

W-ZF 기법을 이용한 MIMO-FTN 송수신 구조 연구

서정현 · 정지원*

MIMO-FTN Transceiver Structure Using W-ZF Method

Jung-hyun Seo · Ji-won Jung*

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

본 논문에서는 무선 통신에서의 높은 전송률과 신뢰도 있는 무선 통신 방안 중 터보 부호를 이용한 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 통신 기법과 FTN(Faster Than Nyquist) 기법을 접목시켜 전송률을 향상시키며 신뢰성을 높일 수 있는 복호 방법을 제안한다. 기존의 계층적 시공간 부호화 기반의 MIMO-FTN(Multiple Input Multiple Output-Faster Than Nyquist) 기법은 FTN으로 인한 인접 심볼 간섭을 제거하기 위한 시공간 부호화 방식의 적용으로 전송률의 손해를 초래한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 ZF(Zero Forcing) 기법을 이용한 MIMO-FTN 기법에서 ZF 기법의 단점을 보완한 W-ZF(Weighted-Zero Forcing)을 이용한 방식을 제안한다. 본 논문에서는, 시뮬레이션을 통해 계층적 시공간 부호화 기반의 MIMO-FTN 기법과, W-ZF를 적용한 MIMO-FTN 기법, SISO-FTN 기법에서 FTN의 간섭량에 따른 성능과 전송률을 비교 하였다. 그 결과 W-ZF 기법을 적용한 MIMO-FTN 기법이 다른 두 기법보다 전송률에서 2배 더 좋은 것을 확인할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a decoding method that improves the transmission rate and reliability by integrating MIMO(Multiple Input Multiple Output) communication scheme using turbo code and FTN(Faster Than Nyquist) scheme among high rate and high reliability wireless communication schemes in wireless communication. The existing MIMO-FTN(Multiple Input Multiple Output-Faster Than Nyquist) scheme based on hierarchical space-time coded method induced data rate loss due to the application of the space-time trellis coding scheme to remove adjacent symbol interference due to FTN scheme. To solve these problems, this paper proposes a method using W-ZF(Weighted-Zero Forcing) which overcomes the disadvantages of ZF(Zero Forcing) scheme in MIMO-FTN scheme using ZF scheme. In this paper, we compared the performance and the transmission rate of the MIMO-FTN scheme based on the hierarchical space-time coding, the MIMO-FTN scheme using W-ZF and the SISO-FTN scheme. As a result, the MIMO-FTN scheme using the W-ZF scheme is two times better than the other two schemes.

키워드 : MIMO, FTN, MIMO-FTN, ZF, W-ZF

Key word : Multiple Input Multiple Output, Faster Than Nyquist, MIMO-FTN, Zero Forcing, Weighted-Zero Forcing

Received 07 March 2017, Revised 08 March 2017, Accepted 24 April 2017

* Corresponding Author Ji-won Jung(E-mail:jwjung@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4425)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.7.1291>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

차세대 무선 통신에서는 제한적인 대역폭에서 전송률 향상과 성능 향상을 할 수 있는 방식을 개발하는 것이 중요하다. 그러나 전송률 향상과 성능 향상의 관계는 trade-off의 관계에 있기 때문에, 전송률과 성능을 모두 향상시키기에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 성능을 최대한 유지하면서 전송률을 증가시키는 방식을 개발하는 것이 중요하다.

MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술은 스펙트럼의 효율성을 높이고 다이버시티 및 부호화 이득을 동시에 얻으며 빠른 전송 효율을 보이는 대표적 기술이며[1], 기존의 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안보다는 Nyquist 전송률보다 더 빠르게 전송하는 FTN(Faster Than Nyquist) 방식[2,3]을 이용한 방안이 차세대 무선통신의 표준안으로 대두되고 있다[4]. 전송률 향상을 위해서 MIMO 기법과 FTN 기법이 결합된 MIMO-FTN 전송 기법[5]은 MIMO 통신에서 구현의 복잡도 및 채널 부호화와의 결합에 비해 성능이 만족스럽지 않아 각종 표준안에서는 후보군으로만 분류하고 실제로는 적용이 어려운 실정이다. FTN 기법 적용 또한 Nyquist율 보다 빠르게 전송하여 전송률 향상에는 만족하나 상호 신호간의 간섭(Inter-Symbol Interference) 간섭 제거 기술을 포함한 수신부에서 만족할 만한 성능이 제시되지 못하고 있다. 이러한 두 개의 기술을 결합하면 높은 전송률을 만족하나 이에 따른 성능이 보장되지 못해 이에 대한 연구는 미비한 실정이다. 전 세계적으로 아직 기술 검증 중에 있는 초기 단계라 할 수 있으며, MIMO와 FTN의 결합 기술은 아직 표준안에 제시되지 못하고 있다.

