

LDPC 부호화된 다중 안테나 Faster-Than Nyquist 전송 기법

백창욱*, 정지원°

A Study on LDPC Coded MIMO Faster-Than Nyquist Transmission

Chang-Uk Baek*, Ji-Won Jung°

요약

차세대 무선 통신에서는 다양한 서비스와 함께 빠른 전송 효율, 높은 신뢰도 있는 통신을 요구하고 있으므로, 본 논문에서는 전송률을 향상시키고 신뢰성을 높이는 방안 중 LDPC 부호를 이용한 MIMO 통신 기법과 FTN 기법을 통합시킨 MIMO-FTN 전송 기법에 대한 복호 방법을 제안한다. MIMO 채널에서 FTN 전송 기법의 적용으로 인한 인접 심벌간의 간섭을 제거하기 위해 BCJR 등화기를 적용하고, 시물레이션을 통해 계층적 시공간 부호화 기반의 MIMO-FTN 기법과 전송률 향상을 위해 weighted zero forcing을 이용한 MIMO-FTN 기법에서 FTN의 간섭량에 따른 성능을 비교 분석하였다.

Key Words : Multiple-Input Multiple-Output(MIMO), Low Density Parity Check(LDPC) code, Faster Than Nyquist(FTN), Layered Space Time code(LST), Zero-forcing

ABSTRACT

The next generation wireless communications require high transmission efficiency and high reliability to provide various services with subscribers. To satisfy these requirements, incorporated MIMO (Multiple Input Multiple Output) system with FTN (Faster Than Nyquist) techniques based on LDPC codes are studied in the paper. In receiver side, BCJR algorithm is used for eliminating interferences induced by FTN transmission.

Through the simulation results, based on MIMO-FTN transmission method, we compared the performance of layered space time codes with weighted zero forcing according to interference rate of FTN

I. 서론

차세대 무선 통신에서는 다양한 서비스와 함께 빠른 전송 효율 및 높은 신뢰도 있는 통신을 요구하고 있다. 따라서 높은 신뢰도와 함께 고속의 데이터 전송이 필요하기 때문에 스펙트럼의 효율성을 높이면서 다이버시티 및 부호화 이득을 향상시키기 위한 연구가 진행 중에 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위한 연구 방법은 높은 성능을 갖는 채널 부호화 기술이 있다. 또한, 다수의 송수신 안테나를 이용한 시공간 부

호화 기술 기반의 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 얻는 방법이 있다^[1,2]. 최근에는 시공간 부호화 기법과 반복 부호를 결합하는 계층적 시공간 부호화 기법이 대두되고 있다^[3]. 또한, 시공간 격자부호와 터보 및 LDPC(Low Density Parity Check) 부호기를 결합시키는 계층적 시공간 부호화 방식에 대한 연구도 진행되었다^[4,6].

DVB-S2(Digital Video Broadcasting) 기반 위성통신에서는 복호 속도를 개선시켜 전송률을 향상시키는

* 본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임(NRF-2015R1D1A1A01060931)

• First Author : Korea Maritime and Ocean University Dept. of Radio Communication Eng., cubaek@kmou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea Maritime and Ocean University Dept. of Radio Communication Eng., jwjung@kmou.ac.kr, 정회원
논문번호 : KICS2017-03-061, Received March 3, 2017; Revised May 16, 2017; Accepted June 5, 2017

방안은 이미 과포화 상태에 있다. 그러므로 기존의 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안 보다는 Nyquist 전송률 보다 더 빠르게 전송하는 FTN(Faster Than Nyquist) 방식^[7,8]을 이용한 방안이 차세대 DVB-S3 및 지상파 방송의 표준안인 FOBTV(Future of Broadcast Television)의 표준안으로 대두 되고 있다^[9].

