

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.3.97>

IIBC 2016-3-13

UFMC 시스템에서 CFO의 영향

Effect of CFO on UFMC System

이규섭*, 최진규**

Kyuseop Lee*, Ginkyu Choi**

요약 UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier)는 최근 5G통신 시스템의 전송방식 후보로 주목 받고 있는 다중 반송파 송신기술 중의 하나이다. UFMC는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)의 단순함과 FBMC(Filter Bank Multi-Carrier)의 장점을 합쳐놓은 방식으로 볼 수 있다. CFO(Carrier Frequency Offset)는 다중 반송파 전송방식에서 부 반송파간의 불일치를 일으켜 BER 성능을 낮게 하는 문제점으로 작용하고 있다. UFMC에서의 CFO영향은 OFDM 보다는 크지 않지만 여전히 부 밴드간의 간섭을 일으켜 시스템 성능을 열화 시키고 있다. 이 논문에서는 UFMC에서 CFO의 변화와 E_s/N_0 값에 따른 SNR 열화를 분석 하였다.

Abstract The UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier) is one of multi-carrier transmission technique as a candidate of transmission method for the recent 5G communication system. The UFMC can be considered as the system which has both the advantages of OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) and the simplicity of FBMC(Filter Bank Multi-Carrier). CFO(Carrier Frequency Offset) causes the problem to lower the BER performance due to a mismatch between the sub-carriers in multi-carrier transmission scheme. The effect of CFO on UFMC is not greater than the OFDM. But it still degrades the system performance caused by interference between the sub-band. In this paper, we analyze the SNR degradation due to changes in the value of E_s/N_0 and CFO on UFMC system.

Key Words : UFMC, CFO, OFDM, FBMC, BER degradation

1. 서론

OFDM은 오늘날 가장 잘 알려진 다중 반송파 변조 방식 중 하나로 FFT와 IFFT를 이용한 간단하고 효율적인 변 복조가 가능하고 각각의 부반송파는 단일탭 등화가 가능하여 간단한 수신기 구조를 만들 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점들 때문에 OFDM은 LTE, Wifi 등의 표준으로 채택 되었다. 하지만 OFDM은 사각의 심볼 모양을 갖고 있어 시간 영역의 심볼 구간은 제한할 수 있지

만 주파수 영역에서는 큰 크기의 사이드 로브 스펙트럼이 생긴다. 이러한 특징은 LTE와 같이 엄격하게 동기가 맞추어 지는 시스템에서는 최대의 성능을 낼 수 있고 대용량의 데이터를 전송하는 것에 적합하다^{[1][9]}. 하지만 최근 IoT나 M2M 통신에는 비동기적 통신 방식을 요구하고 있고 향후 5G 무선 통신 시스템에서는 산발적인 신호 그리고 버스트 신호 등 다양한 트래픽 타입을 처리할 수 있는 통신 방식이 요구되고 있다. 또한 5G 무선 통신 시스템은 완화된 동기 상태와 시간, 주파수 심볼의 정렬 오

*준회원, 홍익대학교 전자전공학과

**중신회원, 홍익대학교 전자전기공학과

접수일자 : 2016년 4월 28일, 수정완료 : 2016년 5월 27일

게재확정일자 : 2016년 6월 10일

Received: 27 April, 2016 / Revised: 27 May, 2016 /

Accepted: 10 June, 2016

**Corresponding Author: gkchoi@hongik.ac.kr

Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, Korea

차의 허용을 요구하고 있기 때문에 OFDM의 사각 심볼 형태는 5G 무선 통신에는 문제가 될 수 있다.

FBMC(Filter Bank Multi-Carrier)는 5G 무선통신 시스템에서 OFDM을 대체할 후보 중 하나로 대두되고 있다^[2]. FBMC는 각각의 부반송파를 독립적인 필터를 통과해 심볼을 생성한다. 때문에 부반송파의 사이드 로브는 작아지게 되므로 ICI(Inter Symbol Interference)에 강한 특징을 지닌다. 하지만 일반적으로 FBMC는 각각의 부반송파에 필터를 통과하게 되므로 심볼의 길이가 매우 커질 수 밖에 없다는 단점이 있다. 따라서 이러한 긴 필터길이는 5G 시스템 시나리오에서 요구되는 MTC (Machine Type Communication)나 낮은 지연의 통신 등 짧은 상향 버스트 전송에서 큰 약점으로 작용 될 수 있다^[3]. 또한 FBMC는 OQAM(Offset Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하기 때문에 모든 종류의 MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output)를 적용할 수 없다는 단점도 가지고 있다.

