

다이버시티와 공간 다중화를 고려하여 선형 STBC를 사용한 OFDM 시스템 성능 분석

정희원 이해정*, 양청해*, 광경섭*

Performance Evaluation for Linear Space-time Coded MIMO-OFDM System considering Diversity-Spatial Multiplexing

HaeJeong Lee*, QuingHai Yang*, KhungSub Kwak* *Regular Members*

요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 무선채널에서 고속으로 데이터 전송을 하고자 할 경우 다중경로에 의해 발생하는 심각한 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있는 장점이 있어 다양한 고속 무선 통신시스템의 전송방식으로 채택되었다. 본 논문에서는 최근에 제안된 선형 시-공간 블록 코드와 OFDM 시스템을 결합한 선형 STBC-OFDM 시스템과 STBC-OFDM 시스템을 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 채널 환경에서 성능 분석을 하였고, 공간 다중화와 다이버시티 이득에 대한 성능을 연구하였다. 선형 시-공간 블록 코드는 송신 다이버시티와 공간 다중화를 위해 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 그에 따른 공간 다이버시티와 시간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 또한 OFDM과 결합함으로써 주파수 다이버시티 효과도 얻을 수 있다. 제안된 방식의 성능이 우수함을 보이기 위하여 모의 실험을 통하여 그 결과를 STBC-OFDM과 비교 분석한다.

Key Words : MIMO, OFDM, 선형 STBC, STBC, Diversity, Multiplexing

ABSTRACT

In order to transmit data at high speed in the wireless environment, OFDM is selected as the transmission method of various high-speed wireless communication system since it has the advantage to deal easily the serious selective frequency fading channel by the multiple path. We evaluate STBC-OFDM and linear STBC-OFDM combining with a class of recently proposed linear scalable space-time block codes and OFDM in MIMO channel environments, and demonstrate the performance for spatial multiplexing and diversity gain. The codes are able to use jointly transmit diversity in combination with spatial multiplexing, and achieve spatial and temporal diversity. Frequency diversity of frequency selective channels can be utilized by combining the linear STBC and OFDM.

Simulation results are shown to demonstrate the better performance of proposed approach in comparison with STBC-OFDM.

1. 서론

최근 무선통신 서비스는 기존의 음성 및 일반 텍

스트 데이터를 서비스하는 것에서 멀티미디어 데이터 같은 큰 용량의 데이터를 송수신 할 수 있는 고속의 무선통신 서비스로 전환 되고 있다. 이처럼 미

* 인하대학교 정보통신대학원 정보통신공학과 통신공학연구소(sunlise291@hotmail.com)

논문번호 : 030514-1124, 접수일자 : 2003년 11월 24일

* 본 연구는 한국과학재단 특성기초연구(RO1-2003-000-10685-0)지원으로 수행되었습니다.

래 무선 통신 시스템에서 고속 데이터 전송에 대한 지원은 중요해질 것이다. 그러나 광대역 무선통신에서는 데이터 전송 속도가 증가함에 따라 기존의 3세대 셀룰러 통신과는 달리 다중 경로 지연에 따른 ISI가 큰 문제가 되어 통신 링크의 평균 신뢰도에 영향을 끼치게 된다. 이러한 광대역 통신의 문제는 OFDM 방식을 채택함으로써 효과적으로 해결할 수 있고, 다중 안테나를 사용함으로써 산란이 심한 무선 채널에서의 고속 데이터 전송이 가능하다. 이러한 목적을 위해서 두 가지의 기본적인 코딩 방법이 있는데, 하나는 스펙트럼 효율(Spectral Efficiency)의 감쇠 없이 링크 신뢰도를 개선하기 위한 선형 시·공간 블록 코딩이고, 다른 하나는 스펙트럼 효율을 증가시키기 위한 공간 다중화 기법이다[2]-[4].

시·공간 코드(Space-Time codes)는 무선 통신 채널에서 다중 경로로 인한 페이딩 영향을 최소화시키기 위해서 송·수신 단에서 안테나 배열을 이용한다[1]. 그러한 방법은 송신 측에서 채널 상태에 관한 정보(Channel State Information) 없이도 송신 다이버시티를 얻는 것을 목적으로 하고, 송·수신 단에서 다중 안테나를 사용함에 따라서 채널 용량은 증가하는 특성이 있다[7]-[8]. 선형 시·공간 블록 코드(Linear STBC)는 산란이 심한 다중 안테나 채널에서 공간 다중화에 따른 대역폭의 증가 없이 데이터 전송율을 증가시키고, 레일리 페이딩(Rayleigh fading)에서 채널 용량은 송수신 안테나의 수가 증가함에 따라서 선형적으로 증가한다.

