

음영 지역을 위한 주기적 프리픽스 없는 주파수 효율적인 주파수 공간 블록 부호화 중계기 전송 시스템

원희철*

¹대구대학교 컴퓨터·IT공학부

Spectral Efficient SF Block Coded Relay Transmission System without Cyclic Prefix for a Shadow Area

Hui-Chul Won^{1*}

¹Division of Computer & Information Technology, Daegu University

요약 본 논문에서는 중계기를 통해 다중 경로가 확보된 음영 지역에서 주파수 공간 블록 부호를 적용한 주파수 효율적인 SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안된 시스템은 주기적 프리픽스 사용에 따른 주파수 효율 감소를 방지하기 위하여 주기적 프리픽스를 사용하지 않는다. 주기적 프리픽스를 사용하지 않음에 따라 훼손되는 채널 주기성을 중계기와 수신국의 수신기에서 복원함으로써, 주기적 프리픽스를 사용하지 않는 제안된 시스템의 성능이 충분한 주기적 프리픽스를 사용하는 기존 시스템의 성능과 거의 동일하여 시스템의 주파수 효율이 향상되는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다.

Abstract This paper proposes a spectral efficient space-frequency(SF) block coded single carrier-frequency division multiple access(SC-FDMA) transmission system in a relaying multi-path shadow area. The cyclic prefix(CP) is not used in the proposed system in order to prevent a loss of spectral efficiency due to the use of CP. The destruction of channel cyclicity due to the lack of CP is recovered at the receivers of relays and a destination station. Simulation results show that the performance of the proposed system without CP is almost same as that of the conventional system with full CP, thus increasing the spectral efficiency.

Keywords : SC-FDMA, SF Block Code, Cyclic Prefix, Relay, Shadow Area

1. 서론

SC-FDE(Single Carrier-Frequency Domain Equalization) 통신 방식은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신 방식과 비슷한 수신 성능 및 복잡도를 가지면서 낮은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 값과 비선형성 전력 증폭기에 덜 민감하다는 장점을 갖고 있다. SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 다중 사용자 접속 방식은 SC-FDE 통

신 방식을 기반 구조로 채택하여 부반송파 방식으로 확장시킨 것으로, 차세대 무선 이동 통신 시스템의 기본 전송 방식으로 널리 연구되고 있다[1-4].

SC-FDMA 시스템에서는 페이딩 채널에서의 성능을 향상시키기 위하여 다중 송신 안테나를 이용한 다이버시티 기술을 채택할 수 있다. 시공간 블록 부호(Space-Time(ST) Block Code)와 주파수 공간 블록 부호(Space-Frequency(SF) Block Code)는 이론적으로 동일한 성능을 갖는 대표적인 다중 송신 안테나 다이버시티

본 논문은 대구대학교 2014학술연구비 지원에 의한 논문임.

*Corresponding Author : Hui-Chul Won(Daegu Univ.)

