

다중 경로 페이딩 채널을 위한 Maximum Ratio Transmission 기법

°이경규, 오관명, 김학성, 이원철, 신요안
승실대학교 정보통신전자공학부
°전화 : 02-817-1539 / 팩스 : 02-821-7653

A Maximum Ratio Transmission Scheme for Multipath Fading Channels

°Kyung-Kyoo Lee, Gwan-Myeong Oh, Hak-Seong Kim, Woncheol Lee and Yoan Shin
School of Electronic Engineering, Soongsil University
°E-mail : btwins@amcs.ssu.ac.kr

요 약

고품질, 고속 데이터 전송을 요구하는 제 3세대 무선 통신 시스템에서는 페이딩 현상에 효과적으로 대처하기 위한 방안으로 여러 가지 다이버시티 기법이 연구되어 왔다. 특히 최근 들어 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 시스템에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이러한 추세에 부합하여 송·수신단에 여러 개의 안테나를 사용하여 수신단의 SNR을 최대화하는 MRT (Maximum Ratio Transmission) 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 플랫 페이딩 (Flat Fading) 채널에 국한된 기존의 MRT 연구 결과를 확장하여 다중 경로 페이딩 채널에 대한 MRT 기법을 유도하고 성능을 분석하였으며, 이를 검증하기 위하여 모의실험을 수행하여 다중 경로 및 안테나 수에 따른 비트오율 성능을 제시하였다.

I. 서 론

무선 통신 시스템이 겪는 성능 열화 요인으로 크게 다중 경로 페이딩 현상과 다중 사용자들간의 간섭이 있다. 이러한 성능 열화 요인들에 적절히 대처하기 위해 시간, 주파수 및 공간영역 상에서

여러 형태의 다이버시티 구현을 위한 방안들이 연구되어 왔다. 이 중 수신 다이버시티 기법으로 MRC (Maximum Ratio Combining) 기법이 널리 사용되고 있으나, 이는 이동 단말기의 소형화, 저가격화를 고려할 때 수신 안테나 수가 제한된다는 점에서 충분한 다이버시티 효과를 얻지 못하고 있다. 이와 더불어 고품질, 고속 데이터 전송을 요구하는 제 3세대 무선 통신 시스템에서는 점점 늘어나는 순방향 무선 서비스의 요구량을 해결하고 순방향 통신 시스템 용량 제한으로 인한 시스템 성능 열화를 극복하고자 전송 다이버시티 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며[1,2], 송신 및 수신단에서 동시에 다이버시티 효과를 얻기 위한 MIMO 시스템에 대한 연구 또한 최근 들어 많은 관심이 집중되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 단일 경로 플랫 페이딩 환경에서 다중의 송·수신 안테나를 동시에 사용하여 수신단 신호대잡음비 (SNR)를 최대화하는 MRT 기법이 제안되었다[3].

본 논문에서는 플랫 페이딩 채널에 국한된 기존의 MRT 기법을 다중 경로 페이딩 채널로 확장하여 수신단에서의 SNR을 최대화하는 최적의 해를 제시하였다. 이를 검증하기 위해서 모의실험을 수행하여 경로 및 송신 안테나의 수의 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 보였다. 본 논문의 구성

은 다음과 같다. 2절에서는 기존의 단일 경로 플랫폼 페이딩 채널에서의 MRT 기법에 대한 이론을 간단히 설명하고, 이를 다중 경로 페이딩 채널[4]로 확장 분석한 결과를 제시한다. 3절에서는 제안된 MRT 기법의 다중 경로 페이딩 채널 하에서의 모의실험 결과를 보이고, 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

II. MRT 기법

2.1. 플랫폼 페이딩 채널에서의 MRT 기법

플랫폼 페이딩 채널 환경에서 송·수신단에 다중 안테나를 사용한 기존의 MRT 기법은 수신단의 SNR을 최대화시킬 수 있는 송·수신 가중치를 구한 후 이를 이용하여 심벌을 전송하는 방식이다. 그림 1은 K 개의 송신 안테나와 L 개의 수신 안테나를 사용하는 MRT 시스템의 일반적인 구성도를 보인다.

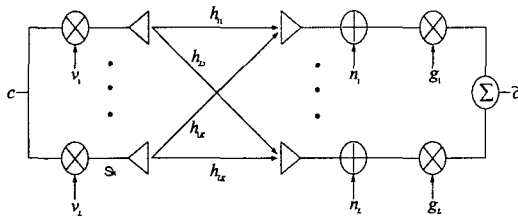


그림 1. MRT 구성도.

