

MISO 시스템에서 시공간 블록 코드를 이용한 송신 고유빔 형성 기법

김홍철, 신요안, 이원철
송실대학교 정보통신전자공학부
전화 : 02-826-7980 / FAX : 02-823-7980

Transmit Eigen-beamformer with Space-Time Block Code for MISO Systems

Hong-Cheol Kim, Yoan Shin and Won-Cheol Lee
School of Electronic Engineering, Soongsil University
E-mail : chouls@amcs.ssu.ac.kr

본 논문은 한국전자통신연구원의 연구비 지원 결과임

요 약

본 논문에서는 MISO(Multiple-Input Single-Output) 시스템에서 시공간 블록 부호(Space-Time Block Code; STBC)와 전송 고유빔 형성기의 결합을 통해 전송 다이버시티 이득과 빔형성 이득을 동시에 추구하는 기법에 대해 설명하였다. 빔형성 이득에 대한 성능을 분석하기 위해 채널간 상관 정도에 따라 모의실험을 통해 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과 일반적인 STBC 기법을 적용하는 기법보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

I. 서 론

STBC는 고속 고품질의 데이터 전송을 위한 MISO 시스템에서 유망한 전송 다이버시티 (Transmit Diversity) 기법들 중에 하나이며, 많은 논문들을 통해 우수한 성능이 입증되었다[1,2]. 페이딩 효과를 완화시켜 용량을 증대하기 위해서는 다중의 송신안테나와 하나의 수신안테나 사이의 채널의 상관관계가 가능한 없어야 한다. 그러나 일반적인 매크로 셀 환경에서 플랫 페이딩 채널을 고려하면 상관관계가 없는 채널이 보충되지 않는다. 즉, 실제적인 경우에는 송신안테나들과 수신안테나 사이의 간섭성의 페이딩 특성이 발생하게 됨에 따라 안테나들의 코히어런트한 깊은 페이딩으로

인해 성능의 저하가 발생하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 고유빔 형성기(eigen beamformer)가 제시되었으며, 이 기법은 채널들간의 상관특성을 제거하는 방법이다[3]. 이러한 고유빔 형성기의 송신 빔형성 가중치 벡터는 다중의 송신안테나들의 출력들로부터 얻어지는 공간 상관 행렬의 고유벡터를 이용하게 된다. 이러한 고유빔 형성기는 평균적인 측면에서의 MISO 채널들 사이의 상관특성이 제거되는 특징을 가지게 된다[3,4]. 본 논문에서는 IMT-2000과 같은 무선 통신 시스템에서 하향링크 가용 용량을 극대화하기 위해 STBC와 고유빔 형성기의 결합을 통해 전송 다이버시티 이득과 빔형성 이득을 동시에 얻을 수 있는 방법을 설명하며, 무선 채널의 상관 정도에 따른 성능을 분석 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 기법을 적용하기 위한 MISO 무선 채널 모델에 대해서 설명하고, 3장에서는 송신 고유빔 형성기와 제안된 기법에 대해 설명한다. 4장에서는 성능분석을 위한 모의 실험 결과를 보이며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 빔형성을 위한 MISO 채널 모델

본 논문에서 고려하는 채널은 빔형성을 위한 안테나 배열이 STBC를 위해 두 개가 있는 경우를 고려하였

다. 배열 안테나 상에 서로 다른 도래각 퍼짐 중심각인 AoA(Angle of Arrival)를 갖고 지연 시간이 동일한 두 개의 공간성 다중경로가 존재하는 경우 각 다중경로는 여러 개의 ray들로 구성되며 ray들의 공간성 각 퍼짐 정도는 송신단이 위치한 지형적 환경이나 셀 반경 혹은 전송 안테나 높이 등에 의해 결정된다. 이 때 채널간의 상관 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다 [5,6].

$$\mathbf{R} = \sum_{r=0}^{N_{ray}} \mathbf{a}(\theta_r) \mathbf{a}^H(\theta_r) \quad (1)$$

여기서 $N_{ray} = N_{ray1} + N_{ray2}$ 는 다중경로가 갖는 ray의 수를 나타내며, $\mathbf{a}(\theta_r)$ 는 r 번째 ray의 입사 방향 θ_r 에 대한 $M_r \times 1$ 의 크기를 갖는 지향 벡터 (Directional Vector)이다. 일반적으로 지향 벡터는 안테나 센서들간의 유격과 ray들의 입사각에 의해 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a}(\theta_r) = [1 \exp(-j\mu) \cdots \exp(-j(M_r-1)\mu)] \quad (2)$$

여기서 $\mu = 2\pi/\lambda \cdot d \cdot \sin(\theta_r)$ 이다. 부배열의 안테나가 균일 분포로 가정될 때, 공간 상관 행렬은 Toeplitz 허미션 구조이며 다음과 같이 표현된다[6].