Tel: +82-53-850-6587 email: hcwon@daegu.ac.kr

Received July 29, 2015

Revised September 3, 2015,

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

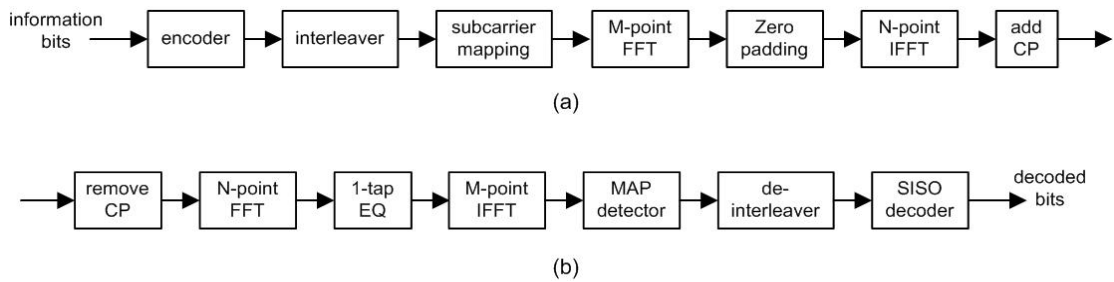


Fig. 1. Basic SC-FDMA system (a) transmitter (b) receiver

기술로서, 각각 다중 송신 안테나와 연속적인 전송 심볼 간, 다중 송신 안테나와 이웃하는 부채널 간에 블록 부호를 적용함으로써 다이버시티 이득을 획득하여 성능을 크게 개선할 수 있다[5-8]. 최근에는, 모바일 기기의 작은 크기로 인해 송신 안테나 간 일정한 거리를 확보하기 어렵다는 점을 고려하여 송신 안테나를 중계기로 대체하여 다이버시티 이득을 획득하는 방법이 제안되었다[9-11]. 특히, [11]의 경우, 수신국이 셀 커버리지 밖이나 음영 지역에 존재하는 경우를 고려하여 다중 중계기 간에 주파수 공간 블록 부호를 적용한 SC-FDMA 전송 시스템을 제안하였다.

OFDM 방식과 SC-FDE 방식, 그리고 SC-FDMA 다중 사용자 접속 방식은 매 블록마다 주기적 프리픽스(CP, Cyclic Prefix)를 삽입함으로써 무선 채널의 지연 확산(delay spread)을 효과적으로 다룰 수 있다[1-3, 7-8]. 특히, 블록 간 간섭 신호(ICI, Inter-Block Interference)를 방지하고 채널 주기성(channel cyclicity)을 유지하기 위하여 주기적 프리픽스는 채널 충격 응답(CIR, Channel Impulse Response) 길이보다 길어야 한다. 한편, 주기적 프리픽스 삽입은 전송 시스템의 주파수 효율을 감소시키기 때문에 주기적 프리픽스 삽입에 따른 주파수 효율 감소를 방지하기 위한 기법들이 OFDM 및 SC-FDE 방식을 대상으로 제안되었다[12-14]. 먼저, OFDM 통신 방식의 주파수 효율 증대를 위해 반복적인 잔재 간섭 신호 제거 기법이 제안되었고[12-13], 단일 중계기를 활용한 SC-FDE 통신 방식에서 주파수 효율 증대를 위한 채널 주기성 복원 기법이 제안되었다[14]. 본 논문에서는 SC-FDMA 전송 시스템에 채널 주기성 복원 기법을 적용하여 주기적 프리픽스를 사용하지 않고도 시스템 성능을 유지하고자 한다. 이때, SC-FDMA 전송 시스템은 수신국이 셀 커버리지 밖이나 음영 지역에 존재하는 경우를 고려하여 다중 중계기를 기반으로 주파수

공간 블록 부호를 적용한다.

본 논문의 구성을 살펴보면, 2장에서는 주기적 프리픽스 사용에 따른 효과에 대하여 설명한다. 3장에서는 주파수 효율 증대를 위해 주기적 프리픽스를 사용하지 않는 다중 중계기 기반의 SC-FDMA 송수신기 구조에 대하여 제안한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 주기적 프리픽스 효과

