

FBMC/OQAM 시스템 기반의 연속적인 파일럿 패턴을 이용한 채널 추정시 간섭 상쇄 기법에 관한 연구

*원용주 **오종규 ***김준태
건국대학교

*stonew59@konkuk.ac.kr

**riza@konkuk.ac.kr

***jtkim@konkuk.ac.kr

An Interference Canceling Method for Continual Pilot Pattern of Channel Estimation Situation in FBMC/OQAM system

*Won, Yong-Ju **Oh, Jong-Gyu ***Kim, Joon-Tae
Konkuk University

요약

현재 다양한 통신 표준에서 채택되고 있는 OFDM 시스템에 비해 주파수를 더욱 효율적으로 이용해야 하는 요구가 증가함에 따라 FBMC/OQAM 시스템이 주목을 받고 있다. 수신단에서 알고 있는 파일럿 심볼을 이용한다는 관점에서 FBMC/OQAM 시스템에서의 채널 추정 방식은 OFDM의 채널 추정 방식과 유사하지만 FBMC/OQAM 시스템의 고유한 간섭으로 인해 OFDM 시스템의 채널 추정 방식에 비해 추가적인 기법이 필요하다. 이러한 간섭에 대처할 수 있는 방법으로 보조 파일럿을 사용하는 방법에 대해 알아보고, 연속적인 파일럿 패턴에 적용하는 데 제한이 있는 보조 파일럿 방식에 대해 간섭을 상쇄할 수 있는 기법을 적용한 후 성능을 측정하였다.

1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) 시스템은 디지털 방송, 4세대 이동통신 등의 다양한 표준에서 사용되고 있는 다중 반송파 전송 시스템이다. OFDM 시스템은 연속되는 심볼의 사이에 보호구간으로 CP(Cyclic Prefix)를 채용함으로써 다중경로 채널로 인한 ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거하여 다중경로 채널에 대해 강하다는 장점이 있다. 하지만, 최근 LTE(Long term Evolution)등의 시스템에서 채용하는 대역폭이 넓어지면서, OFDM 심볼의 기본 주기(Elementary Period)가 줄어드는 추세에 있다. 이에 반해 CP의 길이는 채널의 임펄스 응답보다 긴 시간을 필요로 하므로 단일 OFDM 심볼 대비 CP의 비중이 증가하게 되어 데이터 전송 효율이 낮아지게 된다. 또한 OFDM 시스템에서 각각의 부반송파들은 주파수 축에서 sinc함수의 형태이기 때문에 인접한 채널에 영향을 미치는

IBI(Inter-Band Interference)를 줄이기 위해 주어진 대역폭의 가장자리에 가상 반송파(Virtual Carrier)를 사용하여 대역폭 효율이 낮아지게 된다.

이에 대한 대안으로 FBMC/OQAM(Filter Bank Multi Carrier based on Offset-QAM) 시스템이 주목을 받고 있다. FBMC 시스템은 OFDM 시스템에 다중경로 채널로 인한 ISI에 강하며 인접한 부반송파 이외에는 ICI(Inter-Carrier Interference)를 발생시키지 않는 원형 필터를 이용하여 각 부반송파를 전송하는 시스템이다[1]. FBMC 시스템의 원형 필터는 임펄스 응답이 심볼의 양 끝에서 상당히 작은 값을 가지고 있어 CP를 통해 ISI를 제거하지 않고도 다중경로 채널에 강한 모습을 보이며, 주파수 축의 관점에서 원형 필터의 주파수 응답은 인접한 부반송파 외에는 영향을 미치지 않기 때문에 OFDM 시스템에 비해 주어진 대역폭을 효과적으로 사용할 수 있다. OQAM(Offset-QAM)이란 시간과 주파수에 대해 위와 같은 특

성을 가질 수 있는 원형 필터는 실수축에 대해서만 직교하는 성질이 있으므로 허수부의 위치를 반 심볼 주기만큼 이동시켜 QAM 심볼을 전송하는 방식이다[2].

FBMC/OQAM 시스템은 위와 같은 장점이 있지만 채널 추정 방식에 있어 OFDM 시스템에 비해 추가적인 연산을 필요로 한다. 수신단에서 알고 있는 신호인 파일럿을 이용한다는 관점에서 OFDM 시스템의 추정 방식과 기본 원리는 같다. 하지만, FBMC/OQAM 시스템의 채널을 추정할 때 OFDM 시스템과 동일한 방식으로 파일럿을 전송한다면, FBMC/OQAM 시스템에서의 고유한 OQAM 심볼 간의 ISI와 파일럿에 인접한 부반송파 간의 ICI로 인한 간섭이 파일럿에 작용하여 채널 추정에 오차가 발생한다[3].

