

주파수 선택적 신호 환경에서 안테나 어레이의 FBMC/OQAM 시스템 적용

김 예카테리나*·안 흥 섭**·최 승 원***

Application of antenna array to FBMC/OQAM system in frequency-selective signal environment

Kim Yekaterina·Ahn Heungseop·Choi Seungwon

〈Abstract〉

Despite attractive advantages such as good time-frequency localization and improved spectral efficiency, filter bank multicarrier with offset quadrature amplitude modulation (FBMC/OQAM) suffers from multipath fading. In highly frequency-selective channels, the effect of multipath interference can significantly distort the FBMC/OQAM signal due to the absence of cyclic prefix. To resolve the problem of the multipath interference in FBMC/OQAM, this paper proposes applying an antenna array that provides well shaped beam pattern for each multipath. To evaluate the performance of the proposed array system, various computer simulations have been conducted. The accuracy of direction of arrival estimation is demonstrated through spatial spectrum for a different number of antennas in a sub-array. The performance improvement is presented in terms of bit error rate. We found that the proposed array system mitigate the multipath interferences in Extended Typical Urban model with 12 antennas in a sub-array. Moreover, as the number of antennas in a sub-array increases, the system provides a signal-to-noise ratio gain.

Key Words : Filter Banks, Antenna Array, Highly Frequency-Selective Fading, OFDM

I. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 4세대 및 5세대 광대역 모바일 통신을 위한 멀티 캐리어 기술로써 널리 사용되어 왔다. OFDM은 무선 전송에서의 다중 경로 간섭의 효과를 극복하기 위해 Cyclic Prefix (CP)를 각 OFDM 심볼

에 적용하지만, CP 도입에 따른 오버헤드로 인해 스펙트럼 효율을 떨어뜨리는 단점을 가지고 있다. 또한 OFDM은 직사각형 펄스 정형 (pulse shaping) 필터의 높은 사이드 로브와 높은 대역 외(Out of Band, 이하 OOB) 방사로 인한 스펙트럼 효율이 떨어지는 문제를 가지고 있다[1, 2].

FBMC/OQAM(Filter Bank Multi Carrier with Offset Quadrature Amlitude Modulation)는 CP를 사용하지 않으며, OFDM에 비해 훨씬 낮은 사이드 로브를 제공하는 펄스 정형 필터를 채택하여 더 나은

* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정

** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정

*** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 교수

스펙트럼 감금 (spectrum confinement)과 시간 및 주파수 분산 (time and frequency dispersion)에 대한 강인함을 제공한다[3-5].

그러나 FBMC/OQAM은 CP의 부재로 인해 다중 경로 분산이 극히 큰, 높은 분산 채널에서는 시간 분산에 대한 강인함을 제공할 수 없음을 따라 수신 (Receive, 이하 Rx) 성능을 심각하게 저하시킬 수 있는 단점이 존재한다[4]. 이렇게 다중 경로 분산이 극히 큰 다중 경로 환경에서 CP 사용 없이 다중 경로 간섭 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 UL(Uplink) FBMC/OQAM 시스템에 안테나 어레이를 적용하는 방법을 제안한다. 안테나 어레이는 타겟 경로 및 다른 간섭 경로에 따라 최대 이득 및 널(null) 빔 패턴을 조정해주는 최적의 가중 벡터를 제공한다. 다중 경로 간섭 문제를 해결하기 위해 제안하는 어레이 시스템은 OFDM에 비해 시간 및 스펙트럼 자원의 보다 효율적인 사용을 제공하며, OFDM에 준하는 주파수 분산에 대한 견고성을 제공한다. 제안된 시스템의 성능은 국제 표준 기술 단체인 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 지연 프로파일[6]의 ETU(Extended Typical Urban) 모델을 고려하여 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 FBMC/OQAM 시스템에 안테나 어레이를 적용하려는 동기를 제시하며, 3장에서는 제안하는 시스템 설계에 대해 자세히 설명한다. 4장에서는 서로 다른 각도 분해능에 따른 시뮬레이션 결과 및 성능 평가로써 어레이 빔 패턴 및 BER(Bit Error Rate)을 제시하고 5장에서는 결론을 제시한다.

