

SU-MIMO 통신 시스템을 위한 SVD 기반의 MRC diversity 기법에 대한 연구

¹윤태훈, ¹김현, ¹장성원, ^{2,3}송형규*

¹세종대학교 전자정보통신공학과, ²세종대학교 정보통신공학과,

³세종대학교 지능형드론융합전공

xogns8120@outlook.kr, tlrmsj65@naver.com, jungseonglian@sju.ac.kr, *songhk@sejong.ac.kr

A Study on SVD-based MRC Diversity Technique for SU-MIMO Communication Systems

¹Tae-Hun Yun, ¹Hyun Kim, ¹Seong-Won Jang, ^{2,3}Hyoung-Kyu Song*

¹Department of Electronic Information and Communication Engineering,

²Information and Communication Engineering and ³Convergence Engineering for Intelligent Drone,

Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

요약

본 논문은 Single User- Multiple input Multiple out(SU-MIMO) 무선환경에서의 Singular value decomposition(SVD) 기반의 Maximal Ratio Combining(MRC) diversity 기법을 제안한다. 기존 Selection Combining(SC) diversity 기법은 다중 경로상의 한 개 이상의 수신 신호 중 가장 높은 Signal to Noise Ratio(SNR)을 가진 신호를 이용하여 원래의 정보를 복원하는 방법으로 구현은 간단하지만 모든 수신 신호를 동시에 이용하지 못한다. 이를 보완한 Maximal Ratio Combining (MRC) diversity 기법은 fading을 겪은 신호에 가중치를 부여하여 합성 효과를 극대화하는 기법으로 SC diversity 기법 대비 복잡도는 증가하지만 더 높은 Bit Error Ratio(BER) 성능을 보여준다. MRC 기법은 채널의 수가 많아질수록 계산이 복잡해진다 는 문제점이 발생한다. 이에 본 연구에서는 SVD를 수행한 후 특이값의 누적 합에 대한 문턱 값을 지정하여 우수한 품질을 가진 채널들을 선택하여 합성하는 SVD-based MRC diversity 기법을 제안한다. 본 연구에서는 기존의 SC, EGC, MRC 기법과 SVD-MRC 기법의 BER 성능을 비교 분석하였고, 문턱값에 대해 몇 개의 수신 안테나를 선택하는지 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

I. 서론

다중경로 페이딩이란 서로 다른 경로를 따라 수신된 전파들이 여러 장애물에 의한 다중 반사로 인해 서로 간섭을 일으켜 수신 신호의 진폭이나 위상을 왜곡시켜, 수신된 신호의 품질을 저하시키는 현상을 의미한다. 이러한 다중 경로 페이딩 문제를 극복하기 위해서 다양한 다이버시티 기법이 제안되었다[1]. 기존의 다이버시티 기법 중 SC 기법은 다중경로 환경에서 가장 높은 SNR을 보이는 신호만을 선택하여 사용하는 방식으로, 구현은 간단하지만 수신 신호의 모든 정보를 활용하지 못하는 단점이 있다[2]. 이에 반해 MRC (Maximal Ratio Combining) 기법은 모든 수신 신호에 적절한 가중치를 부여하여 합성함으로써, 각 신호가 가진 정보를 최대한 활용하고, 다중 경로 페이딩의 영향을 줄이는 기법이다. 그러나 이 방법은 계산의 복잡도가 높다는 단점이 있다.

본 논문에서는 SVD를 활용하여 기존의 MRC 기법을 개선한 SVD-MRC 다이버시티 기법을 제안한다. 이 기법은 기존 MRC에 비해 계산 복잡도를 낮추면서도, SC 기법보다 우수한 BER 성능을 보장함으로써, 무선 통신의 신뢰성과 효율성을 더욱 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

II. 본론

본 논문에서는 diversity 효과를 누리기 위한 SU-Multiple-Input Multiple-Output(SU-MIMO) 무선 통신 시스템 환경을 가정한다. 채널

은 perfect CSI 환경을 가정한다. 또한 Line of Sight(LoS) 성분이 존재하지 않는 Rayleigh 채널 환경을 가정한다[3].

