

5세대 이동통신용 다중안테나/F-OFDM 시스템에서의 동기 방식과 성능 평가

안창영*, 유흥균^o

Synchronization and Performance Evaluation of MIMO/F-OFDM Systems for 5G Mobile Communications

Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu^o

요약

본 논문에서는 5세대 이동통신을 위한 새로운 변조 기술 중 하나인 F-OFDM 기술과 MIMO 기술을 결합한 시스템을 설계하며, 이 시스템에 다양한 동기화 기술들을 적용하고, 각 동기화 방법들의 동기화 성능을 비교 평가 및 분석을 수행한다. 본 논문에서 비교 평가 및 분석을 위해 Schmidl, Minn, Park의 방법을 고려하였으며, 시플레이션 결과를 통해 F-OFDM 변조에서 OOB 전력을 저감시키기 위해 필터길이를 확장할 경우 동기 추정기의 시간 메트릭이 일부 열화가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 시간 메트릭의 Plateau의 경우 Schmidl, Minn, Park 순서로 좁은 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히, F-OFDM 변조의 필터길이 만큼 시간 메트릭이 쉬프트이 동하며, 이는 필터 길이에 영향을 받으므로 송수신기에서 시스템 설계시 고려된 필터 길이를 이용하여 보상할 수 있음을 확인할 수 있다.

Key Words : OFDM, F-OFDM, MIMO, synchronization, 5th generation

ABSTRACT

In this paper, we have designed MIMO system using F-OFDM modulation. And then, we have evaluated and analyzed synchronization performance of the system. In this paper we have considered Schmidl's method, Minn's method, and Park's method. As simulation results, Schmidl's method has wide plateau of timing metric and Park's method has impulse-shape timing metric. Also, we can confirm that timing metric characteristic of synchronization estimator can be degraded by adjusting filter length of F-OFDM system. Especially, we can confirm that timing metric of synchronization estimator is shifted according to filter length of MIMO system using F-OFDM modulation and this timing metric movement can be compensated by using designed filter length.

※ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0101-16-244, 초연결 스마트 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심 기술 개발), 그리고 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046), 그리고 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음[B0717-16-0081, 밀리미터파 대역 5G 안테나 3차원 빔 측정설비 기반구축].

• First Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호:KICS2016-10-297, Received October, 10 2016; Revised December 20, 2016; Accepted December 22, 2016

I. 서 론

최근 다양한 멀티미디어 서비스의 수요와 공급이 급격하게 증가하고 있다. 이와 같은 차세대 멀티미디어 서비스는 높은 통신용량을 요구한다^[1,2]. 이와 같은 요구 사항을 만족시키기 위해서 현재 4세대 이동통신 시스템을 뛰어넘는 5세대 이동통신 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^[3,4].