II. FBMC/OQAM에 안테나 어레이의 적용

구현 간소화, 높은 처리량 및 시간 다이버시티에

대한 강인함을 포함하는 많은 장점에도 불구하고, OFDM은 높은 OOB 방사, 낮은 스펙트럼 효율, UL에서의 동기화 에러에 대한 높은 민감도 등의 한계를 가지고 있다. FBMC/OQAM은 OFDM의 한계를 작은 사이드레브를 가지는 펄스 정형 필터를 사용하여 극복한다[7, 8]. OFDM과 달리 FBMC/OQAM은 이러한 필터를 하나의 프로토타입 필터[2, 9, 10]의 복잡한 변조로 얻은 각 서브채널에 대한 멀티 캐리어 변조기 및 복조기로 사용한다. FBMC/OQAM에 사용된 프로토타입 필터는 필터 임펄스 응답 길이가 기준 심볼 기간인 N 에 비해 K 배만큼 필터 임펄스 응답의 길이가 증가한다는 특징이 있다[9-11]. 중첩 인자 K 를 사용하여, OQAM 시차(staggering)에 의해 복소수 샘플로부터 얻어진 KN 개의 실수 샘플은 심볼 기간 N 의 매 절반마다 송신되어, 멀티캐리어 심볼 K 개가 시간 영역에서 중첩된다. 심볼 주기가 K 만큼 증가하기 때문에 FBMC/OQAM에서의 다중 경로 간섭의 영향은 상대적으로 약한 주파수 선택 채널에서는 무시할 수 있다. 결국 FBMC/OQAM에서 펄스 정형 필터를 사용하면 CP가 필요하지 않으며, 낮은 레벨의 OOB 방사, 높은 스펙트럼 효율 및 타이밍 및 주파수 오프셋에 대한 강인함을 제공할 수 있다[4, 12-15].

FBMC/OQAM은 펄스 정형 필터 덕분에 스펙트럼 효율과 시간 및 주파수 선택성에 대한 강인함 측면에서 OFDM보다 우수하다는 장점이 있다. 그러나 지연 확산이 큰 다중 경로 환경에서, FBMC/OQAM은 간섭이 모든 FBMC/OQAM 심볼에서 나타나는 극심한 다중 경로 간섭을 겪을 수 있다. 즉, 다중 경로 스프레드의 폭만큼 매 FBMC/OQAM 심볼 시작 부분에 간섭을 겪게 된다. 따라서 5000ns의 지연 시간을 갖는 ETU 환경과 같이 채널 지연 확산 시간이 긴 환경에서는 다중 경로 간섭으로 인한 성능 저하가 발생한다[6].

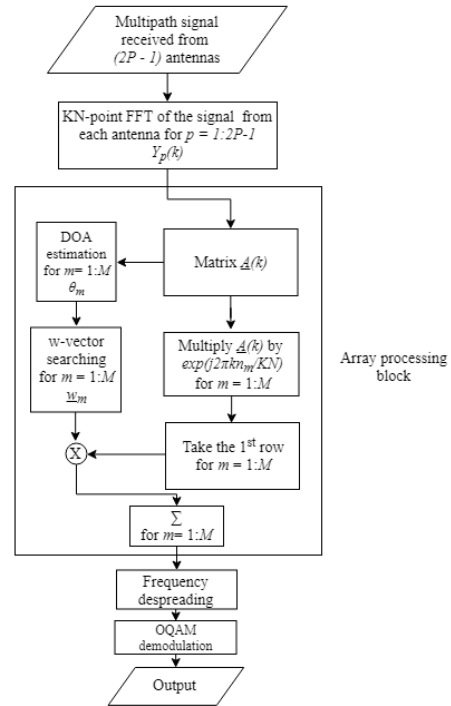
큰 지연 확산 채널에서 FBMC/OQAM 신호의 성능을 향상시키기 위해서는 다중 경로 간섭 문제를 해

결하는 것이 중요하다. 그러나 고주파수 선택성 신호 환경에서 FBMC/OQAM 신호의 다중 경로 간섭 왜곡을 완화하는 방법을 연구 한 연구는 거의 없었다. 실제로, 각 부반송파 및 전체 채널이 주파수 선택적 페이딩을 겪는 채널에서 동작하는 FBMC/OQAM의 성능 열화에 대한 분석은 없었다. 이에 따라 본 논문에서는 고주파수 선택적 페이딩을 겪는 채널에서의 성능을 분석하고 이를 해결할 수 있는 방법을 찾는 것이 중요하다.