참고문헌 [6]에서는 FTN으로 인한 간섭을 제거하고 각 송신 안테나에서 전송되는 신호를 분리하기 위해 시공간 부호화 방식을 적용하였으나 이는 시공간 부호화 시 전송률의 손해를 초래하므로 본 논문에서는 시공간 부호화 방식 대신 채널 매트릭스의 역을 곱하여 송신된 신호를 정확히 검출하는 기법인 ZF(Zero Forcing) 기법 기반의 W-ZF(Weighted - Zero Forcing) 기법을 적용하였다.

본 논문에서는 제안하는 W-ZF 방식 기반의 MIMO-FTN 구조를 SISO-FTN 및 논문[6]에서의 결과와 성능 및 전송률을 비교하였다.

II. 무선통신에서 전송률 향상을 위한 기법

차세대 무선 통신에서는 데이터 전송률에 대한 요구가 지속적으로 증가하는 반면, 대역폭이 제한적이기 때문에 전송률을 높이기 위한 많은 방안들에 대한 연구가 진행 중에 있다. 이러한 방안 중 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하여 전송률을 향상시키는 기법인 FTN 기법, 2개 이상의 송수신 안테나를 사용하여 전송률을 높이는 MIMO 기법, 마지막으로 FTN 기법과 MIMO 기법을 연접하여 전송률을 극대화 시키는 MIMO-FTN 기법을 소개한다[6].

2.1. FTN 기법

FTN 전송방식은 주파수 대역에서 주어지는 Nyquist 속도 보다 빠르게 신호를 전송할 수 있으나 필연적으로 ISI가 발생하고 이로 인하여 송신 심볼 간 간섭이 발생한다. 간섭된 신호의 형태는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sqrt{E_s} \sum_n a_n h(t - n\tau T), \tau < 1 \quad (1)$$

이 때 E_s 는 심볼 에너지, a_n 은 M-ary 값, h 는 FTN 전송기법으로 인한 다중경로 전달함수를 의미한다. 그리고 심볼 시간은 τT 이고 τ 는 FTN으로 인해 Nyquist 속도 보다 얼마만큼 빠르게 보내는 간섭 시점을 나타낸다. 예를 들어 τ 가 1일 때는 기존의 Nyquist 속도와 동일하게 전송하는 것을 의미하며, 이의 간섭비율은 0%이다. 간섭비율 τ' 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau'(\%) = 100 \times (1 - \tau) \quad (2)$$

간섭비율은 다르게 정의하면 τ' 만큼의 전송률 향상을 의미한다. 주기 T 에 할당된 샘플수 N_s 에서 간섭되는 샘플수 τ_{N_s} 와 τ 의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\tau_{N_s} = N_s(1 - \tau) \quad (3)$$

만일 τ' 가 20%라면 τ 는 0.8이므로 비트당 샘플 수 N_s 가 100비트라고 가정할 때, τ_{N_s} 는 20비트가 인접 비트의 간섭을 일으키게 된다.

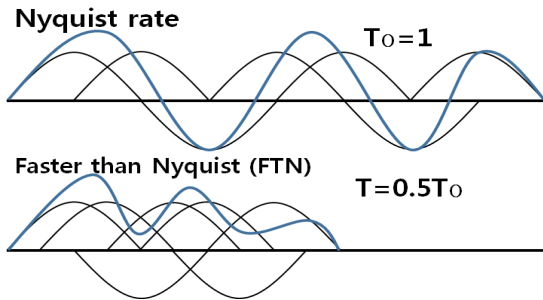


Fig. 1 FTN signal modeling

그림 1에서 T_0 경우에는 Nyquist 속도에 따라 전송되므로 ISI가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 $T=0.5T_0$ 경우에는 FTN 으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 결정 시점마다 데이터에 영향을 주므로 간섭으로 인한 파형의 변화를 있음을 알 수 있다. ISI로 인해 신호의 파형이 왜곡되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 전송률을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.2. MIMO 기법