5세대 이동통신 시스템 구현을 위해서 통신 시스템을 구성하는 각 계층에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 특히 물리 계층에서는 향상된 변조기술에 대한 연구와 더불어 다수의 안테나를 사용하는 MIMO(multiple-input multiple-output) 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[5]. 향상된 변조기술에 대한 연구는 스펙트럼 효율을 향상시키는 것을 목적으로 하며, 스펙트럼의 OOB(out-of-band) 전력의 크기를 억압시켜 이 목적을 달성할 수 있다. 현재 4세대 이동통신에서는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 기술이 핵심 변조기술이다. OFDM은 다수의 반송파에 데이터를 맵핑하여 전송하는 기술로, CP(cyclic prefix)를 사용할 경우 수신기 처리를 간소화하여 데이터 고속 전송을 가능하게 한다. 그러나 기존의 OFDM 기술은 Rectangular Window를 사용하기 때문에 주파수 영역의 스펙트럼을 분석할 경우 높은 OOB 전력 크기를 갖는다^[6]. OOB 전력이 높기 때문에 할당된 대역폭에서 실제 사용할 수 있는 주파수 영역이 감소된다. 예를 들어 20Mhz 주파수 대역에서 2048 크기의 FFT를 사용하여 데이터를 맵핑할 경우 주파수 마스크를 만족시키기 위해서 실제로는 1201개의 반송파만을 사용할 수 있으며, 좌측과 우측 외곽에 위치하는 반송파 847개는 사용할 수 없다. 여기에서 OFDM 시스템의 OOB를 저감시키면 할당할 수 있는 반송파의 개수를 늘릴 수 있으며, 이는 스펙트럼 효율을 향상시키게 된다. 이러한 변조기술 부분에서 스펙트럼 효율을 향상시키기 위한 OOB 전력 저감을 위해 다양한 기술이 제안되었으며, 현재 연구가 수행되고 있다^[6]. 추가로, 스펙트럼 효율을 향상시키기 위한 안테나 부분의 기술로 MIMO 기술을 향상시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다. MIMO 기술에서 더 많은 송수신 안테나를 사용할 경우 더욱 높은 스펙트럼 효율 향상을 달성할 수 있다. MIMO 시스템은 다수의 안테나를 사용하기 때문에 각 안테나를 이용한 데이터 스트림 간의 동기화가 매우 중요하다. 각 안테나로 전송하는 데이터의 동기가 맞지 않을 경우 수신기에서는 MIMO 디코

딩을 수행하는데 문제가 발생하여 데이터 수신에 어렵게 된다. 따라서 각 안테나 간의 동기를 맞추는 것이 중요하다.

5세대 이동통신 시스템 개발을 위해 각 계층에서 이와 같은 기술들을 복합적으로 사용하여 전체적인 시스템 특성을 향상시키는 방향으로 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 5세대 이동통신을 위한 새로운 변조 기술 중 하나인 F-OFDM(Filtered OFDM) 기술과 MIMO 기술을 결합한 시스템을 설계하며, 이 시스템에 다양한 동기화 기술들을 적용하고, 각 동기화 방법들의 동기화 성능을 비교 평가 및 분석을 수행한다.

II. 시스템 모델

5세대 이동통신 시스템을 위한 새로운 변조 기술은 더욱 높은 스펙트럼 효율을 달성하는데 그 목적이 있다. 5세대 이동통신 시스템을 위한 후보변조 기술로는 OFDM 시스템에 Windowing 및 Filtering을 추가로 수행하여 OOB 전력을 저감시키는 기술이 주로 연구되고 있다^[7]. 본 논문에서는 Filtering 기법을 사용한 F-OFDM 시스템에 초점을 두며, F-OFDM 기반의 MIMO 시스템에서 이루어지는 동기화 방식에 대한 성능을 평가하고 분석하는 것을 목표로 한다.

2.1 F-OFDM 시스템

그림 1은 F-OFDM 시스템의 구성도를 나타낸다. F-OFDM 시스템은 각 서브밴드별로 필터링을 하여 기존 OFDM 시스템 대비 OOB 전력을 효과적으로 저감시키는 시스템이다. F-OFDM 시스템의 송신기를 살펴보면, 각 서브밴드 별로 iDFT 연산을 이용하여

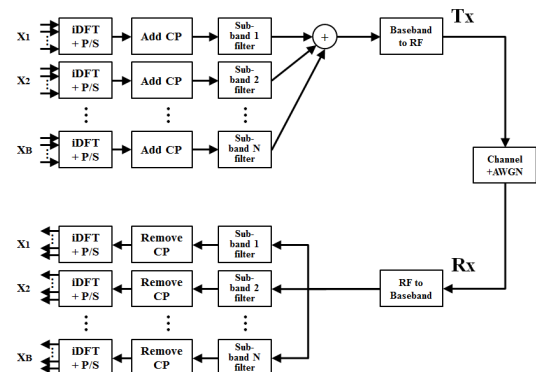


그림 1. F-OFDM 시스템의 구성도
Fig. 1. Block diagram of F-OFDM system

데이터 심볼을 각각 맵핑한다. 그 다음 CP(cyclic prefix)를 각 서브밴드별로 추가하고, 필터링을 수행한다. 최종적으로 각 필터링된 서브밴드의 신호들은 합쳐지고, RF 체인을 거쳐 안테나로 송신된다. F-OFDM 시스템에서 각 서브밴드에 적용되는 필터의 종류에 따라 OOB 전력 저감 성능이 달라질 수 있다.