다중 경로 간섭을 해결하기 위한 효율적인 방법 중 하나는 Rx 안테나 어레이를 사용하여 모든 다중 경로 신호 구성 요소를 수집하여 빔포밍 (Beamforming) 이득을 얻는 것이다. 안테나 어레이를 이용한 빔포밍을 통해 간섭 신호를 정확하게 제거하고 타겟 신호의 세기를 최대화 할 수 있다. 본 논문에서는 CP가 없는 조건, UL 기지국에서의 FBMC/OQAM의 조건 하에 주파수 선택성이 높은 채널을 극복하기 위해 기지국에서의 안테나 어레이 시스템을 적용 할 것을 제안한다. 제안하는 시스템은 CP를 사용하여 다중 경로 간섭을 완화하는 대신, 대상 경로 방향의 신호 세기를 최대화하며, 다중 경로 간섭의 방향으로는 수신 신호 세기는 0으로 만든다. 제안하는 어레이 시스템을 사용하여 다중 경로 간섭이 제거 된 후에, 각 다중 경로와 관련된 모든 신호 구성 요소를 결합함으로써, 제안하는 시스템은 FBMC/OQAM 변조의 스펙트럼 효율을 그대로 유지하면서 고주파수 선택적 페이딩 채널에서도 강인한 성능을 얻을 수 있다.

III. 제안하는 시스템 설계

본 장에서는 <그림 1>에서와 같이 기지국 UL FBMC/OQAM에 적용되는 Rx 빔포밍 어레이 시스템을 제시한다. UL의 기지국 Rx측에는 어레이 안테나를 사용하고 사용자의 Tx측에는 단일 안테나를 사용



<그림 1> 제안하는 어레이 시스템의 블록 다이어그램

한다고 가정하였다. 어레이 안테나 시스템의 안테나 수는 채널 조건에 따라 결정되어야 하며 다중 경로가 많을수록 더 많은 수의 안테나가 요구된다[16].

<그림 1>은 균등하게 이격 된 $(2P - 1)$ 안테나 소자로 구성된 제안하는 어레이 시스템을 나타낸 것이다. 여기서 P 는 채널 매트릭스의 랭크(rank)를 결정하는 각 서브어레이에서의 안테나 수를 나타낸다. 파 필드(far field) 조건의 선형 어레이가 본 논문에서 고려되었지만, 제안하는 시스템은 임의의 어레이 구조에 적용될 수 있다. 채널 행렬 크기 P 는 주어진 신호 환경에서 무시할 수 없는 다중 경로의 수보다 작지 않도록 결정되어야 한다. 각 안테나는 단순함을 위해 전방향성(omnidirectional) 안테나를 사용하는 것으로 가정 하였으며, 안테나 간 간격은 $\lambda/2$ 이며, 여기서 λ 는 캐리어 주파수에서 FBMC/OQAM 신호의 파장

을 나타낸다.

<그림 1>에서 볼 수 있듯이 Rx FBMC/OQAM 신호는 각 안테나 포트($p = 1, 2, \dots, 2P - 1$)에서 KN 포인트 FFT 연산을 거치며, 여기서 K 와 N 은 각각 중첩 요소와 부반송파의 개수를 나타낸다. p -번째 안테나에 해당하는 k -번째 부반송파의 FFT 처리된 FBMC/OQAM 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_p(k) = x(k) \sum_{m=1}^M \alpha_m e^{-j(p-1)\pi \sin(\theta_m)} e^{-j\frac{2\pi kn_m}{KN}} + \xi_p(k) \quad (1)$$

여기서, α_m 및 n_m 은 k -번째 부반송파에 해당하는 Tx FBMC/OQAM 샘플이 겪는 m -번째 다중 경로 크기 및 전파 지연이고, θ_m 은 m -번째 부반송파의 입사 각이며, $\xi_p(k)$ 는 부가 백색 가우시안 잡음을 나타낸다. $e^{-j(p-1)\pi \sin(\theta_m)}$ 의 값은 가장 빠른 위상을 갖는 기준 안테나에 대한 안테나 배열 인자를 정의한다[17-19].