MIMO 기법은 다중의 입출력이 가능한 시스템을 말한다. 따라서 사용된 안테나 수에 비례하여 전송률과 채널용량을 높일 수 있다. MIMO는 여러 개의 안테나를 동시에 동작하여 고속의 데이터 교환을 가능하게 한다. N 개의 송신 안테나에 동일시간에 동일 주파수를 사용하여 독립적인 신호를 전송한다. 이렇게 송신된 신호들은 무선채널 상에서 rayleigh fading을 겪게 되어 각 안테나로 수신되는 신호는 서로 독립성을 유지하게 된다. 송신 안테나마다 다른 신호를 송신함으로써, 기존보다 송신 안테나 수(N 개)만큼 더 많은 데이터를 송신

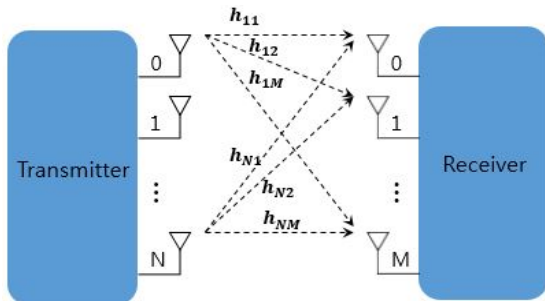


Fig. 2 The block diagram of general MIMO system

할 수 있는 것이다. 그림 2는 일반적인 MIMO 시스템 블록도이다.

이때 수신된 신호는 식 (4)와 같다.

$$r_j(k) = \sum_{i=0}^{N-1} h_{ij}(k) * x_i(k) + \eta_j(k), \quad (j=0, \dots, M) \quad (4)$$

r_j 는 j 번째 수신안테나의 수신신호, x_i 는 i 번째 송신 안테나의 송신신호, η_j 는 j 번째 수신안테나의 가우시안 잡음이며, h_{ij} 는 i 번째 송신안테나에서 j 번째 수신안테나에 대한 채널 임펄스 응답이다. 송신신호는 각각의 독립된 채널 h_{ij} 와 convolution되어 잡음이 더해지게 된다. 수신신호는 식 (5), (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}, \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \dots & h_{N1} \\ h_{12} & h_{22} & \dots & h_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1M} & h_{2M} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (7)$$

예를 들어 송수신 안테나가 각각 두 개인 MIMO 시스템에서의 수신신호는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= h_{11} \times x_1 + h_{21} \times x_2 + \eta_1 \\ r_2 &= h_{12} \times x_1 + h_{22} \times x_2 + \eta_2 \end{aligned} \quad (8)$$

이를 행렬 형태로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3. MIMO-FTN 연접 기법

2.1절과 2.2절에서 설명한 전송률을 높이는 MIMO와 FTN의 두 기법을 연접하여 전송률을 더욱 극대화하는 MIMO-FTN 기법이다. 만약 송수신 안테나의 개수를 (N, M)라 할 때 송수신 안테나의 개수가 각각 한 개

이고 $\tau=1$ 일 경우의 전송률 $R=1$ 이라 하면 전송률 R 은 아래의 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{(N,M)}{1-\tau}, (0 \leq \tau < 1) \quad (10)$$

표 1은 식 (10)에서 송수신안테나 개수가 각각 한 개와 두 개일 때 간섭량 τ 가 0.0~0.5일 때의 전송률 R 을 나타낸 것이다.

