

터보부호를 이용한 계층적 시공간 부호기반 MIMO FTN 전송기법 연구

박건웅¹ · 정지원^{2*}

A Study of MIMO FTN Scheme based on Layered Space Time Code using Turbo Code

Gun-Woong Park¹ · Ji-Won Jung^{2*}

¹Dept. Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

^{2*}Dept. Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

차세대 무선 및 위성통신에서는 다양한 서비스와 함께 빠른 전송 효율, 높은 신뢰도 있는 통신을 요구하고 있으므로 본 논문에서는 전송률을 높이고 신뢰성을 향상시키는 방안 중 계층적 시공간 부호화 방식에 기반을 둔 MIMO와 FTN 기법이 통합된 새로운 전송 기법에 대한 복호 방법을 제안한다. MIMO 채널에서의 FTN 전송 기법의 간섭을 제거하기 위해 시공간 부호화 방식의 복호 방법을 BCJR 등화기와 터보 부호를 연결한 터보 등화 복호 모델을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 기존의 터보 부호를 이용한 SISO 모델과 제안된 방식의 성능을 비교 분석하며 간섭량에 따른 성능을 분석하였다.

ABSTRACT

The next generation wireless and satellite communications require high transmission efficiency and high reliability to provide various services with subscribers. To satisfied these requirements, incorporated MIMO (Multiple Input Multiple Output) system with FTN (Faster Than Nyquist) techniques based on layered space time coded method are considered in the paper. To improve performance, STTC (Space Time Trellis Code) was employed as an inner code. As the same as SISO (Single Input Single Output) system, the outer codes are turbo codes. In receiver side, BCJR algorithm is used for STTC decoding in order to eliminate interferences induced by FTN transmission. They can yield significantly increased the data rates and improved link reliability without additional bandwidth. Therefore, we proposed a new decoding model for MIMO FTN model and confirmed that performance was improved compared to conventional SISO model according to amount of interference for FTN.

키워드 : MIMO, FTN, 시공간 격자 부호, BCJR, 터보 부호

Key word : MIMO(Multiple-Input-Multiple-Output), FTN(Faster-Than-Nyquist), STTC(Space-Time-Trellis-Code), BCJR, Turbo codes

Received 17 February 2016, Revised 22 February 2016, Accepted 18 March 2016

* Corresponding Author Ji-Won Jung(E-mail:jwjung@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4424)

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

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.5.895>

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

급속도로 발전하는 차세대 위성 방송/통신 및 5G 기반의 이동통신은 데이터 전송률에 대한 요구가 지속적으로 증가하는 반면, 대역폭이 제한적이기 때문에 전송률을 높이기 위한 많은 방안들이 연구되어지고 있다. 하지만 전송률 향상과 성능 향상은 trade-off 관계이기 때문에 두 가지 모두 충족시키기에는 많은 어려움이 따른다. 그러므로 전송률을 증가시키며 성능을 최대한 유지할 수 있는 방식을 개발하는 것이 가장 중요하다.

스펙트럼의 효율성을 높이고 다이버시티 및 부호화 이득을 동시에 얻으며 빠른 전송 효율을 보이는 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기술이 현재 연구 중에 있으며[1], DVB-S2 기반 위성통신에서는 전송률 향상을 위한 많은 방안들 중 가장 대표적인 복호 속도를 개선시켜 전송률을 향상시키는 방안은 이미 연구가 포화 상태에 있다. 그러므로 기존의 복호 속도를 개선시켜 전송률을 높이는 방안보다는 Nyquist 전송률보다 더 빠르게 전송하는 FTN (Faster Than Nyquist) 방식[2-4]을 이용한 방안이 차세대 DVB-S3의 표준안으로 대두되고 있다.