공간 다중화를 사용한 실질적인 방법으로 V-BLAST가 있지만 이 기법은 추가적으로 송신 다이버시티를 얻기 위해 설계되지 않았다. [8]에서 시·공간 블록 코드의 여러 분류를 선형 분산 코드(Linear Dispersion code)로 정의했고, 모든 선형 블록 코드는 선형 블록 코드로서 설명될 수 있음을 보였다. [8]에서 제안된 선형 분산 코드에서는 송신 다이버시티 이득을 얻기 위한 어떠한 보장도 제공하지 못한다. 그렇기 때문에 미래 무선 통신에서 코딩 스킴에 대한 요구는 중요해지고 있고, 시스템에서 요구하는 데이터 전송 속도와 채널 조건에 따라서 공간 다중화와 송신 다이버시티 중 어느 것을 사용하는 것이 더 좋은지에 대한 선택 또한 중요성을 더해가고 있다. 예를 들면, 채널의 상태가 좋다면 다이버시티 보다는 데이터 전송율을 높일 수 있는 다중화 기법을 사용하는 것이 좋고 반대로 채널의 상태가 안 좋으면 다이버시티를 사용하는 것이 다중화 기법을 사용하는 것보다 더 좋은 선택이

될 것이다. 그래서 공간 다중화를 통한 데이터 전송율의 향상과 다이버시티를 통한 링크의 신뢰도를 개선할 수 있는 코딩 기법을 사용하는 시스템은 점점 많은 데이터 전송을 요구하는 경우에 효과적이다.

지금까지 연구된 시·공간 블록 코딩은 협 대역 채널에서의 단일 반송파(single-carrier) 시스템에 국한되었기 때문에 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 없었다. 그러나 광 대역 다중 안테나 채널에선 지연 확산으로 인한 주파수 다이버시티뿐만 아니라 다중 안테나의 사용으로 공간 다이버시티 또한 제공한다.

OFDM은 다중 경로 페이딩과 지연 확산, 도플러 쉬프트와 같은 무선 채널에서의 손상에 강하고, 높은 캐패시티와 스펙트럼 효율을 지원한다는 점에서 고속 데이터 전송을 요구하는 미래 무선 통신 시스템에 적합하므로, 본 논문에서는 선형 시·공간 코드를 OFDM 시스템에 적용하여 주파수 선택적 채널에 대한 신호처리 방식을 설명하였고, STBC-OFDM 시스템과 성능을 비교 분석 하였다. 또한 선형 STBC는 안테나 수가 증가함에 따른 코드 구성이 간단하기 때문에 안테나 수가 증가하여도 낮은 복잡도를 가짐을 보였다. 시·공간 블록 코드는 송신 다이버시티와 공간 다중화 모두에서 사용이 가능하기 때문에 선형 시·공간 부호화된 MIMO-OFDM에서 주파수 다이버시티를 얻을 수 있었다.

II. 선형 시·공간 블록 코드를 사용한 OFDM 시스템

본 논문에서 선형 시·공간 코드를 OFDM 시스템에 적용함에 따라서 주파수와 시간 다이버시티를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 다중 안테나에 적용하여 공간 다이버시티 또한 얻을 수 있음을 확인하였다.

MIMO 채널에서 선형 시·공간 블록 코드를 사용한 OFDM 시스템에 모델을 그림 1에서 보였다.

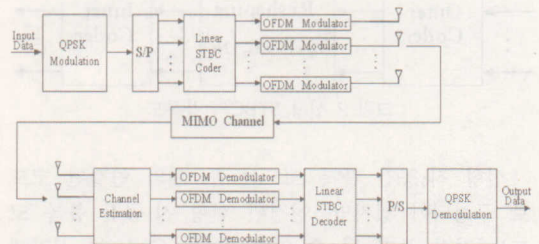


그림 1 선형 STBC를 사용한 OFDM 시스템

그림 1에서 입력 데이터는 QPSK 변조된 다음 선형 시·공간 블록 코더를 통과 후 OFDM Modulator를 거쳐 각 송신 안테나를 통해 전송된다. 선형 시·공간 블록 코드를 사용하여 N개의 부 반송파를 갖는 OFDM 시스템에서의 송신 신호와 수신 신호를 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\hat{x}[k] = \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ x_{N_t}[k] \end{bmatrix}, \quad x_l[k] = \sum_{n=1}^N s_l[n] \cdot e^{j2\pi nk/N}$$

$$\hat{y}[k] = H[k] \cdot \hat{x}[k] + n[k]$$

$$1 \leq k \leq N, \quad 1 \leq l \leq N_t \quad (1)$$

선형 시·공간 블록 코더를 통과한 신호는 부 반송파의 수만큼 $s_l[n]$ 로 병렬 처리되어 OFDM Modulator를 통과한다. OFDM Modulator를 통과한 신호 $x_l[k]$ 는 송신 신호 $\hat{x}[k]$ 를 구성한다.

