

# 음영 지역을 위한 주파수 공간 블록 부호화 중계기 전송 시스템

원희철\*

<sup>1</sup>대구대학교 컴퓨터·IT공학부

## Space-Frequency Block Coded Relay Transmission System for a Shadow Area

Hui-Chul Won<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Computer & Information Technology, Daegu University

**요약** 음영 지역 해소 및 셀 커버리지 확대를 위하여 중계기를 활용하는 이동 통신 시스템이 널리 연구되고 있다. 본 논문에서는 중계기를 통해 다중 경로가 확보된 음영 지역에서 주파수 공간 블록 부호를 적용한 SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템을 제안하고, 중계기와 수신국 간의 신호 대 잡음 비를 기준으로 음영 지역을 위한 SC-FDMA 시스템의 성능을 비교한다. 중계기에서 복원된 전송 신호에 대하여 주파수 공간 블록 부호를 적용하여 재전송함으로써 중계기 기반 SC-FDMA 시스템의 수신 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안된 주파수 공간 블록 부호화 중계기 기반 SC-FDMA 시스템의 신호 대 잡음 비 성능이 단일 중계기 기반 SC-FDMA 시스템보다  $10^{-2}$  심볼 오류율 수준에서 약 5 dB 개선됨을 실험을 통해 확인할 수 있다.

**Abstract** Relay-assisted wireless communication systems have been studied widely to cope with shadow areas and extend the cell coverage. This paper proposes a space-frequency (SF) block coded single carrier-frequency division multiple access (SC-FDMA) transmission system in a relaying multi-path shadow area and present the performance comparison of SC-FDMA systems based on the signal-to-noise power ratio (SNR) between a relay and a destination station. The performance of relaying SC-FDMA systems can be improved by applying SF block code to the recovered signals of relays before re-transmitting them. The simulation result showed that the SNR performance of the proposed SF block coded relaying SC-FDMA system was approximately 5 dB better than the SNR performance of the single-path relaying SC-FDMA system at a symbol error rate (SER) of  $10^{-2}$ .

**Key Words** : Relay, SC-FDMA, SF Block Code, Shadow Area, Multi-path

### 1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 다중 반송파 통신 방식은 송수신 구조가 간단하고 주파수 효율이 높으면서 주파수 선택적 페이딩 환경에서 우수한 성능을 갖기에 광대역 무선 이동 통신 시스템의 기반 구조로서 널리 사용되고 있지만, PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 값이 높다는 단점을 가지고 있다. SC-FDE(Single Carrier-Frequency Domain Equalization)

통신 방식은 OFDM 방식의 단점인 PAPR 문제를 보완한 방식으로, OFDM 방식의 송신부에 존재하는 DFT(Discrete Fourier Transform) 모듈을 수신부로 옮긴 구조와 비슷하여 OFDM과 비슷한 수신 성능과 전체 복잡도를 보이면서도 낮은 PAPR 값을 갖고 비선형성 전력 증폭기에 덜 민감하다는 장점을 갖는다[1,2].

OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템은 OFDM 다중 반송파 통신 방식의 부반송파들을 다수의 사용자들이 분할하여 정보를 전송

본 논문은 대구대학교 연구년 과제로 수행되었음.

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

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

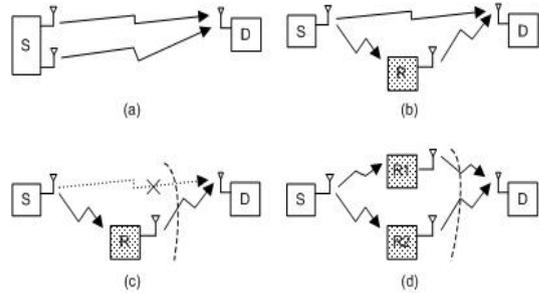
Received May 27, 2014

Revised (1st July 14, 2014, 2nd July 15, 2014)

