

소형궤도열차 제어를 위한 MIMO-OFDM 시스템에서 낮은 귀환률을 고려한 안테나 선택 기법

An antenna selection scheme considering low feedback rate in MIMO-OFDM systems for Personal Rapid Transit Systems

박호환* 임종경** 김백현*** 유동관**** Kwak정섭*****

Park, Ho Hwan Lim, Jong kyoung Kim, Baek Hyun Yoo, Dong kwan Kwak, Kyung Sup

ABSTRACT

This paper proposes an efficient antenna selection scheme for PRT (Personal Rapid Transit) remote control in a wireless MIMO-OFDM systems. Using high correlation among neighboring sub-carriers, transmit antennas are selected by calculation based on the channel response of the center sub-carrier in each subgroup. This scheme reduces complexity of selection algorithm and significantly reduces the feedback channel information with small performance degradation. Especially, when feedback channel rate between a control base and a train is fixed, the proposed scheme can provide a significant advantage in high mobility.

국문 요약

본 논문에서는 PRT (Personal Rapid Transit)의 원격 제어를 위한 무선 채널 환경에서 안테나 선택 기법을 적용한 MIMO-OFDM 시스템에서 귀환 정보의 양을 줄이는 효과적인 기법을 제안한다. 제안한 기법은 PRT 무선 채널 환경에서 차량에 할당된 주파수 채널 상관도에 따라 부분송파들을 그룹 단위로 나눈 후 그룹의 중앙에 위치한 부분송파의 채널 값을 기준으로 해당 부분송파 그룹의 송신 안테나를 선택한다. 보의실현을 통해 해당 그룹의 부분송파들의 수를 적절히 선택하면 적은 성능의 열화를 가지면서도 귀환 정보의 양을 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 특히 PRT 무선 채널 환경에서 차량과 제어기지국 사이의 귀환 채널의 전송률이 고정된 경우, 차량의 속도가 증가할수록 제안한 기법이 더욱 좋은 성능을 보였다.

1. 서론

최근의 무선통신 서비스는 음성 및 일반 텍스트 등의 저용량 서비스에서 멀티미디어와 같은 대

* 연세대학교 정보통신대학원 석사과정, 비회원

** 연세대학교 정보통신대학원 석사과정, 비회원

*** 연도기술연구원, 정회원

**** 연세대학교 정보통신대학원 석사과정, 비회원

***** 연세대학교 정보통신공학부/대학원 정교수, 비회원

용량 서비스로 전환되고 있다. 데이터 전송속도의 증가에 따라 나타나는 다중경로지연에 의한 ISI (Inter-symbol Interference)를 해결하고자 차세대 이동통신에서는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 유력한 후보로써 고려하고 있다. 최근에는 주파수 선택적 결합 효율을 높이는 연구로서 다중안테나 (MIMO: Multiple Input Multiple Output) 시스템이 주목 받고 있으며 안테나 선택 기법을 이용하여 채널 용량 및 부전 품질을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1,2].

안테나 선택 기법이란 수신단에서 채널 상태 정보를 기반으로 데이터를 보내기에 적절한 송신 안테나를 선택하는 기법이며 선택한 안테나 정보는 귀환 채널을 통해 송신단으로 귀환된다. 만약 귀환 채널의 전송률이 고정되어 있다면, 귀환하는 정보량이 증가함에 따라 귀환 지연에 따른 성능 열화가 더 커지게 되므로 귀환하는 정보량과 귀환 지연의 영향 간에 적절한 타협점이 요구된다.

본 연구에서는 안테나 선택 기법을 결합한 공간 다중화 MIMO-OFDM 시스템에서 연산 복잡도 및 귀환 정보를 줄일 수 있는 방안을 제시한다. 제안된 PRT 시스템의 제어에 사용될 수 있으며 특히 고속 PRT 시스템의 채널 환경의 시간 변화에 민감하게 대응할 수 있다.