그림 1에서 c 는 송신단에서의 전송하고자 하는 심벌을 의미하고, s 는 심벌에 식 (1)로 표현되는 $K \times 1$ 크기의 송신단 가중치 벡터를 곱하여 얻어진 $K \times 1$ 크기의 벡터로서 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{v} = \frac{1}{a} (\mathbf{gH})^H \quad (1)$$

$$\mathbf{s} = c\mathbf{v} = \frac{c}{a} (\mathbf{gH})^H \quad (2)$$

$$a = |\mathbf{gH}| = \sqrt{\left(\sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^L g_p g_q^* \sum_{k=1}^K h_{pk} h_{qk}^* \right)} \quad (3)$$

식 (1)에서 a 는 정규화 인자를 나타내며, 식 (3)과 같이 정의된다. 또한 \mathbf{g} 는 $1 \times L$ 크기의 수신단 가중치 벡터, \mathbf{H} 는 크기가 $L \times K$ 인 채널 행렬, 윗 첨자 H 는 Hermitian (Conjugate Transpose) 연산을 의미한다. K 개의 송신 안테나와 L 개의 수신 안테나를 사용하는 경우의 채널 행렬 \mathbf{H} 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L1} & \dots & h_{LK} \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서, h_{lk} ($l = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K$)는 k 번째 송신 안테나와 l 번째 수신 안테나 사이의 복소 채널 계수를 의미한다. 채널 계수 h_{lk} 는 서로 통계적으로 독립적이며, 모든 채널 계수는 완벽한 추정 이 되었다고 가정한다. 이렇게 가정된 채널을 통과한 후 $L \times 1$ 크기의 수신 신호 \mathbf{x} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (5)$$

여기서, \mathbf{n} 은 부가성 백색 가우시안 잡음 (AWGN)을 의미한다. 수신 신호 \mathbf{x} 에 수신단 가중치벡터 \mathbf{g} 를 곱하여 송신 심벌 c 의 추정치 \hat{c} 를 구할 수 있으며, 이 과정은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{c} &= \mathbf{g}\mathbf{x} = \frac{c}{a} \mathbf{g}\mathbf{H}(\mathbf{g}\mathbf{H})^H + \mathbf{g}\mathbf{n} \\ &= ac + \mathbf{g}\mathbf{n} \end{aligned} \quad (6)$$

이와 같이 추정된 심벌 \hat{c} 로부터 얻어진 수신단 SNR은

$$\gamma = \frac{a^2}{\mathbf{g}\mathbf{g}^H} \gamma_0 = \frac{a^2 \gamma_0}{\sum_{p=1}^L |g_p|^2} \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서, γ_0 는 다이버시티를 사용하지 않았을 때, 즉 단일 안테나 시스템의 SNR을 나타낸다. 성능 척도인 비트오율 (BER)을 최소화하기 위해서는 수신 신호의 SNR을 최대화하여야 하며, 이것은 수신된 신호의 SNR에 비례하는 a^2 값을 최대화하는 것과 같다. 이러한 조건을 만족하는 \mathbf{g} 는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$(\mathbf{g}_p \mathbf{g}_q^*)^* = \frac{\sum_{k=1}^K (h_{pk} h_{qk}^*)}{\left| \sum_{k=1}^K (h_{pk} h_{qk}^*) \right|} \quad (8)$$

여기서 $p, q = 1, \dots, L$ 이고, 윗 첨자 $*$ 는 복소 Conjugate 연산을 의미한다. 이렇게 얻어진 \mathbf{g} 를 이용하여 식 (1), (3)의 \mathbf{v} 및 a 를 간단히 구할 수

다중 경로 페이딩 채널을 위한 Maximum Ratio Transmission 기법

있다. 이렇게 얻어진 송·수신 가중치는 단일 경로 플랫 페이딩 채널하에서 수신단의 SNR을 최대화 함으로써 다중 안테나를 이용하는 MRT 시스템의 성능을 극대화 할 수 있다.