Rx 신호 행렬 $\underline{A}(k)$ 는 주파수 영역에서 $Y_p(k)$ 샘플로 구성되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{A}(k) = \begin{bmatrix} Y_1(k) & Y_2(k) & \dots & Y_p(k) \\ Y_2(k) & Y_3(k) & \dots & Y_{p+1}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_p(k) & Y_{p+1}(k) & \dots & Y_{2p-1}(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

도착 방향 (Direction of Arrival, 이하 DOA) 추정을 위해 본 논문에서는 고유 분해법 (eigen-decomposition) 을 이용한다[16-18]. 행렬 $\underline{A}(k)$ 에서의 신호 고유 값의 수는 다중 경로의 수 M 에 의해 결정되는 반면, 잡음 고유치의 수는 지연 프로파일 모델에 대해 $(P-M)$ 으로 결정되어진다. 고유 분해를 위해, 자기 공분산 행렬 B 는 단순화를 위해 모든 부반송파들, 즉 KN 으로 가정되는, 타겟 사용자에게 할당된 모든 부반송파들에 대한 신호 행렬 $\underline{A}(k)$ 를 다음과 같이 평균함으로써 계산된다.

$$B = \frac{1}{KN} \sum_{k=1}^{KN} [\underline{A}(k)]^H \underline{A}(k) \quad (3)$$

여기서, $\underline{A}(k)$ 는 KN -포인트 FFT 연산의 각각의 출력으로 부터 얻어진 k -번째 서브 캐리어에 대한 P -by- P 신호 행렬이고, 위 첨자 H 는 허미시안 연산자이다.

자기 공분산 행렬 B 는 고유 벡터와 고유 값의 조합이며 다음과 같이 주어진다.

$$B = \underline{V} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_p \end{bmatrix} \underline{V}^H \quad (4)$$

여기서, λ_p 는 p -번째 고유치를 나타내고, P -by- P 행렬 \underline{V} 는 $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_p$ P 개의 고유 벡터의 구성이다.

다음으로 공간 스펙트럼을 생성함으로써 $(P-M)$ 개의 최소 고유치에 해당하는 $(P-M)$ 잡음 고유 벡터로부터 M 개의 다중 경로의 DOA를 구할 수 있다[18].

$$E(\theta) = \frac{1}{P-M} \sum_{p=1}^{P-M} \frac{1}{\| [\underline{v}_p]^H \underline{d} \|^2} \quad (5)$$

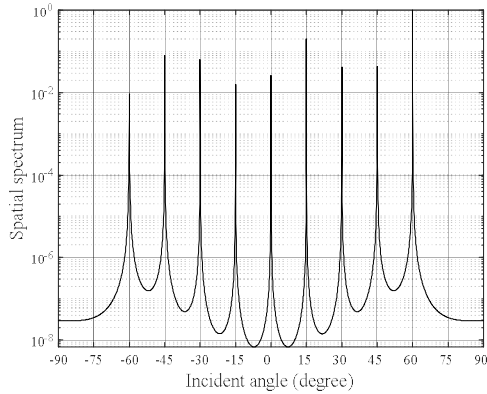
여기서, \underline{v}_p 는 p -번째 잡음 고유 벡터를 나타내고, 벡터 \underline{d} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\underline{d} = [1 e^{-j\pi \sin \theta} \dots e^{-j(p-1)\pi \sin \theta}]^T \quad \text{for } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

위 첨자 T 는 트랜스포즈(transpose) 연산자이다.

<그림 2>는 서브어레이의 안테나 수가 16개이고 ETU 지연 프로파일[5]의 9개 탭이 $\pm 60^\circ / \pm 45^\circ / \pm 30^\circ / \pm 15^\circ / 0^\circ$ 의 도달 각으로 공간에

균일하게 분배 된 경우의 공간 스펙트럼 $E(\theta)$ 제시한다.



<그림 2> 3GPP ETU 모델에 대한 9개의 균일 분포 탭의 DOA 추정 공간 스펙트럼

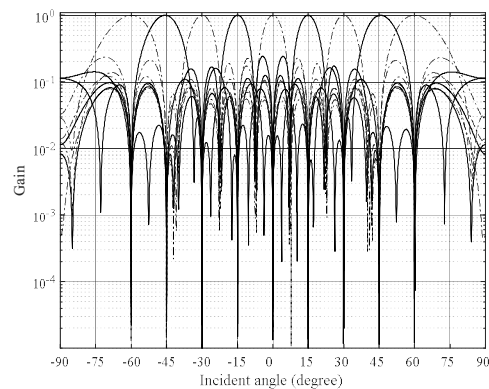
각각의 다중 경로의 DOA가 결정된 후에, 대응하는 빔 패턴이 타겟 다중 경로의 방향으로 최대 이득을 생성하고 다른 경로의 방향을 따라 널 패턴을 생성하도록 각각의 다중 경로에 대한 적절한 가중 벡터가 얻어 져야 한다. $m = 1, 2, \dots, M$ 에 대한 각각의 DOA에 대해 웨이트(weight) 벡터 w_m 를 구해야 하고, 웨이트 벡터를 얻기 위한 행렬식은 다음과 같다.