이러한 FBMC/OQAM 시스템에 존재하는 고유한 간섭을 해결하기 위한 방법으로 파일럿에 보조 파일럿을 추가하여 파일럿에 작용하는 고유한 간섭을 제거한 후 채널 추정을 하는 방법이 있다[4]. 보조 파일럿 방식은 파일럿을 통해 채널을 추정하는데 효과적인 방법이지만, 보조 파일럿 방식을 DVB-T2(Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial)와 같은 시간적으로 연속적인 파일럿을 사용하는 시스템에 적용할 경우, 인접한 보조 파일럿이 계산과정에 포함되는 상황이 발생하게 되어 두 개 이상의 파일럿-보조 파일럿 쌍을 연속적으로 배치할 수 없다는 제한점이 있다[3].

이에 대해 OFDM/OQAM 시스템에서는 파일럿-보조 파일럿 쌍의 사이사이에 역 보조 파일럿-파일럿 쌍을 추가하여 간섭을 상쇄하는 방법이 있다[5]. 본 논문에서는 파일럿들이 연속해서 배치되어 있는 경우에서의 파일럿에 작용하는 간섭을 상쇄하는 방법을 적용하여 채널 추정 성능을 측정하였다.

2. FBMC/OQAM 시스템

FBMC/OQAM 시스템의 기저대역 전송 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

$$s(t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (1)$$

M 은 1개의 OQAM 심볼의 부반송파의 개수, $d_{m,n}$ 은 QAM 심볼의 실수 부분과 허수 부분을 취하여 n 번째 OQAM 심볼의 m 번째 부반송파에 실리는 데이터이며 실수 값이다. f_0 는 주파수축에서 부반송파 사이의 간격, τ_0 은 인접한 OQAM 심볼간의 시간차이며, f_0 은 2개의 OQAM 심볼간의 시간차의 역수이다.

$g_{m,n}(t)$ 는 FBMC/OQAM 시스템의 원형 필터를 기본으로 하여 n 번째 OQAM 심볼의 m 번째 부반송파에 대해 적용되는 필터이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_{m,n} = j^{(m+n) \bmod 2} g(t - n\tau_0) e^{j2\pi m f_0 t} \quad (2)$$

$g(t)$ 는 FBMC/OQAM 시스템에서 사용되는 원형 필터이며, (3)번 식을 만족한다[1].

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^K H_k \cos(2\pi \frac{kt}{KT}) \quad (3)$$

H_k 는 원형 필터의 주파수 응답의 계수이며 <표 1>에서 K 에 따른 계수가 나와 있다[1], K 는 Overlapping Factor이며, 본 논문에서는 $K=4$ 인 원형 필터를 사용하였다.

| K | H_0 | H_1 | H_2 | H_3 |
|-----|-------|--------------|--------------|----------|
| 2 | 1 | $\sqrt{2}/2$ | | |
| 3 | 1 | 0.911438 | 0.411438 | |
| 4 | 1 | 0.971960 | $\sqrt{2}/2$ | 0.235147 |

<표 1> 원형 필터의 주파수 응답 계수

수신단에서는 수신된 신호에 $g_{m,n}^*(t)$ 과의 상관값을 통해 n 번째 OQAM 심볼의 m 번째 부반송파에 변조된 신호를 복구한다.

$$\begin{aligned} \langle s(t) | g_{m,n} \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) g_{m,n}^*(t) dt \quad (4) \\ &= d_{m,n} + j \sum_{(p,q \neq m,n)} d_{p,q} \langle g \rangle_{m,n}^{p,q} \end{aligned}$$

상관값은 데이터 부분과 인접한 부반송파와 OQAM 심볼로 인해 발생하는 간섭으로 이루어져 있으며, 이 간섭은 순수한 허수 값을 가지고 있다.

3. 보조 파일럿(Auxiliary Pilot) 방식

FBMC/OQAM 시스템에서 하나의 부반송파에 작용하는 채널의 값이 일정하다고 가정할 때, n 번째 OQAM 심볼의 m 번째 부반송파에 작용하는 채널의 주파수 응답을 $H_{m,n}$, 백색 가우시안 잡음을 $n(t)$ 라고 할 때, 수신된 신호의 기저대역에 대한 표현은 다음과 같다[3].