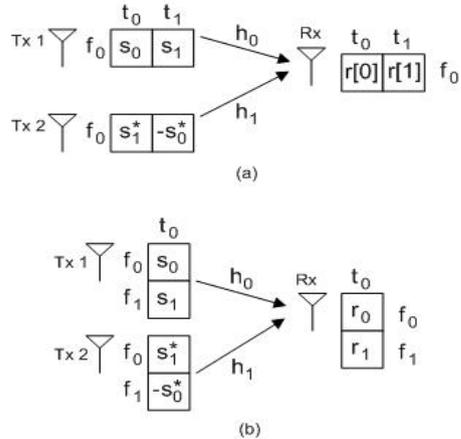
Accepted September 11, 2014

하는 다중 사용자 접속 시스템으로, 차세대 광대역 무선 이동 통신 시스템으로 널리 연구되고 있다. 하지만, OFDMA는 OFDM 방식에 기반을 둔 통신 시스템이므로, OFDM 방식과 마찬가지로 PAPR 값이 높다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위하여 SC-FDE 방식을 부반송파 방식으로 확장시킨 SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 다중 사용자 접속 방식이 제안되었다. OFDMA와 SC-FDMA는 서로 비슷한 수신 성능과 전체 복잡도를 가지며, 현재 차세대 무선 이동 통신 시스템의 기본 전송 방식으로 널리 연구되고 있다[1-4].

OFDMA 및 SC-FDMA 시스템에서는 페이딩 채널에서의 성능을 향상시키기 위하여 다양한 형태의 다이버시티 기술을 적용할 수 있다. 특히, 다중 송신 안테나를 이용한 다이버시티 기술은 낮은 복잡도의 신호 처리를 통해 쉽게 다이버시티 이득을 얻을 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 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[5-12]. 그러나, Fig. 1(a)와 같이, 송신 안테나 간 일정 거리를 두어야 하는 다중 송신 안테나 기술은 휴대폰과 같은 모바일 기기의 크기와 복잡도 제한에 의하여 적용이 쉽지 않은 상황이다. 이를 해결하기 위하여 다중 송신 안테나 대신 중계기(R)를 이용하여 다이버시티 이득을 획득하는 방법이 제안되었다[13-15]. Fig. 1(b)와 같이, 중계기를 이용하여 단일 송신 안테나를 갖는 송신국(S)과 수신국(D) 간의 다중 경로를 제공할 수 있다. 다만, 중계기는 셀 커버리지 확대와 음영 지역 해소를 위해 전송 신호를 받아 복원하여 재전송하는 역할을 담당하기 위해 개발되었기에 수신국이 셀 커버리지 밖이나 음영 지역에 존재하는 경우 Fig. 1(c)와 같이 다중 경로 생성에 실패할 수 있다. 따라서, Fig. 1(d)와 같이, 다중 중계기를 통해 다중 경로를 확보하는 것이 적절하다. 본 논문에서는 Fig. 1(d)와 같이 다중 중계기를 적용한 SC-FDMA 전송 시스템에서 다중 중계기와 이웃하는 부채널 간에 주파수 공간 블록 부호를 적용하여 음영 지역에서의 수신 성능을 개선하고자 한다.



[Fig. 1] (a) multiple paths from multiple transmit antennas (b) multiple paths from a source station and a relay (c) single path from a relay(shadow area) (d) multiple paths from multiple relays (shadow area)



[Fig. 2] Transmit diversity techniques (a) space-time (ST) block code (b) space-frequency(SF) block code

본 논문의 구성을 살펴보면, 2장에서는 대표적인 송신 다이버시티 기술인 시공간 블록 부호 기술과 주파수 공간 블록 부호 기술에 대하여 설명한다. 3장에서는 주파수 공간 블록 부호를 적용한 다중 중계기 기반의 SC-FDMA 송수신기 구조에 대하여 설명한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 송신 다이버시티 기술

다중 송신 안테나를 이용한 다이버시티 기술은 S. Alamouti에 의해 최초로 제안되었다[5]. 시공간 블록 부호라고 불리는 이 기법은 Fig. 2(a)와 같이, 특정 주파수