A. 특이값 분해(SVD) 기법

MIMO 시스템에서는 전송 채널에 대한 Subcarrier 들의 집합을 행렬로 나타낼 수 있다. Subcarrier 행렬에 SVD를 수행하면 이 행렬을 세 가지 행렬 (U, Σ, V^T)의 곱으로 분해할 수 있다.

$$H = U\Sigma V^T \quad (1)$$
$$= \begin{pmatrix} | & | & \dots & | \\ u_1 & u_2 & \dots & u_m \\ | & | & \dots & | \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{\lambda_m} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} - & v_1^T & - \\ - & v_2^T & - \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ - & v_n^T & - \end{pmatrix}$$

($m < n, \sqrt{\lambda_1} \geq \sqrt{\lambda_2} \geq \dots \geq \sqrt{\lambda_m}$, 행렬 U, V 는 orthogonal 행렬) 식(1)에서 행렬 H 는 송수신 안테나 간 subcarrier 행렬에 해당하며, m 은 수신 안테나 수에 해당한다. $\sqrt{\lambda_1}$ 는 각 수신 안테나로 들어오는 채널의 특이값 중 가장 큰 값에 해당하며, $\sqrt{\lambda_m}$ 는 m 번째로 큰 값에 해당한다. 모든 $m \times n$ 행렬 H 는 식(1)와 같이 서로 직교하는 orthogonal 행렬 U, V 와 singular value 행렬 Σ 로 표현가능하다.

$$H = \sqrt{\lambda_1}u_1v_1^T + \sqrt{\lambda_2}u_2v_2^T + \dots + \sqrt{\lambda_m}u_mv_m^T \quad (2)$$

식(2)에서 v 와 u 는 정규화된 벡터이기 때문에 uv^T 내의 성분의 값은

행렬 크기에 영향을 주지 않는다. 따라서 SVD 기법을 이용하여 subcarrier 행렬 H 를 동일한 크기를 갖는 여러 개의 행렬로 분해해서 생각할 수 있다. 분해된 각 행렬의 원소의 값의 크기는 $\sqrt{\lambda}$ 의 값에 의해 정해진다. $\sqrt{\lambda_1} \geq \sqrt{\lambda_2} \geq \dots \geq \sqrt{\lambda_m}$ 의 관계에 의해 큰 특이값을 갖는 일부 행렬 $\sqrt{\lambda}uw^T$ 들의 합으로 행렬 H 의 근사치를 구할 수 있다. 특이값이 큰 subcarrier 들은 gain이 높은 채널로써 품질이 좋은 신호들이 거처온다. 따라서 특이값이 높은 subcarrier 만을 선택하여 MRC 기법으로 결합하여 일반적인 Receive diversity 기법인 MRC, EGC 보다 적은 수의 신호를 combining 하여도 충분히 높은 품질의 신호를 수신할 수 있다.

B. 다이버시티 기법

1. SC (Selection Combining)

Selection Combining 기법은 한 개 이상의 수신 신호 중 가장 높은 SNR을 가진 신호를 이용해 원 신호를 복조하는 기법을 의미한다. 가장 구현이 간단하지만 단 하나의 안테나밖에 선택하지 못한다는 단점이 있다.

2. MRC (Maximum Ratio Combining)

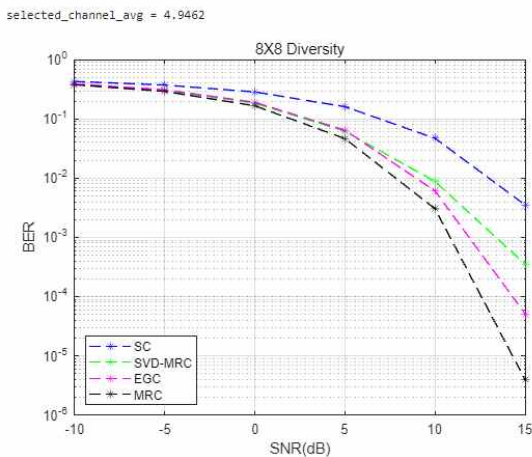
Maximum Ratio Combining 기법은 극심한 fading을 겪은 신호에 대해서는 가중치를 적게, 그렇지 않은 신호에 대해서는 가중치를 크게 하여 합성 효과를 증대한다.