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & a & b & c \\ a^* & 1 & a & b \\ b^* & a^* & 1 & a \\ c^* & b^* & a^* & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (1)의 채널 상관 행렬 \mathbf{R} 를 고유치 해석을 통해 고유 벡터와 고유치로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q} \mathbf{\Sigma} \mathbf{Q}^H \quad (4)$$

여기서 \mathbf{Q} 는 고유 벡터들로 이루어진 행렬이며, $\mathbf{\Sigma}$ 는 고유치들로 이루어진 대각 행렬이다. 채널의 상관 행렬이 위의 식 (4)와 같을 때 각 배열 안테나와 수신단 사이의 채널은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$\mathbf{h} = [h_1 h_2 \cdots h_{M_r}]^T = \mathbf{Q} \mathbf{\Sigma}^{1/2} \mathbf{g} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{g} 는 채널의 페이딩 특성을 표현하는 평균이 0이고 분산값 1을 갖는 가우시안 랜덤변수들로 구성된 벡터이다.

상향 링크와 하향 링크가 동일한 주파수 대역을 사용하고, 수신 단말기와 송신단과의 거리가 충분히 떨어져 있고 송신단 안테나가 높게 설치되어 있다면, 송신단의 부배열 안테나에 속한 안테나간의 상호 상관 행렬은 수신 단말기로부터 송신 부배열 안테나로 도래하는 각 다중경로에 해당하는 ray들의 지향 벡터들에 의해 결정된다. 또한 부배열 안테나군간의 간격이 일정 수준이하인 경우 각 부배열 안테나가 갖는 상호 상관 행렬은 거의 동일하다고 볼 수 있다. 이 때 식 (4)를 상호 상관 행렬이라고 놓으면 송신단의 각 부배열

안테나와 수신 단말기간의 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1 &= [h_{11} h_{12} \cdots h_{1M_r}]^T = \mathbf{Q} \mathbf{\Sigma}^{1/2} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{h}_2 &= [h_{21} h_{22} \cdots h_{2M_r}]^T = \mathbf{Q} \mathbf{\Sigma}^{1/2} \mathbf{g}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{h}_i 는 i 번째 부배열과 수신단 사이의 채널을 나타내며, h_{ij} 는 i 번째 부배열 안테나의 j 번째 센서와 수신 안테나 사이의 페이딩 채널 페이딩 파라미터를 나타낸다. 또한 $\mathbf{g}_i = [g_{i,1} g_{i,2} \cdots g_{i,M_r}]^T$ 는 i 번째 부배열 안테나에 대한 수신 단말기의 이동 속도에 따른 도플러 스펙트럼을 고려한 평균이 0이고 분산이 1인 서로 독립적인 복소 가우시안 랜덤 변수들로 구성된 벡터이다. 이와 같이 채널을 정의할 경우의 채널의 상관 행렬을 구하면 이미 정의된 채널 상관 행렬과 같은 값을 아래의 식 (7)를 통해 알 수 있다.

$$E\{\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H\} = \mathbf{Q} \mathbf{\Sigma} \mathbf{Q}^H = \mathbf{R} \quad (7)$$

III. STBC와 고유빔 형성기의 결합

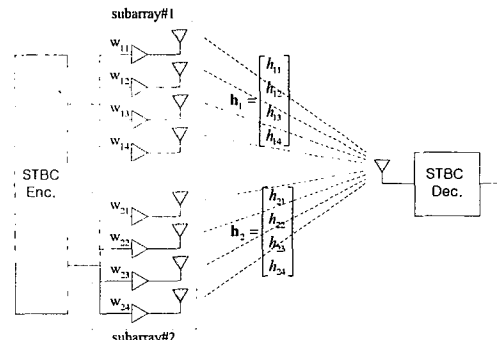


그림 1 : STBC와 빔형성 결합을 위한 시스템 구성.