송신 신호는 MIMO 채널을 통과하여 전송되는데, MIMO 채널은 지연된 페이딩의 합으로서 표현 될 수 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(e^{j\theta}) = \sum_{l=0}^{L-1} H_l \cdot e^{-j2l\theta}, \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (2)$$

H는 $N_r \times N_t$ 인 복소 값을 갖는 랜덤 행렬이다. 본 논문에서 H_l ($l=0,1,K,L-1$)은 $N_r \times N_t$ 의 Rayleigh 페이딩을 가정하였다.

공간 다중화와 다이버시티 모두를 이용하기 위해 사용한 선형 시·공간 블록 코드는 그림 2와 같은 구성을 가진다.

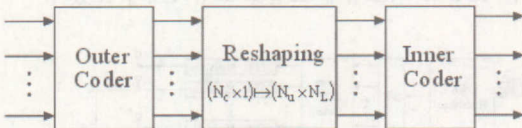


그림 2 선형 STBC의 블록도

선형 시·공간 블록 코드는 두 개의 연결된 코드로 구성되어 있지만, 연결된 선형 시·공간 블록 코드는 각각 분리 될 수 있다. Inner Coder는 시간에

따라 변하는 특성을 가지며, Q_v 로 정의했고, Outer Coder는 시간에 따라 변하지 않으며 R로 주어졌다.

Outer Code는 높은 다이버시티 이득을 얻기 위해 최적화 되는데, R은 순환 행렬(cyclic matrix)로 열을 추가하거나 제거함으로써 code rate을 간단하게 수정할 수 있으며, code rate이 1인 경우에도 페이딩 환경에서 좋은 성능을 가진다[2]. 본 논문에서는 code rate = 1을 적용하였다.

R의 열 구성은 [4]와 같은 chirp filter의 순환 임펄스 응답으로 이루어진다.

$$R = \begin{bmatrix} r[0] & r[i-1] \wedge r[1] \\ r[1] & r[0] \wedge r[2] \\ \vdots & \vdots \wedge \vdots \\ r[i-1] & r[i-2] \wedge r[0] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$r[i] = \exp\left(j \cdot 2\pi \cdot \alpha \cdot \frac{(i-1)^2}{N_s^2}\right) \quad (4)$$

파라미터 α 는 가장 높은 PEP(Pairwise Error Probability)를 최소화하기 위한 최적의 값으로 [2]에 정의 되어 있다.

그림 2에서 입력 데이터는 Outer Coder를 통과하여 \hat{b} 를 형성하고, \hat{b} 는 $N_u \times N_t$ 로 재구성되어 $C_{reshape}$ 를 형성하는데 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\hat{c}[k] = R \cdot \hat{b}[k] = \begin{bmatrix} c_1[k] \\ c_2[k] \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ c_{N_t}[k] \end{bmatrix}$$

$$C_{reshape}(u, v) = c_{(u+N_t(v-1))}[k]$$

$$1 \leq u \leq N_u, \quad 1 \leq v \leq N_t \left(= \frac{N_s}{N_u} \right) \quad (5)$$

위의 식에서 $\hat{b}[t]$ 는 $b_1[t], b_2[t], \dots, b_{N_t}[t]$ 로 구성된 Outer Coder의 입력 신호이다. $\hat{b}[t]$ 와 식 (3)에서 얻은 R과 곱해져서 생성된 신호 \hat{c} 는 $C_{reshape}$ 로 재구성되는데, 여기서 N_u 는 공간 다중화를 위해 이용되는 공간 부 채널의 수를 N_s 는 코드

블록 길이를 의미한다. 그리고 N_L 는 입력되는 데이터의 수를 말하며, v 는 시간인덱스이다.