따라서 전송률 향상을 위해서 MIMO 기법과 FTN 기법이 결합된 MIMO-FTN 전송 기법은 전송률 향상을 극대화시킬 수 있으나 이에 대한 복호 방식 및 간섭 제거가 어려워 이에 대한 연구는 아직 미미한 단계이지만 본 논문에서는 시공간 부호화 방식을 결합하여 FTN으로 발생하는 간섭량을 BCJR 복호기를 통하여 제거하는 계층적 시공간 부호화 방식에 기반을 둔 MIMO와 FTN 기법의 복호 방식을 제안하였다. 제안한 복호방식을 검증하기 위해 기존의 SISO (Single Input Single Output) 채널에서의 터보 부호를 이용한 FTN 성능과 MIMO 채널에서의 FTN 성능을 비교 분석한다. 특히 MIMO 채널에서는 시공간 부호 중 다이버시티 이득과 함께 부호화 이득을 동시에 가지는 Blum에 의해 제안된 32 상태의 시공간 격자 부호화 기법을 내부 부호로 하고[5], 터보 부호[6]를 외부 부호로 구성하고, 시공간 격자 부호의 복호 방식을 연판정 출력을 위한 BCJR(Bahl, Cocke, Jelinek and Raviv) 알고리즘[7]을 적용하여 터보 복호와 함께 성능을 분석 하였다.

II. FTN 신호 모델링

FTN 전송 방법은 주파수 대역에 의해 주어지는 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하는 방법이다. 예를 들어 어느 정해진 시간동안 Nyquist 속도에 따라 전송하면 10000개의 데이터를 전송한다고 했을 때, FTN 방식을 사용하여 50%로 축소하면 동일한 시간동안 20000개의 데이터를 전송할 수 있다. 그로 인해 필연적으로 ISI (Inter-Symbol Interference)가 발생하게 된다. 간섭된 신호의 전송신호 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

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

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. 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 τN_s 는 간섭비율 τ' 과의 관계는 식 (3)과 같다.

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

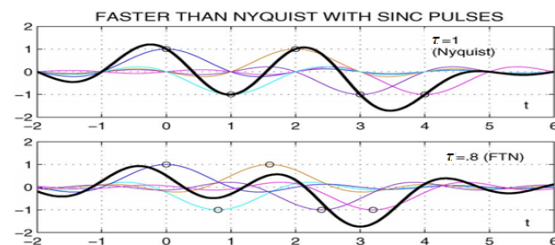


Fig. 1 FTN modeling signal

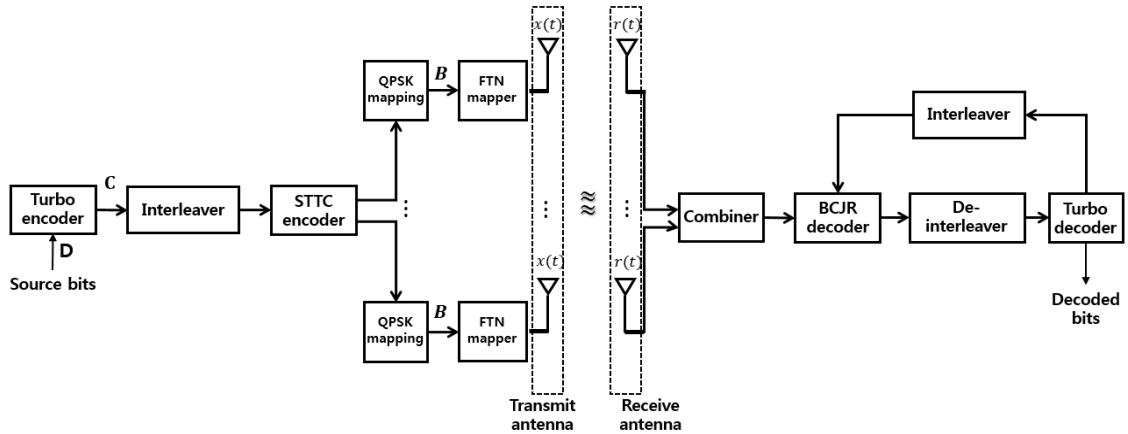


Fig. 2 The structure of Rx & Tx in MIMO FTN based on Turbo code

그림 1에서 $\tau = 0$ 경우에는 Nyquist 속도에 따라 전송되므로 ISI가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 $\tau = 0.8$ 경우에는 FTN 으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 결정 시점 마다 데이터에 영향을 주므로 간섭으로 인한 파형의 변화를 있음을 알 수 있다. ISI로 인해 신호의 파형이 왜곡 되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 20%의 전송률을 향상 시킬 수 있음을 알 수 있다.