그림 1은 두 개의 부배열을 수반하는 STBC를 위한 송신단의 구조를 나타낸 것이며, 각 부배열 내의 안테나 수가 4개인 경우를 도시한 것이다. 먼저 STBC 인코딩을 거쳐 두 개의 부배열로 신호가 분리되며, 이때 각 부배열에서 고유빔 형성기를 통해 전송하게 된다. 여기서 각 부배열은 빔형성을 위한 다수개의 안테나들로 구성되며, 각 부배열들 간의 거리는 충분히 떨어져 있는 경우이다. 고유빔 형성기는 채널의 공간 상관 행렬을 이용하여 빔형성 가중치를 계산하게 되며, 공간 상관 행렬은 전파 지연을 갖는 공간적으로 분포된 다중경로들의 각 퍼짐(angle spread)에 따라 정해진다. 따라서 두 개의 부배열들의 각 퍼짐들이 동일하게 나타나며 이로 인해 공간 상관 행렬들도 동일하게 된다. 각 안테나 부배열은 4개의 균일한 분포의 안테나

들로 구성된다. 여기서 다수개의 송신 안테나를 갖는 각 부배열과 하나의 수신안테나 사이의 채널을 식 (6)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 기지국과 이동국의 거리가 충분히 떨어져 있다면 각 부배열에 공간적 신호 특성은 동일하다고 가정된다. 따라서 두 개의 부배열의 상관 행렬이 동일하므로 전송을 위한 고유빔 형성기의 가중치 벡터들도 동일하게 이용되며 다음의 식으로 표현된다.

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\zeta} \sum_{j=1}^{M_i} \sqrt{\lambda_j} \mathbf{q}_j, \quad \mathbf{q}_j = \sum_{i=1}^{M_i} \tilde{\mathbf{w}}^j \quad (8)$$

여기서 \mathbf{w} 는 송신단에서의 공간 상관행렬의 고유치들인 $\{\mathbf{q}_j\}_{j=1}^{M_i}$ 의 선형 조합으로 구성된 고유빔 형성기의 가중치 벡터이다. 그리고 $\{\lambda_j\}_{j=1}^{M_i}$ 는 고유치들을 나타내며, $\zeta = \sqrt{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{M_i}}$ 는 시스템의 성능 비교를 위해 고유빔 형성기의 고유벡터를 l_2 -norm으로 만들기 위한 정규화 인수이다. 또한 $\{\tilde{\mathbf{w}}^j\}_{j=1}^{M_i}$ 는 고유벡터들을 각각 ζ 로 나눠준 형태를 갖는다. 전파 지연과 배경 침가 잡음을 고려하지 않은 경우 STBC 부호화를 통해 생성된 서로 다른 두개의 심벌 시퀀스 S_1 과 S_2 이 고유빔 형성기의 각 부배열을 통해 MISO 플랫 페이딩을 거쳐 수신단으로 전송된다. 이 때 각 부배열을 통해 수신단에 수신된 심벌은 다음과 같이 표현된다.

$$r_i = \left(\sum_{j=1}^{M_i} \tilde{\mathbf{w}}^{(j)H} \cdot \mathbf{h}_i \right) \cdot S_i \quad (9)$$

$$= \left(\sum_{j=1}^{M_i} f_j \right) \cdot S_i, \quad i=1, 2$$

여기서 $\{f_j\}_{j=1}^{M_i}$ 는 새로운 페이딩 파라미터이다. 따라서 새로운 페이딩 파라미터 f_j 의 값에 의해 페이딩 채널 특성이 결정되며, 이들의 상관 정도에 따라 전체적인 시스템 성능이 결정된다. 따라서 첫 번째 부배열에 대한 새롭게 생성된 페이딩 파라미터 f_i 의 상관정도를 살펴보면 다음과 같다. 즉, $m \neq n$ 의 경우,

$$E\{f_m f_n^*\} = E\left\{ \mathbf{w}_m^H \mathbf{h}_1 \mathbf{h}_1^H \mathbf{w}_n \right\}$$

$$= \mathbf{w}_m^H \left\{ \sum_{k=1}^{M_i} \lambda_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \right\} \mathbf{w}_n \quad (10)$$

$$= \lambda_m \mathbf{w}_m^H \mathbf{w}_n^H = 0$$

윗 식을 살펴보면 $m \neq n$ 인 경우 \mathbf{w}_m 과 \mathbf{w}_n 은 고유 벡터들이며 따라서 직교하기 때문에 0이 됨을 알 수 있다.