Fig. 1은 기본적인 SC-FDMA 전송 시스템의 송수신기 구조를 보여주고 있다. Fig. 1(a)와 같이, 송신기에서 전송할 비트 신호는 부호기와 인터리버를 거쳐 부채널 맵핑된 후 M 점 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 대역 신호로 변환된다. 이 때, M 은 각 사용자에게 할당된 부채널 수 또는 각 사용자에게 지정된 푸리에 변환 점 개수를 의미한다. 각 사용자의 주파수 대역 신호는 N 점 역 푸리에 변환(IFFT, Inverse FFT)을 거쳐 시간 대역 신호로 변환되고 주기적 프리픽스를 추가한 후 송신 안테나를 통해 발송된다. 이 때, 사용하지 않는 주파수 대역 신호는 아날로그 프론트-엔드(AFE, Analog Front-End) 필터링을 통해 엄격히 분리된다. 주기적 프리픽스와 관련하여 자세히 살펴보면, 길이 L_{cp} 의 주기적 프리픽스 샘플은 i 번째 전송 샘플 시퀀스 $\{x_k^i\}_{k=0}^{N-1}$ 앞에 삽입되어 하나의 SC-FDMA 전송 심볼(길이 $N + L_{cp}$)을 구성하고, L 차수를 갖는 FIR(Finite Impulse Response) 필터로 모델링되는 채널 $\{h_l\}_{l=0}^L$ 을 통과한 후 수신 안테나로 수신된다. i 번째 수신 샘플 시퀀스 $\{r_k^i\}_{k=-L_{cp}}^{N-1}$ 는 아래와 같다.

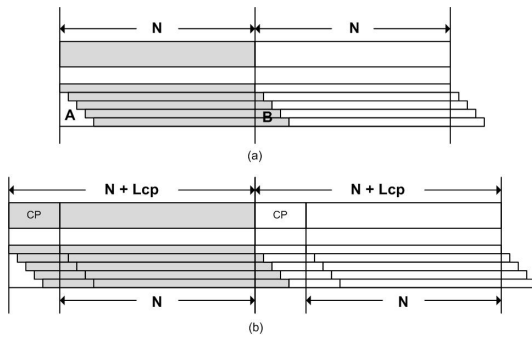


Fig. 2. (a) IBI occurs when $L_{cp} = 0$ (b) No IBI occurs when $L_{cp} \geq L$

$$r_k^i = \sum_{l=0}^L h_l x_{(k-l)_N}^i + n_k^i \quad (1)$$

if $L - L_{cp} \leq k < N$

$$r_k^i = \sum_{l=0}^{L_{cp}+k} h_l x_{(k-l)_N}^i + \sum_{l=L_{cp}+k+1}^L h_l x_{(k-l+L_{cp})_N}^i + n_k^i \quad (2)$$

if $-L_{cp} \leq k < L - L_{cp}$

이때, $(k)_N$ 은 k 를 N 으로 나눈 나머지 값을 의미하고, n_k^i 는 백색 잡음이다. 수신기에서는 수신 샘플 시퀀스(길이 $N + L_{cp}$)의 앞 부분(길이 L_{cp})을 제거하고 뒷 부분(길이 N)을 받아들인 후, Fig. 1(b)와 같이, N점 푸리에 변환하고 등화기, M점 역 푸리에 변환기, MAP 디텍터, 디인터리버 및 디코더를 통과하여 신호를 복원하게 된다. 한편, 식 (1)과 식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 주기적 프리픽스 길이가 채널 길이보다 길면, 즉 $L_{cp} \geq L$ 이면 간섭 신호(IBI)가 존재하지 않는 깨끗한 수신 신호(길이 N)를 확보할 수 있지만, 주기적 프리픽스 길이가 채널 길이보다 짧으면 수신기가 받아들이는 뒷 부분 N 개 샘플 중 처음 $(L - L_{cp})$ 개 샘플에는 직전 $(i - 1)$ 번째 전송 심볼 $\{x_k^{i-1}\}_{k=0}^{N-1}$ 에 의한 간섭 신호(식 (2)의 두 번째 요소)가 섞이게 되어 성능 저하가 발생한다. Fig. 2(a)는 주기적 프리픽스가 충분하지 못하여 직전 전송 심볼에 의한 간섭 신호(그림에서 B 부분)가 수신 신호에 섞이는 현상을 보여주고 있고, Fig. 2(b)는