2.2 F-OFDM 기반 MIMO 시스템

그림 2는 F-OFDM 기반 MIMO 시스템의 송수신 구성도를 나타낸다. 우선 송신기에서는 데이터 스트림을 각각의 안테나로 전송하기 위해 MIMO 인코딩을 한다. 그 다음 각 데이터 스트림을 F-OFDM으로 변조하고 변조된 후의 신호를 각각의 안테나를 통해 전송한다. 수신기에서는 수신 받은 신호를 이용하여 우선 동기화를 수행한다. 각 MIMO 스트림간의 동기를 맞추고 난 후에 F-OFDM 복조를 수행하고, MIMO 디코딩을 수행하여 각각의 데이터 스트림을 추출한다. MIMO 시스템에서는 각 MIMO 스트림간 동기화가 매우 중요하다. 만약 동기화가 올바르게 되지 않았을 경

우 MIMO 디코딩을 수행하여도 원하는 데이터를 수신하기 어렵다. 따라서 MIMO 시스템에서는 효과적인 동기화 방식이 요구된다.

III. 동기화 방법

그림 3은 본 논문에서 고려한 F-OFDM 변조 기반의 MIMO 시스템의 동기화를 위해 고려한 프리앰블 구조를 나타낸다. 그림 3의 구조는 이미 IEEE 802.11a의 프리앰블 구조로 사용되는 구조이다. 그림 3의 프리앰블 구조에서 짧은 프리앰블 신호에서는 신호 검출 및 AGC(Auto Gain Control), 심볼의 오프셋 추정, 반송파 주파수 오프셋 추정 과정이 이루어지며, 긴 프리앰블에서는 미세 주파수 오프셋 추정 및 채널 추정이 이루어진다. 본 논문에서는 그림 3과 같은 프리앰블 구조를 고려하였으며, 따라서 동기화를 위한 프리앰블 송수신 채널은 독립적이라고 가정하였다.

F-OFDM 변조 방식의 MIMO 시스템에서 시간과 주파수 동기를 맞추기 위해서는 시간과 주파수 오프

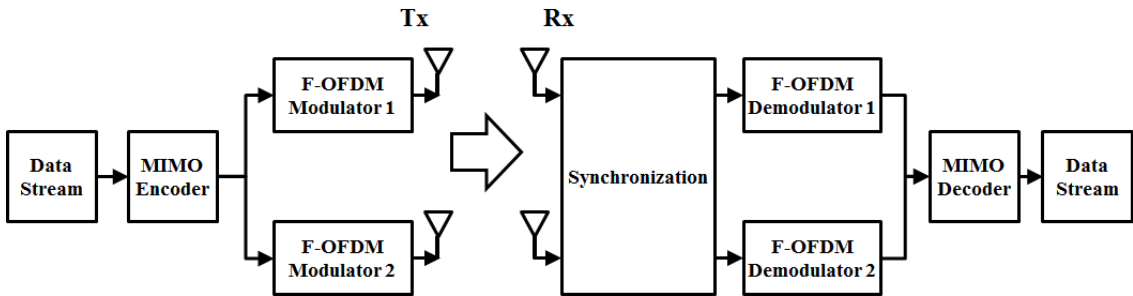


그림 2. F-OFDM 기반 MIMO 시스템의 구성도
Fig. 2. Block diagram of MIMO system based on F-OFDM