따라서 전송률 향상을 위해서 MIMO 통신 기법과 FTN 기법이 결합된 MIMO-FTN 전송 기법^[10,11]은 전송률 향상을 극대화 시킬 수 있으나, 이에 대한 복호 방식 및 인접 심볼 간의 간섭을 제거하기 어려워 이에 대한 연구는 아직 미미한 단계이다. SISO-FTN에 대한 복호 모델로 BCJR 등화기, Remmaper, SIC(Successive Interference Cancellation) 기법 등이 연구되고 있지만, 이를 MIMO - FTN에 대한 복호 모델로 적용이 어렵다. 이에, 본 논문에서는 MIMO-FTN 전송 기법에 대한 효율적인 복호 방식으로 인접 채널간의 간섭을 제거하기 위해 계층적 시공간 부호화 방식을 적용하는 방안과 W-ZF (Weighted-Zero Forcing)을^[12] 적용하여 각 송신 안테나로부터 전송되는 신호를 분리하고, FTN으로 발생하는 간섭량을 BCJR 복호기를 통하여 제거하는 방안을 제안하며 이에 대한 성능을 분석하였다.

성능분석 결과 BER = 10⁻⁵에서 W-ZF 기반의 MIMO-FTN이 계층적 시공간 부호 기반보다 FTN으로 인한 간섭 비율이 0% 일 때 0.5dB, 20%인 경우 0.5dB, 30%의 경우 2dB 만큼 성능이 향상되었다. 또한, 간섭 비율이 40% 인 경우 계층적 시공간 부호 기반은 과도한 ISI(Inter-Symbol Interference)로 인해 데이터를 복호 할 수 없었지만, W-ZF 기반의 MIMO-FTN 모델은 9.5dB의 성능을 보였다.

II. FTN 신호 모델링

FTN 전송 방법은 주파수 대역에 의해 주어지는 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하는 방법이다. 예를 들어 정해진 시간동안 Nyquist 속도에 따라 전송하면 10⁴개의 데이터를 전송한다고 했을 때, FTN 방식을 사용하여 50%로 축소하면 동일한 시간동안 2 × 10⁴개의 데이터를 전송할 수 있다. 그로 인해 필연적으로 ISI가 발생하게 된다. 간섭된 신호의 전송신호 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[8].

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

여기서 $b(n)$ 은 n 시점에서 부호화된 비트열을 나타내며, $h(t - n\tau T)$ 는 저대역 필터 응답을 나타낸다. τ 는 FTN으로 인해 Nyquist 속도 보다 얼마만큼 빠르게 보내는 간섭 시점을 나타낸다.

그림 1에서 $\tau=1$ 인 경우에는 Nyquist 속도에 따라 전송되므로 ISI가 발생하지 않는다. 그러나, $\tau=0.8$ 경우에는 FTN 으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 결정 시점 마다 데이터에 영향을 주므로 간섭으로 인한 파형의 변화가 있음을 알 수 있다. 이러한 인접 심볼들의 간섭을 간섭비율 τ' 로 정의하면 τ' 만큼의 전송률 향상을 의미한다. 간섭비율 τ' 은 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

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

식 (2)에서 $\tau=0.8$ 이라면 $\tau' = 20\%$ 가 되므로, 20%만큼의 간섭이 발생하며 이는 20%의 전송률 향상을 의미한다. 본 논문에서 간섭비율 $\tau'(\%)$ 으로 나타낸 것은 기존 전송률 대비 얼마나 전송률이 향상되었는지를 평가하는 기준으로 사용하고 있기 때문이다. 또한, 본 논문에서는 비트당 샘플 수 N_s 개를 할당하였으며, 각 주기 T 에 할당된 N_s 에서 인접 비트와 간섭이 된 샘플수 τ_{N_s} 는 식 (3)과 같다.

$$\tau_{N_s} = N_s \times \frac{\tau'}{100} \quad (3)$$

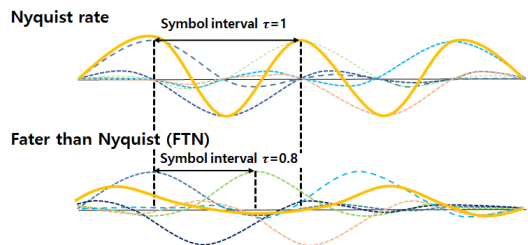


그림 1. FTN 신호 모델
Fig. 1. FTN modeling signal

III. LDPC 부호를 이용한 MIMO FTN 모델

3.1 계층적 시공간 부호 기반 MIMO FTN 전송 기법

최근의 통신 시스템에서 요구하는 사항들을 만족시키기 위해서는 N 개의 송신 안테나와 M 개의 수신안테나를 이용하여 다이버시티 이득을 가지는 시공간

부호와 함께 강력한 오류 정정률을 보이는 채널부호화 기법을 연결하여 전송하여야 한다. 또한, 전송률 향상을 위해서 MIMO 기법과 FTN 기법이 결합된 MIMO-FTN 전송 기법을 고려해야 한다.