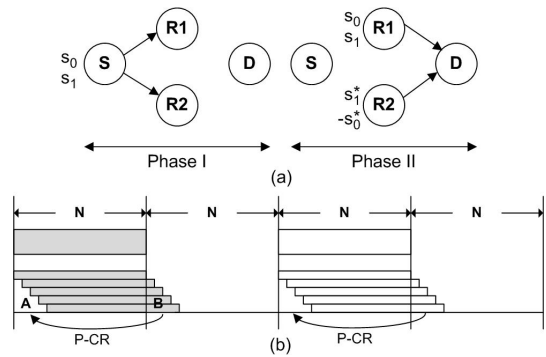


Fig. 3. (a) 2-slot relaying protocol (b) P-CR method

충분한 길이의 주기적 프리픽스를 삽입한 경우, 수신기가 받아들이는 뒷 부분 N 개 샘플에는 간섭 신호가 존재하지 않음을 보여주고 있다.

한편, 주기적 프리픽스 삽입은 간섭 신호를 방지하여 성능 저하를 예방할 수 있지만, N 과 대비하여 L_{cp} 가 크면 클수록 주파수 전송 효율이 감소하는 단점이 있다. 주파수 전송 효율과 시스템 성능을 모두 고려할 경우, 주기적 프리픽스를 삽입하지 않고 그로 인해 발생하는 간섭 신호가 섞인 샘플을 깨끗하게 복원하는 과정이 필요하다. 복원 과정은 두 단계로 구성되며, 첫 번째 과정은 수신 신호로부터 간섭신호를 제거하는 TC(Tail Cancellation) 과정이고, 두 번째 과정은 간섭 신호가 제거된 후 원 신호로 채워 넣어 주기성을 복원하는 CR(Cyclicity Restoration) 과정이다[12-13]. Fig. 2(a)에서 B 부분의 신호가 A 부분으로 이동하면 신호의 주기성이 완전하게 복원된다. 두 절차를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{r}_k^i = r_k^i - \sum_{l=L_{cp}+k+1}^L h_l x_{(k-l+L_{cp})_N}^{i-1} + \sum_{l=L_{cp}+k+1}^L h_l x_{(k-l)_N}^i \quad (3)$$

if $0 \leq k < L - L_{cp}$

식 (2)를 참조하여, 식 (3)에서 두 번째 요소를 빼는 과정이 간섭 신호를 제거하는 TC 과정이고, 세 번째 요소를 더하는 과정이 주기성을 복원하는 CR 과정이다. 실제로 TC 과정을 구현할 때에는 직전 $(i - 1)$ 번째 검

