

# 페이딩 환경에 강한 트렐리스 부호화 방식의 성능분석

임수환, 황병대, 오성근

아주대학교 전자공학부, 통신시스템 연구실

전화: 031-219-1950 / 핸드폰 : 019-248-2393

## Performance Analysis of a Robust Trellis Coded Modulation for a Correlated Fading Channel

Su Hwan Lim, Byung-Dae Hwang, and Seong Keun Oh

School of Electronics Engineering, Ajou University

E-mail : jkui89@comm.ajou.ac.kr

### Abstract

*In this paper, we propose a robust trellis coded modulation for a correlated Rayleigh fading channel. This method use only one transmit antenna, which can achieve superior performance compared to Space-Time Trellis Coded Modulation (STTC) over a wide channel correlation range among transmit antennas. The code is designed to have the largest Euclidean distance between faded signals at the receiver. Computer simulations are performed to evaluate the frame error rate (FER) performance and to compare the proposed code with the conventional one.*

### I. 서 론

현재의 무선통신 시스템에서는 열악한 페이딩 환경에서 신호의 손상을 보상하여, 우수한 품질의 다량의 정보를 전송해야 한다[1],[2],[4],[5]. 따라서, 높은 전력 효율 및 주파수 효율을 유지하며 고속의 데이터 전송을 하기 위한, 페이딩에 강한 전송방식의 연구가 필수적이다. 현재 고속의 무선 멀티미디어 전송방법을 위하여 다수의 송신 안테나를 사용하여 전송 다이버시티 안테나 기법[2],[5],[6], space-time 부호화 방법

[2],[3],[4],[7],[8], 안테나 배열을 사용하는 방법 [2],[5],[6], 그리고 터보 부호화 방법[8]들이 주로 연구되고 있다. 이들 중에서 다중 안테나 전송방식에 채널 부호화를 결합하여 페이딩의 영향을 극복하기 위한 space-time 부호화 방법은 기존의 방법들과 비교하여 상당히 이득이 있는 것으로 알려져 있다.

Space-time 트렐리스 부호는 채널 부호화된 심벌을 안테나에 따라 공간적으로 다시 부호화하여, 송신 안테나 배열에 따라 동시에 전송하는 것을 특징으로 하며, 수신부에서는 maximum likelihood 복호기를 사용하여 원신호를 복원[2],[4],[7]한다. 이는 채널 부호화된 이득과 공간 다이버시티 기법을 결합시켜 페이딩의 영향을 매우 효율적으로 보상한다. 그러나, 지금까지의 space-time 트렐리스 부호는 부호율 및 복잡도에 대한 다이버시티 이득의 최대화 여부가 증명되지 않았으며, 안테나 개수의 증가에 따른 동기화의 문제, 다중 경로 전송에 따른 성능 저하, 실질적인 공간 확보와 비용의 문제가 대두되고 있다.

본 논문에서는 기존의 space-time trellis coded modulation (STTC)방법과는 달리 단일 송신 안테나를 사용하여서도 SNR이 낮고, 안테나간 상관성이 존재하는 경우에 기존의 STTC방법의 성능보다 우수한 트렐리스 부호화 방식을 제안한다. 이는 수신안테나를 2개 사용하는 시스템을 사용하면 그 성능 차이가 더욱 커지게 된다. 이는 송신된 신호가 다중 페이딩 채널을

거쳐 수신안테나에 입력될 때, 복호시 부호간의 유클리드 거리가 클수록 성능이 향상된다는 점에 착안하여 수신부에서 각 신호들이 공간적으로 결합할 때 유클리드 거리가 최대가 되도록 트렐리스 부호를 설계하여 시스템의 성능이 극대화 되도록 한다.

또한 모의 실험을 통하여, 수신안테나가 하나인 경우와 두 개인 경우에 대한 성능을 기존의 방식인 STTC방법과 비교 분석함으로써 제안된 방식이 페이딩 환경 채널에서 효과적인 성능을 나타내는 것을 확인한다.