그림 2는 LDPC 부호 기반의 MIMO-FTN 송수신단의 구조를 나타낸 것이다. 시공간 격자 부호 중 다이버시티 이득과 함께 부호화 이득을 동시에 가지는 Blum에 의해 제안된 32 상태의 시공간 격자 부호화 기법^[13]을 내부 부호로 하고, LDPC 부호를 외부 부호로 구성된 MIMO 시스템에서 전체 반복을 위해 symbol separation 블록과 symbol combine 블록이 더해진 계층적 시공간 부호 기반의 MIMO-FTN 시스템 구조이다. 시공간 부호기를 거친 부호어는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조 후 FTN mapper를 첨가시켜 변조된 신호를 τ 만큼 ISI에 의해 왜곡된 신호를 송신한다. 수신 신호는 BCJR 복호기와 LDPC 복호기 과정을 거친다. LDPC 복호기에서 계산된 출력 값을 다시 BCJR 복호기에 업데이트 시켜 주게 되고 이를 통해 성능이 향상된다. 기존의 BCJR 복호기와 LDPC 복호기의 전체 반복이 어려운 문제점을 해결하기 위해 논문 [5]에서는 symbol separation과 symbol combine을 통하여 전체 반복이 가능하게 하였다.

그림 2에서 전송하고자 하는 원 신호 비트열 \mathbf{D} 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_K\} \quad (4)$$

전송하고자 하는 원 신호 비트열은 K 의 크기를 가

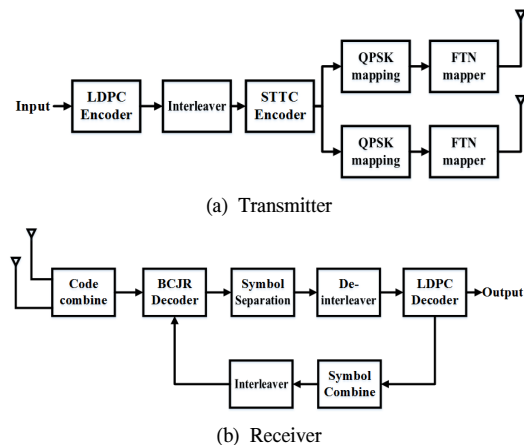


그림 2. LDPC 부호를 이용한 계층적 시공간 부호 기반의 MIMO-FTN 모델
Fig. 2. The structure of MIMO-FTN based on layered space time code using LDPC code.

지며, 먼저 반복 기반의 채널 부호화기(N, K)를 통하여 부호화되어진다. 반복 부호화 후 비트열 \mathbf{C} 는 식(5)와 같다.

$$\mathbf{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_N\} \quad (5)$$

N 은 부호화 된 비트의 길이를 나타낸다. 반복 부호화 후 비트열 \mathbf{C} 는 S/P(Serial / Parallel)를 통하여 두 비트씩 묶어 시공간 격자 부호화기로 입력된다. 각 송신 안테나에서 변조된 신호는 식 (6)과 같다.

$$S_i = \{s_1, s_2, \dots, s_l\} \quad (6)$$

여기에서 S_i 는 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 번째 송신 안테나에서의 전송 신호를 나타내며, l 은 변조 방식에 따라 값이 변한다. 예를 들어 변조 방식이 QPSK 인 경우 $l = \frac{N}{2}$ 이 된다. FTN mapper를 통해 τ 만큼 ISI에 의해 왜곡된 전송 신호는 식 (7)과 같다.

$$x_i(t) = \sqrt{E_s} \sum_n S_i(n) h(t - n\tau T) \quad (7)$$

$(\tau < 1, i = 1, \dots, N)$

이때 수신 신호는 식(8)과 같다.