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{m,n} H_{m,n} g_{m,n}(t) + n(t) \quad (5)$$

FBMC/OQAM 시스템에서는 서로 다른 부반송파들 간의 $g_{m,n}(t)$ 가 실수부분에만 직교성이 성립하기 때문에 수신단에서 $g_{m,n}^*(t)$ 를 통과한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{m,n} &= H_{m,n} \left(d_{m,n} + j \sum_{(p,q \neq m,n)} d_{p,q} \langle g \rangle_{m,n}^{p,q} \right) + n_{m,n} \quad (6) \\ &= H_{m,n} (d_{m,n} + I_{m,n}) + n_{m,n} \end{aligned}$$

$I_{m,n}$ 은 FBMC/OQAM 시스템에서 인접한 부반송파와 OQAM 심볼로 인해 발생한 간섭이다.

파일럿을 통해 채널을 추정하는 경우 파일럿의 위치를 $(m,n = m_p, n_p)$, LS(Least Square) 방식으로 추정한다고

할 때, 채널의 추정 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

두 개의 파일럿-보조 파일럿 쌍이 간격이 없이 연속해

| 부반송파 \ OQAM 심볼 | $n-4$ | $n-3$ | $n-2$ | $n-1$ | n | $n+1$ | $n+2$ | $n+3$ | $n+4$ |
|----------------|--------|----------|---------|----------|--------|----------|---------|----------|--------|
| $m-2$ | 0 | 0.0006 | -0.0001 | 0 | 0 | 0 | -0.0001 | 0.0006 | 0 |
| $m-1$ | 0.0054 | j0.0429 | -0.1250 | -j0.2058 | 0.2393 | j0.2058 | -0.1250 | -j0.0429 | 0.0054 |
| m | 0 | -0.0668 | 0.0002 | 0.5644 | 1 | 0.5644 | 0.0002 | -0.0668 | 0 |
| $m+1$ | 0.0054 | -j0.0429 | -0.1250 | j0.2058 | 0.2393 | -j0.2058 | -0.1250 | j0.0429 | 0.0054 |
| $m+2$ | 0 | 0.0006 | -0.0001 | 0 | 0 | 0 | -0.0001 | 0.0006 | 0 |

〈표 2〉 인접한 부반송파에 영향을 미치는 간섭

$$\hat{H}_{m_p, n_p} = \frac{r_{m_p, n_p}}{d_{m_p, n_p}} = \frac{H_{m_p, n_p}(d_{m_p, n_p} + I_{m_p, n_p}) + n_{m_p, n_p}}{d_{m_p, n_p}} \quad (7)$$

(7)번 식에서 볼 수 있듯이, I_{m_p, n_p} 로 인해 채널 추정에 오차가 발생하여 채널 추정 성능이 상당히 감소하게 된다.

이에 대해 해결할 수 있는 방법으로 보조 파일럿 방식이 있다. 보조 파일럿 방식이란 보조 파일럿의 위치를 선택 ($m, n = m_a, n_a$)하고, 파일럿에 대한 고유한 간섭이 0이 되도록 하는 보조 파일럿의 값을 구하는 것이다. 보조 파일럿의 값은 다음과 같이 계산할 수 있다[4].

$$d_{m_a, n_a} = - \frac{\sum_{m=m_p-1}^{m_p+1} \sum_{n=n_p-3}^{n_p+3} d_{m, n} \langle g \rangle_{m_p, n_p}^{m, n}}{\langle g \rangle_{m_p, n_p}^{m_a, n_a}}, \quad (m, n \neq m_a, n_a) \quad (8)$$

$\langle g \rangle_{p, q}^{m, n}$ 는 하나의 부반송파가 주변 부반송파에 미치는 간섭의 크기이며 〈표 2〉에서 표현된 값이다[7]. 간섭을 계산할 때 고려해야 하는 인접한 부반송파들의 위치는 〈표 2〉에서 색이 칠해진 부분이며, 보조 파일럿의 위치는 제외한다.

보조 파일럿 방식에서는 파일럿들이 시간적으로 연속하는 경우에서 보조 파일럿의 값을 계산하는데 한계가 있다[3]. 본 논문에서는 보조 파일럿들의 사이에 역 보조 파일럿을 추가하여 시간적으로 연속하는 파일럿에 대한 간섭을 상쇄하는 방식[5]을 적용하여 채널 추정 성능을 측정하였다.