다이버시티를 위해 Inner Coder는 Outer Coder에 의해서 나온 채널의 정전 확률과 관련하여 최적화 되는데, Q_v 는 송신 안테나 배열을 유도하기 위해 이용되고 송신 안테나 수만큼 생성된다. $c_{reshape}$ 는 Inner coder Q_v 를 통과하는데, Q_v 는 푸리에 행렬(Fourier Matrix)의 행으로 이루어지고 아래의 식(6)과 같이 \vec{q}_v 로 표현된다.

$$\vec{q}_v = F[v, 1 : N_L]^T$$

$$F[n, m] = \frac{1}{\sqrt{N_L}} \cdot \exp(-j \cdot 2\pi \cdot (n-1) \cdot (m-1)/N_L) \quad (6)$$

다이버시티인 경우 위의 식으로부터 얻은 \vec{q}_v 에 의해서 Inner Coder가 형성된다. 다중 안테나 채널에선 독립된 데이터 열을 다중화하여 공간 부채널을 통해 전송할 수 있다. 만약 사용되는 공간 부채널의 수(N_v)가 송신 안테나의 수보다 작다면 Inner Coder와 Outer Coder는 다이버시티와 공간 다중화를 병행하여 사용할 수 있도록 구성될 수 있다. 사용되고 있는 N_v 에 따라 링크의 신뢰도를 높이기 위한 다이버시티와 데이터 율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 다이버시티와 공간 다중화를 결합하여 다이버시티 이득과 데이터 전송 율의 향상을 동시에 얻을 수 있다. 이러한 데이터 전송 율의 향상을 위한 공간 다중화는 Inner Coder에 의해서 조절되며, 공간 다중화를 위한 Inner Code의 구성은 아래와 같다.

$$Q_v = \text{diag}(\vec{q}_v) \cdot G \quad (7)$$

Q_v 는 앞에서 설명한 \vec{q}_v 의 열 성분들을 대각 행렬로 구성한 값과 G 의 곱으로 형성되며, G 는 복소 직교정규 행렬로 $G^H \cdot G = I_{N_L}$ 이다. G 는 Outer Code와 마찬가지로 G 의 첫 번째 열을 구성하는 성분들을 순환 이동(cyclic shift)함으로써 얻어지고 G 의 첫 번째 열을 아래의 식에 대한 FFT로서 얻어진다.

$$G = \begin{bmatrix} g[0] & g[i-1] & g[i-2] & \dots & g[1] \\ g[1] & g[0] & g[i] & \dots & g[2] \\ g[2] & g[1] & g[0] & \dots & g[3] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g[i-1] & g[i-2] & g[i-3] & \dots & g[0] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\vec{g}[i] = \exp(j \cdot 2\pi \cdot \beta \cdot (i-1)^2 / N_L^2) \quad (9)$$

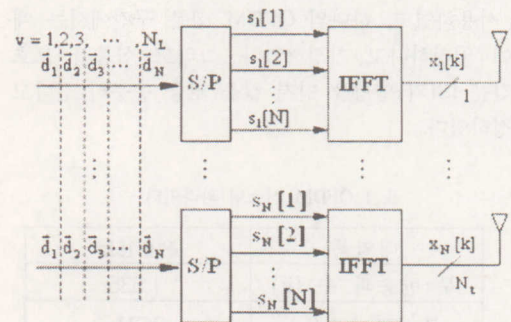
파라미터 β 는 송신 안테나의 수에 따라서 결정되며 송신 안테나의 수가 2인 경우 $\beta = 1$ 이고 송신 안테나의 수가 4인 경우 $\beta = 14$ 로 [2]에서 정의했다. N_U 가 다른 경우에는 G 의 열을 추가하거나 제거함으로써 간단하게 재구성 될 수 있다.

지금까지 다이버시티 이득을 얻기 위한 경우와 공간 다중화를 위한 경우의 선형 시-공간 블록 코드의 구성에 대해 설명하였다. 선형 시-공간 블록 코더를 통과한 신호 \vec{d}_v 는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{d}_v = Q_v \cdot C_{reshape}(:, v)[k]$$

$$D = [\vec{d}_1, \vec{d}_2, \vec{d}_3, \dots, \vec{d}_{N_L}] \quad (10)$$

N_L 개 형성된 신호 \vec{d}_v 에 의해 구성된 D 는 그림 1에서 본 것처럼 OFDM Modulator를 통과하여 각각의 안테나로 전송된다. 그 과정을 그림 3에서 보이고 있다.