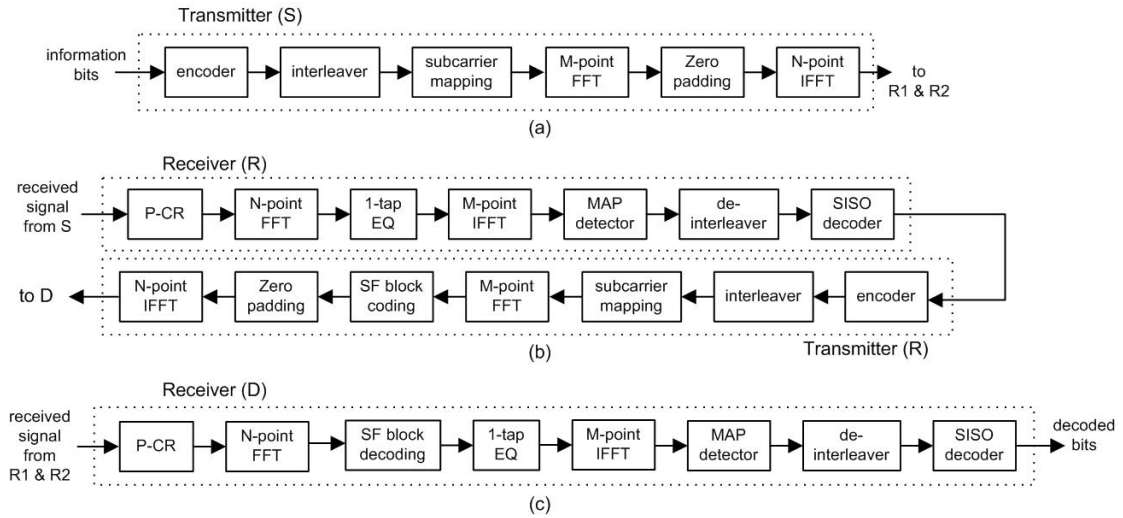


Fig. 4. Proposed SC-FDMA system without cyclic prefix (a) transmitter of source station (S) (b) receiver and transmitter of relays (R) (c) receiver of destination station (D)

출된 샘플 시퀀스 $\{\hat{x}_k^{i-1}\}_{k=0}^{N-1}$ 를 사용하여 TC 과정을 수행한다. 또한, 신호를 수신했을 때는 현재의 i 번째 전송 샘플 시퀀스 $\{x_k^i\}_{k=0}^{N-1}$ 를 미리 알지 못하므로 $\{x_k^i\}_{k=0}^{N-1}$ 에 대한 검출 과정과, 이로 인해 검출된 샘플 시퀀스 $\{\hat{x}_k^i\}_{k=0}^{N-1}$ 를 이용한 복잡한 CR 과정이 통합 반복 수행되어야 한다.

3. 다중 중계기 기반의 주기적 프리픽스 없는 주파수 효율적인 SC-FDMA 시스템

본 논문에서는 수신국이 셀 커버리지 밖이나 음영 지역에 존재하는 경우를 대비하여 Fig. 3(a)와 같이, 다중 중계기(R1, R2)를 통해 송신국(S)과 수신국(D) 간 다중 경로를 확보하고, 다중 중계기와 이웃하는 부채널 간에 주파수 공간 블록 부호를 적용하여 음영 지역의 수신 성능을 개선할 수 있는 SC-FDMA 시스템을 고려한다[11].

Fig. 3(a)에서 제시된 중계기 프로토콜을 살펴보면, 홀수 번째 전송 구간에서는 송신국이 독립적으로 다중 중계기로 전송하고, 짝수 번째 전송 구간에서는 다중 중계기들이 독립적으로 수신국에게 신호를 전송한다. 2-술

롯 기반으로 번갈아 신호를 전송하기 때문에 주기적 프리픽스를 삽입하지 않더라도 Fig. 3(b)와 같이, 간섭 신호가 섞이지 않는 특징을 발견할 수 있다. 또한, 그림의 B 부분의 수신 신호를 획득하여 그림의 A 부분을 채울 수 있어 주기성을 쉽게 확보할 수 있다. 이 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{r}_k^i &= r_k^i + r_{N+k}^i & (P-CR) \\ \text{if } 0 \leq k < L_{cp} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 비교해 보면, 식 (3)의 경우 직전 $(i-1)$ 번째 복원된 전송 샘플 시퀀스와 채널 추정기를 통해 추정된 채널 값을 이용하여 곱셈 연산을 통해 복잡한 TC 과정을 수행하는 데 반해, 식 (4)의 경우 간섭 신호의 영향이 없기 때문에 TC 과정이 전혀 필요하지 않다. 또한, 식 (3)의 경우 현재 i 번째 전송 샘플 시퀀스를 미리 알지 못하기 때문에 전송 신호 검출 과정을 먼저 수행한 후, 검출된 샘플 시퀀스와 추정된 채널 값을 이용하여 복잡한 CR 과정이 통합 반복 수행되어야 한다. 반면에, 식 (4)의 경우 수신기 앞단에서 수신 샘플 간의 간단한 덧셈 연산만을 수행하여 CR 과정을 완료할 수 있다. 수신기의 신호 복원 과정을 거치지 않고 수신기 앞단에서 미리 CR 과정을 수행하기 때문에 본 논문에서는 P-CR (pre-CR) 과정이라고 명명한다.