STBC 부호화되어 각 부배열을 통해 시간 간격 $[0, T]$ 와 $[T, 2T]$ 에 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 T 는 심분 간격을 나타낸다.

$$r_1 = S_1 \gamma_1 + S_2 \gamma_2 + n_1, \quad [0, T] \quad (11)$$

$$r_2 = -S_2^* \gamma_1 + S_1^* \gamma_2 + n_2, \quad [T, 2T]$$

여기서 S_i 는 i 번째 안테나로부터 송신되는 QPSK 심벌을 나타낸 것이다. $n_k, (k=1, 2)$ 는 복소 가우시안 랜덤변수인 AWGN이다. 또한 $\gamma_k, (k=1, 2)$ 는 k 번째 부배열과 관련되어 빔형성 가중치 벡터와 채널 벡터의 곱으로 표현되는 새로운 채널 파라미터로 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_k = \mathbf{w}^H \mathbf{h}_k, \quad (k=1, 2) \quad (12)$$

식 (8)과 같이 수신된 신호를 STBC 디코딩을 위해 선형 조합을 통한 채널 보상을 다음과 같이 수행하게 된다.

$$\tilde{S}_1 = r_1 \gamma_1^* + r_2^* \gamma_2$$

$$= (|\gamma_1|^2 + |\gamma_2|^2) \cdot S_1 + \eta_1$$

$$\tilde{S}_2 = r_1 \gamma_2^* - r_2^* \gamma_1$$

$$= (|\gamma_1|^2 + |\gamma_2|^2) \cdot S_2 + \eta_2 \quad (13)$$

식 (13)이 보여주듯이 STBC 디코딩을 통해 최대비 혼합 디코딩이 됨을 확인 할 수 있다. 위의 식 (14)를 이용하여 제안된 시스템의 출력 SNR을 계산하면 다음과 같이 나타나게 된다.

$$SNR = \frac{1}{2} \frac{|\gamma_1|^2 + |\gamma_2|^2}{\sigma_n^2} \quad (13)$$

III. 모의 실험

본 절에서는 제안된 기법의 성능 분석을 위해 모의 실험을 통해 성능을 나타내었다. 모의실험에 사용된 채널 모델은 채널간 상관 특성에 따라 2가지 모델을 [5]의 MIMO 채널 모델중 기지국 채널 모델에서 선택하여 적용하였다.

A) 채널간 상관이 작은 경우

Macrocell Veh A, AoA=50도, AS(Angle Spread)=10도, 그리고 안테나간 간격이 4λ인 경우이다. 이때 식 (3)의 상관행렬의 값은 $a=0.1669+0.0944i$, $b=0.0370+0.0409i$, $c=0.0092+0.0220i$ 이다.

B) 채널간 상관이 큰 경우

Macrocell Veh A, AoA=50도, AS(Angle Spread)=10도, 그리고 안테나간 간격이 0.5λ인 경우이다. 이때 식 (3)의 상관행렬의 값은 $a=-0.6821+0.6512i$, $b=0.0673-0.8081i$, $c=0.3773+0.5411i$ 이다.

제안된 기법<STBC+EBF>과의 성능 비교를 위해

무선 채널이 서로 독립적인 2개의 송신 안테나를 사용하고 하나의 수신 안테나를 사용하는 일반적인 STBC 기법<STBC>과 비교하였으며, 또한 제안된 기법과 동일한 구조에서 고유빔 형성기를 사용하지 않고 AoA를 정확하게 알고 있다고 가정된 일반적인 지향성 빔형성기(Directional Beamformer)를 적용한 경우 <STBC+DBF>와도 성능을 비교하였다.

그림 2는 채널간의 상관관이 거의 없는 경우의 시스템의 성능을 나타낸 것이다. 빔형성 이득이 최대화 되기 위해서는 채널간 상관 정도가 커야 하지만, 이 채널 모델은 부배열의 안테나간 간격이 4λ로 매우 크기 때문에 채널간 상관정도가 거의 없기 때문에 빔형성 이득이 거의 없음을 알 수 있다.