UFMC는 OFDM과 FBMC의 여러 장점을 갖고 있는 새로운 다중 반송파 전송 방식이다^[4]. 기존의 방식들은 전체의 심볼에 필터를 통과하거나 각각의 부반송파에 필터를 통과시킨 반면에 UFMC는 심볼을 부밴드 블록으로 나누고 블록 단위로 필터를 통과 시키는 방식이다. 이것을 통해 UFMC는 FBMC에 비해 필터 길이를 매우 작게 줄일 수 있다. 또한 FBMC와는 달리 QAM을 사용할 수 있기 때문에 모든 종류의 MIMO도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 그리고 OFDM과 마찬가지로 FFT와 IFFT 기반으로 변복조가 가능하고 각각의 부반송파가 단일 탭 등화가 가능하여 단순한 송수신기 구조를 구현할 수 있는 장점 역시 갖고 있다^{[5][10]}.

UFMC는 필터에 따른 부밴드 누설이 적기 때문에 OFDM 보다는 CFO의 영향을 적게 받지만 여전히 부반송파간의 간섭 및 부밴드간의 간섭이 있어 BER 열화에 큰 영향을 준다. 이 논문에서는 AWGN 채널에서 UFMC 시스템의 CFO와 반송파 위상 노이즈에 의해 생기는 BER의 열화를 수식을 통해 나타내고 분석적 방법을 통해 평가 하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 UFMC 시스템 모델에 대해 기술하였다 그리고 3장에서는 UFMC 시스템에서 CFO와 열화(Degradation) 파라미터와의 관계를 정의 하였다 그리고 4장에서는 3장에서 얻은 관계를 바탕으로 CFO와 열화 파라미터와의 관계를 그래프로

나타내고 그 결론을 서술 하였다.

II. UFMC 시스템 모델

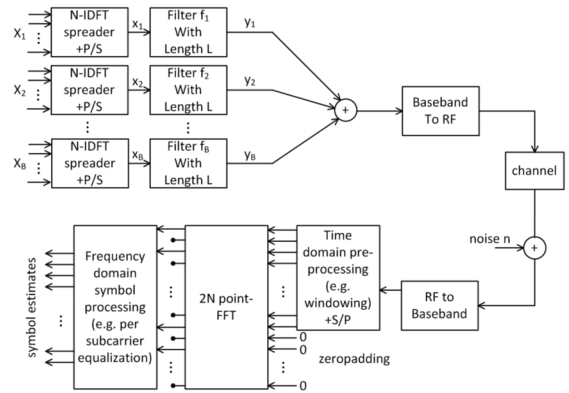


그림 1. UFMC의 시스템 모델.

Fig. 1. System model of UFMC.

UFMC의 시스템 모델은 위의 그림 1과 같다^[6-7]. 그림 1에서 보이는 것과 같이 UFMC는 N개의 데이터 심볼 $X(k)$ 를 B개의 부밴드 $X_i(k)$ 로 나누고 N-Point IDFT를 수행하여 시간영역 신호 $x_i(n)$ 으로 변환한다. UFMC의 부밴드는 LTE의 PRB (Physical layer Resource Block)에 대응 될 수 있다. 그리고 부밴드는 각각 N_B 개의 연속적인 부반송파를 갖는다.

$$x_i(n) = \frac{1}{N} \sum_{k \in S_i} X_i(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

IDFT 연산된 각각의 부밴드 신호 $x_i(n)$ 은 L의 길이를 갖는 FIR 필터 $f_i(n)$ 을 통과하게 된다. 따라서 필터된 부밴드 신호는 N+L-1의 길이를 갖게 되고 최종적으로 B개의 부밴드 신호는 합쳐져 송신된다. 송신된 UFMC 심볼 $y(n)$ 은 채널을 통과하고 가우시안 노이즈 $z(n)$ 의 영향을 받게 된다. 이 때 가우시안 노이즈 $z(n)$ 은 σ_z^2 의 분산을 갖는다고 가정한다. 본 논문에서는 CFO의 영향에 집중하기 위하여 채널은 이상적이라고 가정한다. 이러한 가정 하에 채널을 통해 전송되는 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{y}(n) = \sum_{i=1}^B (x_i(n) * f_i(n)) + z(n) \quad (2)$$