2.2. 다중 경로 페이딩 채널에서 MRT의 확장

다중 경로 페이딩 환경에서는 송·수신에 $K \times L$ 개의 안테나에 의한 채널 링크가 형성이 되며, 각 채널 링크는 다시 M 개의 다중 경로 성분으로 이루어져 있다고 가정한다. 이처럼 다중 경로 페이딩 채널에서 K 개의 송신 안테나와 L 개의 수신 안테나로 구성된 시스템의 채널 행렬은 식 (4)와 유사한 방법을 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{11} & \cdots & \mathbf{h}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{L1} & \cdots & \mathbf{h}_{LK} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{h}_{lk} = \begin{pmatrix} h_{lk}^{(1)} \\ \vdots \\ h_{lk}^{(M)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

따라서 \mathbf{H} 는 $LM \times K$ 크기의 행렬이며, 행렬의 모든 원소는 서로 통계적으로 독립이라 가정한다. 또한 \mathbf{h}_{lk} 는 k 번째 송신안테나와 l 번째 수신 안테나 사이의 M 개의 다중 경로 성분 ($h_{lk}^{(m)}$)으로 구성된 채널 벡터를 의미한다. 다중 경로 성분 $h_{lk}^{(m)}$ 의 위첨자 m 은 해당 채널링크의 m 번째 다중 경로 성분을 의미한다. 다중 경로 페이딩 채널에서 수신단의 가중치 벡터 \mathbf{v} 는 식 (1)을 M 개의 다중 경로 성분을 갖는 채널로 확장하여 얻을 수 있으며, 이 때 정규화 인자 a 는 적절한 유도과정을 거치면 식 (10)의 형태로 표현 가능하다.

$$a = |\mathbf{g}\mathbf{H}| = \sum_{k=1}^K \left| \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M g_n^{(m)} h_{nk}^{(m)} \right| \quad (10)$$

$$= \sqrt{\sum_{n=1}^L \sum_{n'=1}^L g_n g_{n'}^* \left(\sum_{k=1}^K \left(\sum_{m=1}^M h_{nk}^{(m)} \right) \left(\sum_{m=1}^M h_{n'k}^{(m)*} \right) \right)}$$

다중 경로 페이딩 채널에서 송신 가중치 \mathbf{v} 는 식 (1)과 동일하게 정규화 인자 a , 수신단 가중치 벡터 \mathbf{g} 및 채널 행렬 \mathbf{H} 로 구성된다. 또한, 채널을 통과 후 수신된 신호 \mathbf{x} 도 식 (5)와 동일하다. 수신단의 SNR을 유도하기 위해 수신된 신호 \mathbf{x} 에 포함된 잡음의 전력 세기를 구하면 식 (11)과 같다.

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_n^2}{M^2} \left[\sum_{l=1}^L \left| \sum_{m=1}^M g_l^{(m)} \right|^2 \right] \quad (11)$$

한편, 신호의 전력은 $a^2 E[c^2]$ 이므로 수신단의 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{a^2 E[c^2]}{\sigma^2} = \frac{a^2}{\mathbf{g}\mathbf{g}^H} \gamma_0 = \frac{a^2 \gamma_0}{\sum_{l=1}^L |g_l|^2} \quad (12)$$

앞서 언급한 바와 같이 송·수신 가중치는 수신단의 SNR γ 를 최대화하도록 설계되어야 하며, 식 (10), (12)로부터 γ 를 최대화하는 수신 가중치 벡터 \mathbf{g} 를 구하면 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$(\mathbf{g}_p \mathbf{g}_q^*)^* = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\sum_{m=1}^M h_{pk}^{(m)} \right) \left(\sum_{m=1}^M h_{qk}^{(m)*} \right)}{\left| \sum_{k=1}^K \left(\sum_{m=1}^M h_{pk}^{(m)} \right) \left(\sum_{m=1}^M h_{pk}^{(m)*} \right) \right|} \quad (13)$$

수신 안테나가 $L=2$ 개인 경우 수신단 가중치 행렬은 $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_L]$ 이고, $\mathbf{g}_1 = [g_1^{(1)} \dots g_1^{(M)}]^T$, $\mathbf{g}_2 = [g_2^{(1)} \dots g_2^{(M)}]^T$ 으로 표현된다. 식 (13)에서 알 수 있듯이 g_i ($i=1, \dots, L$)는 개별적으로 구해질 수 없으며, $\mathbf{g}_p \mathbf{g}_q^*$ 와 같은 두 가중치의 곱의 형태의 해만을 제시하고 있다. 따라서 개별적인 가중치 값을 얻기 위해서는 어느 하나의 가중치를 사전에 정해진 특정값으로 설정한 후에 식 (13)을 이용하여 나머지 변수를 구해야 한다. 본 논문에서는 수신단에 2개의 수신 안테나를 사용한 경우를 고려하고, 이 경우 식 (14)과 같이 \mathbf{g}_1 을 고정하고 식 (13)을 이용하여 나머지 가중치 벡터 \mathbf{g}_2 를 구하였다.

$$|g_1^{(1)}| = \dots = |g_1^{(M)}| = 1, \quad |g_2^{(1)}| = \dots = |g_2^{(M)}| \quad (14)$$

수신단 가중치 벡터 \mathbf{v} 는 이미 구해진 a , \mathbf{g} , \mathbf{H} 로부터 식 (1)을 이용하여 쉽게 구할 수 있으며, 이렇게 얻어진 송·수신 가중치는 수신단 SNR을 최대화하도록 설계된 값들이다. 따라서, 최적의 \mathbf{g} , \mathbf{v} 값은 수신단의 BER을 최소화하여 다중 경로 페이딩 채널에서 겪는 채널 왜곡 성분을 효과적으로 보상함으로써 다중 송·수신 안테나를 이용하는 MIMO 시스템의 성능을 극대화할 수 있다.