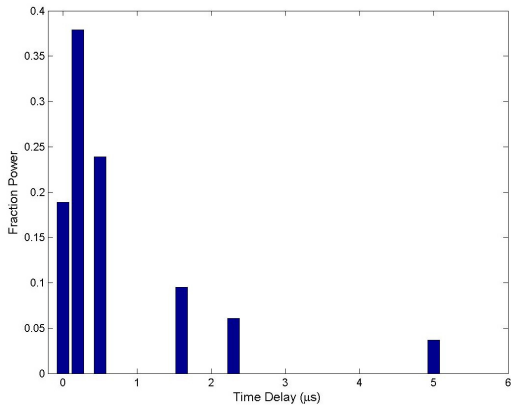


Fig. 5. Typical urban channel

Fig. 4는 본 논문에서 제안된 다중 중계기 기반의 주파수 효율적인 SC-FDMA 전송 시스템 구조를 보여주고 있다. 송신국과 수신국, 중계기 모두 주파수 효율 증대를 위하여 주기적 프리픽스를 사용하지 않는다. Fig. 4(a)는 송신국의 송신기 구조이며, Fig. 1(a)와 비교해 보면 마지막 부분에 주기적 프리픽스 삽입 블록이 없음을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 다중 중계기들의 수신기와 송신기 구조를 보여주고 있다. 수신기에서는 신호를 수신한 후 맨 먼저 P-CR 과정을 수행하여 주기성을 복원하고, 송신기에서는 Fig. 4(a)와 마찬가지로 주기적 프리픽스를 삽입하지 않고 신호를 전송한다. 중계기 송신기는 송신국 송신기와 동일한 과정을 수행하되, 송신 다이버시티 이득을 획득하기 위하여 주파수 공간 블록 부호화(SF Block Coding) 과정이 포함된다. Fig. 4(c)는 수신국의 수신기 구조를 보여주고 있다. 수신기 내 주파수 공간 블록 부호에 대한 디코딩 과정을 통해 송신 다이버시티 이득을 획득하여 수신 성능이 향상된 사용자 신호를 복원하게 된다. Fig. 1(b)와 비교해 보면 주기적 프리픽스를 사용하지 않기 때문에 주기적 프리픽스 삭제 과정 대신 P-CR 과정이 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

실험을 위하여 총 256개 부채널($N = 256$)을 사용하고 64개 부채널($M = 64$)을 1개 밴드로 구성하여 사용자에 할당하였다. 각 부채널은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조 방식을 적용하였고, 제한 길이

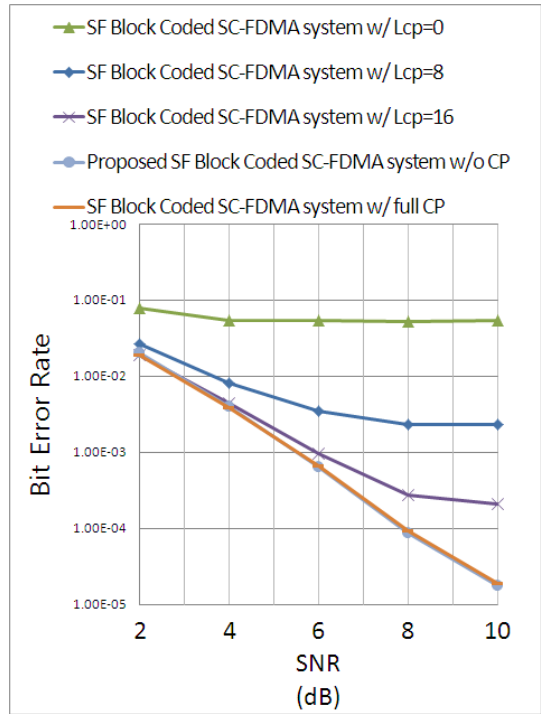


Fig. 6. Bit error rate performance of the proposed SC-FDMA system without cyclic prefix