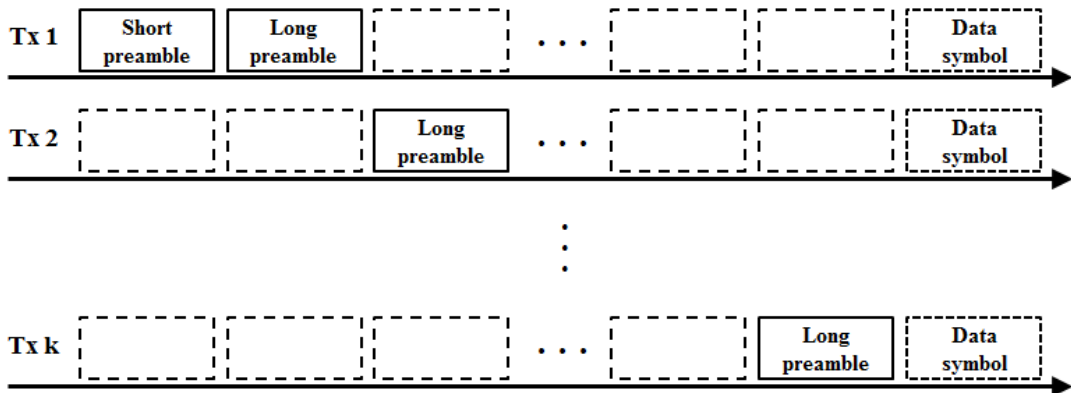


그림 3. MIMO 시스템의 동기화를 위한 프리앰블 구조
Fig. 3. Preamble structure for synchronization of MIMO system

셋 f 와 ϵ 를 추정해야 한다. 이와 같은 시간과 주파수 오프셋을 추정하는 방법에는 여러 가지 방법이 있다^[8,9]. 본 논문에서는 Schmidl의 방법, Minn의 방법, Park의 방법을 사용하는 F-OFDM 변조 방식의 MIMO 시스템을 구성하고 동기화 성능을 비교 평가한다.

3.1 Schmidl의 방법

그림 4는 Schmidl이 제안한 동기화를 위한 시간 영역 프리앰블 신호 구성 방법을 나타낸다. 그림 4에서 A는 $N/2$ 의 크기를 가지며, N은 iDFT(inverse discrete Fourier transform) 연산의 크기, 즉 부반송파의 개수를 나타낸다.

Schmidl의 방법에서 시간영역 오프셋을 추정하는 방법은 식 (1)을 연산하여 최대값이 나오게 하는 부분을 찾는 것이다^[10].

$$M(m) = \frac{|p(m)|^2}{(R(m))^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 $p(m)$ 과 $R(m)$ 은 다음 식 (2), 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. r 은 수신 받은 신호를 나타낸다.

$$p(m) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(m+k) \cdot r(m+k+N/2) \quad (2)$$

$$R(m) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(m+k+N/2)|^2 \quad (3)$$

시간 오프셋은 식 (4)와 같이 계산되며, 주파수 오프셋은 식(7)과 같이 계산된다.

$$\hat{\epsilon} = \underset{m}{\operatorname{argmax}} (M(m)) \quad (4)$$

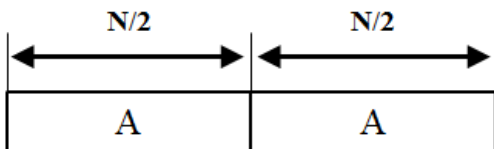


그림 4. Schmidl 방법의 시간 영역 프리앰블 신호 구성
Fig. 4. Form of the time-domain preamble of Schmidl's method

$$\hat{f} = \operatorname{angle}(p(\hat{\epsilon})) / \pi \quad (5)$$

3.2 Minn의 방법

그림 5는 Minn이 제안한 동기화를 위한 시간 영역 프리앰블 신호 구성 방법을 나타낸다. 그림 5에서 B는 $N/4$ 의 크기를 가지며, PN 시퀀스로 구성이 된다^[10].