$$A(k) w_m = x(k) a(\theta_m) \quad \text{for } m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

여기서, $A(k)$ 는 Rx 측에서는 그 값을 알고 있는 트레이닝 심볼 Tx 샘플 $x(k)$ 에 대응하는 Rx 신호 행렬이며, $a(\theta_m)$ 는 m 번째 다중 경로의 DOA에 의해 결정된 스티어링(steering) 벡터를 나타내며, w_m 은 계산되어 질 웨이트 벡터이다. 식(7)에서 행렬 $A(k)$ 를 구성하는 Rx 신호는 각 타겟 경로에 대한 전파 지연의 값에 따라 Rx 신호에 $e^{j \frac{2\pi k n m}{KN}}$ 을 계산하는 위상 보상이 되어야 한다. 행렬 방정식 식(7)은 각 경로 ($m = 1, 2,$

\dots, M)에 대한 위상 지연이 각 Rx 신호로부터 추정될 수 있도록 트레이닝 심볼을 이용하는 것이 중요하다. 이를 위해 LTE[20]의 UL 신호 포맷에 따라 각 데이터 슬롯의 4번째 심볼 주기마다 존재하는 트레이닝 심볼을 사용한다. 식(7)의 우변에서 설정 될 스티어링 벡터 $a(\theta_m)$ 에 대해서, 모든 다중 경로의 각 DOA에 대해 정확한 값이 가중 벡터 계산 이전에 찾아야 한다[18]. 한편, 제안하는 어레이 시스템에서 심볼 구간마다 한번의 DOA 추정이 수행되었음이 주목할 만하다. 그러나 실제 신호 환경에서, 이동성은 일반적으로 심볼 기간 내에서 무시할 수 있기 때문에, DOA 추정 기간은 심볼 기간보다 훨씬 길 수 있다.

<그림 3>은 해당 다중 경로에 적용된 각 웨이트 벡터에 의해 제공된 어레이 패턴을 보여준다. 주목할 점은 각 빔 패턴이 타겟 전파 경로의 방향을 따라 최대 이득을 제공하고 다른 모든 다중 경로의 방향을 따라 제거 한다는 점이다. <그림 3>은 공간 도메인에서 각 웨이트 벡터가 원하는 FBMC/OQAM 신호를 어떻게 형성하는지 보여준다. <그림 3>에 도시 된 빔 패턴에 대해 고려 된 신호 환경은 도달 각이 $\pm 60^\circ/\pm 45^\circ/\pm 30^\circ/\pm 15^\circ/0^\circ$ 로 설정된 3GPP ETU 모델을 이용하였다.