$$r_j(t) = \sum_{i=1}^N h_{ij}(t) * x_i(t) + n_i(t) \quad (8)$$

$(j = 1, \dots, M)$

여기에서 r_j 는 j ($j = 1, 2, \dots, M$) 번째 수신 안테나에서의 수신 신호를 나타낸다. 레일레이 페이딩 채널을 통과한 수신 신호 r_j 는 M 개의 수신 안테나 수만큼 결합하여 평균값을 취하는 code combine 계산을 통하여 MIMO의 특성인 다이버시티 이득을 가지게 된다. Code combine 된 신호는 시공간 격자 부호기로 입력된다. 시공간 격자 부호기의 출력 값은 반복 부호기로 입력되는 구조이다. 이때 연결시키고자 하는 채널 부호화 기법과 함께 시공간 부호의 선택에 따라서 성능 차이를 보이게 된다. 따라서 본 논문에서는 다양한 통신시스템에서 사용되고, 차세대 DVB-S2 시스템에서 표준으로 채택되어 사용되고 있는 LDPC 부호를 이용한다. 또한 LDPC 부호와 연결시키기 위한 시공간 부호화 기법으로는 MIMO 기술의 특성인 다이버시티 이득과 함께 부호화 이득을 동시에 가지는 시공간 격

자 부호를 사용한다. 하지만 이러한 구조는 BCJR 복호기에서 강관정 된 출력 값을 LDPC 복호기에 입력 값으로 사용하게 되고 시공간 격자 부호와 LDPC 부호는 개별적인 반복만 가능하게 되어 그 성능이 떨어지게 된다. 기존의 시공간 격자 부호와 LDPC 부호의 연접을 통한 계층적 시공간 부호화 방식은 각 부호의 내부 반복만 가능하고, 전체 반복이 불가능하기 때문에 성능 저하가 초래되었다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 내부 부호와 외부 부호의 반복을 통해 전체 반복이 가능한 symbol separation과 symbol combine을 첨가한 구조를 그림 2에 나타내었으며, 자세한 알고리즘은 참고문헌 [5]를 참조하였다. 간략히 설명하면 BCJR 복호기에서는 BM (Branch Matrix), FSM(Forward State Matrix), BSM(Backward State Matrix)를 구하기 위하여 입력 값에 따른 출력 값과 함께 변화하는 상태를 나타내는 격자도를 이용하여 복호한다. j 번째 수신 안테나의 수신신호 r_j 는 시공간 격자 부호 방식인 BCJR 복호기를 통하여 수신 비트 스트림 크기만큼의 LLR 값이 출력된다. 각 상태에서 LLR 값 $L(S_k^{i,j})$ ($i=0,1, j=0,1$) 값을 출력하게 되고 이는 i,j 두 비트에 대한 LLR 값이므로 이를 LDPC 복호기에 입력하기 위해서는 한 비트에 대한 출력 값으로 바꿔줘야 하므로 symbol separation 블록이 필요하다. symbol separation에서는 $L(S_k^{i,j})$ 를 이용하여 나온 출력 값을 i,j 각 비트에 대한 확률 값으로 바꾼 뒤 LDPC 복호기로 입력한다. LDPC 복호기 출력 값은 i,j 각 비트에 대한 출력 값이므로 이를 BCJR 복호기와 연접하기 위해서는 다시 i,j 두 비트의 확률 값으로 합치는 symbol combine 블록이 필요하다.

이러한 구조를 통해 시공간 방식에 의한 MIMO-FTN 전송기법의 복호과정은 FTN 적용으로 인한 인접 심볼 간섭을 제거하면서 LDPC 부호와 내·외부 반복, 즉 전체 반복이 가능해져 성능이 향상된다. 그러나 MIMO-FTN의 적용은 성능을 유지하면서 전송률 향상에 목적이 있으나 FTN 으로 인한 인접 심볼 간섭을 제거하기 위한 시공간 부호화 방식의 적용으로 전송률의 손해를 초래한다. 따라서 다음 3.2절에서는 시공간 부호를 적용하지 않고 각 안테나에서 전송되는 신호를 분리하는 ZF(Zero Forcing) 기법을 이용한 MIMO-FTN 복호 구조를 제시한다.