7을 갖는 1/2 비율의 길쌈 부호와 $S = 5$ 로 설정된 S-랜덤 인터리버를 사용하여 이진 신호를 부호화하였다. 정규화된 도플러 주파수 값은 0.001로 설정하고 1개 프레임은 10개의 데이터 심볼 구간으로 구성하였다. 무선 채널은 6-탭 TU(Typical Urban) 채널 모형을 사용하였고, 채널 추정은 완벽히 이루어진다고 가정하였다[15]. Fig. 5는 실험에서 사용한 6-탭 TU 채널 모형을 보여주고 있다. 최대 지연시간 $5 \mu s$ ($L = 32$)를 갖는 총 6개의 임펄스 응답으로 구성되어 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 중계기와 수신국 간의 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise power Ratio)를 기준으로, 음성 지역을 위한 SC-FDMA 시스템의 비트 오류율(BER, Bit Error Rate)과 심볼 오류율(SER, Symbol Error Rate) 성능을 각각 보여주고 있다. 이때, 송신국과 중계기 간의 채널 상태는 양호(SNR=20 dB)하다고 설정하였다. 각 그림에서 세모 모양의 실선은 주기적 프리픽스를 사용하지 않은 주파수 공간 블록 부호화 SC-FDMA 시스템의 성능을 보여주고 있다. Fig. 3을 통해 설명하였듯이, 2-슬롯 기반의 전송 프로토콜을 사용하므로 주기적

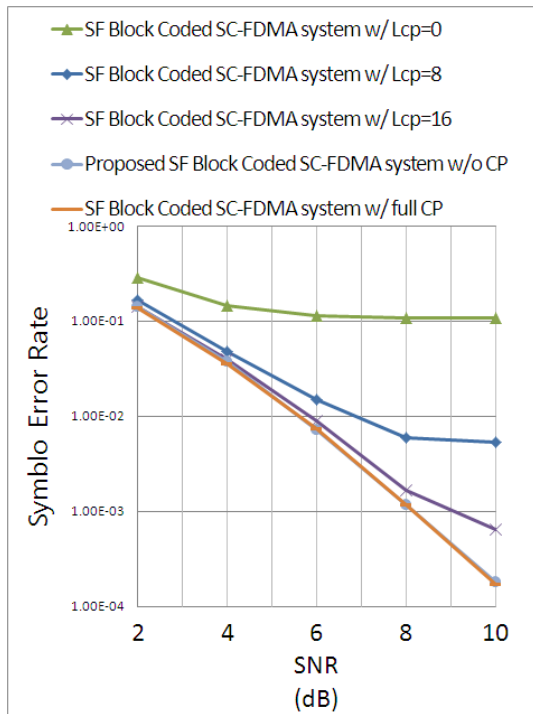


Fig. 7. Symbol error rate performance of the proposed SC-FDMA system without cyclic prefix