대역  $f_0$  에서, 2개의 송신 안테나(Tx1, Tx2)와 연속적인 두 심볼 구간  $t_0$  과  $t_1$  에 걸쳐 2차 직교 행렬  $S_2$  를 적용하여 송신국에서 신호를 전송한다. 이 때, 2차 직교 행렬  $S_2$  는 아래와 같다.

$$S_2 = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ s_1^* & -s_0^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

수신국에서 연속적인 두 심볼 구간  $t_0$  과  $t_1$  에서 수신한 신호를  $r[0]$  과  $r[1]$  이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r[0] &= s_0 h_0[0] + s_1^* h_1[0] + n[0] \\ r[1] &= s_1 h_0[1] - s_0^* h_1[1] + n[1] \end{aligned} \quad (2)$$

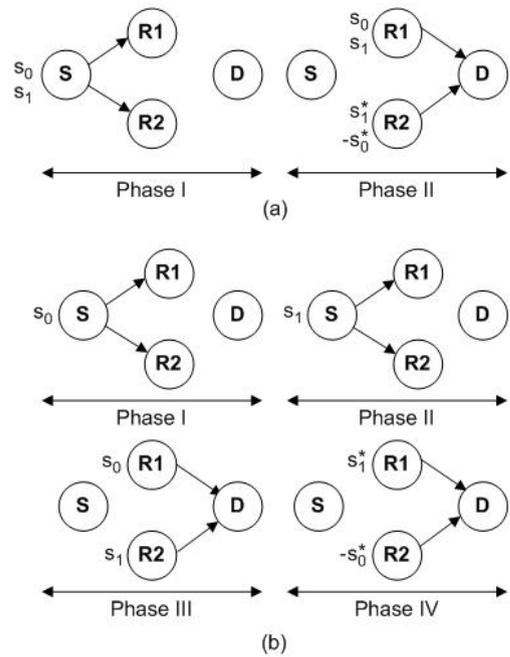
이 때,  $h_i[j]$  는 수신국과  $i$  번째 송신 안테나 간의 심볼 구간  $t_j$  에서의 주파수 대역 채널 값을 의미하고,  $n[j]$  는 심볼 구간  $t_j$  에서 발생한 백색 잡음을 뜻한다. 연속하는 두 심볼 구간  $t_0$  과  $t_1$  에서의 채널이 일정하다고 가정하면, 즉,  $h_0 \equiv h_0[0] = h_0[1]$  이고  $h_1 \equiv h_1[0] = h_1[1]$  이면, 전송 신호  $s_0$  과  $s_1$  에 대한 추정 값은 아래와 같은 결정 과정을 통해 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_0 &= \frac{h_0^* r[0] + h_1 r^*[1]}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \\ \hat{s}_1 &= \frac{h_0^* r[1] - h_1 r^*[0]}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \end{aligned} \quad (3)$$

한 편, 식 (3)에 식 (2)를 대입하여 추정 신호  $\hat{s}_0$  과  $\hat{s}_1$  을 이론적으로 전개하면 다음과 같이 원 신호( $s_0$  과  $s_1$ ) 와 변형된 잡음의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_0 &= s_0 + \frac{h_0^* n[0] + h_1 n^*[1]}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \\ \hat{s}_1 &= s_1 + \frac{h_0^* n[1] - h_1 n^*[0]}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

연속적인 두 심볼 구간에 적용하는 시공간 블록 부호와 달리, 주파수 공간 블록 부호 기법은 Fig. 2(b)와 같이, 특정 심볼 구간  $t_0$  에서, 2개의 송신 안테나(Tx1, Tx2)와