3.2 W-ZF 기반 MIMO FTN 통신 기법

MIMO 시스템에서 수신단의 검출 방식은 선형 기법인 ZF, MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법과 비선형 기법인 OSIC(Ordered Successive Interference Cancellation)기법, 최적의 수신 기법이라 할 수 있는 ML(Maximum Likelihood) 기법을 사용한다. 가장 정확하게 MIMO 검출 값을 계산하여 최대의 성능을 얻을 수 있는 ML 방식은 전송 안테나의 수와 변조 치수에 따라 계산의 복잡도가 지수적으로 증가하기 때문에 실제 시스템에서의 구현은 거의 불가능하다^[12]. 반면에 가장 복잡도가 적은 검출 방식으로 ZF 방법을 들 수 있으나, 검출 과정에서 발생하는 잡음 증가 현상으로 인한 성능 저하가 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다^[15].

본 논문에서는 복잡도가 적은 ZF 검출 방식에서 잡음에 의한 성능 저하를 해결하기 위해 가중치 값을 고려한 W-ZF 기법을 적용한 MIMO-FTN 시스템을 제안한다. 앞절에서 설명한 계층적 시공간 부호화 방식과 결합된 MIMO-FTN 전송기법은 LDPC 부호화된 비트를 다시 시공간 부호화 함으로써 전송효율을 떨어뜨리게 된다. 따라서 시공간 부호화 방식의 적용 없이 W-ZF의 적용을 통해 MIMO 신호를 검출하고, FTN 적용으로 발생한 간섭을 BCJR 등화기에서 보상하여 만족할만한 성능을 얻는다면, 전송효율 면에서 큰 이득을 가질 수 있다. 그림 3은 ZF기반의 MIMO-FTN 시스템 모델을 나타낸다.

역행렬의 성질을 이용하는 ZF은 수신된 신호에 채널 매트릭스의 역을 곱함으로써, 송신된 신호를 정확

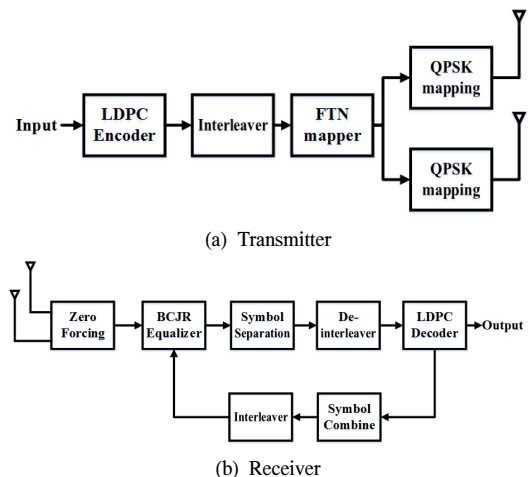


그림 3. LDPC 부호를 이용한 ZF 기반의 MIMO-FTN 모델
Fig. 3. The structure of MIMO-FTN based on zero forcing using LDPC code.

히 검출하는 방법을 말한다. N 개의 송신 안테나와 M 개의 수신 안테나를 가지는 MIMO 시스템의 수신 신호 식 (8)을 행렬형태로 표시하면 다음식 (9)와 같다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{x} 는 N 개의 송신 안테나에서 송신한 신호이고 \mathbf{r} 과 $\boldsymbol{\eta}$ 은 M 개의 수신안테나에서 수신된 신호와 잡음 신호다. 채널 매트릭스 \mathbf{H} 는 식(10)과 같은 $N \times M$ 채널 행렬이다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \cdots & h_{N1} \\ h_{12} & h_{22} & \cdots & h_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1M} & h_{2M} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 h_{ij} 는 i 번째 송신 안테나에서 j 번째 수신 안테나로 입력되는 채널 이득이다.

