
주파수 선택적 페이딩 채널에서 반송파 간섭 부호를 이용한 고성능 MIMO-OFDM 시스템의 성능분석

서완우* · 정연호*

Performance Evaluation of High-performance MIMO-OFDM System using Carrier Interferometry Codes in Frequency Selective Fading Channels

Wan-woo Seo* · Yeon-ho Chung*

요 약

MIMO (Multiple Input Multiple Output) 시스템은 공간적으로 분리된 안테나를 이용하여 공간 다이버시티 이득을 제공하는 고성능, 고용량의 광대역 무선 접속 기술이다. 본 논문에서는 주파수 다이버시티의 이득을 제공하는 다중 반송파 부호 기술인 반송파 간섭 부호 (Carrier Interferometry Code)를 MIMO-OFDM 시스템에 적용하여 성능을 추가적으로 개선하는 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템을 제안한다. SPW 시뮬레이션 플랫폼을 이용한 시뮬레이션 분석 결과에 의하면 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서 기존의 MIMO-OFDM 시스템 보다 반송파 간섭 부호를 적용한 MIMO-OFDM 시스템의 성능이 높은 채널 지연 환경에서도 약 4dB까지 개선됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

MIMO system takes advantage of the spatial diversity obtained by spatially separated antennas for high-performance and high-capacity broadband wireless access. In this paper, we propose Carrier Interferometry coded MIMO-OFDM system (MIMO-CI/OFDM) which provides frequency and spatial diversity. These combined diversity gains greatly improve the performance of OFDM systems. To perform a performance analysis, we have used SPW platform that provides an easy tool to analyze the performance. The results show that the performance of MIMO-CI/OFDM shows an approximately 4dB gain over the MIMO-OFDM even in highly frequency selective fading channels.

Keyword

MIMO, Carrier Interferometry, Space-Time Block Codes, OFDM,

I. 서 론

OFDM은 고속 전송률을 갖는 데이터열을 낮은 전송률을 갖는 많은 수의 데이터열로 나누고 이들을 다수의 부반송파를 이용하여 동시에 전송하는 기술로서

각각의 부반송파 대역폭은 전파 환경의 무선 채널 코히런스 대역폭보다 더 작게 된다. 이러한 변조 기술로 OFDM 기술은 차세대 무선 통신 시스템의 여러 분야에서 응용되고 있다[1]. 대표적인 OFDM 응용 시스템으로 미국의 IEEE 802.11a와 유럽의 HIPERLAN/2 등

이 있다[2,3]. 그러나 OFDM 전송에 있어서 데이터 심볼은 하나의 부반송파를 이용하여 전송하기 때문에 다수의 부반송파가 깊은 페이딩으로 완전히 손실될 수 있다. 따라서 전방오류정정 부호화나 다이버시티 같은 기법들이 필수적으로 사용되어야 한다.

미래의 유비쿼터스 환경에서는 높은 주파수 효율(10b/s/Hz), 고속 전송(100Mbps 혹은 1Gbps) 및 고용량이 요구되는데 이러한 요구조건에 적합한 OFDM 기반의 기술로 MIMO-OFDM이 고려되고 있다[4]. 또한 최근에는 OFDM에 반송파 간섭 부호를 적용한 반송파 간섭 부호 OFDM 시스템이 제안되었으며[5] 반송파 간섭 부호를 이용한 적응 OFDM 시스템도 소개되고 있다[6]. 이 시스템은 기존의 OFDM에 비해 시스템의 복잡도는 많이 증가하지 않으면서 수율(throughput)의 감소 없이 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 즉, 기존의 부반송파 하나에 하나의 심볼을 전송하는 대신에 사용가능한 모든 부반송파에 각 심볼을 직교적으로 전송하여 최대의 주파수 다이버시티 효과를 얻는 기술이다.