수신기와 송신기의 오실레이터의 주파수가 완벽히 일치 하지 않거나 도플러 쉬프트가 일어날 때 수신기 반송파 f_r 과 송신기 반송파 주파수 f_t 사이에 CFO $\Delta f = f_t - f_r$ 가 생길 수 있다. Δf 는 주파수 오프셋, T_s 는 샘플링 시간이고, 부반송파 밴드 폭이 $1/NT_s$ 일 때 상대 주파수 오프셋 ϵ_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$\epsilon_i = \frac{\Delta f}{1/NT_s} = \Delta f NT_s \quad (3)$$

이 때 수신 신호 $y(n)$ 은 아래와 같이 표현 된다 [8].

$$y(n) = \left(\sum_{i=1}^B (x_i(n) * f_i(n)) + z(n) \right) e^{\frac{j2\pi\epsilon_i n}{N}} \quad (4)$$

III. 3장 CFO의 영향

이번 장에서는 2장에서 구한 수신신호를 바탕으로 UPMC 수신기에서 CFO의 영향에 대하여 수식적으로 분석한다. 수신된 UPMC 심볼의 길이는 송신기의 부반송파와 데이터 심볼을 N-Point DFT를 하고 길이가 L인 필터를 거치기 때문에 N+L-1의 길이가 된다. 때문에 송신된 데이터를 복구 하기위해 FFT를 이용할 때는 2N-Point FFT를 수행한다. 따라서 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$Y(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^B \sum_{k=0}^{2N-1} X_i(k) F_i(k) C_i(2k-m) + Z(k) \\ = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{2N-1} X_{i,S_m}(k) F_i(k) C(2k-m) \right. \\ \left. + \sum_{k=0}^{2N-1} X_{i,ICI_m}(k) F_i(k) C(2k-m) \right. \\ \left. + \sum_{l=1, l \neq i}^B X_l(k) F_l(k) C(2k-m) \right) + Z(k) \quad (5)$$

여기서 $X_i(k)$ 는 부반송파 데이터 심볼이고 $X_{i,S_k}(j)$ 는 심볼의 신호 성분 그리고 $X_{i,ICI_k}(j)$ 는 심볼의 ICI 성분이다 [7]. $F_i(k)$ 는 $f_i(n)$ 의 DFT이고 $C(2k-m)$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$C(2k-m) = \frac{\sin\left(\frac{(2k-2\epsilon_i-m)(N+L-1)}{2N}\right)}{2N \sin\left(\frac{\pi(2k-2\epsilon_i-m)}{2N}\right)} \\ \times e^{-\frac{j\pi(2(k-\epsilon_i)-m)}{2N}} e^{\frac{j\pi(2(k-\epsilon_i)-m)(N+L-1)}{2N}} \quad (6)$$

2N-Point FFT를 수행한 UPMC의 수신 신호 $Y(m)$ 은 m이 홀수인 경우 같은 부밴드의 부반송파 사이에서 ICI가 생기므로 부밴드 내의 ICI를 제거 하기 위해 m이 짝수 인 경우 (즉 m = 0,2,...,2N-2 인 데이터)만 사용하고 m이 홀수인 경우는 버리게 된다.

수신 신호 $Y(m)$ 의 i번째 부밴드의 주파수 오프셋을 보상하기 위한 주파수 오프셋의 추정값은 $\arg(C_i(0))$ 으로 구할 수 있다. 주파수 오프셋의 추정값을 $\psi = \arg(C_i(0))$ 라 하고 주파수 오프셋이 보상된 수신 값 $V(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V(k) = Y(k) e^{-j\psi} \\ = X_i(k) F_i(k) |C_i(0)| \\ + \left(\sum_{i=1, i \neq i}^B X_l(k) F_l(k) C_l(2k-m) + Z(k) \right) e^{-j\psi} \quad (7)$$

여기서 $|C_i(0)|$ 는 $E_0 + \delta$ 로 정의 할 수 있고 $E_0 = E[|C_i(0)|]$ 이며 $E[\cdot]$ 은 기댓값이다. 이 때 $V(k)$ 의 첫 번째 부분에서 $X_i(k) F_i(k) E_0$ 는 유효 신호 부분이고 $X_i(k) F_i(k) \delta$ 는 추가 노이즈 부분이라 할 수 있다.