Minn의 방법에서 시간영역 오프셋을 추정하는 방법은 식 (6)을 연산하여 최대값이 나오게 하는 부분을 찾는 것이다.

$$M(m) = \frac{|p(m)|^2}{(R(m))^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 $p(m)$ 과 $R(m)$ 은 다음 식 (7), 식 (8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$p(m) = \sum_{l=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(k+lN/2+m) \cdot r(k+lN/2+N/4+m) \quad (7)$$

$$R(m) = \sum_{l=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} |r(k+lN/2+N/4+m)|^2 \quad (8)$$

시간 오프셋은 식 (9)와 같이 계산되며, 주파수 오프셋은 식(10)과 같이 계산된다.

$$\hat{\epsilon} = \underset{m}{\operatorname{argmax}} (M(m)) \quad (9)$$

$$\hat{f} = \operatorname{angle}(p(\hat{\epsilon})) * 2 / \pi \quad (10)$$

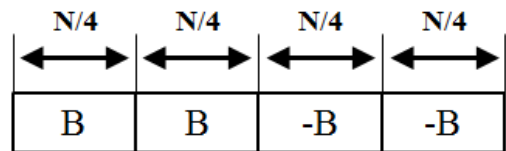


그림 5. Minn 방법의 시간 영역 프리앰블신호 구성
Fig. 5. Form of the time-domain preamble of Minn's method

3.3 Park의 방법

그림 6은 Park이 제안한 동기화를 위한 시간 영역 프리앰블 신호 구성 방법을 나타낸다. 그림 6에서 C는 $N/4$ 의 크기를 갖는 샘플이며, D는 C의 대칭된 신

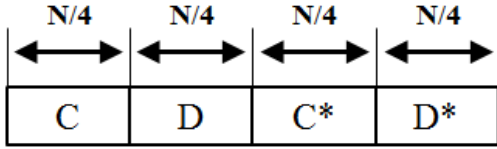


그림 6. Park 방법의 시간 영역 프리앰블신호 구성
Fig. 6. Form of the time-domain preamble of Park's method

호로 구성된다. 그림 5에서 *은 Conjugate 연산을 나타낸다.

Park의 방법에서 시간영역 오프셋을 추정하는 방법은 식 (11)을 연산하여 최대값이 나오게 하는 부분을 찾는 것이다¹⁰⁾.

$$M(m) = \frac{|p(m)|^2}{(R(m))^2} \quad (11)$$

식 (11)에서 $p(m)$ 과 $R(m)$ 은 다음 식 (12), 식 (13)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$p(m) = \sum_{k=1}^{N/2-1} r(m+k) \cdot r(m+N-k) \quad (12)$$

$$R(m) = \sum_{k=1}^{N/2-1} |r(m+k)|^2 \quad (13)$$

시간 오프셋은 식 (14)와 같이 계산되며, 주파수 오프셋은 식(15)과 같이 계산된다.

$$\hat{\epsilon} = \underset{m}{\operatorname{argmax}} (M(m)) \quad (14)$$

$$\hat{f} = \operatorname{angle}(q(\hat{\epsilon})) / \pi \quad (15)$$

식 (15)에서 $q(\hat{\epsilon})$ 은 식 (16)과 같이 계산된다.

$$q(\hat{\epsilon}) = \sum_{k=0}^{N/4-1} r^*(\hat{\epsilon}+k) \cdot r(\hat{\epsilon}+k+N/2) \quad (16)$$

IV. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이션을 위해서 본 논문에서는 부반송파 개수를 1024개로 고려하고, Cyclic Prefix 길이를 iFFT 크

기의 1/8인 128로 고려하였다. 변조는 QAM 변조를 사용하였으며, F-OFDM 변조를 위한 필터는 Dolph-Chebyshev 필터를 사용하였으며, 필터 길이는 5, 10, 15로 설정하고, 필터의 감쇄 수치는 60dB로 고려하였다. 시스템에서 MIMO는 안테나가 2개인 2x2 MIMO 시스템을 고려하여 시간 동기화 추정을 수행하였다. 노이즈 환경은 0dB, 4dB, 8dB를 고려하였으며, Schmi