본 논문에서는 이러한 MIMO-OFDM 시스템에 주파수 다이버시티 효과를 제공하는 반송파 간섭 부호를 적용한 MIMO-CI/OFDM을 제안한다. 특히 이동 무선 채널 환경에서 지연 확산의 파라미터 값을 변화시키면서 제안하는 시스템의 성능 변화를 비교 분석하였다. 2장에서는 서론에 이어서 반송파 간섭 부호를 적용한 OFDM 시스템의 송·수신단의 구조를 설명하며, 3장에서는 시공간 부호를 적용한 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템에 대해 설명한다. 4장에서는 SPW 시뮬레이션 플랫폼을 이용하여 구현한 시스템 환경에서의 실험을 통해 각각의 성능을 비교 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 반송파 간섭 부호 OFDM 시스템

반송파 간섭 부호는 다수반송파 시스템의 성능을 개선시킨 기술이다. 이 부호는 Δf 에 의해 구분되는 N 개의 반송파 중첩으로 정의 된다[5].

$$p(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\pi n \Delta f t) \quad (1)$$

식(1)에서 Δf 는 $1/T_s$ 이고, T_s 는 심볼의 주기이다. 반송파 간섭 부호는 $1/\Delta f$ 시간에서 하나의 주엽과 다수의 부엽을 가진다. 식 (1)에서 $p(t)$ 의 상관관계를 살펴보면

$$R(\tau) = \frac{1}{2\Delta f} \sum_{n=0}^{N-1} \cos(2\pi n \Delta f \tau) \\ = \frac{1}{2\Delta f} \frac{\sin(N\pi \Delta f \tau)}{\sin(\pi \Delta f \tau)} \cos(\pi(N-1)\Delta f \tau) \quad (2)$$

식(2)로부터, 많은 수의 0을 쉽게 발견할 수 있게 된다. 즉, 값 $\tau = n/N\Delta f$ 와 $2n-1/2(N-1)\Delta f$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$)에서 상관관계 값이 0이 된다. 또한, N 이 기수일 때 $2N-1$ 이 0의 값을 가지고 N 이 우수일 때 $2N-3$ 이 0값을 가지게 된다.

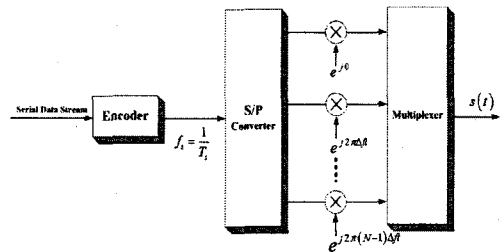


그림 1. OFDM 송신단의 구성도
Fig. 1 Block diagram of OFDM Transmitter

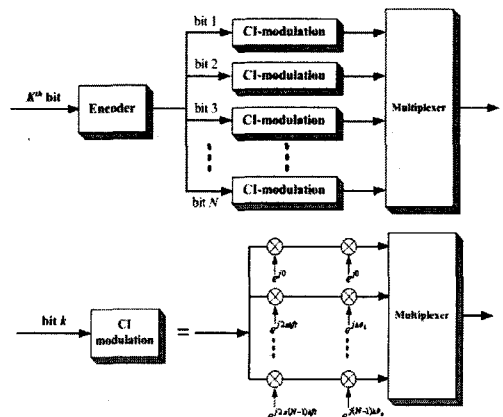


그림 2. CI/OFDM 송신단의 구성도
Fig. 2 Block diagram of CI/OFDM Transmitter

그림 1과 2는 기존의 OFDM 시스템과 반송파 간섭 부호 기반의 OFDM 시스템을 각각 나타낸다. 그림에

서 보는 바와 같이 두 시스템 모두 입력 데이터를 병렬로 변화시킨다. 그러나 기존의 OFDM 시스템에서는 하나의 반송파에 하나의 OFDM 심볼을 전송하였으나, 반송파 간섭 부호 기반에서는 각각의 OFDM 심볼이 동시에 모든 반송파에 의하여 전송되게 된다. 그리고 심볼 사이의 직교성은 식(2)를 이용한 위상 옵셋의 차이를 가지고 유지하게 된다. 여기서 위상 옵셋은 다음 식으로 정의될 수 있다[5].

$$\Delta\theta_k = \frac{2\pi}{N}k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

그러므로, 전송되어지는 k 번째 심볼은

$$s_k(t) = c_k \sum_{n=0}^{N-1} \cos\left(2\pi n\Delta f\left(t - \frac{k}{N\Delta f}\right)\right) \quad (4)$$

여기서, c_k 는 k 번째 심볼이다.