## II. Space-Time 트렐리스 부호

일반적인 space-time 트렐리스 부호에서, M-PSK로 나타내진 정보신호는 시간적으로 상태(state)정보를 사용하여 부호화되고, 공간적으로는 안테나 배열에 따라서 부호화되어 동시에 전송하는 것을 특징으로 한다. 수신부에서는 maximum likelihood 복호기를 사용하여 비터비 알고리즘을 기반으로 하여 원신호를 복원한다. 그림 1은 일반적인 space-time 부호의 송신부 블록도이다. 정보신호는 채널 부호에 의해 부호화되고 직렬-병렬 변환기를 통하여 N개의 스트림 정보로 분리된 후 각 스트림 정보신호는 펄스 생성기에 입력되어서 변조되어 진다. 따라서 부호화된 t번째 심볼은  $x_i^t$ 가 되며  $i(1 \leq i \leq N)$ 번째 송신 안테나를 통해 전송된다. N개의 신호들은 서로 다른 N개의 송신 안테나를 통하여 동일시간에 전송되어진다.

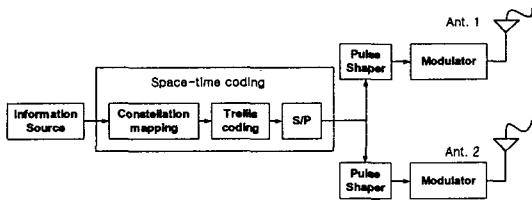


그림 1. Space-time 부호의 블록도.

송신된 신호들은 서로 다른 경로를 거쳐 독립적인 페이딩을 받은 후 수신안테나에 도달하게 되며, 수신기에서는 잡음이 부과된다. 따라서 j 번째 안테나에서 정합 필터를 거친 후 수신된 t 번째 신호  $d_j^t$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_j^t = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j} x_i^t + \eta_j^t \quad (1)$$

여기서  $\eta_j^t$ 는 j 번째 안테나에서 첨가되는 잡음으로 평균이 0이며 분산이  $N_0$ 인 복소 가우시안 랜덤 변수를 나타내며,  $\alpha_{i,j}$ 는 i 번째 송신 안테나와 j 번째 수신안테나 사이의 경로 이득이다. 이러한 경로 이득은 한 프레임 구간 동안은 일정하다고 가정한다[8]. 경로 이득  $\alpha_{i,j}$ 는 복소 가우시안 랜덤 변수로서 분산 1을 가진다. 수신기에서는 완벽한 채널 상태 정보를 안다는 가정 하에 maximum likelihood 복호 방법을 사용하여 복호한다.

이는 복조기가 각각의 수신안테나 j ( $1 \leq j \leq M$ )에서 수신된 신호로부터 매 시간 슬롯 t 마다 모든 경로의 경로 가중치 (path metric)를 계산하고 누적 가중치 값이 가장 작은 경로를 찾아가며 원신호를 복원한다. 누적 가중치 계산식은 식 (2)와 같으며, 수신된 신호와 가능한 신호의 조합에 의한 자승 오차의 누적치를 구하여 비터비 알고리즘을 통하여 복원된다.

$$\sum_{j=1}^M \left| d_j^t - \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j} x_i^t \right|^2 \quad (2)$$

그림 2는 4-PSK의 송신 신호  $x_i^t$ 의 집합으로 전송 가능한 모든 신호의 trellis 구조를 나타낸다.

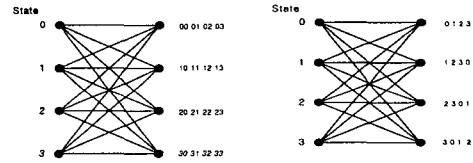


그림 2. 기존의 4 state, 4-PSK STTC

그림 3. 제안된 4 state, 4-PSK 트렐리스 부호

## III. 제안된 트렐리스 부호

본 절에서는 페이딩 환경에 강한 제안된 트렐리스 부호화 방식을 제시한다. 이는 기존의 STTC방법에서 사용했던 것과 유사하지만 송신안테나를 하나만 사용하며, 그림 2의 트렐리스 구조에서 나타낸 모든 신호를 사용하지 않고 그림 3과 같이 제안된 4-PSK 트렐리스 부호를 사용한다.