따라서 수신기에서의 SNR(Signal to Noise Ratio)은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$SNR = \frac{E_0^2}{\frac{N_0}{|H[k]|^2 E_s} + V_0} \quad (8)$$

이때 V_0 는 추가 노이즈 부분의 분산이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_0 = E[|\delta|^2] + \sum_{l=1, l \neq i}^B E[|C_l(0)|^2] \quad (9)$$

또한 열화(Degradation) 파라미터 D는 CFO가 없을 때의 SNR을 SNR_{ref} 로 정하고 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} D &= -10 \log \left(\frac{SNR}{SNR_{ref}} \right) \\ &= -10 \log \left(\frac{E_0^2}{\frac{1}{|H[k]|^2} + V_0 \frac{E_s}{N_0}} \right) \\ &= -10 \log(E_0^2) + 10 \log \left(\frac{1}{|H[k]|^2} + V_0 \frac{E_s}{N_0} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 첫 번째 부분은 유효신호 E_0 ($E_0 < 1$)의 크기 감소를 발생시키고 두 번째 부분은 노이즈 때문에 발생하는 부분인데 이것이 매우 작을 때 D는 테일러 급수를 이용해 아래와 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$D \approx \frac{10}{\ln 10} \left(\left(\frac{1}{|H(k)|^2} - E_0^2 \right) + V_0 \frac{E_s}{N_0} \right) \quad (11)$$

D값이 작을 때 같은 값의 BER을 유지하기 위해서는 E_s/N_0 값을 D값이 증가하는 만큼 증가하여야 한다. 때문에 D는 BER의 열화 또는 SNR의 열화라고 할 수 있다.

만일 $E_1 = E[|C_i(0)|^2]$ 이라고 정의 하면 V_0 의 두 부분은 다음과 같이 바뀔 수 있다.

$$E[|\delta|^2] = E_1 - E_0^2 \quad (12)$$

$$\sum_{l=1, l \neq i}^B E[|C_l(0)|^2] = 1 - E_1 \quad (13)$$

만일 필터에서 $|H[k]| = 1$ 이라 가정하고 $|C_i(0)|$ 이 랜덤 신호가 아니라면 $\delta = 0$ 이 되어 E_0^2 은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$E_0^2 = E_1 = |C_i(0)|^2 = \left| \frac{\sin(\epsilon_i \frac{\pi}{N}(N+L-1))}{2N \sin(\epsilon_i \frac{\pi}{N})} \right|^2 \quad (14)$$

따라서 열화 파라미터 D는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D \approx \frac{10}{\ln 10} \left((1 - E_0^2) \left(1 + \frac{E_s}{N_0} \right) \right) \quad (15)$$

IV. 결과 및 분석

이번 장은 주파수 오프셋 ϵ 과 $EsNo$ 의 변화에 따른 열화 파라미터 D와의 관계를 수치 그래프를 통하여 분석 하였다. 이 시뮬레이션 파라미터로 FFT 사이즈 $N = 128$ 로 하였고 필터길이 $L = 32$ 로 하였다.

그림 2의 그래프는 식 (15)를 이용하여 열화 파라미터 D의 값을 주파수 오프셋 값과 $EsNo$ 값의 변화에 따라서 변화 하는 양을 도식화 하였다. 열화 파라미터 D는 주파수 오프셋 ϵ 이 $0 < \epsilon < 0.5$ 로 변화할 때 주파수 오프셋이 각각의 부반송파에 대한 영향이 증가하고 그에 따라 열화 파라미터 D도 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 2를 보면 $EsNo$ 값이 5dB에서 10dB 그리고 15dB로 바뀌에 따라 SNR열화 파라미터 값이 더욱 더 커짐을 볼 수 있다. 특히 주파수 오프셋이 0.5이고 각각 5dB와 15dB의 $EsNo$ 값을 갖을 때 SNR열화 파라미터 값이 대략 6dB 정도 차이가 있음을 볼 수 있는데 이것은 SNR열화 파라미터가 $EsNo$ 의 값에 상대적으로 민감하다는 것을 알 수 있다. 특히 $EsNo$ 값이 높고 상대 주파수 오프셋이 0.5 이상일 때 SNR열화 파라미터 값이 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

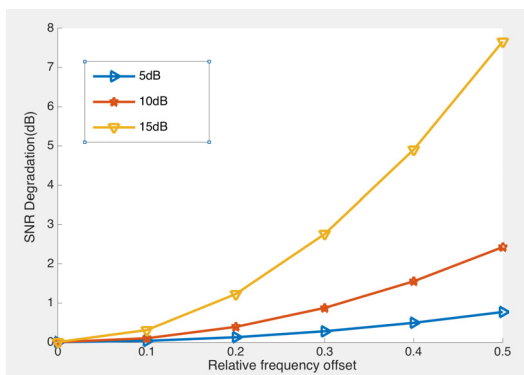


그림 2. EsNo가 5dB, 15dB, 20dB일때 캐리어 주파수 오프셋에 따른 SNR 열화의 변화
 Fig. 2. SNR Degradation vs. Carrier frequency offset when EsNo is 5dB, 15dB, 20dB