Table. 1 Transmission rate according to (N,M) and τ

Transmitting / receiving antenna count (N,M)	Interference amount τ	Transmission rate R
(1,1)	0.0	1.0
	0.1	1.11
	0.2	1.25
	0.3	1.42
	0.4	1.67
	0.5	2.0
(2,2)	0.0	2.0
	0.1	2.22
	0.2	2.5
	0.3	2.85
	0.4	3.33
	0.5	4.0

FTN 기법을 적용하지 않고 송수신 안테나가 각각 한 개인 일반적인 SISO 시스템 전송률 R 을 1이라 가정한다. 여기서 간섭량 τ 가 증가할 때마다 전송률 R 이 증가하는 것을 볼 수 있으며, $\tau=0.5$ 일 때 전송률이 2배 증가하는 것을 보였다. 또한 FTN 기법 적용전의 송수신 안테나 개수가 각각 두 개가 될 경우 MIMO 시스템이 되고 전송률은 SISO 시스템보다 2배가 증가한 것을 볼 수 있다. 만약 송수신 안테나의 수가 세 개, 네 개로 더욱 많아질 경우 전송률은 그에 배수로 증가할 것이다. 하지만 MIMO-FTN은 ISI로 인해 왜곡된 송신신호를 rayleigh fading 채널에서 곱해진 채널 매트릭스로부터 신호를 검출하기에 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 MIMO-FTN의 최적의 송수신 기법을 제안하고 시뮬레이션 결과를 비교 분석한다.

III. W-ZF 방식을 적용한 MIMO-FTN 복호 구조

기존의 LDPC 부호를 이용한 MIMO-FTN 연구는 진행되어왔으나[7], 그림 3에서와 같이 FTN 기법을 첨가하여 터보 ϕ 부호[8]와 W-ZF 기법으로 MIMO 신호를 검출하는 구조이다. 터보 ϕ 부호화를 거친 비트 스트림은 인터리버 후에 FTN mapper에 입력되어진 후 QPSK mapping이 이루어지게 되는 구조이다. 송신된 신호는 rayleigh fading 채널을 통과하여 수신된다. 각각의 채널은 독립적이며 수신단에서 알고 있다고 가정하였다. 수신신호는 W-ZF단계를 거쳐 채널 매트릭스로부터 송신신호를 검출해낸다. 기존의 ZF단계에서 최종적으로 송신신호를 검출하는 방식은 강판정, 연판정 방식과, 제안한 방식에서 W-ZF단계를 통해 가중치를 곱해 구하는 방식이 있다.

Pseudo-inverse의 성질을 이용한 ZF 기법은 수신된 신호에 채널 매트릭스의 pseudo-inverse을 곱함으로써, 송신된 신호를 정확히 검출하는 방법을 말한다. N 개의 송신 안테나와 M 개의 수신 안테나를 가지는 MIMO 시스템은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

식 (7)에서 \mathbf{x} 는 N 개의 송신 안테나에서 송신한 신호이고, \mathbf{r} 과 \mathbf{n} 은 M 개의 수신안테나에서 수신된 신호와 잡음 신호다. \mathbf{H} 는 식(6)과 같은 $N \times M$ 채널 행렬이다. 만약 채널 상태 정보가 완전하다고 가정한다면, 송신된 데이터 심볼 벡터의 ZF는 아래 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}' = \mathbf{G}(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}) \quad (11)$$

$\mathbf{G} = \mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H$ 이며, \dagger 은 pseudo-inverse를 나타낸다. \mathbf{H}^\dagger 는 아래 식 (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}^\dagger = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{21} & \dots & h'_{N1} \\ h'_{12} & h'_{22} & \dots & h'_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h'_{1M} & h'_{2M} & \dots & h'_{NM} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(11)를 계산하면 아래의 식(13)와 같다[9].