그러므로, 전송되는 신호는 식(5)와 같이 주어진다.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \sum_{n=0}^{N-1} \cos\left(2\pi n\Delta f t - \frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (5)$$

전송되는 신호는 이동 무선 전송 채널을 통과하는 동안 감쇠, 지연 그리고 AWGN의 영향을 받게 된다. 따라서 수신신호는 식(6)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n \cos\left(2\pi n\Delta f(t - \tau_n) - \frac{2\pi nk}{N} + \phi_n\right) + n(t) \quad (6)$$

여기서, α_n 은 n 번째 반송파의 채널 감쇠계수이고, ϕ_n 은 n 번째 반송파의 채널 위상이고 $n(t)$ 는 AWGN이다.

수신단은 기본적으로 송신부의 역과정을 거친다. 수신신호 $r(t)$ 의 N 개 직교 반송파는 FFT과정을 거친 후, 각각의 반송파로부터 k 번째의 위상 옵셋을 없애게 된다. 그러므로, k 번째 심볼은

$$r_k = (r_k^0, r_k^1, \dots, r_k^{N-1}) \quad (7)$$

이다. 여기서 r_k^n 은

$$r_k^n = \alpha_n c_k \sum_{j=0, j \neq k}^{N-1} \alpha_n c_j \times \cos\left(\frac{2\pi nk}{N} + \Delta\theta_k - \frac{2\pi nj}{N} - \Delta\theta_j\right) + n(t) \quad (8)$$

식(8)에서 두 번째 항은 심볼간의 간섭을 의미한다. AWGN이나 균등 페이딩 채널 환경에서는 동일 이득 결합(equal gain combining), 최대비 결합(Maximal ratio combining)이 적용되고 있으나 본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서 적합한 최소평균 제곱오차(Minimum mean square error)를 적용하였다. 따라서 판정 변수는 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_k = \sum_{n=0}^{N-1} r_k^n \frac{\alpha_n}{N\alpha_n^2 + N_o/2} \quad (9)$$

III. 반송파 간섭 부호 MIMO-OFDM 시스템

본 논문에서는 두개의 송·수신 안테나를 가지는 Alamouti의 전송 다이버시티 기법을 사용하여 2장에서 설명한 시스템에 적용하였다[7].

송신단에서 입력 심볼들은 각각 두개의 심볼 그룹으로 나누어진다.

$$s_k(m, j) = \begin{cases} c_k(m), & j=1 \\ c_k(m+1), & j=2 \end{cases} \quad (10)$$

$$s_k(m+1, j) = \begin{cases} -c_k^*(m+1), & j=1 \\ c_k^*(m), & j=2 \end{cases} \quad (11)$$

여기서, j 는 송신단의 안테나 개수이며 m 은 시간주기이다.

수신단에서 2개의 안테나를 가진다고 가정하면 수신된 신호는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k(m, i) = \sum_{j=1}^2 h_k(m, i, j) s_k(m, i) + n_k(m, i) \quad (12)$$

여기서, i 는 수신단의 안테나 수이고, $h_k(m, i, j)$ 는 시간 주기 m 에서 j 번째 송신 안테나를 통해 i 번째 수신안테나로 도달될 때의 복소수의 페이딩 계수이다.

수신된 데이터 심볼 $r_k(m, i)$ 와 $r_k(m+1, i)$ 를 결합과정을 통해 수신 추정 심볼 \tilde{c}_k 과 $\tilde{c}_k(m+1)$ 로 각각 분리된다.

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k(m) &= r_k(m, 1)h_k^*(m, 1, 1) + r_k(m, 2)h_k^*(m, 2, 1) \\ &+ r_k^*(m+1, 1)h_k(m+1, 1, 2) + r_k^*(m+1, 2)h_k(m+1, 2, 2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k(m+1) &= r_k(m, 1)h_k^*(m, 1, 2) + r_k(m, 2)h_k^*(m+1, 2, 2) \\ &- r_k^*(m+1, 1)h_k(m+1, 1, 1) - r_k^*(m+1, 2)h_k(m+1, 2, 1) \end{aligned} \quad (14)$$

제안된 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템에서는 두 가지의 복호과정이 이루어지는데, 첫 번째로 식(13)과 (14)에서 살펴본 것과 같이 Alamouti의 결합과정을 통해 복호되며 이 과정을 통해 시공간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 다음으로 2장에서 살펴본 것과 같이 반송파 간섭 부호의 복호과정인 최소평균제곱오차 과정을 통해 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 식(13)과 (14)를 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템에 적용시키면 식(15)와 (16)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k(m) &= \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_k^2(m, i, j) \right] c_k(m) \\ &+ \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_k^2(m, i, j) \right] c_l(m) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N} + \Delta\theta_k - \frac{2\pi nl}{N} - \Delta\theta_l\right) \\ &+ n_k(m) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k(m+1) &= \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_k^2(m+1, i, j) \right] c_k(m+1) \\ &+ \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_k^2(m+1, i, j) \right] c_l(m) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N} + \Delta\theta_k - \frac{2\pi nl}{N} - \Delta\theta_l\right) \\ &+ n_k(m+1) \end{aligned} \quad (16)$$

