

# 페-루프 다중안테나시스템에서 제한된 피드백을 이용한 시공간블록부호기술의 적용

\*김정미, 오동진, 김철성

\*전남대학교 컴퓨터정보통신공학과, 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

e-mail : \*skygalaxy@naver.com, djoh@chonnam.ac.kr, chskim@chonnam.ac.kr

Unitary precoding space time block coding with limited feedback

\*Jeong-Mi Kim, Dong-Jin Oh, Cheol-Sung Kim

\*Dept. of Computer Engineering, Dept. of Electronics Computer &  
Information Engineering, Chonnam National University

## Abstract

Space-time code is a good solution to get transmit diversity. During the last years a number of space-time block codes have been proposed for use in multiple transmit antenna systems. This code, however, was presented only for the special case of the certain numbers of transmit antennas and the certain modulation schemes. and designed under the assumption that the transmitter has no knowledge about the channel. In this work, on the other hand, we consider the case when the transmitter has partial, but not perfect knowledge about the channel. This system can have full diversity for arbitrary number of the transmit antennas with a little bits of feedback.

## I. 서론

차세대 이동 및 무선통신 시스템은 현재보다 빠른 고속 데이터 전송과 시스템 용량을 요구하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 최근 복수의 안테나를 사용하여 데이터를 송수신하는 기술들이 사용되고 있다. 무선 채널이 유선 채널 보다 데이터 전송이 어려운 이유 중 하나는 채널이 시간에 따라 변화하는 페이딩이 현상 때문이다. 페이딩 현상을 효과적으로 극복하는 방법은 페이딩 변화 특성이 독립적인 여러 채널

을 형성하여 신호를 형성하는 다이버시티(diversity) 방법이다. 복수 안테나를 사용하는 것은 공간 다이버시티에 해당하며, 이것은 추가로 또 다른 주파수를 사용하지 않아도 된다는 장점이 있다.

본 논문에서는 송신기에서 채널의 정보를 이용할 수 있는 페-루프 시스템에 시공간블록부호 방식을 적용하였다. 시공간블록부호 방식은 주로 개-루프 시스템에 적용되는 다이버시티 기법으로, 송신 안테나의 개수에 따라 부호의 존재 여부가 종속적이다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 적은 제한 채널 정보로 송신 안테나의 개수와 무관하게 시공간블록부호를 적용하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

## II. 관련 연구

### 2.1 송신 다이버시티

무선을 통한 데이터 서비스 경우 하향링크(downlink,)가 상향링크(uplink)보다 큰 용량을 요구하며 하향링크 용량을 증대시키기 위해서는 단말기의 안테나의 수를 증대시키는 것이 효과적이지만, 단말기의 경우 전력, 크기, 무게, 가격의 제약 때문에 많은 수의 안테나를 두는 것은 현실적이지 않다. 이에 반해서 기지국은 그러한 제약이 상대적으로 적으므로 그 대안으로 기지국의 안테나의 수를 그 대안으로 기지국의 안테나의 수를 증가시키는 방법을 택할 수 있다. 그러나 수신기와는 달리 송신측에서는 단순히 복수의 안테나를 두는 방법만으로는 다이버시티효과나 신호대잡음비의 증가를 이룰 수는 없다. 따라서 복수의 안테나로 신호를 송신하기 이전에 어떤 특정한 신호처리과정이 필요하다. 이 송신기의 신호처리과정에서 채널의 정보 이용 여부에 따라 개-루프 다이버시티와 페-루프

\* 본 연구는 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

다이버시티로 구분한다. 이 기술들은 어느 것이 다른 것보다 항상 우수하다고는 할 수 없으며, 채널의 특성, 안테나의 수, 단말기의 속도 등 여러 가지 시스템 특성에 의해서 그 성능이 결정된다.

2.2 페-루프 다이버시티

송신기에서 채널의 정보를 이용하는 방법을 이용할 경우 TDD(time division duplexing) 방식에서는 수신 신호를 이용하여 채널을 예측하며 FDD(frequency division duplexing) 방식에서는 수신기로부터의 케환(feedback) 정보를 이용하게 된다. 단말기의 속도가 상대적으로 적은 실내 및 도심 환경에서는 비교적 정확한 채널의 정보를 얻을 수 있다. Angular spread가 큰 scattering 채널에서는 FDD 경우, 상향링크의 결과를 하향 링크에 사용할 수 없으므로 기지국은 단말기로부터 채널정보를 받아서 이를 이용하여 빔포밍(beamforming)을 행하게 된다. 이러한 기술을 closed-loop transmit diversity 또는 TxAA(transmit adaptive array)라고 한다. 송신기에서 정확한 채널의 상태정보를 아는 것이 가능할 경우 다이버시티 이득과 함께 빔포밍에 의한 수신 신호대잡음비의 이득을 얻을 수 있다. 그러나 정확한 채널의 상태정보를 위해서는 많은 양의 정보를 케환해야 하므로 시스템에 오버헤드를 야기한다는 단점이 있다.