3. EGC (Equal-Gain Composition)

Equal Gain Composition 기법은 오직 채널의 위상 왜곡만을 보정하여 신호를 복조하는 기법을 의미한다.

C. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 LoS 성분이 존재하지 않는 Rayleigh 채널 환경을 가정한다. SU-MIMO 무선통신환경을 가정하였으며 송신 안테나와 수신 안테나를 각각 8개로 설정하였다. Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 전송을 수행한다고 가정한다. FFT size 는 128, CP size는 FFT size의 1/4이다. 특이값의 누적합에 대한 문턱값은 0.8로 설정 하였으며, 변복조방식은 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 다중 채널 경로 수는 7로 가정한다.



[그림1] SNR에 따른 BER 측정 결과

[그림1]은 SNR에 따른 bit-error-rate(BER) 성능을 나타낸다.

SC 는 Selection Combining, EGC 는 Equal Gain Combining, MRC 는 Maximum Ratio Combining, SVD-MRC 는 본 연구에서 제안하는 특이

값 분해 기반의 MRC 기법을 나타낸다. 네 가지 기법에서 모두 8개의 송신 안테나에서 동일한 비트 스트림을 전송하였다. 특이값의 누적합에 대한 문턱값을 0.8로 설정할 경우 평균적으로 약 4.9개의 수신 안테나를 사용하는 것과 비슷한 효과를 낸다. 이에 따라 모든 subcarrier 를 사용하는 EGC, MRC 기법에 비해 BER 성능이 낮은 것을 볼 수 있다. 반면에 1개의 수신 안테나 채널을 사용하는 SC 기법에 비해 BER 성능이 높은 것을 볼 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 SU-MIMO 무선 통신 시스템 환경에서 성능이 좋은 신호를 수신하는 일부 수신 안테나 채널을 선택하는 SVD-MRC 기법을 제안한다. 제안되는 기법은 subcarrier 행렬의 특이값 분해를 통해 높은 품질의 신호만을 선택적으로 합성하는 접근 방식으로, 채널의 페이딩 문제를 효과적으로 극복할 수 있도록 하였다.

시뮬레이션 결과에 따르면, SVD-MRC 기법은 SU-MIMO 무선 통신 환경에서 전통적인 MRC 방식의 복잡도를 줄이면서 SC 방식 대비 우수한 BER 성능을 보장하는 것을 보여주었다. 이러한 결과는 특히 다중경로와 같은 복잡한 무선환경에서의 통신 품질을 개선하는데 있어서 유의미하다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A03038540). 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540). This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the metaverse support program to nurture the best talents (IITP-2024-RS-2023-00254529) grant funded by the Korea government(MSIT). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2024-RS-2023-00254529). This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2023-2021-0-01816) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2023-2021-0-01816).

참고 문헌

[1] Alamouti, Siavash M. "A simple transmit diversity technique for wireless communications." *IEEE Journal on selected areas in communications* 16.8 (1998): 1451-1458.

[2] Ning Kong and L. B. Milstein, "Average SNR of a generalized diversity selection combining scheme," in *IEEE Communications Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 57-59, March 1999, doi: 10.1109/4234.752901.

[3] P. A. Dighe, R. K. Mallik and S. S. Jamuar, "Analysis of transmit-receive diversity in Rayleigh fading," *GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270)*, 2001, pp. 1132-1136 vol.2, doi: 10.1109/GLOCOM.2001.965656.