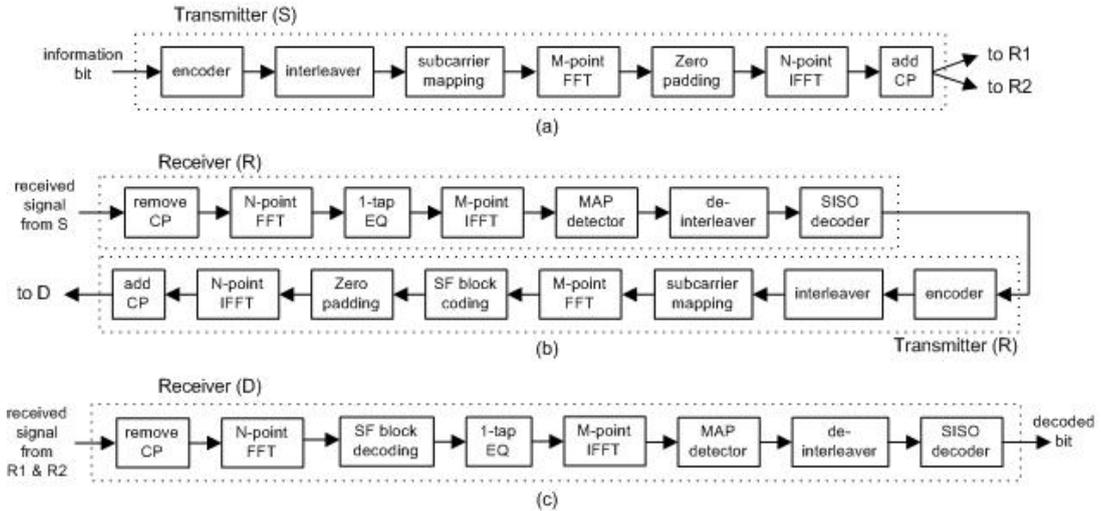
[Fig. 3] (a) 2-slot protocol for SF block code (b) 4-slot protocol for ST block code

이웃하는 두 주파수 대역  $f_0$  과  $f_1$  에 걸쳐 식 (1)의 2차 직교 행렬  $S_2$  를 적용하여 송신국에서 신호를 전송한다. 수신국의 이웃하는 두 주파수 대역  $f_0$  과  $f_1$  에서 수신한 신호를  $r_0$  과  $r_1$  이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_0 &= s_0 h_{0,0} + s_1^* h_{1,0} + n_0 \\ r_1 &= s_1 h_{0,1} - s_0^* h_{1,1} + n_1 \end{aligned} \quad (5)$$

이 때,  $h_{i,j}$  는 수신국과  $i$  번째 송신 안테나 간의 주파수 대역  $f_j$  에서의 채널 값을 의미하고,  $n_j$  는 주파수 대역  $f_j$  에서 발생한 백색 잡음을 뜻한다. 이웃하는 두 주파수 대역  $f_0$  과  $f_1$  에서의 채널이 일정하다고 가정하면, 즉,  $h_i \equiv h_{i,0} = h_{i,1}$ ,  $i = 0, 1$  이면 전송 신호  $s_0$  과  $s_1$  에 대한 추정 값은 아래와 같은 결정 과정을 통해 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_0 &= \frac{h_0^* r_0 + h_1 r_1^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \\ \hat{s}_1 &= \frac{h_0^* r_1 - h_1 r_0^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \end{aligned} \quad (6)$$



[Fig. 4] SC-FDMA system (a) transmitter of source station (S) (b) transmitter and receiver of relay (R) (c) receiver of destination station (D)

또한, 식 (6)에 식 (5)를 대입하면 추정 신호  $\hat{s}_0$  과  $\hat{s}_1$  은 아래와 같이 원 신호( $s_0$  과  $s_1$ )와 변형된 잡음의 합으로 구성된다.

$$\hat{s}_0 = s_0 + \frac{h_0^* n_0 + h_1^* n_1}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \quad (7)$$