본 논문의 구성은, 2장에서 MIMO-OFDM시스템과 안테나 선택 기법을 간단히 소개한다. 3장에서는 본 논문에서 제안한 기법의 시스템 모델을 제시하고 부반송파들 사이의 간격과 상관도 사이의 관계에 대해 논의한다. 마지막으로 4장에서는 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 평가하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. MIMO-OFDM 시스템 및 안테나 선택 기법

2.1 공간 다중화를 위한 MIMO-OFDM 시스템

다중 안테나 시스템을 이용하여 주파수 효율을 높이기 위해서는 공간다중화 방식을 사용해야 한다 [3,4]. 이 경우, 각 송신안테나들은 서로 다른 데이터 스트림을 동시에 보내게 되며 각 수신안테나들은 각각의 전송된 스트림을 구분하여 받기 위해 사용한다. 송신안테나 수가 N_t 이고 수신안테나 수가 N_r 일 때, $N_r \geq N_t$ 를 만족하면 수신단에서 각 데이터 스트림의 구분이 가능하며 추가적인 주파수 자원의 소비 없이 N_t 개 만큼의 데이터 전송량을 향상시킬 수 있다.

k 번째 부반송파가 쪼는 채널 H_k 는 다음과 같은 $N_r \times N_t$ 행렬로 나타낼 수 있다.

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{1,1}^k & h_{1,2}^k & \dots & h_{1,N_t}^k \\ h_{2,1}^k & h_{2,2}^k & \dots & h_{2,N_t}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}^k & h_{N_r,2}^k & \dots & h_{N_r,N_t}^k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

여기서 $h_{i,j}^k$ 는 j 번째 송신안테나와 i 번째 수신안테나 사이에서 k 번째 부반송파가 쪼는 채널 계수이다. 따라서 k 번째 부반송파의 수신신호 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = H_k X_k + N_k. \quad (2)$$

일반적으로 MIMO-OFDM 시스템의 수신단에서는 각각의 채널을 쪼고 들어온 신호를 ZF (Zero Forcing) 또는 MMSE (Minimum mean square error) 등의 선형 검출기나 OSUC (Ordered Successive cancellation) 또는 ML (Maximum Likelihood) 등의 비선형 검출기를 통해 각 데이터 스트림을 구분한 후, OFDM 심볼 복호 과정을 거친다.

2.2 안테나 선택 기법

안테나 선택 기법이란 현재 송신단에서 데이터 스트림을 전송하기에 유리한 안테나 조합에 대한 정보를 사용하는 기법으로 이것은 수신단에서 채널 상태 정보에 기반한 연산 결과를 귀환하여 얻어진다. 안테나 선택 기법의 설계 기준은 크게 세 가지가 있다 [5]. 첫째는 SNR이 가장 낮은 스트림을 최대로 만드는 경우를 찾는 방법이고 둘째는 SVD (Singular Value Decomposition)를 적용한 후의 최소 Singular값을 최대로 만드는 안테나 조합을 선택하는 방법이며, 셋째는 채널 용량의 관점에서의 설계이다 [6]. 각 설계 기준에 대하여 송신 안테나 선택을 위한 최적의 방법은 선택 가능한 모든 안테나들의 조합에 대한 성능을 모두 계산하는 것이다. 그러나 이것은 너무 많은 연산량을 요구하므로 최근에는 복잡도를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

안테나 선택 기법을 이용하여 다이버시티 이득을 얻기 위한 가장 간단한 방법은 수신 신호의 전력에 기반하는 것이다. 그러나 공간 다중화 시스템에서는 수신단에서 서로 다른 데이터 스트림을 구분하는 것이 더 중요하므로 이러한 접근은 알맞지 않다. 이 같은 특성을 고려하여 채널 행렬의 상관도와 전력값의 관점에서 해석한 기법이 제안되었으며 [7]. 비슷한 접근 개념으로 두 안테나들 사이의 상호정보량을 비교하는 방식이 제안되었다 [8]. 최근에는 선택되는 송신 안테나의 수를 고정하지 않고 채널 상태에 따라 선택하는 안테나 수를 바꾸면서도 연산량을 낮추는 방법이 제안되어 있다 [9]. 또한 [10]에서는 변형된 Gram-Schmidt 분해 기법을 이용해 복잡도를 낮추는 기법이 제안되었다. 이 기법은 QR분해의 성질을 이용하여 서로 직교성이 큰 송신 안테나들의 집합을 선택하는 기법으로 최적 기법에 비해 적은 성능 열화를 가지면서 복잡도를 크게 낮추었다. 본 논문 4장의 모의실험에서는 이 연산 기법을 사용한다.

3. MIMO-OFDM 시스템에서 부반송파 그룹을 이용한 안테나 선택 기법

본 절에서는 MIMO-OFDM 시스템에 안테나 선택 기법을 적용할 경우, 귀환하는 정보량을 줄이는 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 수신신호 모델은 다음과 같다.

$$y_k = \sqrt{\frac{E_s}{N_T}} H_k^p x_k + N_k. \quad (3)$$

H_k^p 에서 p 는 안테나 선택 기법 적용한 후의 k 번째 부반송파가 겪는 등가채널을 의미한다. E_s 는 심볼 에너지이며, $N_k = [v_{k,1} v_{k,2} \dots v_{k,N_r}]$ 는 백색 잡음으로 성분들이 서로 독립이고 평균이 0, 분산이 N_0 인 가우시안 분포를 따른다.