<그림 3> 3GPP ETU 모델에 대한 9개의 균일 분포된 탭의 어레이 패턴

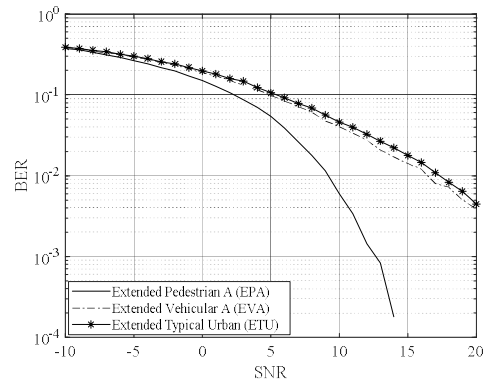
행렬 식(7)에 대한 해는 일반화 된 공역 기울기 (conjugate gradient) 방법[21]을 사용하여 각 다중 경로에 대해 구할 수 있다. 웨이트 벡터 결과는 $m = 1, 2, \dots, M$ 에 대한 각 신호 행렬 $A(k)$ 의 첫 번째 행에 적용되고, M 개의 가중치 합은 <그림 1>과 같이 최대 비율 결합 (maximum ratio combining, 이하 MRC)한다. 식 (7)에서 제공된 웨이트 벡터는 패턴 널과 함께 다중 경로 간섭을 해결할 뿐만 아니라 전체 SNR을 N 배 향상 시킨다[16, 18]. MRC 결과는 후속적으로 FBMC/OQAM 프로토타입 필터로 MRC 신호를 필터링하고 합성 된 QAM 심볼을 재조립하는 절차를 포함하는 주파수 역확산(frequency despreading) 연산자에서 처리된다. FBMC/OQAM 신호의 Tx 데이터는 <그림 1>과 같이 QAM 복조기의 절차를 통해 복조된다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안하는 어레이 시스템의 코딩되지 않은 BER 성능을 시뮬레이션 결과로 제시한다. BER 성능은 채널 환경, 안테나 요소의 수 및 유형, 관련된 Tx 및 Rx 객체의 이동성 등에 따라 결정된다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 채널 환경으로써 3GPP 모델링[6]이 고려되었으며 각 안테나는 등방성 안테나를 사용을 가정하였으며, 다음 매개 변수가 시뮬레이션에 사용되었다. 1) $K = 4$, FBMC/OQAM 신호의 중첩 요소, 2) $N = 1024$, 부반송파 개수.

<그림 4>는 EPA(Extended Pedestrian A), EVA(Extended Vehicular A) 및 ETU의 세 가지 3GPP 지연 프로파일에 대해 단일 안테나에서 얻은 FBMC/OQAM 신호의 BER 성능을 보여준다. <그림 4>에서 볼 수 있듯이, EVA와 ETU 환경 모두에서의 다중 경로 확산이 EPA 환경보다 훨씬 더 넓기 때문에 EVA와 ETU의 경우 BER 성능이 상당히 저하되었

음을 관찰할 수 있다. EPA 환경에서의 다중 경로 스프레드 410ns는 FBMC/OQAM 신호의 확장 심볼 길이 $4 \times 66.67 \mu s$ 에 비해 무시할 만하지만, 넓은 다중 경로 스프레드를 가지는 EVA 및 ETU (즉, 2510ns 및 5000ns) 환경에서는 BER 성능을 상당히 저하시킨다.

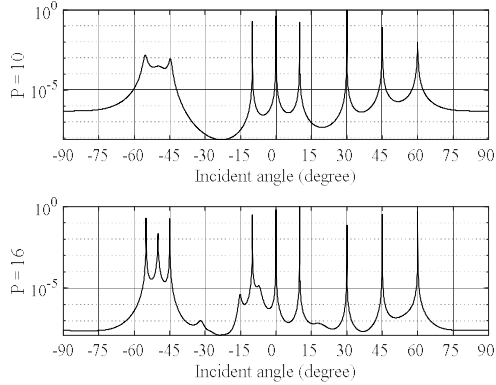


<그림 4> EPA, EVA, ETU 지연 프로파일에서의 안테나 어레이가 없는 ($P = 1$) FBMC/OQAM의 BER 성능

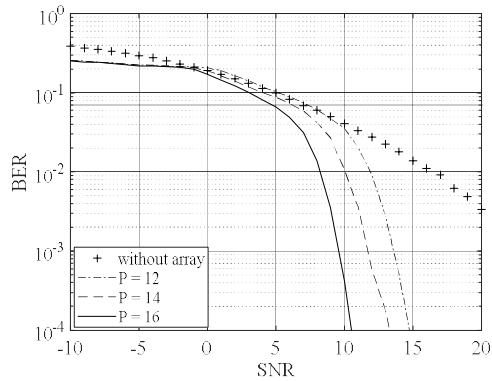
제안하는 어레이 시스템의 다중 경로 간섭의 영향 해결 능력을 알아보기 위해 단일 안테나에서 가장 안 좋은 BER 성능을 초래하는 ETU 모델에서 시뮬레이션 해보았다. 실제 신호 환경에서는 DOA 분포가 균일하지 않을 것으로 가정하고 시뮬레이션에서의 DOA는 $-55^\circ/-50^\circ/-45^\circ/-10^\circ/0^\circ/10^\circ/30^\circ/45^\circ/60^\circ$ 로 설정하였다.

