j2\pi \epsilon_i n}{N}} \quad (8)$$

이것을 DFT 한 신호는 다음과 같다.

$$Y_k = X_k^{(i)} H_k^{(i)} + I_{q,k}' + W_k' \quad (9)$$

식 (9)을 보면 k 번째 부반송파 신호인 $X_k^{(i)} H_k^{(i)}$ 의 크기 및 위상이 보상된 것을 볼 수 있다. 또한 $I_{q,k}'$ 에는 i 번째 사용자에게 할당된 부반송파 사이의 ICI는 존재하지 않고, 사용자 간의 간섭인 MUI만 존재하게 된다. 즉 다음과 같다.

$$I_{q,k}' = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^K \sum_{q \in S_l} (X_q^{(l)} H_q^{(l)}) \frac{\sin(\pi \epsilon_{l,i})}{N \sin(\pi(q-k+\epsilon_{l,i})/N)} \cdot e^{j\pi \epsilon_{l,i} (N-1)/N} e^{-j\pi(l-k)/N} \quad (10)$$

여기서 $\epsilon_{l,i}$ 는 i 번째 사용자와 l 번째 사용자 신호 사이의 주파수 오프셋의 차이로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{l,i} = \epsilon_l - \epsilon_i \quad (11)$$

나. 다중 접속 간섭 제거

MUI를 제거하기 위하여 SIC 및 PIC를 적용한다. 특정 사용자에게 할당된 부반송파 중 비교적 내부에 위치한 부반송파는 외부에 위치한 부반송파보다 MUI가 적게 포함되게 된다. 왜냐하면 OFDM 심볼은 포락선의 모양이 구형과 이므로 스펙트럼은 sinc 모양이 된다. sinc 모양의 스펙트럼은 부엽(sidelobe)의 크기가 주엽(mainlobe)로부터 멀어짐에 따라 지수 함수적으로 감소하게 된다. 따라서 간섭하는 사용자 스펙트럼으로부터 비교적 멀리 위치한 부반송파에는 간섭하는 신호의 크기가 감소되어 들어오게 된다. 즉 비교적 간섭 부반송파로부터 멀리 위치한 내부 부반송파의 신호를 위해서는 간섭 제거 성능은 낮지만 계산량이 적은 SIC, MUI가 큰 외부 부반송파의 신호를 위해서는 계산량은 많지만 간섭 제거 성능이 우수한 PIC를 적용하여 MUI를 제거한다. 이것은 그림. 1과 같이 표현할 수 있다.

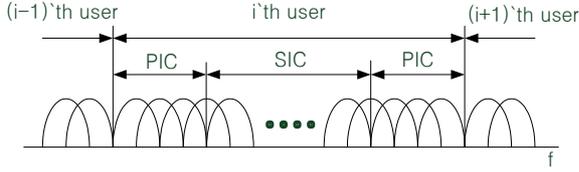


그림. 1. 주파수 영역에서의 MUI 제거방법

SIC는 특정 부반송파의 신호를 판정한 뒤 그 신호가 주위의 부반송파에 미치는 영향을 순차적으로 제거하는 방법으로 비교적 계산량이 적다는 장점이 있다. PIC는 특정 부반송파의 신호를 모든 부반송파에서 동시에 판정한 후 모든 부반송파에 대해 미치는 영향을 동시에 제거해주는 방법으로 간접 제거성능은 우수하지만 계산량이 많아 복잡성이 증가한다는 단점이 있다. PIC는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. k 번째 부반송파 심볼을 판정한 값은 다음과 같다.

$$\widehat{Y}_k^{(i)} = dec(Y_k^{(i)}) \quad (12)$$

여기서 $dec()$ 는 판정함수를 나타낸다. 식 (10)의 MUI 성분은 인접 부반송파의 선형결합으로 이루어져 있다. 따라서 k 번째 부반송파에서 주변 부반송파로부터의 간섭성분을 다음과 같이 제거할 수 있다.

$$\widehat{X}_k^{(i)} = \widehat{Y}_k^{(i)} - \sum_{l=1}^K \sum_{q \in S, l \neq i} \widehat{Y}_q^{(l)} \alpha_{q,k} \quad (13)$$

$\alpha_{l,k}$ 는 l 번째 부반송파에서 k 번째 부반송파로의 간섭계수를 의미한다. 수신된 OFDM 심볼의 q 번째 부반송파 데이터를 판정하고 그 값에 간섭계수 α 를 곱하여 k 번째 부반송파에서 제거해 준다. 따라서 만일 판정된 값이 정확하면 $\widehat{X}_k^{(i)}$ 는 MUI가 제거된 신호가 된다. $\alpha_{q,k}$ 는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있으며, $\epsilon_{l,i}$ 와 N 을 알고 있으므로 계산해 낼 수 있다.

$$\alpha_{q,k} = \frac{\sin(\pi \epsilon_{l,i})}{N \sin(\pi(q-k+\epsilon_{l,i})/N)} e^{j\pi \epsilon_{l,i}(N-1)/N} e^{-j\pi(l-k)/N} \quad (14)$$

MUI를 한번 제거한 신호를 다시 판정한 후 식 (13) 적용하여 MUI를 제거할 수 있다. 이 경우 판정한 $\widehat{X}_k^{(i)}$ 가 이전에 판정한 값보다는 MUI 성분이 적어 더 정확한 판정이 가능하다. 따라서 신호의 판정 및 MUI 제거를 반복하게 되면 $\widehat{X}_k^{(i)}$ 는 점점 MUI가 정확하게 제거되어 전송한 데이터에 근접하게 된다.

4. 결 론

이 논문에서는 사용자마다 서로 다른 주파수 옵셋이 존재하는 상향 OFDMA 환경에서 수신신호가 받는 영향을 살펴보고, MUI를 제거하기 위한 방법을 제안하였다. 먼저 특정 사용자에 대한 주파수 옵셋을 시간영역에서 보상하고, 이어 주파수 영역에서 원하는 사용자 신호와 다른 사용자 신호 사이에 나타나는 주파수 옵셋 차이에 의한 MUI를 부반송파의 위치에 따라 SIC 및 PIC를 따로 적용하여 제거하였다. 제안한 방법을 통해 모든 부반송파에 PIC를 적용한 것 보다 적은 계산량을 가지면서 효과적으로 MUI를 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

[1] J. Choi, C. Lee, H. W. Jung, and Y. H. Lee, "Carrier frequency offset compensation for uplink of OFDM-FDMA systems," *IEEE Commun. Lett.* vol. 4, no. 12, pp. 414-416, Dec. 2000.

[2] I. Koffman and V. Roman, "Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802.16," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 96-103, Apr. 2002

[3] L. Wei and C. Schlegel, "Synchronization requirements for multi-user OFDM on satellite mobile and two-path Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no.2-4, pp. 887-895, Feb.-Apr. 1995

[4] H.Sari and G.Karam, "Orthogonal frequency division multiple access and its application to CATV networks," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 9, no. 6, pp. 507-516, Nov.-Dec. 1998.

[5] S. Manohar, D. Sreedhar, V. Tikiya and A. Chockalingam, "Cancellation of Multiuser Interference Due to Carrier Frequency Offsets in Uplink OFDMA," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.6, No. 7, July. 2007, pp. 2560-2571

[6] D. Huang and K. B. Letaief, "An interference cancellation scheme for carrier frequency offsets correction in OFMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 7, pp. 1155-1165, July 2005.