$$\hat{s}_1 = s_1 + \frac{h_0^* n_1 - h_1^* n_0}{|h_0|^2 + |h_1|^2}$$

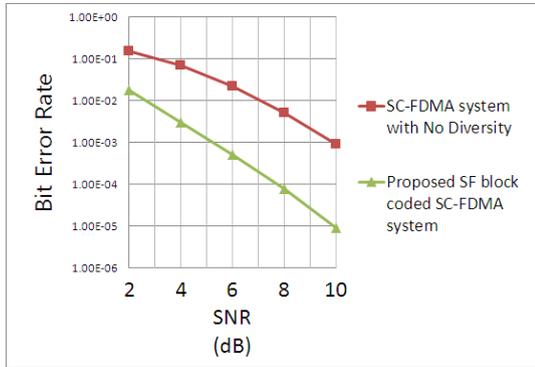
식 (3)과 식 (6)을 통해, 시공간 블록 부호와 주파수 공간 블록 부호의 수신 신호 결정 과정이 동일함을 확인할 수 있고, 식 (4)와 식 (7)을 통해 두 블록 부호의 성능이 이론적으로 같음을 확인할 수 있다. 다만, 시공간 블록 부호의 경우 연속하는 두 심볼 구간의 채널이 동일하다고 가정하였기에 패스트 페이딩(fast fading) 채널 환경에서, 주파수 공간 블록 부호의 경우 이웃하는 두 주파수 대역의 채널이 동일하다고 가정하였기 때문에 주파수 선택적(frequency-selective) 채널 환경에서 각각 성능 저하가 발생할 수 있다.

한편, 다중 송신 안테나 대신 다중 중계기를 이용하여 블록 부호를 적용할 경우, 주파수 공간 블록 부호는 이웃하는 두 부채널에 정보( $s_0$  과  $s_1$ )를 전송하기 때문에 Fig. 3(a)와 같이, 2-슬롯 단위의 프로토콜을 사용할 수 있지만, 시공간 블록 부호는 연속하는 두 심볼 구간을 통

해 정보( $s_0$  과  $s_1$ )를 전송하기 때문에 Fig. 3(b)와 같이 4-슬롯 단위의 프로토콜을 사용해야 한다. 즉, 전체 전송량과 수신 성능이 이론적으로 같더라도 4-슬롯 단위의 프로토콜을 처리하기 위한 추가적인 버퍼 등 운영 및 하드웨어 측면에서 시공간 블록 부호 기법이 주파수 공간 블록 부호 기법보다 다소 불리하다. 따라서, 본 논문에서는 시공간 블록 부호 대신 주파수 공간 블록 부호 기법을 적용하여 다중 중계기 기반의 전송 시스템을 살펴본다.

### 3. 주파수 공간 블록 부호화 중계기 기반의 SC-FDMA 전송 시스템

Fig. 4는 다중 중계기 기반의 SC-FDMA 전송 시스템 구조를 보여주고 있다. Fig. 4(a)와 같이, 송신국(S) 송신기에서 전송할 비트 신호는 부호기와 인터리버를 거쳐 부채널 맵핑된 후 M점 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 대역 신호로 변환된다. 이 때, M은 각 사용자에게 할당된 부채널 수 또는 각 사용자에게 지정된 푸리에 변환 점 개수를 의미한다. 각 사용자의 주파수 대역 신호는 N점 역 푸리에 변환(IFFT, Inverse FFT)을 거쳐 시간 대역 신호로 변환되고 사이클릭 프리픽스(CP, Cyclic Prefix) 신호가 추가되어 송신국 송신 안테나를 통해 발송된다. Fig. 4(b)는 중계기 송수신기 내부 구조를 보여주고 있다. 각 중계기는 송신국으로부터 신