<그림 5>는 ETU 지연 프로파일에서 $P = 10$, $P = 16$ 의 안테나 어레이를 이용해 9개의 다중 경로 DOA를 추정된 공간 스펙트럼 $E(\theta)$ 를 보여준다.

<그림 5>는 각 다중 경로의 DOA가 $P = 16$ 일 때, 합리적인 복잡성을 가지고 정확하게 추정 될 수 있음을 보여준다. 그러나 $P = 10$ 의 시스템은 예를 들어, $\theta_m = -55^\circ/-50^\circ/-45^\circ$ 와 같이, 보다 조밀하게 도착한 다중 경로의 정확한 DOA를 추정하기에 충분하지 않다. 도달 각 분포가 더 조밀해짐에 따라 요구되는 각



<그림 5> P = 10과 P = 16의 안테나 어레이에 의한 9개의 다중 경로의 DOA 추정 공간 스펙트럼



<그림 6> P = 12, P = 14 및 P = 16 인 BER 성능

도 분해능도 증가하므로, 이에 비례하여 안테나 수를 늘리는 것이 필요하다.

<그림 6>은 ETU 모델의 9개의 다중 경로가 불균일하게 분배 될 때 제안하는 어레이 시스템의 BER 성능을 보여준다. <그림 6>에서 보듯이 제안하는 P = 12의 어레이는 Eb/N0가 10dB 이상인 모든 다중 경로 간섭을 성공적으로 해결하는 반면, P = 14 및 P = 16의 다중 경로 간섭은 안테나 수에 비례하는 추가적인 SNR 이득을 제공한다.

IV. 결론

CP 사용으로 인한 낮은 스펙트럼 효율의 OFDM의 단점에 기인하여 본 논문에서는 UL에서 Rx 안테나 어레이를 사용하는 FBMC/OQAM 변조를 제안했다. 비록 CP가 없는 FBMC/OQAM이 OFDM의 낮은 스펙트럼 효율 한계의 관점에서 유리하지만, FBMC/OQAM 신호는 고 주파수 선택적 페이딩 채널에서 심각한 다중 경로 간섭을 겪는다. 고 주파수 선택적 페이딩 채널에서 FBMC/OQAM 성능을 심각하게 저하시키는 다중 경로 간섭의 효과를 해결하기 위해, 제안하는 어레이 시스템은 간섭하는 모든 다중 경로의 방향에 따라 널을 갖고 타겟 소스의 방향으로 최대 이득을 갖는 빔 패턴을 제공 하였다. 본 논문에서는 3GPP의 ETU 모델에서 수행 된 컴퓨터 시뮬레이션에서 9개의 채널 탭의 DOA가 불균일하게 분포 될 때 제안하는 어레이 시스템이 각 서브어레이의 안테나 수 P = 12으로 다중 경로 간섭을 완전히 해결 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Acknowledgment

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017_0_00723, Reconfigurable Radio System 기술을 적용한 소프트웨어 기반 서비스 지향 통합 기지국 플랫폼 개발)

참고문헌

[1] F. Luo, J. Zhang, Signal processing for 5G: algorithms and implementations, John Wiley & Sons, Inc, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2016, pp. 3-23, 47-89.