$$\mathbf{r}' = \mathbf{x} + \mathbf{n}' \quad (13)$$

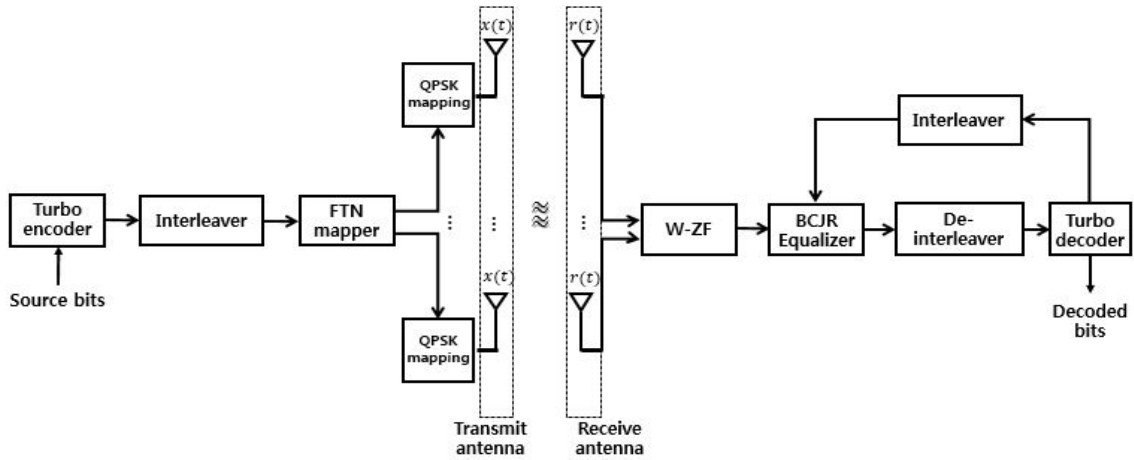


Fig. 3 The structure of W-ZF model for MIMO-FTN

수신신호 \mathbf{r} '는 원 송신신호 \mathbf{x} 와 잡음 \mathbf{n} 에 pseudo-inverse \mathbf{H}^\dagger 이 곱해진 \mathbf{n}' 의 합으로 이루어져 있다. 만약 잡음 \mathbf{n} 이 없었다면 수신신호에서 완벽히 송신신호 \mathbf{x} 를 복원 할 수 있을 것이다. 하지만 pseudo-inverse \mathbf{H}^\dagger 이 곱해져 변화된 잡음 \mathbf{n}' 의 값으로 인해 성능이 저하된다. 따라서 ZF 단계에서 변화된 잡음 \mathbf{n}' 의 분산 값을 보정해 주기 위한 가중치 값을 참고문헌[10]을 참고하여 구한다. 가중치는 식 (14)와 같이 pseudo-inverse \mathbf{H}^\dagger 의 항으로 이루어져 있다.

$$\alpha_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^M |h'_{ij}|^2}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

가중치 값 α_i 을 ZF 출력 값에 곱해줌으로써 ZF단계에서 잡음으로 인해 크게 변화된 신호를 보상해준다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시한 구조의 효율성을 분석하기 위해 논문 [6]에서 제시한 SISO-FTN 방식, 계층적 시공간 부호화 기반의 MIMO-FTN 및 제안하는 W-ZF 기반의 MIMO-FTN 방식을 표 2와 같은 시뮬레이션 파라미터를 적용하여 성능 및 전송 효율을 분석하였다. 송수신 안테나의 수는 각각 2개로 고정하였으며, SISO, MIMO

시스템 모두 AWGN(Additive White Gaussian Noise)과 rayleigh fading 채널 환경이 모두 존재하며 각각의 채널은 독립적이며 수신단에서 알고 있다고 가정하였다.

Table. 2 Simulation parameters

SISO channel coding	Turbo codes with 16 states
MIMO channel coding	Inner code : Turbo codes with 16 states Outer code : STTC with 32 states
Channel (SISO, MIMO)	AWGN + Rayleigh fading
Coding rate	1 / 2 (K = 1504)
τ'	0%, 10%, 20%, 30%, 40%
Modulation	QPSK
Iteration	5

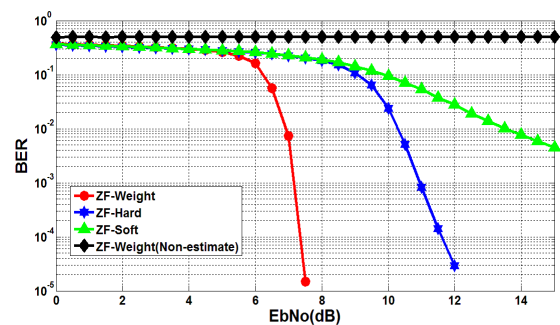


Fig. 4 The performance MIMO-FTN based on ZF according to three method ($\tau' = 0\%$)