Inner Coder를 통과하여 생성된 신호 D 는 그림 3에서처럼 N 개의 부반송파 수만큼 병렬 처리되어 아래의 식(11)과 같이 표현된다.

$$s_l[N_L(k-1) + v] = D(l, v)[k], \quad 1 \leq l \leq N_t$$

$$s_l[n], \quad 1 \leq n \leq N \quad (N : \text{subcarrier}) \quad (11)$$

N개의 $s_l[n]$ 는 IFFT단을 통과하여 송신 신호 $x_l[t]$ 이 형성되고 아래의 식 (12)와 같이 표현된다.

$$x_l[k] = \sum_{n=1}^N s_l[n] \cdot e^{j2\pi nk/N}, \quad 1 \leq k \leq N, \quad 1 \leq l \leq N_t \quad (12)$$

모든 OFDM 부 반송파에 Outer 코딩을 적용하는 것은 부 반송파의 수가 증가함에 따라서 블록 길이 또한 증가하여 디코더의 복잡도는 높아진다. 그러나 OFDM 부 반송파 수가 클수록 바로 인접해 있는 OFDM 부 반송파 사이의 거리는 매우 작기 때문에 인접한 부 반송파가 겪는 페이딩은 상당히 유사하다. 그래서 실제로 채널에서 이용할 수 있는 주파수 다이버시티는 제한된다.

III. 모의 실험

이 장에서는 선형 시공간 블록 코드를 MIMO-OFDM에 적용한 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인할 것이다.

3-1. 모의 실험 환경

본 논문에서 모의 실험을 위해서 사용한 시스템 파라미터는 표 1.에서 보였다.

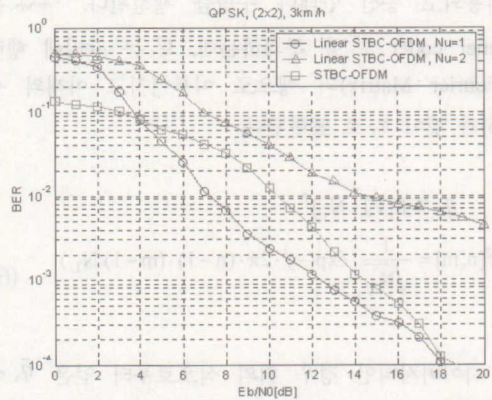
모든 모의 실험에서는 [6]에서 제안한 MAP-DFE를 사용하였고, 하나의 OFDM 심볼 구간에서는 채널이 일정하다고 가정하였다. 그리고 심볼간 보호 구간은 ISI의 영향을 받지 않을 만큼 충분히 길다고 가정하였다.

표 1 OFDM 시스템 파라미터

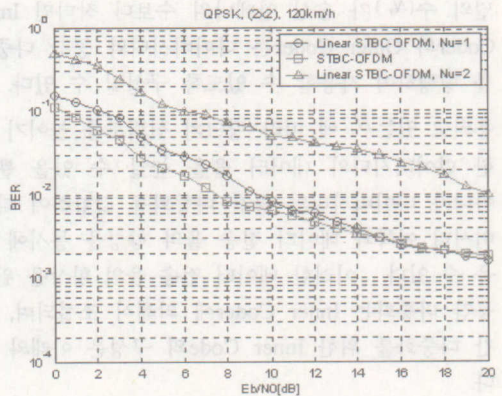
대역폭	20MHz
부 반송파 수 (k)	1.536
중심주파수 (f_c)	2GHz
FFT length	2,048
보호구간 (T_G)	20 μ s
심볼 구간 (T_s)	100 μ s
속도	3, 60, 120km/h
페이딩	Rayleigh fading

3-2. 모의 실험 결과

먼저 두 개의 송수신 안테나를 갖는 Linear STBC-OFDM 시스템과 STBC-OFDM 시스템의 성능을 보면 그림 4와 같다.



(a) 3km/h에서 선형 STBC-OFDM과 STBC-OFDM의 성능



(b) 120km/h에서 선형 STBC-OFDM과 STBC-OFDM의 성능

그림 4 선형 STBC-OFDM과 STBC-OFDM 성능 비교

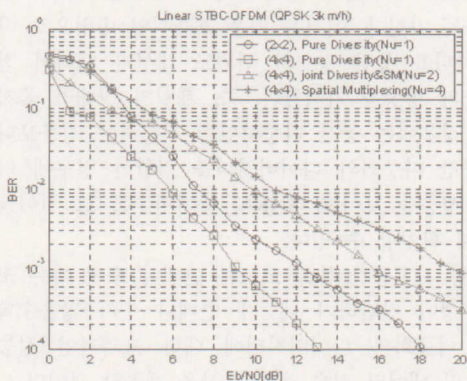
그림 4는 3km/h와 120km/h에서 (2x2) 선형 STBC-OFDM과 STBC-OFDM 시스템의 비트 오류율과 선형 STBC-OFDM 시스템인 경우 다이버시티 이득에 따른 비트 오류율과 공간 다중화에 따른 비트 오류율을 나타낸다. 저속인 경우의 (a)를 보면 선형 STBC-OFDM에서 $N_t = 1$ 인 경우는 다이버시티 이득에 대한 성능으로 낮은 SNR에서는 STBC-OFDM에 비해 성능의 저하를 보이지만, BER이 10^{-3} 인 경우를 기준으로 E_b/N_0 를 보면 선