V. 결론

본 논문에서는 UFMC시스템의 CFO의 영향에 대하여 분석하였다. 캐리어 주파수 오프셋은 캐리어간의 간섭(ICI)을 야기하고 수신 신호의 SNR을 열화 시킴을 알 수 있다. SNR 열화는 캐리어 주파수 오프셋에 비례하여 커짐을 알 수 있었고 특히 EsNo가 커짐에 따라 더욱 민감하게 지수적으로 증가 변화 됨을 알 수 있다. 향후 연구 과제로는 다중 경로 채널에서의 CFO 영향에 대한 연구가 필요하다고 생각 한다.

References

- [1] Gerhard Wunder, Peter Jung, Martin Kasparick, Thorsten Wild, and more authors, "5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, no.2, pp. 97-105, Feb. 2014.
- [2] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier", *IEEE Signal Process. Mag.*, Vol. 28, pp. 92 -112, May 2011.
- [3] Wunder, G. Kasparick, M. ten Brink, S. Schaich, F. Wild, T. Gaspar, and more authors, "5GNOW: Challenging the LTE Design Paradigms of Orthogonality and Synchronicity", *Mobile and Wireless Commun. Syst. for 2020 and Beyond, Workshop @ 77th IEEE Veh. Technol. Conf. Spring (VTC'13 Spring)*, Jun. 2013.
- [4] Thorsten Wild, Frank Schaich, Stephan ten Brink, and Jean-François Frigon, "Universal Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE", *9th Int. Workshop on Broadband Wireless Access @ IEEE Globecom'13, Atlanta*, Dec. 2013.
- [5] Thorsten Wild, Frank Schaich, and Yejian Chen, "5G Air Interference Design based on Universal Filtered (UF-) OFDM", *Int. Conf. on Digital Signal Processing, DSP14, Hongkong*, Aug. 2014.
- [6] Frank Schaich and Thorsten Wild, "Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs. UPMC", *Special Session on Signal Processing Techniques for Future Mobile Networks @ 6th Int.l Symposium on Communications, Control, and Signal Processing (ISCCSP, Athens, April 2014*.
- [7] Frank Schaich, Thorsten Wild, and Yejian Chen, "Waveform contenders for 5G - suitability for short packet and low latency transmissions", in *Proc. IEEE 79th Veh. Technol. Conf. (VTC13 Spring)*, Seoul, April 2014.
- [8] Xiaojie Wang, Thorsten Wild, Frank Schaich, and Andre Fonseca dos Santos, "Universal Filtered Multi-Carrier with Leakage-Based Filter Optimization", *European Wireless, EW14, Barcelona, May 2014*.
- [9] Dong-Keun Jeon and Yeonwoo Lee, "Performance Evaluation of WiMedia UWB MAC Protocol Algorithm Supporting Mixed Video and Shipboard Control Data Traffic", *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication* Vol. 8 No. 1. pp. 53-63, 2016
- [10] Jeong, Sang-Guk, An, Tae-Ki, Kim, Back-Hyun, Myung Woo Nam, Young-seock Lee and Myung-Kwan Oh, "Development of Wireless Image Transmission System in Subway at 18GHz", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS)*, Vol. 11, No. 6, pp. 2196-2201, 2010.

저자 소개

이 규 섭(준회원)



- 2009년 : 홍익대학교 전자전기공학과 (BS)
 - 2011년 : 홍익대학교 전자전산공학과 (MS)
 - 2011년~현재 : 홍익대학교 전자전산공학과 박사과정
- <주관심분야 : 차세대이동통신, wavelet, uwb, 통신신호처리>

최 진 규(종신회원)



- 1983년 : 성균관대학교 전자공학과 (BS)
 - 1990년 : (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (MS)
 - 1994년 : (미)Polytechnic Univ. 전산과학과 (MS)
 - 1996년 : (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (Ph.D)
- 1983년~1986년 : LG 전자, Motorola Korea 연구원
- 1996년~2004년 : 삼성전자 통신연구소 수석연구원
- 2004년~현재 : 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 교수
- <주관심분야 : 차세대이동통신, 초광대역 통신, 통신신호처리>

※ 이 논문은 2013학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음. 교신저자 : 최진규