채널 매트릭스 \mathbf{H} 의 역행렬은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

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

ZF기법을 적용시키기 위해 식(9)의 양변에 \mathbf{H} 의 역행렬 \mathbf{H}^{-1} 를 곱하여 계산하면 아래의 식(12)와 같이 나타낼 수 있다^{[16],[17]}.

$$\mathbf{r}' = \mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}' \quad (12)$$

수신신호 \mathbf{r}' 는 송신신호 \mathbf{x} 와 잡음 $\boldsymbol{\eta}$ 에 역행렬 \mathbf{H}^{-1} 이 곱해진 $\boldsymbol{\eta}'$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 만약 잡음 $\boldsymbol{\eta}$ 이 없었다면 수신신호에서 완벽히 송신신호 \mathbf{x} 를 복원할 수 있을 것이다. 하지만, 잡음 $\boldsymbol{\eta}$ 에 역행렬 \mathbf{H}^{-1} 이 곱해져 성능이 저하된다. 따라서 ZF 단계에서 $\boldsymbol{\eta}'$ 의 값을 보정해주기 위한 가중치 값의 계산이 필요하고 가중치를 적용시킨 ZF 기법이 W-ZF이다^[12]. 가중치는 식 (13)과 같이 역행렬 \mathbf{H}^{-1} 의 값을 이용하여 계산한다.

$$\alpha_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^M |h'_{ij}|^2} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

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

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 사용한 시공간 부호화기는 2개의 송신안테나를 이용하여 32-상태의 시공간 격자 부호화기를 이용하였을 때와 ZF 방식 및 W-ZF 방식을 통해 MIMO 신호를 검출하였을 때의 성능을 분석하였다. LDPC 부호기는 전송 bit의 크기 $K=32,400$, 부호화율 $R=1/2$ 을 사용하였다. LDPC 복호기의 내부 반복 횟수는 60회로 설정하였고, 전체 반복 횟수는 5회로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 심플 주기 T 동안 서로 독립적인 분포를 가지는 레일리 페이딩 채널로써 주기 T 동안 채널의 변화가 없고 수신단에서는 채널 추정을 정확히 알고 있다고 가정하였다. 변조방식은 QPSK 변조방식을 적용하였다.

그림 4는 그림 2의 구조에서 τ' 에 따른 성능 곡선이다. τ' 이 0%와 10%의 성능은 BER 10^{-5} 에서 3.5dB의 성능을 보였으나, τ' 이 증가함에 따라 성능이 저하되었다. τ' 이 0%와 10%의 성능이 동일 한 것은 두 가지로 분석된다. 첫째, τ' 이 10%의 경우 ISI가 적게 발생하고 이를 BCJR 등화기에서 완벽하게 ISI를 보상함으로써 τ' 이 0%일 때와 동일한 성능이 나타났다. 둘째, τ' 이 10%의 경우 LDPC 복호기의 입력 부분에서는 성능 차이가 나타날 수 있지만, LDPC 복호기는 BER $10^{-0.8} \sim 10^{-1}$ 정도면 모든 복호가 성공적으로 이루어지므로 τ' 이 0%와 10%가 동

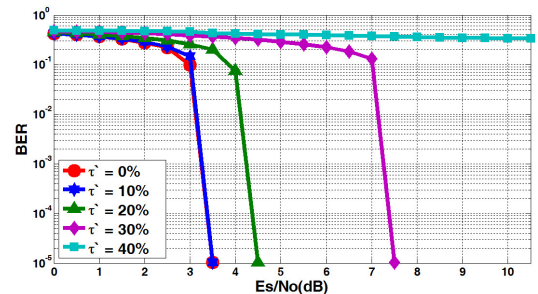


그림 4. 계층적 시공간 부호 기반 MIMO-FTN 성능 곡선
Fig. 4. Performance of MIMO-FTN based on LST model according to τ'

일한 성능이 나타났다. 그리고, τ' 이 40%의 경우 과도한 ISI로 인해 데이터를 복호하지 못하였다.

그림 5는 그림 3의 구조에서 ZF 단계에서 잡음에 대한 보정을 해주는 가중치 값을 곱하지 않았을 때의 성능 곡선이다.