III. 계층적 시공간 부호화 방식 기반 MIMO FTN 모델

3.1. MIMO FTN 시스템 모델

그림 2는 본 논문에서 제시하는 터보 부호 기반의 MIMO FTN 송수신단의 구조를 나타낸 것이다. 시공간 부호 중 다이버시티 이득과 함께 부호화 이득을 동시에 가지는 Blum에 의해 제한된 32 상태의 시공간 격자 부호화 기법을 내부 부호로 하고, 터보 부호를 외부 부호로 구성된 MIMO 시스템 구조에서 QPSK 변조 후 FTN mapper를 첨가시켜 변조된 신호를 τ 만큼 ISI에 의해 왜곡된 신호를 송신한다. 수신신호는 BCJR 복호기를 거쳐 터보 복호기에서 출력된다. 그리고 터보 복호기에서 계산된 출력값을 다시 BCJR 복호기에 업데이트 시켜 주는 방식의 반복으로 기존의 터보 복호기 내부에서의 반복 하였을 때보다 성능이 향상되는 구조를 구성하

였다[8].

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

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

전송하고자 하는 원 신호 비트열은 K 의 크기를 가지며, N 은 부호화 된 비트의 길이를 나타낸다. 먼저 반복 기반의 채널 부호화기(N, K)를 통하여 부호화되어 진다. 부호화 후 비트열 C는 식(5)와 같다.

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

반복 부호화 후 비트열 C는 두 비트씩 묶어 시공간 격자 부호화기로 입력된다. 각 송신 안테나에 변조된 신호는 식 (6)과 같다.

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_l\} \quad (6)$$

여기에서 l 은 변조 방식에 따라 값이 변한다. 따라서 변조 방식이 QPSK 인 경우 $l = \frac{N}{2}$ 이 된다. 2장의 SISO 통신에서 식 (2)를 MIMO 통신으로 확장하여 전송 신호 식(6)을 확장하면 아래 식(7)와 같다.

$$x_i(t) = \sqrt{E_s} \sum_n b_i(n) h(t - n\tau T), \tau < 1 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (7)$$

이때 수신된 신호는 식(8)과 같다.

$$r_j(t) = \sum_{i=0}^{N-1} h_{ij}(t) * x_i(t) + n_j(t), \quad (j=0, \dots, M) \quad (8)$$

위 식에서 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 번째 수신 안테나에서의 수신 신호를 나타내며, r_j 는 j 번째 수신센서의 수신 신호, x_i 는 i 번째 송신센서의 송신신호, n_j 는 j 번째 송신센서의 가우시안 잡음이며, h_{ij} 는 i 번째 송신센서에서 j 번째 수신센서에 대한 채널 임펄스 응답이다. 송신 신호는 각각의 독립된 채널 h_{ij} 와 컨벌루션되어 잡음 $n_j(t)$ 이 더해지게 된다.

3.2. 내부부호 및 복호 방식

시공간 부호는 크게 전송 다이버시티와 부호화 이득을 동시에 가지는 시공간 격자 부호와 부호화 이득은 없고 전송 다이버시티만 가지는 시공간 블록 부호로 나눌 수 있다[9]. 시공간 블록 부호는 부호화 이득은 없지만 최적의 다이버시티 이득과 함께 간단하게 부호화를 구성할 수가 있다. 하지만 시공간격자 부호 중 다이버시티 이득과 함께 부호화 이득을 동시에 가지는 Blum에 의해 제안된 32 상태의 시공간 격자 부호화 기법을 내부 부호로 적용하고자 한다. Blum이 제안한 32 상태의 부호화[5] 식은 아래 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} b_{n1} &= 2 \times (c_2(n - \hat{\tau}) \oplus c_1(n - 2\hat{\tau}) \oplus c_2(n - 2\hat{\tau}) \oplus c_1(n - 3\hat{\tau})) \\ &\quad + (c_2(n - 2\hat{\tau}) \oplus c_1(n - \hat{\tau})) \\ b_{n2} &= 2 \times (c_2(n) \oplus c_2(n - \hat{\tau}) \oplus c_2(n - 2\hat{\tau}) \oplus c_1(n - 3\hat{\tau})) \\ &\quad + (c_2(n - 2\hat{\tau}) \oplus c_1(n - \hat{\tau}) \oplus c_1(n)) \end{aligned} \quad (9)$$

b_{n1}, b_{n2} 는 식 (6)에서 n 시점에서 출력값 b_n 에 대한 송신안테나 2개의 출력값을 나타낸다. $c_1(n), c_2(n)$ 는 n 시점에서 시공간 격자 부호기의 입력비트이고, $c_i(n - \hat{\tau})$ 는 i 번째 입력 신호의 $\hat{\tau}$ 만큼 지연된 신호이다. 따라서 QPSK의 심볼로 4개의 위상점 {0,1,2,3}을 나타내기 위해 식 (9)와 같이 나타내었다[5].