- [2] A. Sahin, I. Guvenc, H. Arslan, "A Survey on Multicarrier Communications: Prototype Filters, Lattice Structures, and Implementation Aspects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, 2014, pp. 1312–1338.
- [3] P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe et al., "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, 2014, pp. 80–93.
- [4] A. Pérez-Neira, M. Caus, R. Zakaria et al., "MIMO signal processing in offset-QAM based filter bank multicarrier systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 21, 2016, pp. 5733–5762.
- [5] B. Saltzberg, "Performance of an efficient parallel data transmission system," *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 15, no. 6, 1967, pp. 805–811.
- [6] 3GPP TS 36.101 v12.7.0, Technical specifications for LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) - User Equipment (UE) radio transmission and reception, 2015, pp. 604–605.
- [7] H. Bölcskei, "Orthogonal frequency division multiplexing based on offset QAM," in *Advances in Gabor Analysis*, Birkhäuser, 2003, pp. 321–352.
- [8] P. K. Remvik and N. Holte, "Carrier frequency offset robustness for OFDM systems with different pulse shaping filters," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, vol. 1, Nov. 1997, pp. 11–15.
- [9] M. Bellanger, D. Le Ruyet, D. Roviras et al., "FBMC physical layer: a primer," *PHYDYAS*, 2010.
- [10] M. Bellanger, "FS-FBMC: an alternative scheme for filter bank based multicarrier transmission," 2012 5th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2012, pp. 1–4.
- [11] T. Ihalainen, A. Ikhlef, J. Louveaux et al., "Channel equalization for multi-antenna FBMC/OQAM receivers," *Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 5, Jun. 2011, pp. 2070–2085.
- [12] W. Jiang, M. Schellmann, "Suppressing the out-of-band power radiation in multi-carrier systems: A comparative study," *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2012, pp. 1477–1482.
- [13] A. Aminjavaheri, A. Farhang, A. L. Rezaadeh-Reyhani et al., "Impact of timing and frequency offsets on multicarrier waveform candidates for 5G," in *Proc. IEEE DSP Workshop Edu.*, Aug. 2015, pp. 178–183.
- [14] P. Siohan, C. Siclet, and N. Lacaille, "Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filter bank theory," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 5, May 2002, pp. 1170–1183.
- [15] F. Rottenberg, X. Mestre, D. Petrov et al., "Parallel equalization structure for MIMO FBMC-OQAM systems under strong time and frequency selectivity," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 17, Sep. 2017, pp. 4454–4467.
- [16] S. Choi, T. Sarkar, J. Choi, "Adaptive antenna array for direction-of-arrival estimation utilizing the conjugate gradient method," *Signal Processing*, vol. 45, no. 3, 1995, pp. 313–327.
- [17] A. Liu, G. Liao, C. Zeng et al., "An

- eigenstructure method for estimating DOA and sensor gain-phase errors," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 12, 2011, pp. 5944-5956.
- [18] L. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations," Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 8, 1997, pp. 1195-1245.
- [19] F. B. Gross, Smart antennas with MATLAB. New York: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 63-99, 163-284.
- [20] 3GPP TS 36.211 v.13.2.0, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13), 2016, pp. 41-54.
- [21] C. Shin, J. Ju, D. Kang et al. "Implementation of an antenna array for satellite communications with the capability of canceling jammers," IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, pp. 32-48.
- [22] 김호일 · 안홍섭 · 최승원, "범용 DSP를 이용한 RRS 기반 기지국 통신 플랫폼 구현," 디지털산업정보학회 논문지, 제14권, 제4호, 2018, pp. 87-92.
- [23] 이광민 · 안홍섭 · 최승원, "TMS320C6670 기반 LTE-A PDSCH 디코더 구현," 디지털산업정보학회 논문지, 제14권, 제4호, 2018, pp. 79-85.

■ 저자소개 ■



김예카테리나
(Kim Yekaterina)

2017년 9월~현재
한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정
2011년~2015년
Beeline Kazakhstan, Senior Engineer
2010년 6월 Almaty University of Power Engineering and Telecommunications 전자공학 (공학학사)
관심분야 : 5G, LTE/LTE-A, Beamforming
E-mail : ylkim@dsplab.hanyang.ac.kr



안 홍 섭
(Ahn Heungseop)

2016년 3월~현재
한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정
2016년 2월
한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학석사)
2013년 2월
한양대학교 융합전자공학부 (공학학사)
관심분야 : vehicular comm, 5G, LTE, Cell planning, SDR etc.
E-mail : ahs90@dsplab.hanyang.ac.kr



최 승 원
(Choi Seungwon)

2012년 3월~현재
HY-MC 연구센터 센터장
2002년~2011년
HY-SDR 연구센터 센터장
1992년~현재
한양대학교 전자전기공학부 교수
1990년~1992년
일본 우정성 통신연구소 선임연구원
1989년~1990년
ETRI 선임연구원
1988년~1989년
미국 Syracuse대학 전지 및 전산과 교수
1988년 12월 미국 Syracuse대학 전기공학 (공학박사)
1985년 12월 미국 Syracuse대학 전기공학 (공학석사)
1982년 2월 서울대학교 전자공학 (공학석사)
1982년 2월 한양대학교 전자공학 (공학학사)
관심분야 : SDR, 이동통신, 신호처리
E-mail : choi@dsplab.hanyang.ac.kr

논문 접수일 : 2019년 02월 28일

게재 확정일 : 2019년 03월 20일