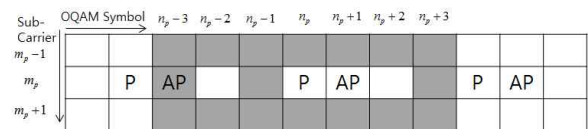
4. 연속적인 파일럿 패턴에 대한 간섭 상쇄 기법

FBMC/OQAM 시스템에서는 한 개의 QAM 심볼을 2개의 OQAM 심볼로 나누어 전송한다. 따라서 보조 파일럿은 파일럿 심볼과 쌍을 이루고 있는 OQAM 심볼에 배치하여 ($m_a, n_a = m_p, n_p + 1$ or $m_p, n_p - 1$) 데이터 전송 효율을 감소시키지 않도록 하며 이를 파일럿-보조 파일럿 쌍이라고 한다.

〈그림 1〉에서 파일럿-보조 파일럿 쌍을 2개의 OQAM 심볼 간격으로 전송하는 경우를 나타내었다. P는 파일럿의 위치이며, AP는 보조 파일럿의 위치이다.

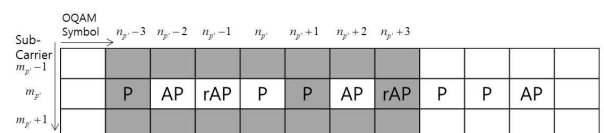
있다면 간섭을 계산할 때 보조 파일럿이 다른 파일럿에 대해서도 간섭을 발생시키기 때문에 보조 파일럿을 계산하는 과정에서 문제가 생긴다. 따라서 두 개의 파일럿-보조 파일럿 쌍이 인접할 수 있는 최소한의 거리는 2개의 OQAM 심볼이다.

2개의 파일럿-보조 파일럿 쌍이 2개의 OQAM 심볼 간격으로 떨어져 있는 경우에는 간섭을 계산해야 하는 데이터의 위치가 겹치게 된다. 하지만 이 경우에는 앞쪽의 보조 파일럿의 값을 알고 있다면 뒤쪽의 보조 파일럿의 값을 계산하는 것이 가능하며 뒤쪽의 보조 파일럿은 앞쪽의 파일럿-보조 파일럿 쌍의 파일럿에 간섭을 발생시키지 않는다. 이것을 〈그림 1〉에서 나타내었다.



〈그림 1〉 파일럿-보조 파일럿 쌍의 간섭 계산

〈그림 2〉에서 나타난 대로 역 보조 파일럿-파일럿 쌍은 파일럿-보조 파일럿 쌍이 가질 수 있는 최소한의 간격인 2개의 OQAM 심볼 사이에 들어가는 파일럿이다[5]. rAP(reversed Auxiliary Pilot)은 역 보조 파일럿을 나타낸다. 역 보조 파일럿-파일럿 쌍은 파일럿-보조 파일럿 쌍에서 순서가 바뀐 형태이며 파일럿은 허수축 부반송파로 전송된다[7]. 〈표 2〉를 참고하면 동일한 부반송파 인덱스의 경우 기준 심볼에서 2개의 OQAM 심볼 간격으로 떨어져 있는 심볼에는 간섭이 0이라는 것을 확인할 수 있다. 따라서 역 보조 파일럿은 파일럿-보조파일럿 쌍의 파일럿에 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 파일럿-보조 파일럿 쌍 사이의 심볼에서도 채널 추정이 가능하게 되어 연속적인 파일럿 배치가 가능해진다.



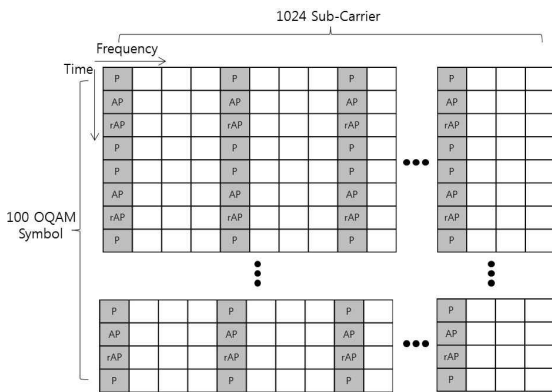
〈그림 2〉 역 보조 파일럿-파일럿 쌍의 간섭 계산

역 보조 파일럿을 계산하는 경우에는 뒤쪽의 역 보조 파

일릿의 값을 알면 앞쪽의 역 보조 파일럿이 계산이 가능하므로, 마지막에서 두 번째 OQAM 심볼의 역 보조 파일럿부터 계산한다면 모든 역 보조 파일럿들의 값을 계산할 수 있다.