프리픽스를 사용하지 않더라도 블록 간 간섭 신호는 발생하지 않지만, 주기성 훼손에 의해 심각한 성능 저하가 발생한다. 다이아몬드 모양의 실선과 엑스 모양의 실선은 불충분한 주기적 프리픽스를 사용(각각 $L_{cp} = 8$ 과 $L_{cp} = 16$ 사용)한 경우의 시스템 성능을 보여주고 있다. 주기적 프리픽스를 사용하였지만 주기적 프리픽스 길이가 부족하여 여전히 성능 저하가 발생하고, 주기적 프리픽스 길이가 부족할수록 성능 저하가 더 심각함을 확인할 수 있다. 모양 없는 실선은 충분한 주기적 프리픽스($L_{cp} \geq 32$)를 사용한 경우의 주파수 공간 블록 부호화 SC-FDMA 시스템의 성능을 보여주고 있다. 마지막으로, 동그라미 모양의 실선은 본 논문에서 제안된 주기적 프리픽스를 사용하지 않는 주파수 공간 블록 부호화 SC-FDMA 시스템의 성능을 보여주고 있다. P-CR 과정을 통해 주기성을 충분히 복원하기 때문에 주기적 프리픽스를 전혀 사용하지 않았음에도 불구하고 주기적 프리픽스를 충분히 사용한 시스템의 성능 그래프와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 중계기를 통해 다중 경로가 확보된 음영 지역 내 수신국을 위한 주파수 효율적인 SC-FDMA 전송 시스템을 제안하였다. 주파수 효율 증대를 위하여 주기적 프리픽스를 사용하지 않았음에도 불구하고, 다중 중계기 기반의 2-슬롯 전송 프로토콜에서 활용 가능한 간단한 주기성 복원 기법을 적용하여 시스템 성능을 유지할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 향후, SC-FDMA 시스템과 유사한 구조를 갖는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템으로 확대하여 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] R. Van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. p.33-51, Artech House Publishers, 2000.
- [2] D. Falconer, S. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 58-66, April 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/35.995852>
- [3] Y. Kim, B. Jeong, J. Chung, C. Hwang, J. Ryu, K. Kim and Y. Kim, "Beyond 3G: Vision, Requirement, and Enabling Technologies", *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, pp. 120-124, March 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2003.1186555>
- [4] Samsung 4G Forum, "Migration Paths Towards 4G Networks", Aug. 2004.
- [5] S. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE J. Select. Areas Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/49.730453>
- [6] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. Calderband, "Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/18.771146>
- [7] J. Jang, H. Won, and G. Im, "Cyclic Prefixed Single Carrier Transmission with SFBC over Mobile Wireless Channels", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 261-264, May 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2006.870374>
- [8] B. Narasimhan, N. Al-Dhahir, and H. Minn, "SFBC Design Tradeoffs for Mobile SC-FDMA with Application to LTE-Advanced", *2010 IEEE International Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3458-3461, March 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICASSP.2010.5495971>

- [9] R. Pabst, B. Walke, D. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. Falconer, and G. Fettweis, "Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio", *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, pp. 80-89, Sep. 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2004.1336724>
- [10] D. Seol, U. Kwon, G. Im, and E. Kim, "Relay-assisted SFBC Single Carrier Transmission over Uplink Fast Fading Channels", *IEEE GLOBECOM*, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/glocom.2007.738>
- [11] H. Won, "Space-Frequency Block Coded Relay Transmission System for a Shadow Area", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society (KAIS)*, vol. 15, no. 9, pp. 5776-5782, Sept. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.9.5776>
- [12] D. Kim and G. Stuber, "Residual ISI cancellation for OFDM with application to HDTV broadcasting", *IEEE J. Select. Areas Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1590-1599, Oct. 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/49.730464>
- [13] H. Won and G. Im, "Iterative Cyclic Prefix Reconstruction and Channel Estimation for STBC OFDM system", *IEEE Communications Letters*, vol. 9, Issue 4, pp. 307-309, April 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2005.1413616>
- [14] U. Kwon, D. Seol, and G. Im, "Spectral Efficient Transmit Diversity Techniques without Cyclic Prefix for Fading Relay Channels", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 58, no. 2, pp. 568-577, Feb. 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2010.02.090030>
- [15] TS 36.211, "Physical Channels and Modulation", in 3GPP TSG RAN, v.8.6.0, March 2009.

원 희 철(Hui-Chul Won)

[정회원]



- 2000년 2월 : 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 포항공과대학교 대학원 전자컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2004년 9월 ~ 2006년 8월 : 삼성 전자 통신연구소 책임연구원
- 2006년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 컴퓨터-IT공학부 부교수

<관심분야>

차세대 이동통신 시스템