QPSK 변조 후 FTN mapping에 의해 왜곡된 신호는 식(7)과 같이 전송되어지고, j 번째 수신센서의 수신 신호 r_j 는 식 (8)과 같이 정의하였다. 복호를 위하여 비터

비 복호기 혹은 BCJR 복호기에 입력된다. 격자구조 기반의 전송 신호는 비터비 복호기로 복호 할 수 있으며, 이의 출력은 경판정된 신호 형태이므로 터보복호기 입력 시 성능 저하를 야기시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 비터비 복호기의 출력을 연판정 가능한 BCJR 복호 방식을 시공간 격자 부호화 방식에 적용시켰다. BCJR 복호기에서는 BM (Branch Matric), FSM (Forward State Matric), BSM (Backward State Matric)을 구하기 위하여 입력 값에 따른 출력 값과 함께 변화하는 상태를 나타내는 격자도를 이용한다.

BCJR의 복호기 격자도는 32상태이며 연산에 있어 유한한 이전상태, 채널 출력, 다음상태가 존재한다. 이전 상태는 $s' = (s'_1, \dots, s'_{32})$, 현재 상태는 $s = (s_1, \dots, s_{32})$ 로 주어지며, 전송된 신호는 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 수신 신호는 $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 로 표현하면, 전송신호 $x_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 에 대한 LLR(Log Likelihood Ratio)값은 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} L(x_j) &= \max^* [\alpha_{j-1}(s') + \gamma_j(s', s) + \beta_j(s)](s', s) : x_j = 0 \\ &\quad - \max^* [\alpha_{j-1}(s') + \gamma_j(s', s) + \beta_j(s)](s', s) : x_j = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

FSM은 (10)식에 의해 $\alpha_j(s) = \log p(s_j = s, r_j^j)$ 로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_j(s) = \max^* [\alpha_{j-1}(s'_1) + \gamma_j(s'_1, s), \alpha_{j-1}(s'_2) + \gamma_j(s'_2, s)] \quad (11)$$

식 (11)을 일반화 하면 식 (12)와 같다.

$$\alpha_j(s) = \max^* [\alpha_{j-1}(s') + \gamma_j(s', s)] \quad (12)$$

BSM은 (10)식에 의해 $\beta_j(s) = \log p(r_{j+1}^n | s' = s)$ 로 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{j-1}(s) = \max^* [\beta_j(s_1) + \gamma_j(s', s_1), \beta_j(s_2) + \gamma_j(s', s_2)] \quad (13)$$

식 (13)을 일반화 하면 식 (14)와 같다.

$$\beta_{j-1}(s') = \max^* [\beta_j(s) + \gamma_j(s', s)] \quad (14)$$

BM은 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_j(s', s) &= \log p(s_j = s, r_j | s_{j-1} = s') \\ &= \log p(r_j | x_j) p(x_j) \end{aligned} \quad (15)$$

max*는 식 (16)로 정의된다.

$$\max^*(x, y) = \max(x, y) + \log(1 + e^{|x-y|}) \quad (16)$$

3.3. 외부부호 및 복호 방식

그림 2의 송신 구조는 터보 부호와 시공간 격자 부호 사이에 인터리버를 접목시키는 구조이며 터보 부호화를 거친 비트 스트림은 인터리버 후에 시공간 격자 부호에 입력되고 FTN에 의해 ISI가 계산되어져 더해지게 된다. 수신 신호는 채널 추정 통하여 복원된 송신신호가 합쳐져서 BCJR 복호기로 입력되어진다. 시공간 격자 복호단에서 BCJR 복호기를 통하여 수신 비트 스트림 크기만큼의 LLR 값이 각 상태에서 “00”, “01”, “10”, “11”의 확률값을 출력하게 된다. 따라서 k 시점 및 각 상태 m 에서 네 개의 두 비트 i, j 에 대한 LLR 값은 다음 식(17)와 같다.

$$L(C_k^{i,j}) = \min \left\{ \sum_m \lambda_k^{00}(m), \sum_m \lambda_k^{01}(m), \sum_m \lambda_k^{10}(m), \sum_m \lambda_k^{11}(m) \right\} \quad (k=0,1,\dots,K-1) \quad (17)$$