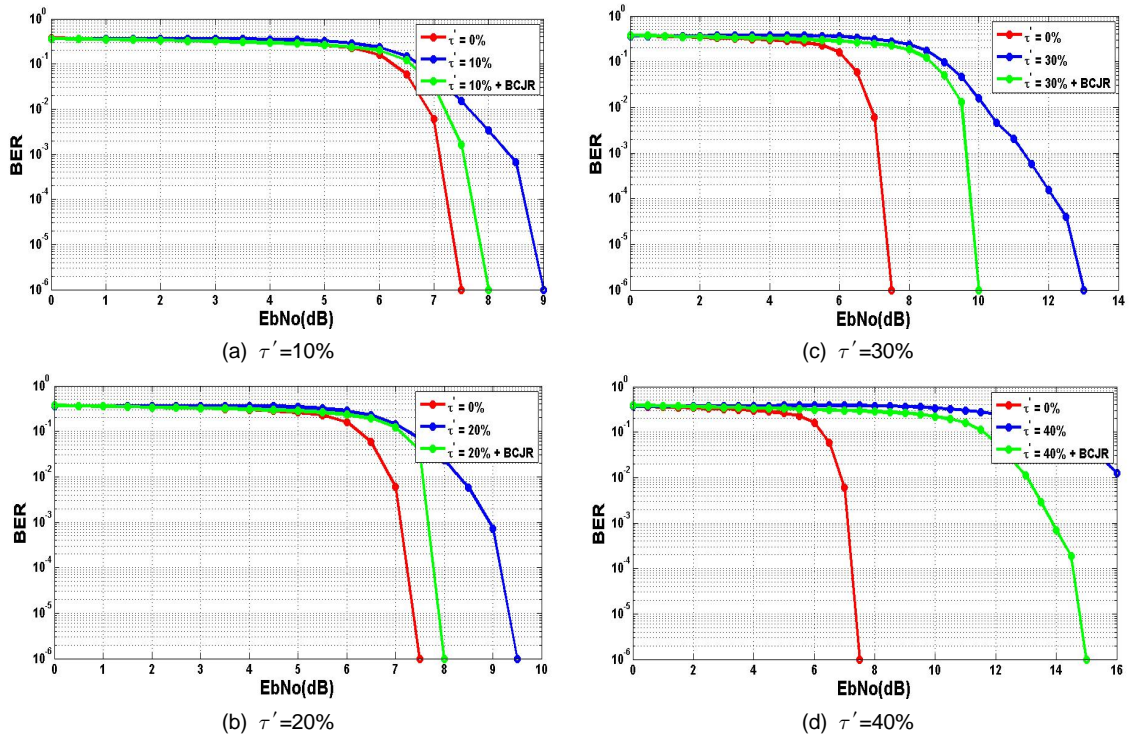


Fig. 5 The performance of MIMO-FTN signaling according to τ'

그림 4는 ZF 기반의 MIMO-FTN의 신호 검출 방식에 따른 성능을 나타내었다. 신호 검출 방식에 따른 성능만을 비교 분석하기 위해 $\tau'=0\%$ 로 가정하였고, 이는 FTN 기법이 적용 되지 않음을 나타낸다. ZF 기반의 MIMO-FTN의 신호 검출 방식은 강판정(hard), 연판정(soft) 방식과 식 (14)를 통해 구한 가중치(weight)를 적용한 W-ZF 방식이 있다. W-ZF를 적용한 방식이 가장 좋은 성능을 보였고 그 뒤로 강판정, 연판정의 순으로 결과가 나타났다. 일반적으로 강판정된 방식보다 연판정된 방식의 성능이 더 뛰어나지만 pseudo-inverse를 곱하는 ZF 단계에서는 변화된 잡음의 값이 매우 크게 작용하므로 오히려 강판정된 방식의 성능이 좋게 나타난 것을 볼 수 있었다. 이에 변화된 잡음으로 인해 복호하기 어려운 연판정 값에 가중치 α_i 를 곱해줌으로써 왜곡된 신호를 보상해준다. 그림 4에서 W-ZF를 하였더라도 각각의 독립된 채널을 수신단에서 알고 있지 못한 경우 채널 매트릭스의 pseudo-inverse를 정확히 구할 수 없어 복호가 불가능함을 알 수 있다.