형 STBC-OFDM은 12dB, STBC-OFDM은 14dB로 2dB의 향상된 성능을 보인다. 그러나 SNR이 증가할수록 선형 STBC-OFDM과 STBC-OFDM의 BER 폭이 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해서, 저속인 경우 STBC-OFDM은 SNR이 증가할수록 BER이 선형적으로 감소하는 반면, 선형 STBC-OFDM은 SNR이 증가할수록 STBC-OFDM보다 10dB까지는 BER의 감소가 크게 나타나지만 그 이상부터는 BER 감소 폭이 줄어들고 있다. 따라서 선형 STBC-OFDM이 STBC-OFDM보다 4~14dB까지는 확연히 좋은 성능을 보임을 확인하였다. $N_U=2$ 인 경우는 데이터 전송 율의 향상을 위해 공간 다중화를 이용한 경우로 송·수신 안테나를 각각 두 개 사용한 경우 낮은 SNR에서는 $N_U=1$ 일 때와 비슷한 비트 오류 율을 보이지만 SNR이 증가함에 따라서 $N_U=1$ 에 비해 성능 저하가 심하게 나타났다.

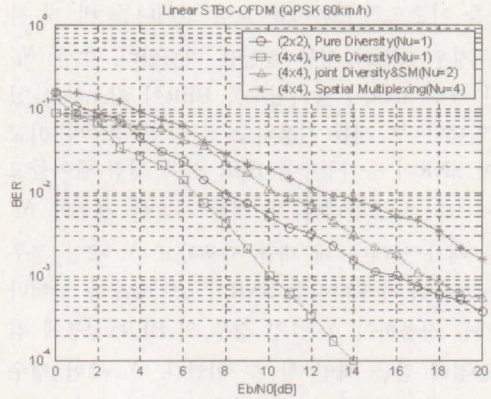
그림 4의 (b)와 같이 고속인 경우를 보면 (a)와 마찬가지로 SNR이 증가함에 따라서 BER은 감소했고 (a)와는 달리 낮은 SNR에서 STBC-OFDM이 선형 STBC-OFDM에 비해 약간의 성능 우위를 보이지만 14dB 이상부터는 비슷한 성능을 보임을 확인하였다. 그리고 공간 다중화를 이용한 경우는 저속일 때와 마찬가지로 성능의 저하가 심하였다.

그림 4에서 선형 STBC-OFDM은 STBC-OFDM에 비해 저속인 경우 BER 성능이 향상되었고, 고속인 경우는 비슷한 BER 성능을 보임을 확인했다.

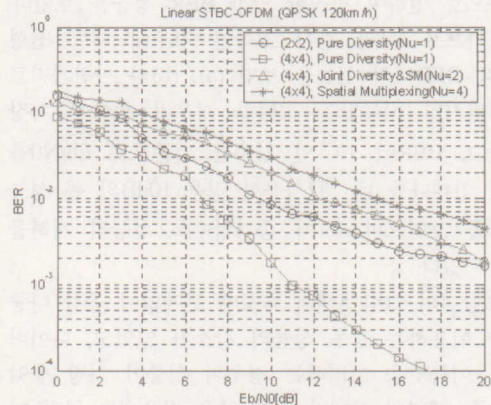
그림 5는 송·수신 안테나가 각각 두 개인 경우와 네 개인 경우의 선형 STBC-OFDM의 BER 성능을 속도에 따라 모의 실험한 결과 그래프이다.



(a) 3km/h에서 선형 STBC-OFDM의 BER 성능



(b) 60km/h에서 선형 STBC-OFDM의 BER 성능



(c) 120km/h에서 선형 STBC-OFDM의 BER 성능

그림 5 선형 STBC-OFDM의 BER 성능

이미 그림 4에서 송·수신 안테나가 두 개인 경우의 BER 성능은 확인하였고 네 개로 증가하였을 때의 성능 향상 및 $N_U=2$ 와 같이 공간 다중화와 다이버시티를 같이 사용할 때의 BER 성능을 그림 5에서 확인할 수 있다. (a)와 같이 저속인 경우 BER이 10^{-3} 인 경우를 기준으로 E_b/N_0 를 보면 안테나를 네 개 사용한 경우 12.5dB, 안테나 두 개를 사용한 경우에는 9dB로 안테나를 네 개 사용한 경우에 3.5dB의 성능 향상을 가져왔고, N_U 가 증가할수록 성능의 저하를 볼 수 있다. 그러나 N_U 가 클수록 데이터 전송 율을 향상시킬 수 있기 때문에 다이버시티 이득과 향상된 데이터 전송 율을 원하는 경우 $N_U=2$ 가 효과적이다. (b) 또한 (a)와 마찬가지로 네 개의 송·수신 안테나에서 다이버시티 이득만을 고려한 경우의 성능이 가장 좋았고, N_U 가 증가할수록 성능의 저하가 있었다. BER이 10^{-3} 인