2.3 개-루프 다이버시티

송신기에서 채널의 정보를 이용하지 않는 경우에는 신호를 송신하기 전에 시간과 공간에서의 특별한 부호화가 필요하며 이것을 시공간부호(space-time codes)라고 한다. 시공간블록부호(space-time block codes)는 시공간부호의 가장 간단한 형태로 레일레이 플랫폼 페이딩 환경에서 뛰어난 성능을 제공하며, 특히 송신 안테나의 수가 2인 경우 Alamouti가 제안한 직교 시공간블록부호(orthogonal space time block codes)는 최대 전송률과 최대 다이버시티 이득을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 간단한 선형처리만으로도 최대 우도 복호가 가능하다는 장점을 지니고 있다[1]. 그러나 복소 변조방식을 사용하는 경우 송신 안테나의 개수가 2이상이면 최대 전송률과 최대 다이버시티를 얻는 부호는 존재하지 않는다[2]. 준직교 시공간블록부호는(Quasi-orthogonal space time block codes) 송신 안테나가 4개인 경우 직교 시공간블록부호와 같은 장점을 얻기 위해 설계되었다. 그러나 오류 성능곡선의 경사를 결정하는 직교성 조건을 완화시킴으로 인해 다이버시티 지수가 최대가 아니기 때문에 높은 신호대잡음비 영역에서는 직교 시공간블록부호보다 성능이 더 떨어진다. Su는 신호성상도(constellation)를 회전시켜 최대 전송률과 최대 다이버시티 이득을 동시에 얻는 방법을 제시하였으나 이것도 특정한 송신 안테나의 수의 경우에만 존재한다는 단점이 있다[3].

III. 시스템 모델

3.1 시나리오

$n_t$ 는 송신 안테나의 수,  $n_r$ 은 수신 안테나의 수,  $T$ 는 송신 심볼 주기,  $m_t$ 은 substream의 수를 의미한다.

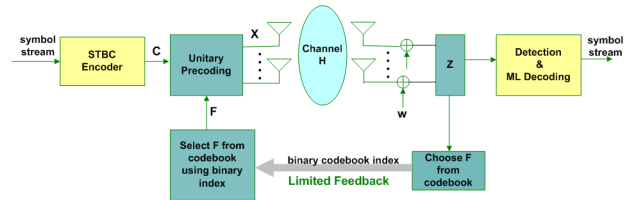


그림. 1. space time block coding with limited feedback

수신기에서 채널정보를 케환하는 채널이 독립적으로 존재하는 FDD 시스템으로, 케환 채널에서는 잡음이 없다고 가정한다. 또한 송·수신기는 미리 정해진 코드북  $F$ 를 알고 있다고 가정한다.

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\} \quad (식.1)$$

수신기는 현재의 채널 상황에서 시스템의 오류 확률을 최소화하는 행렬  $f_k$ 를 찾아 이 행렬의 인덱스  $k$ 를 송신기로 보내준다. 따라서 케환되는 채널정보의 양은  $\log_2 N$  비트이다.

송신기는 복소(complex) 변조된 심볼  $s_1, \dots, s_m$ 를 시공간블록부호화를 한 후, 코드북  $F$ 에서 수신기로부터 케환된 인덱스  $k$ 에 해당하는 선부호화행렬  $f_k$ 를 이용하여  $n_t$ 개의 안테나로 송신한다.

수신기가 MRC(maximum ratio combining) 기법을 이용한다고 가정하고, 이때의 가중치 벡터를  $z$ 라 하면, 수신신호  $y$ 는 (식.2)와 같고, 수신단에서의 신호대잡음비  $\gamma$ 는 (식.3)과 같이 표현할 수 있다[4].

$$y = z^H H f s + z^H w \quad (식.2)$$

$$\gamma = \frac{|z^H H f|^2}{\|z\|^2 N_0} \quad (식.3)$$

여기에서  $H$ 는  $n_t \times n_r$ 의 레일레이 플랫폼 페이딩 채널 행렬이고,  $f$ 는  $n_t \times m_t$ 의 선부호화 행렬,  $s$ 는  $m_t \times T$ 의 시공간블록부호화 행렬을 의미한다. 또  $w$ 는  $n_r \times m_t$ 의 잡음행렬이며, 수신단에서 발생하는 iid(independent identical distributed) 분포 특성을 갖는 Gaussian 가산성 잡음으로 실수부와 허수부가 각각  $\frac{N_0}{2}$ 의 양방향 전력 밀도를 갖는다.