그림 5는 MIMO-FTN 시스템에서 FTN으로 인해 발생한 인접 심볼 간의 간섭을 제거하기 위해 BCJR 등화기[11]를 적용하여 τ' 에 따른 성능을 나타내었다. BCJR 등화기를 적용하였을 때 BCJR 등화기가 없을 때보다 성능이 우수하며, 이는 FTN으로 인한 ISI의 값을 제거하여 성능을 향상시켰음을 의미한다. τ' 의 값이 증가하면 ISI의 양 또한 증가함에 따라 복호에 어려움이 발생한다. BCJR 등화기의 유무에 따른 $BER=10^{-5}$ 에서의 성능적인 측면에서 보면 $\tau'=10\%$ 일 때는 BCJR 등화기의 영향을 많이 받지 않으나, $\tau'=20\%$ 일 때는 BCJR 등화기가 유무에 따라 약 1.5dB, $\tau'=30\%$ 일 때는 약 3dB 이상의 성능차이가 나며 $\tau'=30\%$ 이상으로 τ' 값이 증가할수록 성능차이가 더 많이 날것이다.

표 3은 SISO-FTN과 MIMO-FTN의 τ' 에 따른 $BER=10^{-5}$ 기준에서의 SNR 성능과 전송률 R 을 나타낸 것이다. 표 3에서 MIMO-FTN(STTC)는 참고문헌 [6]의 결과이다.

Table. 3 Performance comparisons between SISO-FTN and MIMO-FTN

	Interference amount τ'	Transmission rate R	SNR[dB] (BER= 10^{-5})
SISO-FTN	0%	1.0	6.2
	10%	1.11	6.4
	20%	1.25	7.0
	30%	1.42	8.5
	40%	1.67	13
MIMO-FTN (STTC)	0%	1.0	9.0
	10%	1.11	9.5
	20%	1.25	10.5
	30%	1.42	16.5
	40%	1.67	-
MIMO-FTN (W-ZF)	0%	2.0	7.5
	10%	2.22	7.7
	20%	2.5	8.0
	30%	2.85	10.0
	40%	3.33	15.0

표 3에서 SISO 시스템에서 FTN 기법을 적용하지 않았을 때의 전송률을 1.0 이라 가정한다. 두 개의 송수신 안테나를 가진 MIMO-FTN은 이론적으로 SISO-FTN보다 2배의 전송률 향상을 가진다. 하지만 표 3에서와 같이 STTC기법을 적용한 MIMO-FTN은 두 개의 송수신 안테나를 가진 MIMO 시스템이지만 SISO-FTN과 전송률이 같다. 일반적인 MIMO 시스템과 다르게 STTC 기법은 부호기에서 입력 2-bit, 출력 4-bit로 입출력의 bit 수가 2배가 되기 때문에 다중 안테나를 사용하지만 전혀 전송률 향상 효과가 없으며 전송률은 SISO 시스템과 동일하다. 그에 비해 W-ZF 기법을 적용한 MIMO-FTN은 SISO-FTN에 비해 2배의 전송률을 가지는 것을 볼 수 있고 SNR 관점의 BER 성능에서도 W-ZF 기법이 STTC 기법에 비해 더 좋은 성능을 보였다.

SISO 시스템에서 $\tau'=0\%$ 와 $\tau'=20\%$ 일 때 BER= 10^{-5} 기준으로 각각 약 6.2[dB], 7.0[dB]의 성능을 보인다. STTC 기법을 적용한 MIMO 시스템에서 $\tau'=0\%$ 와 $\tau'=20\%$ 는 BER= 10^{-5} 기준으로 약 9.0[dB], 10.5[dB]의 성능을 보이며, W-ZF 기법을 적용한 MIMO 시스템에서 $\tau'=0\%$ 와 $\tau'=20\%$ 는 BER= 10^{-5} 기준으로 약 7.5[dB], 8.0[dB]의 성능을 보인다. SISO-FTN은 W-ZF기법의 MIMO-FTN보다 $\tau'=0\%$ 와 $\tau'=20\%$ 에서 각각 약