경우를 기준으로 E_b/N_0 를 보면 안테나를 네 개 사용한 경우 6dB의 성능 향상을 가져왔다. 또한 $N_U=2$ 인 경우 SNR이 증가할수록 BER이 감소하고 있고, 안테나 두 개를 사용하고 $N_U=1$ 인 경우와 비교할 때 SNR이 증가할수록 BER 폭이 점점 줄어들고 있다. 그러므로 안테나 두 개를 사용한 경우의 $N_U=1$ 일 때가 안테나 네 개를 사용하고 $N_U=2$ 인 경우보다 성능이 우수하지만 SNR이 증가할수록 안테나 두 개를 사용하여 $N_U=1$ 인 경우의 BER 성능에 점점 근접해 감을 확인 할 수 있었다. $N_U=2$ 인 경우는 데이터 전송 율의 향상뿐만 아니라 다이버시티 이득으로 인하여 만족할 만한 BER 성능을 보인다. 마지막으로 (c)와 같이 고속인 경우에 대한 선형 STBC-OFDM의 성능을 보면 (a), (b)와 마찬가지로 다이버시티 이득만을 고려한 경우의 성능이 가장 좋았고, BER이 10^{-3} 인 경우를 기준으로 E_b/N_0 를 보면 안테나를 네 개 사용한 경우 10dB의 큰 성능 향상을 보였으며 N_U 가 증가할수록 성능의 저하를 볼 수 있다.

그림 4와 그림 5에서 속도에 관계없이 공간 다중화를 이용하는 경우 성능의 감소가 있었고, 다이버시티 이득만을 고려하는 경우의 성능이 가장 좋았다. 즉, 채널의 상태가 좋지 않은 경우에는 공간 다중화만을 사용하는 경우보다는 공간 다중화와 다이버시티를 결합한 경우에 더 좋은 성능을 보이고, SNR이 증가할수록 그 차이를 명확히 확인할 수 있다. 또한 안테나의 수가 증가할수록 좋은 성능을 보이는데, STBC-OFDM의 경우 송·수신 안테나를 두 개 사용하는 경우와 네 개 사용하는 경우 복잡도가 크게 증가한다. 반면에 선형 STBC-OFDM은 2장에서 선형 STBC의 코드 구성을 설명한 것처럼 안테나의 수가 증가함에 따라서 Outer Coder와 Inner Coder의 열을 추가하거나 삭제하여 간단히 코드를 구성할 수 있다. 따라서 안테나의 수를 증가한 경우 STBC-OFDM보다 송·수신 단의 복잡도가 상당히 감소한다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 MIMO-OFDM 시스템과 선형 시·공간 블록 코드를 결합하여 다이버시티와 공간 다중화를 통한 BER 성능을 확인하였다.

선형 시공간 블록 코드를 MIMO-OFDM과 결합

하여 시간, 공간, 주파수 다이버시티 이득을 가져왔고, N_U 의 수와 속도에 따른 성능을 보였다.

송·수신 안테나가 두 개인 경우의 STBC-OFDM과 선형 STBC-OFDM의 성능을 비교하였는데, 저속인 경우에는 본 논문에서 제안한 선형 STBC-OFDM 시스템이 좋은 성능을 보였고, 고속에서는 비슷한 성능을 보였다. 그러나 선형 STBC-OFDM은 안테나의 수가 증가할수록 코드의 구성이 간단하게 이루어지고 선형성으로 인하여 디코딩이 쉽기 때문에 STBC-OFDM 보다 송·수신 단의 복잡도가 작다는 장점이 있다.