III. 모의실험

모의실험을 위한 채널 환경으로서, 모든 송신 안테나에서 수신 안테나로의 채널은 Rayleigh 페이딩을 겪는 다중 경로 채널들의 조합을 고려하였다. Rayleigh 페이딩 채널 계수들은 복소 가우시안을 사용하였으며, 분산은 I 및 Q 채널 각각 1로 가정하였다. 실험에서 다중 경로 페이딩 채널 성분들은 상호 통계적으로 독립적이며, 수신단에서 완벽히 추정하였다고 가정하였다. 각 다중 경로는 모두 분해 가능하며, 경로간 지연 시간도 수신단에서 완벽히 추정하였다고 가정하였다. 또한 시스템 분석을 용이하게 하기 위해 단일 사용자만을 고려하였으며, 기저대역 신호의 변복조는 QPSK를 사용하였다[4].

그림 2에서는 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 수신 안테나가 $L=2$ 개로 고정되어 있고 각 랭크별 다중 경로 수가 $M=4$ 인 경우, 송신 안테나 수 K 의 증가에 따른 성능 변화를 보인 것이다. 송신 안테나 수가 증가하면 성능이 향상되지만, 안테나 수가 증가함에 따라 이득이 같은 폭으로 비례해서 증가하지 않음을 알 수 있다. 그림 3은 송·수신 안테나가 각각 $K=1, L=2$ 개인 경우에 다중 경로 수 M 의 증가에 따른 성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 다중 경로 수 M 이 증가할수록 시스템 성능이 우수해 짐을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 플랫 페이딩 환경에 국한되었던 MRT 기법을 다중 경로 페이딩 환경으로 확장하여 최적의 가중치를 구하고 이를 검증하기 위해 모의실험 결과를 제시하였다. 모의실험 결과에서 알 수 있듯이 송신 안테나 수 및 다중 경로 성분에 비례하여 시스템 성능이 크게 개선됨을 알 수 있다. 이로써 제안한 다중 경로 페이딩 채널 환경에 적용 가능한 MRT 기법은, 수신단의 SNR을 최대화할 수 있는 최적의 가중치를 구하여 송·수신단에 사용함으로써 페이딩에 의한 채널 열화를 효과적으로 보상할 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] R. Wichman and A. Hottinen, "IMT-2000 transmit diversity concepts," *Proc. PIMRC '99*, Osaka, Japan, Sep. 1999.
- [2] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Jour. Selected Areas in Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [3] T. K. Y. Lo, "Maximum Ratio Transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 10, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [4] J. Winters, "The diversity gain of transmit diversity in wireless systems in Rayleigh fading," *Proc. ICC/SUPERCOMM*, vol. 2, pp. 1121-1125, New Orleans, USA, May 1994.

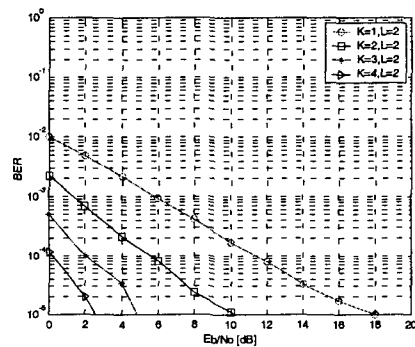


그림 2. 송신 안테나 수 (K)에 따른 BER 성능 ($L=2, M=4$)

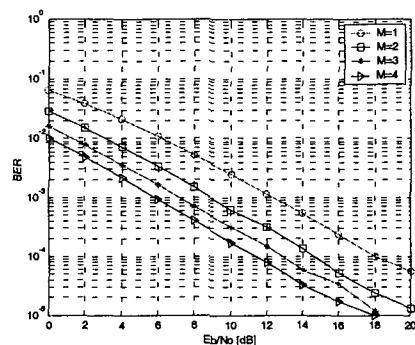


그림 3. 다중 경로 수 (M)에 따른 BER 성능 ($K=1, L=2$)