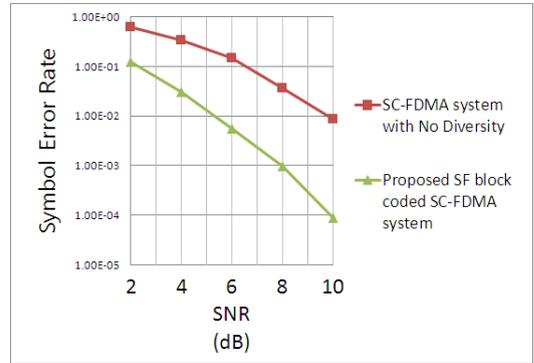


[Fig. 5] Bit error rate performance

호를 수신하여 사이클릭 프리픽스를 제거하고 N점 푸리에 변환한 후, 각 사용자에 지정된 M개 부채널 신호에 대한 등화 과정을 수행한다. 등화된 신호를 M점 역 푸리에 변환한 후 MAP(Maximum A Posteriori) 디텍터로부터 얻은 신호 비트의 LLR(Log-Likelihood Ratio) 값을 디인터리버와 디코더에 입력하여 원 신호를 복원한다. 복원된 신호는 수신국으로의 전송을 위하여 중계기 송신기로 전달된다. 중계기 송신기에서는 복원 신호를 받아 부호화, 인터리빙, 부채널 맵핑, M점 푸리에 변환, N점 역 푸리에 변환, 사이클릭 프리픽스 추가 등 송신국 송신기와 동일한 과정을 수행하여 신호를 발송한다. 다만, 송신 다이버시티 이득을 획득하기 위하여 주파수 공간 블록 부호 맵핑 과정이 포함된다. 수신국에서는 Fig. 4(c)와 같이, 중계기들로부터 전송된 신호를 수신하여 N점 푸리에 변환한 후, 주파수 공간 블록 부호에 대한 디코딩 과정을 수행하고, 등화기, M점 역 푸리에 변환기, MAP 디텍터, 디인터리버 및 디코더를 통과시키면 송신 다이버시티 이득에 의해 수신 성능이 크게 향상된 각 사용자 신호를 복원하게 된다.

#### 4. 실험 결과

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



[Fig. 6] symbol error rate performance

은 10개의 데이터 심볼 구간으로 구성하였다. 무선 채널은 6-탭 TU(Typical Urban) 채널 모형을 사용하였고, 채널 추정 은 완벽히 이루어진다고 가정하였다[16].

Fig. 5와 Fig. 6은 중계기와 수신국 간의 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise power Ratio)를 기준으로, 음영 지역을 위한 SC-FDMA 시스템의 비트 오류율(BER, Bit Error Rate)과 심볼 오류율(SER, Symbol Error Rate) 성능을 각각 보여주고 있다. 이 때, 송신국과 중계기 간의 채널 상태는 양호(SNR=20 dB)하다고 설정하였다. 각 그림에서 네모 모양의 실선은 송신국과 단일 중계기를 통해 다중 경로 형성을 시도하였지만, Fig. 1(c)와 같이, 송신국과 음영 지역의 수신국 사이의 경로 생성이 실패하여 중계기를 통한 단일 경로만이 형성된 SC-FDMA 시스템 성능을 보여주고 있다. 단일 중계기에서 원 신호  $s_0$  과  $s_1$  을 복원한 후 수신국으로 재전송하면, 단일 중계기와 수신국 간의 이웃하는 두 주파수 대역에서의 채널  $h_{0,0}$  과  $h_{0,1}$  을 거쳐 잡음  $n_0$  과  $n_1$  이 각각 더해져 수신국에 수신된다. 수신국의 이웃하는 두 주파수 대역에서 수신된 신호  $r_0$  과  $r_1$  은 다음과 같다.

$$r_0 = s_0 h_{0,0} + n_0, \quad r_1 = s_1 h_{0,1} + n_1 \quad (8)$$

수신 신호  $r_0$  과  $r_1$ 로부터 추정된 신호  $\hat{s}_0$  과  $\hat{s}_1$  은 원 신호( $s_0$  과  $s_1$ )와 채널에 의해 변형된 잡음으로 구성된다.

$$\hat{s}_0 = s_0 + \frac{n_0}{h_{0,0}}, \quad \hat{s}_1 = s_1 + \frac{n_1}{h_{0,1}} \quad (9)$$

채널 페이딩 상황에 따라 채널  $h_{0,0}$  또는 채널  $h_{0,1}$  이 순간적으로 나빠지면 식 (9)의 변형 잡음  $n_0/h_{0,0}$  또