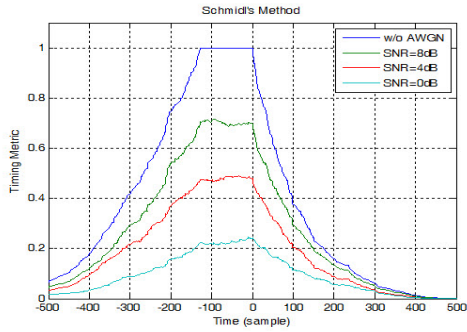
dl, Minn, Park의 방법을 각각 사용하여 동기화 추정을 수행하였다.

본 논문에서는 5세대 이동통신 후보 변조기술 중 하나인 F-OFDM 변조를 사용하는 MIMO 시스템에서 동기화 방법들에 대한 성능 평가를 수행하고 분석하는 것을 목표로 한다.

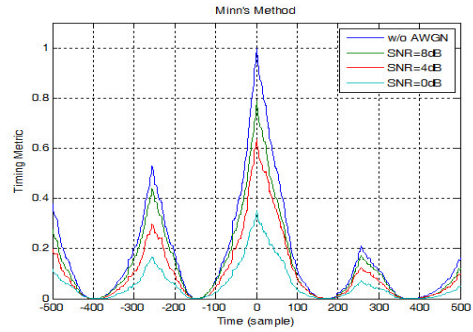
그림 7은 F-OFDM 변조를 사용하는 MIMO 시스템에서 Schmidl의 방법을 사용하여 추정된 동기 신호를 나타낸다. Schmidl의 방법을 사용할 경우 필터링을 하지 않았을 경우, 동기화를 위한 시간 매트릭 추정이 잘 이루어지나, 시스템의 OOB 전력의 크기를 저감시키기 위해 F-OFDM 변조에서 필터 길이를 증가시킬 경우, 동기화 추정이 불안정하게 이루어 질 수 있음을 확인할 수 있다. Schmidl 방법은 F-OFDM 변조에서 필터 길이가 증가함에 따라 더욱 넓은 Plateau 구간을 보이는 것을 확인할 수 있다. Schmidl의 방법에서 Plateau 구간은 다중경로 페이딩을 저감시키기 위한 CP 길이에 영향을 받는다.

그림 8은 F-OFDM 변조를 사용하는 MIMO 시스템에서 Minn의 방법을 사용하여 추정된 동기 신호를 나타낸다. Minn의 방법을 사용하여 동기화 추정을 할 경우, F-OFDM 변조의 필터길이가 증가함에 따라 시간 매트릭이 일부 불안정 할 수 있으나, 동기화 추정을 효과적으로 할 수 있음을 확인할 수 있다. Minn의 방법은 Schmidl의 방법보다 더 Plateau 구간을 더욱 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

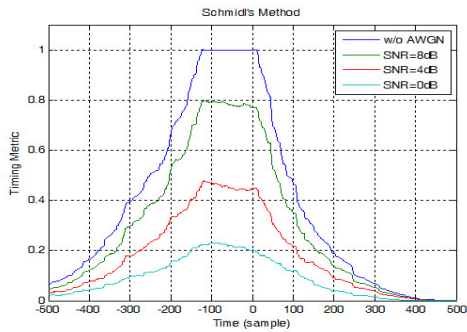
그림 9는 F-OFDM 변조를 사용하는 MIMO 시스템에서 Park의 방법을 사용하여 추정된 동기 신호를 나타낸다. Park의 방법은 임펄스 형태의 시간 매트릭 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히, F-OFDM 변조에서 필터길이를 증가시켜도 시간 매트릭의 열화가 매우 적으며, 효과적으로 동기화 추정을 할 수 있음을 확인할 수 있다.