모의 실험을 통해서 안테나 수의 증가에 따른 선형 STBC-OFDM의 성능을 확인하였는데, N_U 가 작을수록 좋은 성능을 보였으며 $N_U=1$ 인 경우에는 가장 좋은 성능을 보였다. 또한 저속과 고속 모두에서 SNR이 증가할수록 성능도 향상되었다. 그러나 공간 다중화를 이용하는 경우에는 고속일 때는 다이버시티 이득의 효과를 거의 보지 못하였고, 저속인 경우에 다이버시티 이득의 효과를 더 많이 얻었다. 그리고 속도에 관계없이 다중화와 다이버시티를 공동으로 이용하는 경우에는 데이터 전송 율을 향상시키면서 좋은 성능을 보였다. 또한 N_U 가 증가할수록 데이터 전송 율을 향상시킬 수 있지만 SNR이 증가함에 따라서 성능의 향상은 기대하기 어려웠다. 120km/h와 같이 고속인 경우에는 높은 데이터 전송 율을 얻기 위해 다중화만을 이용하게 되면 성능의 저하가 크므로 데이터 전송 율을 향상시키기 위해서는 공간 다중화와 다이버시티를 공동으로 사용하는 것이 좋으며, 링크의 신뢰도 개선을 위해서는 다이버시티를 이용하는 것이 효과적이다. 물론 이것은 저속인 경우에도 마찬가지이며, 고속일 때 보다 낮은 SNR에서 좋은 성능과 좀더 향상된 데이터 전송 율을 가진다. 이것은 매우 효율적인 방법으로 다이버시티를 통한 링크의 신뢰도 개선과 데이터 전송 율의 향상을 가져왔다. 즉, 채널의 상태가 좋지 않은 경우에는 공간 다중화만을 사용하는 경우보다는 공간 다중화와 다이버시티를 결합한 경우에 더 좋은 성능을 보이고, SNR이 증가할수록 그 차이를 명확히 확인할 수 있다.

선형 시·공간 블록 코드는 안테나 수에 따른 코드 구성이 간단하기 때문에 안테나 수가 많을수록 공간 다중화와 다이버시티에 대한 효과적인 성능 개선 및 데이터 전송 율의 향상을 제공할 것이다.

참고 문헌

[1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.

[2] Armin Wittneben and Mark Kuhn, "A new concatenated linear high rate space-time block code," in *Proc. 55th IEEE Veh. Tech. Conf.*, May 6~9, 2002, vol. 1, pp. 289-293.

[3] S.M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[4] FOSCHINI, G.J., and GANS, M.J.: "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wirel. Pers. Commun.*, 1998, 6, (3), pp. 311335.

[5] H. Bolcskei, D. Gesbert, and A. J. Paulraj, "On the capacity of OFDM based spatial multiplexing systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 225-234, Feb. 2002.

[6] M. Kuhn and A. Wittneben, "A new scalable decoder for linear block codes with intersymbol interference," in *Proc. 55th IEEE Veh. Tech. Conf.*, May 6-9, 2002, vol. 4, pp. 1795-1799.

[7] G. G. Raleigh and J. M. Ciof, "Spatio-temporal coding for wireless communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 3, pp. 357-366, 1998.

[8] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "High-rate codes that are linear in space and time," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 7, pp. 1804-1824, July 2002.

[9] L. Zheng and D. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels," Submitted to *IEEE Trans. on Inf. Theory*, 2002.

[10] B. Varadarajan and J. R. Barry, "The rate-diversity trade-off for linear space-time codes," in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.*, 2002, vol. 1, pp. 67 71.

이 해 정(Jeong-hae Lee)

준회원



2002년 2월 : 한성대학교
정보공학과 학사 졸업
2004년 2월 : 인하대학교
정보통신대학원 정보통신
공학과 석사 졸업

<주관심 분야> MIMO-OFDM,
GSM, 무선 랜

양 청 해(Qing-hai Yang)

준회원



1998년 2월 : 중국 Shandong
University of Technology 통
신공학과 학사 졸업
2001년 2월 : 중국 Xidian
University 통신 정보 시스
템 석사 졸업

2001년 3월 ~ 현재 : 인하대학
교 정보통신 대학원 정보통신 공학과 박사과정
<주관심 분야> MIMO-OFDM,, Beamforming,
SDMA, UWB

곽 경 섭(Kyung-sup Kwak)

정회원



1977년 2월 : 인하대학교 전기
공학과 학사 졸업
1979년 2월 : 인하대학교 전기
공학과 석사 졸업
1981년 12월 : 미국 University
of Southern California 전자
공학과 석사 졸업

1988년 2월 : 미국 University of Southern
California 통신 이론 및 시스템 박사
1988년 2월 ~ 1989년 2월 : 미국 Hughes
Network Systems 연구원
1989년 2월 ~ 3월 : 미국 IBM Network Analysis
Center 연구원
1995년 1월 ~ 12월 : IEEE Seoul Section 총무
이사
2000년 3월 ~ 2002년 2월 : 인하대학교 정보
통신 대학원 원장
2002년 1월 ~ 현재 : 한국 통신 학회 부회장
<주관심 분야> 위성 통신, 멀티미디어 통신, 이동
통신, UWB