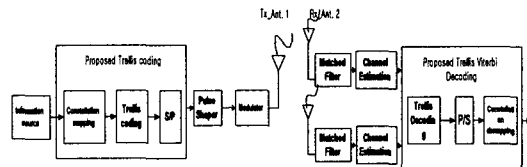


그림 4. 제안된 트렐리스 부호의 송수신부 구조도

## 페이딩 환경에 강한 트렐리스 부호화 방식의 성능분석

위의 그림 4는 제안된 트렐리스 부호화 방법의 송수신부 구조를 나타낸다. 이 부호에서 정보는 단일 송수신 안테나를 사용함으로써 공간상의 다이버시티 이득은 얻지 못하나 동기화 문제를 해결할 수 있으며, 기존의 STTC방법에서는, 경로이득  $\alpha_{i,j}$ 가 상관성이 없는 경우에 다이버시티 이득을 얻게 설계되어 있으므로 [1]-[5] 상관성이 있는 경우에는 좋은 성능을 얻지 못하나, 제안된 트렐리스 부호는 상관성이 있는 채널 환경에서 STTC방법보다 우수한 성능을 나타낸다. 위의 그림 4에서 수신안테나에서의 수신된 신호는 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$d^i_t = \alpha^j_t \cdot x_t + \eta^j_t \quad (3)$$

여기서,  $\eta^j_t$ 는 앞에서와 같이 j번째 수신안테나의 잡음으로 평균이 0이고 분산이  $N_0$ 인 복소 가우시안 랜덤 변수를 나타내고,  $\alpha^j_t$ 는 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 경로 이득이다. , 식 (3)에서  $\eta^j_t$ 가 0이고, 경로 이득  $\alpha^j_t$ 를 1 이라고 가정할 때, 그림 5-(b)와 같은 성상도를 형성한다.

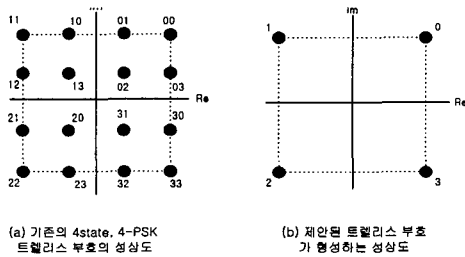


그림 5. STTC과 제안된 부호에서의 성상도 비교

그림 5-(a)와 같이 기존의 STTC방법의 성상도는 신호들간의 유클리드 거리가 가까워서 부호들간의 상대적인 오류확률이 크게 되어 SNR이 낮을수록 에러가 많이 생성되며, 제안된 부호화 방식은 신호들간의 유클리드 거리가 상대적으로 멀어서 오류 확률을 크게 줄일 수 있다. 따라서, SNR이 낮으며 상관성이 높은 페이딩 환경에서 제안된 부호화 방식의 성능이 더 좋게 된다.

일반적인 STTC방법과 제안된 방식은 트렐리스상에서 모든 경로로 분리되어 갈 수 있고, 또한 임의의 상태로 결합하는 가지들은 모든 상태에서부터 올 수 있다. 또 수신부에서도 복호부에서의 채널 상태 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정할 때, 트렐리스 부호의 성능은 트렐리스 가지들마다 할당되는 부호들간의 유클리드 거리 즉, 경로 가중치 값의 차이에 의해서만 성

능이 결정된다고 할 수 있으므로, 다음 식과 같이 수신된 데이터 신호와 가능한 신호 조합에 의한 자승 오차의 누적치를 계산하여 비터비 알고리즘을 통하여 원신호를 복원한다.

$$\hat{c} = \arg \min_c \left( \sum_{i=1}^K |d^i - \alpha^i c|^2 \right), \quad c \in \{0, 1, 2, 3\} \quad (4)$$

여기서  $\alpha^j_t$ 는 단일 송신안테나에 따른 수신안테나의 개수를  $j$  ( $1 \leq j \leq M$ )라 할때의 경로이득을 나타내며, 즉 단일 송신 안테나에 수신안테나를 증가시키면서 성능은 비교분석 할 수 있다.

## IV. 모의 실험 성능 분석

제안된 트렐리스 부호의 성능을 분석하기 위해 Matlab을 이용하여 Frame Error Rate (FER)을 비교하는 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험은 1개의 송신안테나와 1개의 수신안테나를 사용한 시스템과 1개의 송신안테나와 2개의 수신안테나가 적용된 시스템에서, 송신하는 신호는 130개의 심벌로 구성되어진 프레임 단위로 송신하며, 비교 대상으로는 Tarokh가 발표한 2개의 송신 안테나를 사용한 STTC방법[2]과 상관계수, 수신안테나 개수 그리고 SNR에 따라 FER을 측정하였다. 수신부에서는 비터비 알고리즘을 사용하므로 각 프레임의 시작과 끝은 0 state로 수렴하도록 프레임 마지막 2비트는 0을 삽입하였다.