BCJR의 복호 방식은 터보 부호의 복호 방식과 동일하며, 추정되어진 LLR 값은 역-인터리버를 통하여 송신단에서의 인터리버 이전의 주소로 재배치하여 터보 복호기에 입력된다[6]. 터보 복호기는 두 비트에 대한 LLR 값을 입력 받아 두 비트의 확률로 복호가 이루어지므로 마찬가지로 FSM, BSM 과정을 통하여 식 (17)와 같은 동일한 형태의 LLR 값이 출력된다. 따라서 일정한 반복 후에 식 (17)와 같이 i, j 비트 열을 복호하게 된다. 본 논문에서의 복호기 구조는 터보 복호기에서 계산되어 추정된 LLR 값을 다시 인터리버를 통하여 BCJR 복호기에 업데이트 시켜주는 방식으로 터보 부호와 시공간 격자부호를 연결시킨 계층적 시공간 부호화 기반의 MIMO FTN 시스템을 제안한다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 일반적인 AWGN 채널만이 존재할 때의 환경에서 이루어졌다. 시뮬레이션에서 사용한 터보 부호화기는 전송 bit의 $K=984$ 크기, 부호화율 $R=1/3$ 을 사용하였다. 또한 수신 단에서는 채널 추정을 정확히 알고 있다고 가정하였으며 변조방식은 QPSK 변조방식을 적용하였다.

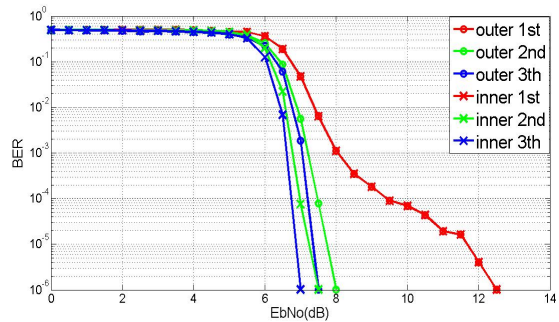


Fig. 3 Performance of Fig. 2 according to inner and outer iteration

그림 3은 그림 2의 구조에서 $\tau=20\%$ 일 때 내부 및 외부 반복별 성능을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 터보복호기만을 이용한 외부반복은 반복 횟수가 늘어남에 따라 성능이 개선되는 것을 알 수 있다. 터보복호기와 BCJR복호기를 함께 반복 시키는 내부반복 또한 반복 횟수가 늘어남에 따라 성능이 개선되는 것을 알 수 있다. 하지만 터보복호기만 반복하는 외부반복보다 앞서 제안한 터보복호기와 BCJR복호기를 함께 반복시키는 내부반복이 성능이 3회 반복하였을 때 $BER=10^{-6}$ 기준으로 약 0.5[dB] 정도 성능이 개선되었음을 볼 수 있다. 따라서 반복횟수는 3회 내부 반복으로 고정하였다.

먼저 터보 부호를 이용한 SISO채널에서의 FTN 성능이다. 즉, 그림 2의 구조에서 내부부호인 시공간부호가 제외되고 외부부호인 터보부호만으로 된 출력값을 ISI로 인해 왜곡된 신호로 변환시켜 AWGN채널을 통과시킨 뒤 터보 복호기를 이용하여 복호하였을 때의 시뮬레이션 결과는 다음 그림 4와 같다.

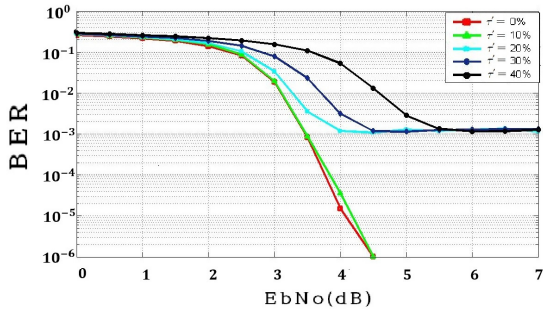


Fig. 4 Performance of SISO Channel according to τ'

그림 4를 보면 ISI 적게 일어나는 τ' 이 0%와 10%의 성능은 거의 비슷하게 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 약 4.5[dB]의 값을 보였다. 하지만 τ' 이 20% 이상이면 ISI 또한 커지게 되면서 오류 마루 현상이 일어나게 되었다. 즉 과도한 ISI로 인해 EbNo가 커지더라도 복호하지 못하는 것을 알 수 있다.