그림 4에서 τ' 이 0%와 10%일 때 기존 계층적 시공간 부호 기반의 MIMO-FTN 모델은 BER 10^{-5} 에서 3.5dB의 성능을 보였으나, 그림 5와 같이 ZF를 적용한 경우 BER 10^{-5} 에서 7.0dB로 성능이 저하되었다. 또한, τ' 이 40%의 경우에도 데이터를 복호하지 못하였다. 이는 MIMO 신호를 검출 하는 방식으로 ZF 방법을 사용할 경우 복잡도는 감소하지만, 검출 과정에서 발생하는 잡음 증가 현상으로 인하여 성능이 저하된 것이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 ZF 단계에서 발생하는 잡음 증가에 따른 가중치 값 식(16)을 계산한 성능을 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 τ' 이 0% 일 때 BER 10^{-5} 에서 3.0dB의 성능을 보였다. 또한, 기존 계층적 시공간 부호 기반의 MIMO-FTN에서는 τ' 이 40% 일 경우 과도한 ISI로 인해 모든 데이터를 복호가 불가능하였으나, W-ZF 기반 MIMO-FTN에서는 9.5dB의 성능을

보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 차세대 무선 및 위성통신에서 요구하는 높은 전송효율을 달성하기 위해 Nyquist 전송률보다 더 빠르게 전송하는 FTN 기법과 높은 전송효율을 가지는 MIMO 기법을 연접하는 MIMO-FTN 모델을 제안하였다. 계층적 시공간 부호 기반의 MIMO-FTN 모델과 ZF 기반의 MIMO-FTN 모델을 시뮬레이션을 통해 각각의 성능을 비교 분석하였다. 또한, MIMO 신호를 검출 하는 방식으로 ZF 방법을 사용할 경우 복잡도는 감소하지만, 검출 과정에서 발생하는 잡음 증가 현상으로 인하여 성능이 저하되는 문제점을 해결하기 위하여 W-ZF 방법을 적용시켜 성능을 분석하였다.

2개의 수신 안테나에서 τ' 을 변화시킴으로 전송율을 향상시킨 시뮬레이션 결과를 BER 10^{-5} 을 기준으로 각각 비교하면, W-ZF 기반이 계층적 시공간 부호 기반 MIMO-FTN 모델보다 τ' 이 0% 일 때 0.5dB, 20%인 경우 0.5dB, 30%의 경우 2dB 성능이 향상되었다. 또한, τ' 이 40% 인 경우 계층적 시공간 부호 기반은 과도한 ISI로 인해 데이터를 복호 할 수 없었지만, W-ZF 기반의 MIMO-FTN 모델은 9.5dB의 성능을 보였다.

이러한 시뮬레이션 결과를 통해 고 전송율과 성능을 만족하는 MIMO-FTN 전송 기법이 차세대 무선 통신으로 적용이 가능하리라 예상한다.

References

- [1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 5, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [2] S. H. Lim, K. S. Kim, and J. W. Choi, "Detection techniques for high dimensional spatial multiplexing MIMO system," *J. KICS*, vol. 39A, no. 7, pp. 413-423, Jul. 2014.
- [3] L. Hanzo, T. H. Liew, B. L. Yeap, and R. Y. S. Tee, *Turbo coding, turbo equalisation and space-time coding: exit-chart aided near-capacity designs for wireless channels*, New

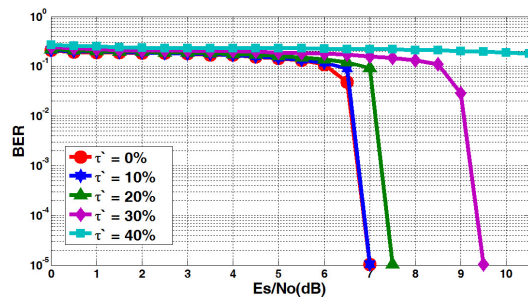


그림 5. ZF기반 MIMO-FTN 성능 곡선
Fig. 5. Performance of MIMO-FTN based on ZF according to τ'

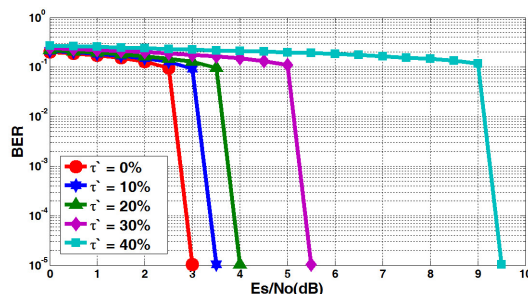
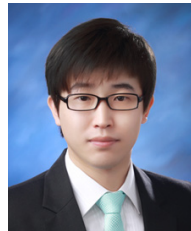