기존의 STTC방법에서 송신 안테나가 2개 이상이 되는 시스템에서는 Rayleigh 페이딩 채널이 상관성[9]을 가질 수 있으므로 상관계수  $\rho=0, 0.5, 1$ 에 따라 모의 실험을 하였다. 수신부에서는 채널의 정보를 정확히 알고 있다고 가정하였고, 비터비 알고리즘이 적용된 최대 우도 복호기 (maximum likelihood decoder)를 사용하였다.

그림 6은 수신 안테나가 1개인 경우에 송신안테나들 사이의 상관계수에 따른 시스템의 성능을 나타내었으며, 그림 7은 2개의 수신안테나를 사용한 시스템에서의 성능을 나타내고 있다.

예상된 바와 같이 송신 안테나 사이의 상관성이 없는 채널에서는 SNR이 높은 경우 STTC방법이 우수하지만, SNR이 낮거나 상관계수가 0.5이상이 되는 경우에는 제안된 트렐리스 부호화 방식이 우수한 성능을 제공함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수신기에서 신호들간의 유클리드 거리가 최대가 되도록 설계된 트렐리스 부호화된 전송방법을 사용함으로써, 단일 안테나를 사용하여도 기존의 두 개의 송신 안테나를 사용하는 시스템보다 성능이 우수한, 상관성이 높은 페이딩 채널에 강인한 트렐리스 부호화방법을 제안하였다.

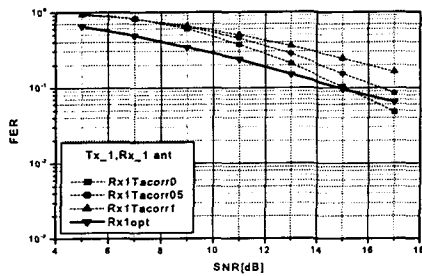


그림 6. 단일 수신안테나 일 때, 각 부호의 FER 성능 분석

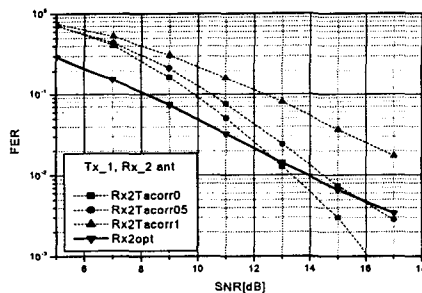


그림 7. 수신안테나 2개 일 때, 각 부호의 FER 성능 분석

따라서, 채널에 상관성이 존재하는 페이딩 환경에서는 제안된 방식의 트렐리스 부호화 방식이 기존의 방식보다 우수한 성능을 보인다는 결론을 얻을 수 있다. 현재는 프레임의 길이가 130개 심볼보다 줄어든 경우에 제안된 방식의 성능을 분석하고 있으며, 앞으로의 연구에서는 제안한 트렐리스 부호화 방식과 Reed-Soloman 부호를 결합시키는 방법 연구, multi-level 신호에 대한 다중 경로 페이딩 환경에서의 성능 분석에 대한 연구가 진행 될 것이다.

참고 문헌

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless communications*, New York, IEEE Press, 1996.
- [2] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication : Performance criterion and code construction," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 199-207, Mar. 1998.
- [3] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [4] N. Seshadri, V. Tarokh, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for wireless communication : Code construction," in *Proc. IEEE VTC'97*, pp. 637-641, May 1997.
- [5] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas. Comm.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [6] W. Robert, Heath. Jr., and A. Paulraj, "Multiple antenna array for transmitter diversity," in *Proc. IEEE ICC'99*, pp. 36-40, June 1999.
- [7] V. Tarokh, A. Naguib, and A. R. Calderbank, "Combined array processing and space-time coding," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 45, no. 4, pp. 1121-1128, May 1999.
- [8] G. Bauch, "Concatenation of space-time block codes and turbo TCM," in *Proc. IEEE ICC'99*, pp. 534-538, June 1999.
- [9] R. B. Ertel, "Generation of Two Equal Power Correlated Rayleigh Fading Envelopes" *Comm. Lett.* vol. 2, no. 10, pp. 276-278 Oct. 1998

정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행