또한 그림 3은 부배열의 안테나들의 간격이 0.5λ로 채널간 상관정도가 매우 큰 경우에 대한 시스템의 성능을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 일반적인 STBC 기법에 비해 약 5 dB이상 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

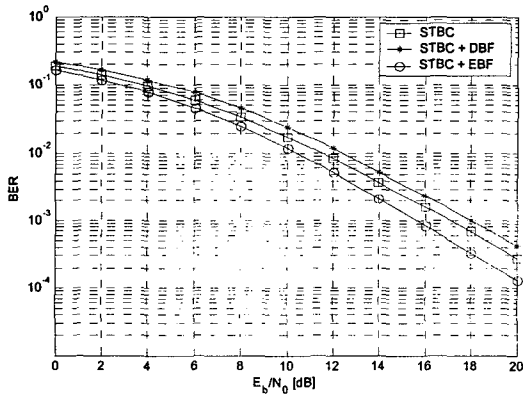


그림 2 : 채널간 상관관이 적은 경우.

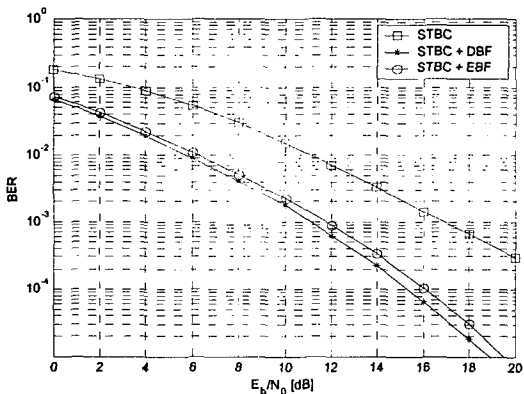


그림 3 : 채널간 상관관이 큰 경우.

IV. 결론

본 논문에서는 송신단에서 다중의 안테나를 사용하고 수신단에서는 하나의 수신 안테나를 사용하는 MISO 시스템에서 STBC와 전송 고유빔 형성기의 결합을 통해 하향링크 가용 용량을 증대시킬 수 있는 방법에 대해 설명하였다. 제안된 기법은 STBC를 통한 전송 다이버시티 이득과 고유빔 형성기를 통한 빔형성 이득을 동시에 얻을 수 있다. 빔형성 이득에 대한 성능을 분석하기 위해 채널간 상관특성이 큰 경우와 매우 적은 경우에 대해서 실험한 결과 채널간 상관관이 적은 경우에는 고유빔 형성기를 통한 이득이 크지 않지만 부배열 내의 안테나 간격이 적은 즉, 채널간 상관관이 큰 경우에는 매우 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 본 논문에서는 채널간 상관 행렬을 송신단에서 모두 정확하게 알고 있다고 가정되었다. 추후 수신단에서 측정된 공간 상관 행렬의 정보를 제한하는 보다 실질적인 환경에서의 성능분석을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] M. Sandell, "Analytical analysis of transmit diversity in WCDMA on fading multipath channels," *Proc. of VTC 2000 Fall*, Sep. 2000.
- [2] B. A. Bjerke, J. G. Proakis, "Antenna Diversity Combining Schemes for WCDMA Systems in Fading Multi-path Channels," *Proc. of VTC 2000 Fall*, Sep. 2000.
- [3] 3GPP, Tx Diversity solutions for multiple antennas, 3G TR25.869, Release 5, V0.1.1, Nov. 2001.
- [4] A. Seeger, A. Lobinger, R. Wiedmann and B. Raaf, "Performance of downlink eigenbeamformer with realistic feedback transmission," *Proc of VTC 2001-Fall*, vol. 3, pp. 1269-1273, 2001.
- [5] Lucent, Nokia, Siemens, Ericsson, "A Standardized set of MIMO radio propagation channels," *3GPP Document TSG-RAN WG1 #23*, R1-01-1179, Jeju, Korea, Nov. 2001.
- [6] Siemens, "Channel model for Tx diversity simulations using correlated antennas," *3GPP Document TSG-RAN WG1 #15*, R1-00-1067, Berlin, Germany, Aug. 2000.