따라서, 수신단에서 최종 판정변수 (decision variable) C_k 는

$$C_k = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{c}_k \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} H}{\frac{N}{2} H^2 + \frac{N_o}{2} H} \quad (17)$$

여기서 H 는 식(18)과 같이 표현된다.

$$H = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_k^2(m, i, j) \quad (18)$$

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 논문에서는 SPW 시뮬레이션 플랫폼을 이용하여 MIMO-OFDM 시스템과 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템을 각각 구현하여 그 성능을 비교하였다.

그림 3은 SPW 시뮬레이션 플랫폼으로 구현한 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템의 최상위 구성도를 나타내었다.

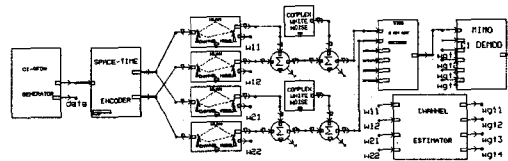


그림 3. MIMO-CI/OFDM 시스템의 최상위 구성도
Fig.3 Top-level block diagram of MIMO-CI/OFDM system

첫 번째 블록에서 필요한 데이터가 생성되고, BPSK 변조를 한 후 반송파 간섭 부호로 변조 된다. 각각의 변조된 심볼은 시공간 블록 부호를 거치게 된다. 심볼은 이동 무선 채널 블록을 통과하면서 손실을 겪게 된다. 그림 4는 그림 3에 있는 이동 무선 채널 블록의 상세도를 보여주고 있다. 여기서 시뮬레이션 시간 등을 고려하여 다중경로 채널의 경로수를 6개로 제한하였다.

기본적으로 수신단은 송신단의 역으로 동작을 한다. 이상적인 채널 추정기를 통해 얻어진 채널 상태

정보는 수신단에서 이용된다. 전술한 이론에 의거하여 심볼은 채널 상태 정보를 이용하여 공간간 부호의 최대 근사화 복호과정과 반송파 간섭 부호의 복호과정인 최소평균제곱오차 복호과정을 수행한 후 원래의 데이터로 복호되는 과정을 SPW 블록으로 구현하였다.

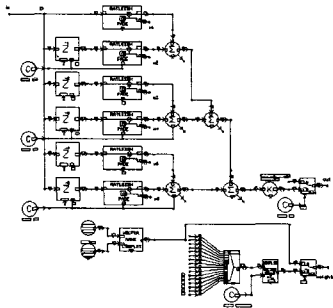


그림 4. 이동 무선 채널의 구성도
Fig. 4 Block diagram of mobile radio channel

1. 지연 확산 100ns에서의 성능 비교

본 논문에서는 지연 확산이 상대적으로 적은 100ns 일 때와 상대적으로 큰 2500ns에서 각각 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 지연 확산이 100ns일 때의 OFDM 시스템, MIMO-OFDM 시스템 및 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템의 시뮬레이션결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템의 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 특히 BPSK 변조를 적용하고 지연확산이 상대적으로 낮은 환경에서는 반송파 간섭 부호로부터 생성되는 다중 반송파를 이용한 주파수 다이버시티 이득이 크게 나타남으로써 높은 성능 개선 효과를 가져 올 수 있음을 알 수 있다. 여기서 MIMO-CI/OFDM의 성능은 SNR 0dB에서만 비트 오류가 발생함을 알 수 있다.