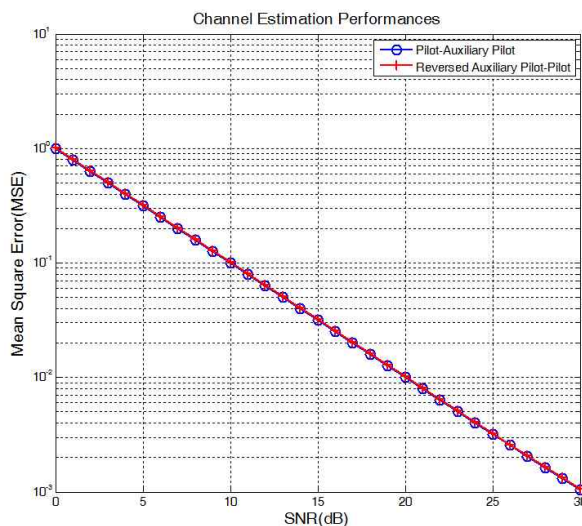
5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 주파수와 시간에 대한 동기는 이상적이라고 가정하였다. 100개의 OQAM 심볼에 대해 진행되었으며, 채널의 주파수 응답은 상수인 상황에 대해 진행되었다.



<그림 3> 시뮬레이션 상의 파일럿 패턴

<그림 3>에서와 같이 부반송파의 개수는 1024로 하였다. 주파수 축에 대한 파일럿의 간격은 4로 설정하였으며, 파일럿이 포함된 부반송파의 인덱스에는 모두 연속하는 파일럿을 배치하였다.



<그림 4> 채널 추정 성능 비교

채널 추정의 성능을 평가하기 위해 각 채널 추정 방식에 대한 Mean Square Error(MSE)를 측정하였다.

<그림 4>는 SNR에 대한 보조 파일럿 방식과 역 보조 파일럿 방식의 채널 추정 오차이며, 이를 통해 보조 파일럿

방식과 역 보조 파일럿 방식의 추정 성능을 비교할 수 있다.

파일럿-보조 파일럿과 역 보조 파일럿-파일럿의 기본 원리는 동일하기 때문에 <그림 4>에서 볼 수 있듯이 두 방식의 채널 추정 성능은 같다는 것을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 FBMC/OQAM 시스템에서 연속적인 파일럿 패턴에 대해 간섭을 상쇄하는 방법을 적용하여 채널 추정 성능을 측정하였다. FBMC/OQAM 시스템에서는 고유한 간섭이 발생하여 채널 추정 성능이 감소하기 때문에 이를 해결하기 위한 방법인 보조 파일럿 방식에 대해 알아보았다. 보조 파일럿을 통한 채널 추정 방식을 사용하는 경우 시간에서 연속적인 파일럿들을 전송할 때, 연속적인 보조 파일럿을 계산함에 있어서 문제점이 발생하게 된다. 이에 대한 해결 방법으로 파일럿-보조 파일럿 쌍과 역 보조 파일럿-파일럿 쌍을 번갈아가며 사용하면 연속적인 파일럿들을 전송하는 것이 가능하다. 보조 파일럿-파일럿 쌍과 역 보조 파일럿-파일럿 쌍의 채널 추정 방식은 기본 원리가 동일하므로 채널 추정 성능이 같다는 것을 확인할 수 있다.

참조 문헌

- [1] Bellanger, M., et al. "FBMC physical layer: a primer." PHYDYAS, January (2010).
- [2] SeungWon Kang, Joo Heo, and KyeongHi Chang. "OFDM/OQAM IOTA System With Odd/Even Center Preamble Structures." The Korean Institute of Communications and Information Science 30.12A (2005): 1153-1160.
- [3] He, Xianjie, Zhifeng Zhao, and Honggang Zhang. "A pilot-aided channel estimation method for FBMC/OQAM communications system." Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012 International Symposium on. IEEE, 2012.
- [4] Javardin, J-P, Dominique Lacroix, and Alexandre Rouxel. "Pilot-aided channel estimation for OFDM/OQAM." Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual. Vol. 3. IEEE, 2003.
- [5] Tero Jokela, et al. "DELIVERABLE D2.3 - REPORT ON ADVANCED COMPONENT TECHNIQUES FOR DVB-NGH " www.celtic-engines.org(2012):
- [6] Lélé, Chrislin, et al. "Channel estimation methods for preamble based OFDM/OQAM modulations." European Transactions on Telecommunications 19.7 (2008): 741-750.
- [7] Stitz, Tobias Hidalgo, et al. "Pilot-based synchronization and equalization in filter bank multicarrier communications." EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2010 (2010)