는  $n_1/h_{0,1}$ 의 분모 값의 파워가 매우 작아지게 되고, 결국 변형 잡음  $n_0/h_{0,0}$  또는  $n_1/h_{0,1}$ 의 파워가 커져서 원 신호( $s_0$ 과  $s_1$ )와 추정 신호( $\hat{s}_0$ 과  $\hat{s}_1$ ) 간에 오류가 발생할 확률이 높아진다. 또한, 이웃하는 두 주파수 대역의 채널이 유사( $h_0 \equiv h_{0,0} \approx h_{0,1}$ )하면 채널 페이딩 상황에 따라 추정 신호  $\hat{s}_0$ 과  $\hat{s}_1$  모두 오류가 발생할 수 있다. 각 그림에서 세모 모양의 실선은 음영 지역 내 수신국과의 다중 경로 형성을 위하여 2개의 중계기를 사용하고, 중계기 간 주파수 공간 블록 부호를 적용한 SC-FDMA 시스템 성능을 보여주고 있다. 2개의 중계기를 사용하여 주파수 공간 블록 부호를 적용한 SC-FDMA 시스템의 수신국에서 추정된 신호  $\hat{s}_0$ 과  $\hat{s}_1$ 은 2장에서 설명한 바와 같이, 수식 (7)과 같다. 채널 페이딩 상황에 따라 첫 번째 중계기와 수신국 사이의 채널  $h_0$ 이 순간적으로 나빠지더라도 두 번째 중계기와 수신국 사이의 채널  $h_1$ 이 양호하면, 또는 채널  $h_1$ 이 순간적으로 나빠지더라도 채널  $h_0$ 이 양호하면 수식 (7)의 추정 신호에 포함되어 있는 변형 잡음의 분모( $|h_0|^2 + |h_1|^2$ )의 파워가 매우 작아지는 현상이 방지되기 때문에 단일 중계기를 사용한 경우와 달리, 추정 신호( $\hat{s}_0$ 과  $\hat{s}_1$ )에 대한 오류 발생 확률이 높아지지 않는다. 채널  $h_0$ 과 채널  $h_1$ 은 수신국과 서로 다른 중계기 간의 채널로서 서로 독립적인 채널 페이딩 현상을 겪게 되므로, 결국 신호 복원에 있어 다이버시티 효과를 얻게 된다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 주파수 공간 블록 부호화된 전송 시스템은 기존 단일 중계기 전송 시스템과 비교하여,  $10^{-3}$  비트 오류율 수준과  $10^{-2}$  심볼 오류율 수준에서 모두 약 5 dB 정도 신호 대 잡음 비(SNR) 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 중계기를 통해 다중 경로가 확보된 음영 지역 내 수신국을 위한 주파수 공간 블록 부호화된 SC-FDMA 전송 시스템을 제안하였다. 다중 중계기에서 복원된 전송 신호에 대하여 주파수 공간 블록 부호를 적용함으로써 음영 지역의 SC-FDMA 시스템 성능이 크게 향상됨을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 향후, 주파수 공

간 블록 부호화된 중계기 기반 전송 시스템을 위한 채널 추정 기법 등의 연구 및 시스템 통합이 필요하리라 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] N. Al-Dhahir, "Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block-Coded Transmissions over Frequency-Selective Fading Channels", *IEEE Communications Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 304-306, July 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4234.935750>
- [8] 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>
- [9] M. Im and H. Kim, "Comparisons on Diversity Techniques for SC-FDE Systems", *the Journal of KICS*, vol. 33, no. 10A, pp. 964-971, Oct. 2008.
- [10] 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>
- [11] H.G. Ryu and D.G. An, "Reduction of Phase Noise Influence in MISO SFBC SC-FDMA System", *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 5-42, June 2012.
- [12] F.B. Ueng, Y.S. Shen, J.C. Chang, Y.K. Chang, and M.H. Hsu, "MIMO Receivers for SFBC SC-FDMA Communication Systems", *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks (CICComms)*, pp. 66-71, April 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CICCommsS.2013.6582856>
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] T. Yune, J. Lim, Y. Cheong, and G. Im, "Iterative Multiuser Detection with Spectral Efficient Protocol for Relay-Assisted SC-FDE", *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 3, pp. 182-184, March 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2008.071688>
- [16] 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