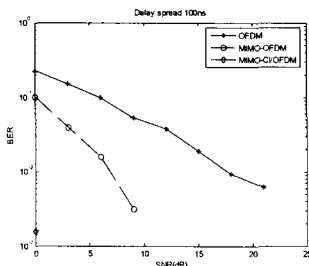


그림 4. 지연 확산 100ns에서의 성능 비교
Fig 4. Performance result for delay spread 100ns

2. 지연 확산 2500ns에서의 성능 비교

상대적으로 지연 확산을 증가하였을 때의 성능 변화를 관찰하기 위하여 값을 2500ns로 하여 높은 지연 채널 환경에서의 시뮬레이션을 수행하였으며 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 4의 결과와 동일하게 지연 확산 값을 증가시키더라도 주파수 다이버시티 이득에 의한 반송파 간섭 부호 기반 MIMO-OFDM 시스템의 성능개선을 얻을 수 있었다. 즉, 높은 채널 지연 환경에서도 반송파를 BPSK 변조한 MIMO-CI/OFDM 시스템은 BER 1.5×10^{-3} 에서 약 4dB 정도의 성능개선 효과를 보여주고 있다.

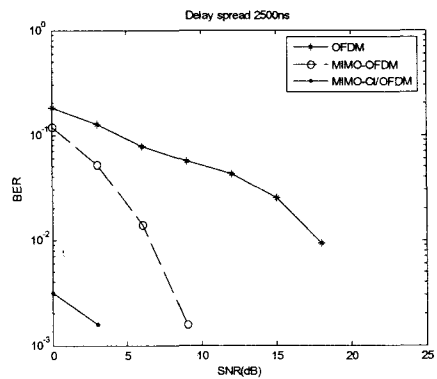


그림 5. 지연 확산 2500ns에서의 성능 비교
Fig 5. Performance result for delay spread 2500ns

V. 결론

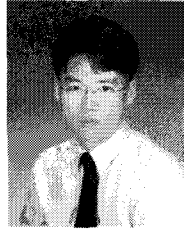
본 논문에서는 미래 광대역 무선 접속을 위한 기술로서 기존의 공간 다이버시티 기술을 적용한 MIMO-OFDM 시스템에 있어서 주파수 다이버시티 이득을 제공하는 반송파 간섭 부호를 적용한 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템을 제안하였다. 성능비교 분석을 위한 SPW 시뮬레이션 결과에 의하면 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템이 기존의 MIMO-OFDM보다 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다. 향후 연구과제로 반송파 간섭 부호 기반의 MIMO-OFDM 시스템에 다중 레벨 변조 및 오류정정 부호를 적용시킨 다중사용자 시스템을 고려할 수 있으며 현재 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- [1] Van Nee, R. and Prasad, R., *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, Boston, 2000.
- [2] IEEE 802.11, "Draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems - LAN/MSN specific requirements - Part 11: wireless MAC and PHY specifications: High speed physical layer in the 5 GHz band," P802.11a/D6.0, May 1999.
- [3] ETSI, "Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2 Technical Specification Part 1-Physical Layer," DTS/BRAN030003-1, Oct. 1999.
- [4] Yang, H., "A road to future broadband wireless access: MIMO-OFDM-based air interface," *IEEE Comm. Mag.* pp.53-60, Jan. 2005
- [5] Natarajan, B., Nassar C.R., Shattil, S., Michelini, M. and Wu Z., "High-performance MC-CDMA via carrier interferometry codes," *IEEE Trans. Veh Tech.* vol.50, no.6, pp.1344-1353, Nov. 2001.
- [6] Yeonho Chung, "Performance evaluation of adaptive OFDM with carrier interferometry codes in frequency selective fading channels," *IEEE ICC 2004*, vol.6, pp.3276-3279, June 2004.
- [7] Alamouti, S. M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE Journal on Select Areas Comm.*, vol.16, issue.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.

저자소개

서원우(Wan-Woo Seo)



2001년 2월 동명정보대학교 정보통신공학과 졸업
 2003년 3월 ~ 현재 부경대학교 정보통신공학과 석사과정

※ 관심분야 : 시공간부호, 채널부호화

정연호(Yeon-Ho Chung)



1984년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업
 1992년 2월 The Imperial College, The University of London, U.K(공학석사)

1996년 2월 Liverpool University, U.K. 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1994년 ~ 1996년 Liverpool University 연구/강의 조교
 1994년 ~ 1995년 영국 Freshfield Communications Ltd. 기술 자문역(이동통신 시스템 설계 및 H/W, S/W 개발)
 1996년 ~ 2001년 : 경북대학교/동의대학교 전임강사
 2001년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 부교수

※ 관심분야 : 적응 변조 및 부호화 기술, 반송파 간섭 신호 부호, OFDM 시스템, 채널부호화