수신기에서는 채널을 정확하게 추정할 수 있다고 가정하면, 수신된 신호는 추정된 채널의 정보  $z$ 를 곱하

고 최대우도복호화(maximum likelihood decoding)과정을 거쳐 송신 심벌을 복호해 낸다.

3.2 직교 시공간블록부호

Alamouti가 제안한 직교 시공간블록부호는 송신 안테나의 수가 2개일 경우 최대의 전송률(full rate)과 최대의 다이버시티(full diversity) 이득을 제공하는 최초의 시공간블록부호로 최대우도복호 과정이 MRC(maximum ratio combining)과 같아 수신기 구조를 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있다[1,2].

(식.4)는 Alamouti 시공간부호 행렬  $C_m$  를 나타낸다.

$$C_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{식.4})$$

$$\det(A_{Ala}(S, \hat{S})) = (|s_1 - \hat{s}_2|^2 + |s_2 - \hat{s}_1|^2)^2 \quad (\text{식.5})$$

이 행렬의 determinant는 (식.5)와 같고, 2개의 송신 안테나를 사용하여 얻을 수 있는 최대의 다이버시티 지수 2를 갖는다는 것을 알 수 있다.

그러나 복소 변조 방식을 사용하는 시스템에서 최대의 다이버시티와 최대의 전송률을 만족하는 시공간블록부호 행렬은 존재하지 않음을 [2]에서 Tarokh는 증명하였다.

3.3 준직교 시공간블록부호

Su는 TBH가 제안한 준직교 시공간블록부호를 바탕으로 신호 성상도 회전 기법을 이용하여 송신 안테나의 개수가 2이상인 4개의 경우에 대해 최대의 다이버시티 이득과 최대의 전송률을 얻는 시공간블록부호를 제안하였다[3,5].

$$C_4 \equiv \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_3 & s_4 & -s_1 & s_2 \\ -s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{식.6})$$

$$\det(A_{TBH}(S, \hat{S})) = \begin{vmatrix} a & 0 & b & 0 \\ 0 & a & 0 & b \\ b & 0 & a & 0 \\ 0 & b & 0 & a \end{vmatrix} = \left( \frac{-(a-b)(a+b)}{4} \right)^2 \quad (\text{식.7})$$

$$a = |x_1|^2 + |x_2|^2 + |x_3|^2 + |x_4|^2$$

$$b = x_1 x_3^* + x_3^* x_1 - x_2 x_4^* - x_4^* x_2$$

(식.6)은 TBH가 제안한 준직교 시공간블록부호 행렬이다. (식 7)의 행렬식을 보면  $a=b$ 인 경우와  $a=-b$ 인 경우에는 행렬식이 0이 되기 때문에 최대 다이버시티 이득을 얻을 수 없다. Su의 성상도 회전 기법은  $s_1, s_2$ 는 성상도  $S$ 로 변조를 하고  $s_3, s_4$ 는 성상도  $S' = e^{j\theta}S$ 로 변조를 하면 행렬식이 0이 되는 경우가 발생하지 않으므로 최대 다이버시티 지수를 얻을 수 있다.

3.4 코드북의 최적화

(식.3)의 신호대잡음비  $\gamma$ 는 (식.8)에 의해 (식.9)로 표현할 수 있다.

$$|z^H H f|^2 \leq \|z\|^2 \|H f\|^2 \quad (\text{식.8})$$

$$\gamma = \frac{\|H f\|^2}{N_o} \quad (\text{식.9})$$

만약 송신기에서 완벽한 채널 정보를 사용한다고 가정하면  $H$  SVD(singular value decomposition)으로 구한 dominant right singular value  $V_{\max}$ 를  $f^*$ 로 정하면  $\|H f\| = \lambda_{\max}$ 를 얻을 수 있다.

$$H = U D V^H : \text{SVD}$$

그러나 채널 전체의 정보는 제한 채널의 양을 증가시킨다. 따라서 부분적인 채널의 정보를 이용하는 경우에 대해 그 왜곡 함수를 식으로 나타내면 (식.10)과 같다[5].

$$E_H \left[ \lambda_{\max} - \sum_{t=1}^{t=n_i} \lambda_t |V_t^H(\arg \max_{1 \leq k \leq N} \|H f\|)|^2 \right] \leq E_H[\lambda_{\max}] E_H[1 - |V_{\max}^H \arg \max_{1 \leq k \leq N} \|H f\| |^2] \quad (\text{식.10})$$

따라서 위 식의 왜곡을 최소화하기 위해서는 (식.11)의 조건을 만족하는  $f$ 를 찾는 것은  $\gamma$ 를 최대화시키는 결과로 결국 오류 성능을 향상시킨다.

$$\max \delta(F) = \max \min_{1 \leq k \leq N} \sqrt{1 - |f^H_k f_t|^2} \quad (\text{식.11})$$

(식.11)은 chordal distance를 의미한다. 송·수신기의 코드북 행렬  $F$ 는 곧 chordal distance를 최소화시키는 문제이고 이것은 noncoherent 시공간부호의 신호 성상도 설계에서 다루어진 systematic unitary construction과 관계가 있다[6].