1.3[dB], 1.0[dB]의 성능 차이를 보이고, STTC 기법의 MIMO-FTN보다 $\tau'=0\%$ 와 $\tau'=20\%$ 에서 각각 약 2.8[dB], 3.5[dB]의 성능 차이를 보여 SISO-FTN의 성능이 더 좋지만, 전송률 향상의 관점에서 볼 때 W-ZF 기법의 MIMO-FTN이 전송률에서 다른 두 방식보다 2배 증가하였다. 따라서 시스템적인 측면에서 성능적인 측면과 전송률적인 측면은 어느 것이 중요하나에 따라 전송방식 선택이 주어질 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 전송률을 향상시키는 여러 가지 방법 중 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하여 전송률을 향상시키는 기법인 FTN과 2개 이상의 송수신 안테나를 사용하여 전송률을 높이는 MIMO기법을 연결하는 MIMO-FTN 송수신구조의 여러 가지의 기법들 중 STTC, W-ZF기법과 SISO-FTN의 시뮬레이션 결과들을 비교하였다.

시뮬레이션 결과 SISO-FTN이 BER 10^{-5} 에서 $\tau'=0\%$ 일 때 MIMO-FTN의 STTC 기법과 W-ZF 기법보다 성능 면에서는 각각 2.8dB, 1.3dB의 성능 차이를 보이고 $\tau'=30\%$ 에서는 각각 8.0dB, 1.5dB의 성능 차이가 보인다. W-ZF 기법의 MIMO-FTN은 STTC 기법의 MIMO-FTN보다 BER 10^{-5} 에서 $\tau'=0\%$ 일 때 1.5dB, $\tau'=30\%$ 일 때 6.5dB의 성능차이를 보인다. 전송률 측면에서 MIMO-FTN의 W-ZF 기법이 SISO-FTN과 STTC기법의 MIMO-FTN보다 전송률이 약 2배씩 증가하여 전송률 측면에서는 SISO-FTN이나 STTC 기법의 MIMO-FTN보다 뛰어난 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF - 2015R1D1A1A010 60931).

REFERENCES

[1] S. H. Lim, K. S. Kim, and J. W. Choi, "Detection techniques for high deimensional spatial muliplexing MIMO system," *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 39A, no. 7, pp. 413-423, Jul. 2014.

[2] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," *The Bell System Technical Journal*, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, Oct. 1975.

[3] J. B. Anderson, F. Rusek, V. Owall, "Faster than Nyquist signaling," *Proceeding of the IEEE*, vol. 101, no. 8, pp. 1817-1830, Aug. 2013.

[4] M. El Hefnawy, and H. Taoka, "Overview of Faster-Than-Nyquist for Future Mobile Communication Systems," in *Proceeding 77th IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.

[5] M. Yuhas, Y. Feng, and J. Bajcsy, "On the Capacity of Faster-than-Nyquist MIMO Transmission with CSI at the Receiver," *IEEE Globecom Workshops*, pp. 1-6, Dec. 2015.

[6] G. W. Park and J. W. Jung, "A Study of MIMO FTN Scheme based on Layered Space Time Code using Turbo Code," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 895-901, May 2016.

[7] C. U. Baek and J. W. Jung, "A Study on LDPC Coded MIMO-FTN Transmission Method," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 7, (in press), Jul. 2017.

[8] C. Douillard and C. Berrou, "Turbo codes with rate- $m/(m+1)$ constituent convolutional codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 10, pp. 1630-1638, Oct. 2005.

[9] J. Lu and J. Li, "A soft detector with good performance/complexity trade-off for a MIMO system," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2004, no. 9, pp. 1266-1274, 2004.

[10] Y. M. Kim, P. P. Shang, and S. Y. Kim, "Estimation of soft deicion channel gain for coded MIMO system," *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 36, no. 6, pp. 577-586, Jun. 2011.

[11] L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-20, no. 2, pp. 284- 287, Mar. 1974.



서정현(Jung-Hyun Seo)

2017년 2월 : 한국해양대학교 전자공학과(공학사)
 2017년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자공학과 석사과정
 *관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변 · 복조 기술, 채널 코딩 등



정지원(Ji-Won Jung)

1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학박사)
 1991년 2월 ~ 1992년 2월 LG 정보통신연구소 연구원
 1995년 9월 ~ 1996년 8월 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
 1997년 3월 ~ 1998년 12월 한국전자통신연구원 초빙연구원
 1996년 9월 ~ 현재 한국해양대학교 전자공학과 정교수
 2001년 8월 ~ 2002년 8월 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)
 *관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변 · 복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등