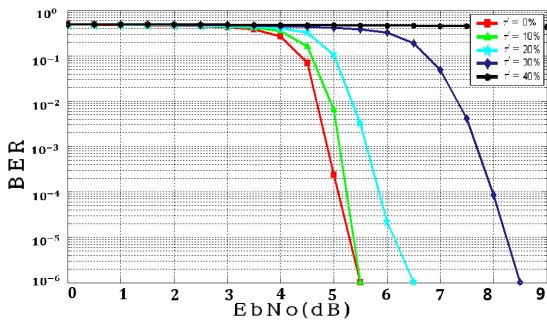


Fig. 5 Performance of MIMO Channel according to τ'

그림 5에서 τ' 가 0%와 10%의 성능은 SISO채널에서의 결과와 마찬가지로 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 약 5.5[dB]로 비슷한 값을 보였으나 20%와 30%에서 오류 마루 현상이 일어나지 않았지만 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 0%와 10%에 비해 각각 약 1[dB], 3[dB] ISI의 왜곡된 신호로 인해 성능이 저하되었다. 그리고 τ' 이 40%일 때는 과도한 ISI로 인해 복호하지 못하는 것을 알 수 있었다. 오류마루 현상이 일어나지 않은 이유는 시공간 격자부호와 터보 부호를 각각 내부 외부 부호로 연결하여 반복함으로써 이러한 현상을 줄일 수가 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 Nyquist 전송률보다 더 빠르게 전송하는 FTN기법과 높은 전송효율을 가지는 MIMO에 연결하여 MIMO FTN 시스템 모델을 제안 하였다. 외부 부호로는 터보 부호를 사용하고 내부 부호로는 시공간 격자부호 방식을 적용하였으며 시공간 격자부호의 복호기로는 BCJR 복호기를 사용 하였다.

시뮬레이션은 기존의 터보부호를 이용한 SISO모델과 본 논문에서 제안한 MIMO 모델에서의 FTN의 성능을 비교 분석 하였다. SISO 채널에서는 τ' 가 0%, 10%에서의 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 약 4.5[dB] 나왔으나 20%~40%에서는 오류마루 현상이 나타났다. MIMO 채널에서도 마찬가지로 τ' 가 0%, 10%에서 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 약 5.5[dB]의 성능을 보였으며 오류마루 현상이 나타났던 20%, 30%에서는 오류마루 현상이 없어졌다. 또한 $BER = 10^{-6}$ 기준으로 0%와 10%에 비해 각각 약 1[dB], 3[dB] 정도로 저하 되었고 40%는 과도한 ISI로 인해 복호하지 못하는 것을 알 수 있었다.

따라서 계층적 시공간 부호화 방식 기반의 MIMO 시스템과 FTN 기법을 동시에 적용하면 전송 효율 뿐만 아니라 $\tau' = 30\%$ 까지 성능을 기대할 수 있어 차세대 무선 통신으로 적용이 가능하리라 예상된다.

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-2015R1D1A1A01060931)

REFERENCES

- [1] M. J. Gans, and G. J. Foschini, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communication*, vol. 5, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.

- [2] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, Oct. 1975.
- [3] A. D. Liveris and C. N. Georghiades, "Exploiting faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 9, pp. 1502-1511, Sep. 2003.
- [4] F. Rusek and J. B. Anderson, "Multistream Faster than Nyquist Signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.
- [5] R. S. Blum, X. Lin, "Improved space-time codes using serial concatenation," *IEEE Communication Letter*, vol. 4, no. 7, pp. 221- 223, Jul. 2000.
- [6] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shanon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes," in *Proc. ICC9*, vol. 2, pp. 1064-1070, May 1993.
- [7] 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. 20, no. 2, pp. 284-287, Mar. 1974.
- [8] Tae-hun Kim, and Ji-won Jung. "Optimum Turbo Equalization Method based on Layered Space Time Codes in Underwater Communications," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 1042-1050, May 2014.
- [9] S. Alamouti, "simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, no 8, pp. 1451-1458, Aug. 1998.



박건웅(Gun-Woong Park)

2015년 2월 : 한국해양대학교 전자공학과 (공학사)
 2016년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자공학과 석사과정
 ※관심분야 : 위성통신, 이동통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 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, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등