IV. 실험결과

4.1. 4 x 1 시스템, 시공간블록부호

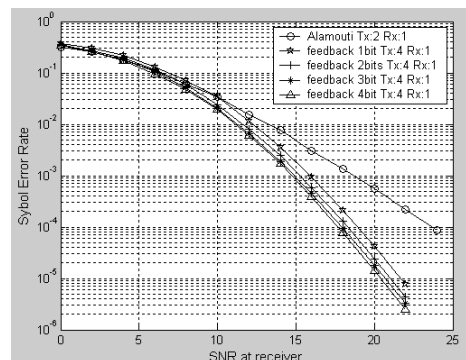


그림 2. 4x1 system with OSTBC

(그림 2)는 Alamouti의 직교 시공간블록부호를 송신 안테나의 수가 4이고 수신 안테나의 수가 1인 경우의 페-루프 시스템에 적용하여 진산 실험한 결과이다. 채널환경은 준정지 레일레이 플랫폼 (quasi-static Rayleigh flat) 페이딩 환경으로 가정하였으며, 피드백 채널에서의 오류는 없다고 가정하였다. 사용된 유니타리 선부호화(Unitary precoding) 행렬은 블록 순환(block circulant) 구조로 첫 번째 코드 북 행렬과 회전 행렬만을 알고 있으면 송·수신 단에서 독립적으로 생성시킬 수 있다.

표1.

피드백 비트 수	Alamouti 2x1 과 비교( 10 <sup>-4</sup> 기준)
1	약 4dB
2	약 4.9dB
3	약 5.4dB
4	약 5.6dB

4.2 5 x 1 시스템, 준직교 시공간블록부호

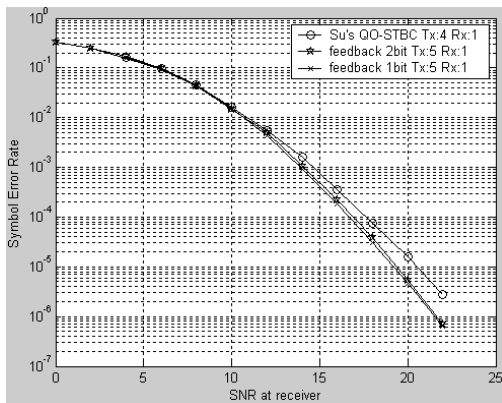


그림 3. 5x1 system with QO-STBC

(그림 3)은 준 직교 시공간블록부호를 송신 안테나의 수가 5이고 수신 안테나의 수가 1인 경우의 페-루프 시스템에 적용하여 실험한 결과로, 조건은 (그림1)의 경우와 동일하다. 두 경우 모두 변조방식은 4QAM을 사용하였다.

표 2.

피드백 비트수	Su의 QO-STBC 4x1 과 비교( 10 <sup>-5</sup> 기준)
2	약 1.3dB
3	약 1.5dB

V. 결론

본 논문에서는 송신 단에서 채널에 대한 정보를 사용하는 페-루프 시스템에 시공간블록부호를 적용하여 개-루프 시스템에서와 같이 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 것을 보였다. 특히, 적은양의 피드백만으로도 다이버시티 이득을 얻을 수 있어 페-루프 시스템에서 전형적으로 존재하는 오버헤드를 감소시켰다. 이러한 기법은 역방향 피드백 채널이 존재하는 FDD시스템이나 순방향과 역방향 전송이 번갈아 일어나는 TDD 시스템에 적용될 수 있다.

참고문헌

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

[2] [1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," *IEEE Jour. Select. Areas in Commun*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[3] W. Su and X. G. Xia, "Signal constellation for quasi-orthogonal space-time block codes with full diversity," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 50, pp. 2331-2347, Oct. 2004

[4] David J. Love and Robert W. Heath. Grassmann beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems. *IEEE Trans. on Information Theory*, 49(10), October 2003

[5] O. Tirkkonen, A. Boariu, and A. Hottinen, "Minimal nonorthononality rate 1 space-time block code for 3+Tx antennas," in *Proc. IEEE 6<sup>th</sup> Int. Symp. Spread-Spectrum Techniques and Applications* (ISSSTA 2000), Sept. 2000, pp.429-432

[6] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, T. J. Richardson, W. Sweldens, and R. Urbake., "Systematic design of unitary space-time constellations," *IEEE Trans. Info. Th.*, Vol.46, pp. 1962-1973, Sept. 2000

[7] Introduction to space-time wireless communications by Paulraj, Nabar and Gore. Cambridge University Press.