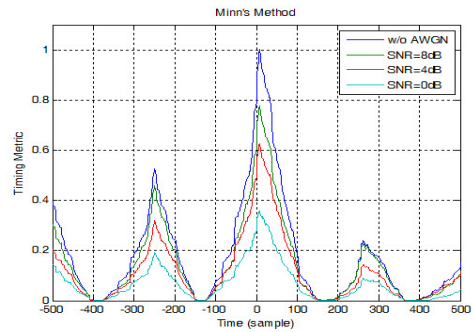
(a) w/o filtering



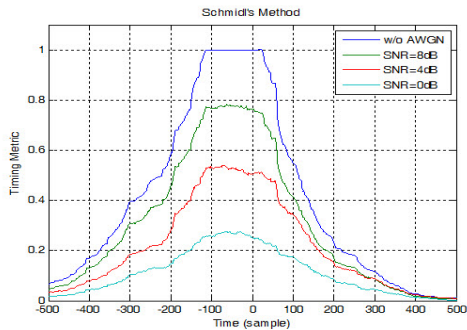
(a) w/o filtering



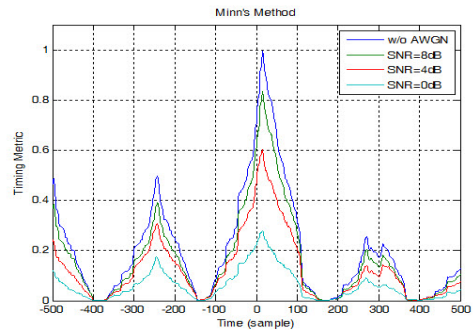
(b) filter length = 5



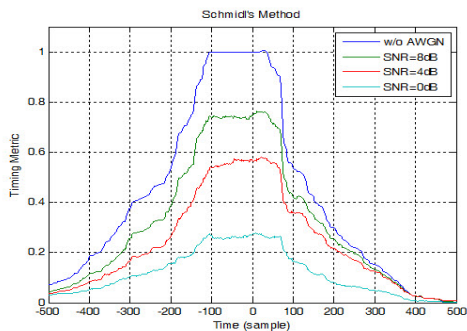
(b) filter length = 5



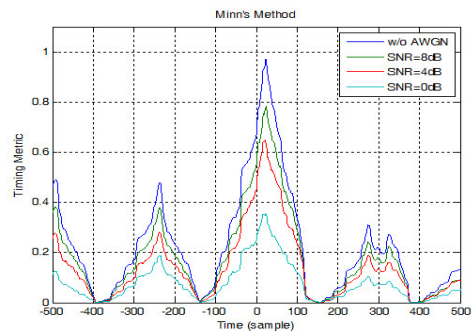
(c) filter length = 10



(c) filter length = 10



(d) filter length = 15



(d) filter length = 15

그림 7. Schmid의 방법을 사용하는 동기 추정기의 시간 메트릭
Fig. 7. Timing metric of estimator based on Schmid's method

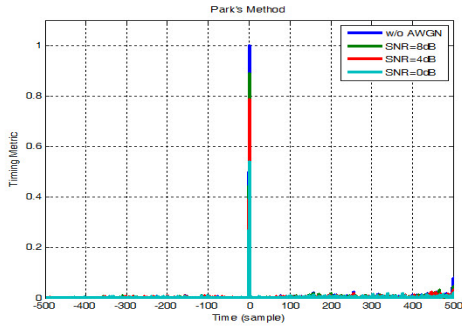
그림 8. Minn의 방법을 사용하는 동기 추정기의 시간 메트릭
Fig. 8. Timing metric of estimator based on Minn's method