그림 6. W-ZF기반 MIMO-FTN 성능 곡선
Fig. 6. Performance of MIMO-FTN based on W-ZF according to τ'

- York, NY, USA: Wiley, Mar. 2010.
- [4] T. D. Park and J. W. Jung, "A study on layered space time trellis codes for MIMO system based on iterative decoding algorithm," *J. Navig. and Port Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 845-849, Dec. 2012.
- [5] C. U. Baek and J. W. Jung, "A study on turbo equalization for MIMO systems based on LDPC codes," *J. KICS*, vol. 41, no. 5, pp. 504-511, May 2016.
- [6] S. J. Park and S. Y. Choi, "Parity check based iterative interference cancellation scheme for LDPC coded MIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1728-1730, Sept. 2015.
- [7] J. E. Mazo, "Faster-than-nyquist signaling," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, Oct. 1975.
- [8] F. Rusek and J. B. Anderson, "Multistream faster than nyquist signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.
- [9] M. El Hefnawy and H. Taoka, "Overview of faster-than-nyquist for future mobile communication systems," in *Proc. 77th IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.
- [10] M. Yuhas, Y. Feng, and J. Bajcsy, "On the capacity of faster-than-nyquist MIMO transmission with csi at the receiver," in *Proc. IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps 2015)*, pp. 1-6, San Diego, Ca, USA, Dec. 2015.
- [11] F. Rusek, "A first encounter with faster-than-nyquist signaling on the MIMO channel," in *Proc. WCNC 2007*, pp. 1094-1098, Kowloon, China, Mar. 2007.
- [12] Y. M. Kim, P. P. Shang, and S. Y. Kim, "Estimation of soft decision channel gain for coded MIMO system," *J. KIICE*, vol. 36, no. 6, pp. 577-586, Jun. 2011.
- [13] R. S. Blum and X. Lin, "Improved space-time codes using serial concatenation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 7 pp. 221-223, Jul. 2000.
- [14] E. G. Larsson and J. Jalden, "Fixed-complexity soft mimo detection via partial marginalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 8, pp. 3397-3407, Aug. 2008.
- [15] C. Niyizamwiyitira, C. G. Kang, and C. H. Oh, "Low complexity ml detection based on linear detectors in MIMO Systems," *J. KIICE*, vol. 13, no. 11, pp. 2405-2411, 2009.
- [16] J. Lu and J. Li, "A simple soft-detector for the blast system," in *Proc. Sensor Array and Multichannel Sign. Process. Workshop*, pp. 159-163, Rosslyn, Va, USA, Aug. 2002.
- [17] C. Ru, L. Yin, and J. Lu, "An ldpc coded mimo-ofdm system with simple detection an channel estimation scheme," in *Proc. IEEE 6th CAS Symp. Emerging Technol.: Mob. Wirel. Commun.*, vol. 2, pp. 693-696, Shanghai, China, May 2004.

백 창욱 (Chang-Uk Baek)



2012년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과 공학사
2014년 2월 : (주)KTE 기술연
구소 연구원
2016년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과 공학석사
2016년 3월~현재 : 한국해양대
학교 전파공학과 박사과정

<관심분야> 위성통신, 수중통신, 변·복조기술, 채널
코딩 등

정 지 원 (Ji-Won Jung)



1989년 2월: 성균관대학교 전
자공학과 공학사

1991년 2월: 성균관대학교 전
자공학과 공학석사

1995년 2월: 성균관대학교 정
보공학과 공학박사

1991년 1월~1992년 2월: LG

정보통신연구소 연구원

1995년 9월~1996년 8월: 한국통신 위성통신연구실
선임연구원

1997년 3월~1998년 12월: 한국전자통신연구원 초빙
연구원

1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 정교수

2001년 8월~2002년 8월: 캐나다 NSERC Fellow-
ship (Communication Research Center 근무)

<관심분야> 위성통신, 수중통신, 변·복조기술, 채널
코딩, FPGA 기술 등