V. 결론

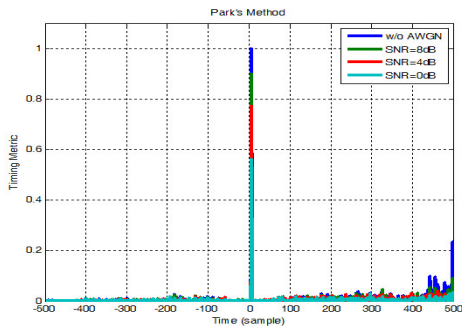
본 논문에서는 F-OFDM 기술과 MIMO 기술을 결합한 시스템을 설계하며, 이 시스템에 다양한 동기화 기술들을 적용하고, 각 동기화 방법들의 동기화 성능을 비교 평가 및 분석을 수행하였다. 본 논문에서 비교 평가 및 분석을 위해 Schmidl, Minn, Park의 방법을 고려하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 F-OFDM 변조에서 OOB 전력을 저감시키기 위해 필터길이를 확장할 경우 동기 추정기의 시간 매트릭이 일부 열화가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 시간 매트릭의 Plateau의 경우 Schmidl, Minn, Park 순서로 좁은 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히, F-OFDM 변조의 필터길이가 만큼 시간 매트릭이 쉬프트 이동하며, 이는 필터 길이에 영향을 받으므로 송수신기에서 시스템 설계시, 고려된 필터 길이를 이용하여 동기화 오프셋 보상이 요구됨을 확인하였다. 추가로, 다양한 필터 종류 및 필터 길이 및 채널 환경을 고려한 F-OFDM 변조 기반의 MIMO 시스템에서의 동기화 특성 및 성능을 평가하고 비교 분석하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

References

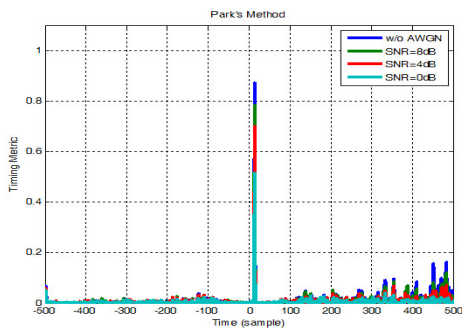
- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.
- [2] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5G wireless access: requirements and realization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, Dec. 2014.
- [3] G. Wunder, et al., "5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 97-105, Feb. 2014.
- [4] P. Banelli, et al., "Modulation formats and waveforms for the physical layer of 5G wireless networks: Who will be the heir of OFDM?," in *arXiv:1407.5947*, Jul. 2014.



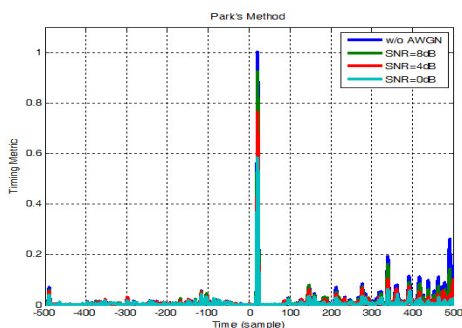
(a) w/o filtering



(b) filter length = 5



(c) filter length = 10



(d) filter length = 15

그림 9. Park의 방법을 사용하는 동기 추정기의 시간 매트릭
Fig. 9. Timing metric of estimator based on Park's method

[5] T. S. Rappaport, et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.

[6] G. Berardinelli, K. Pajukoski, E. Lahetkangas, R. Wichman, O. Tirkkonen, and P. Mogensen, "On the potential of OFDM enhancements as 5G waveforms," *IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Seoul, 2014.

[7] X. Cheng, Y. He, B. Ge, and C. He, "A filtered OFDM using FIR filter based on window function method," *2016 IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Nanjing, 2016.

[8] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.

[9] H. Minn, M. Zeng, and V. K. Bhargava, "On timing offset estimation for OFDM systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 7, pp. 242-244, Jul. 2000.

[10] B. Park, H. Choen, E. Ko, C. Kang, and D. Hong, "A novel timing estimation method for OFDM systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 53-55, May 2003.

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과(공학사)
 2015년 2월: 충북대학교 전자공학과(공학석사)
 2015년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 차세대 이동통신시스템, 무선통신시스템, 디지털신호처리

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재: IEEE, IET 논문 심사위원

2002년: 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리