그림 1은 제안된 시스템의 구성도이다. 일반적으로 수신단은 OFDM 심볼의 각 부반송파의 송신안테나 선택 정보를 송신단으로 귀환해야 한다. 수신단에서는 FFT 연산을 통해 채널 정보의 주파수 응답을 구하며 각 부반송파 그룹의 중앙 부반송파의 채널 상태 정보들을 추려낸다. 추려낸 채널상태정보를 기반으로 [10]에서 제안한 기법을 적용하여 선택하는 송신 안테나 정보를 구한다. 이것을 귀환 채널을 통해 귀환시키며 송신단에서는 이를 활용하여 부반송파 그룹 단위로 전송 안테나를 선택하게 된다.

선택된 송신 안테나 정보를 송신단으로 귀환할 때 고려해야 할 중요한 사항은 귀환 채널의 전송률이 고정되어 있는 경우이다. 이 경우 귀환하는 정보의 양이 많을수록 귀환 정보의 갱신률이 떨어지게 된다. 채널이 빠르게 변하는 경우 갱신률을 높이는 것이 중요하며 채널이 천천히 변하는 경우에는 정확한 정보를 보내는 것이 더욱 중요하다. 귀환 채널의 전송률이 충분히 큰 경우 그룹의 개수를 늘리는 것이 큰 문제가 되지 않지만 보통 귀환 채널의 대역은 고정되어 있다. 송신안테나가 N_t 개이며 귀환 정보

를 보내고자 하는 부반송파들의 그룹 개수가 N_g , 그리고 1비트 당 귀환 갱신률을 f_b 라 할 때 안테나 선택정보를 귀환하기 위한 귀환 채널의 전송률은 다음과 같다.

$$R_{feedback} = \left\lceil \log_2 \left(\frac{N_t}{L_t} \right) \right\rceil \times N_g \times f_b (bps) \quad (4)$$

예를 들어, 안테나 구성이 3×2 이고 부반송파가 64개인 경우에 대해 이 256Kbps로 고정되어 있고 $N_g=1$ 이면 갱신률 f_b 는 2KHz이다. 귀환 채널이 고정되어 있는 경우 N_g 가 줄어들수록 안테나 선택 정보의 귀환 주기 $1/f_b$ 가 작아지므로 채널의 시간변화에 더욱 유리하게 된다. 즉, 부반송파 채널간의 상관도가 큰 경우 한 그룹 내에 반송파의 수를 늘려서 N_g 를 줄이면 f_b 가 커지므로 채널의 시간 변화에 더욱 유리한 성능을 거둘 수 있다.

4. 모의실험 결과

본 논문에서 사용하는 가정은 다음과 같다. 수신단에서 PRT 시스템의 채널 상태 정보를 완벽히 안다고 가정하고 ZF수신기를 사용하며 채널 코딩은 사용하지 않는다. 표 1은 모의실험에 사용한 파라미터를 나타낸다. 채널 대역은 8MHz이며 64개의 부반송파를 사용한다. $\tau_{r.m.s}$ 는 43.52ns이다. 다음의 모의실험에서 한 그룹 내에 부반송파 개수 $l=1,2,4$ 에 대한 결과를 보일 것이다.

그림 3과 그림 4는 PRT 시스템 귀환 채널의 속도제한이 없는 경우, 송·수신안테나 구성이 각각 6×4 와 3×2 인 시스템에서 그룹 크기에 따른 BER성능을 나타내며 도플러 주파수는 12Hz, 즉 $f_d T_s = 4 \times 10^{-6}$ 이다. 두 그림에서 볼 때, 2개와 4개의 부반송파를 한 그룹으로 사용하는 시스템은 1개 부반송파를 한 그룹으로 사용하는 기존의 시스템과 비교할 때 BER 성능 면에서 큰 차이가 없다. E_b/N_0 가 10dB인 경우 기존의 기법과 제안한 기법의 성능차이는 거의 없으며 안테나 구성이 3×2 인 시스템일 때, 부반송파 2개가 한 그룹인 경우와 4개가 한 그룹인 경우 BER 성능이 10^{-3} 인 지점에서 0.2dB와 0.5dB의 작은 열화를 보인다. 이는 PRT 채널의 주파수 응답간의 상관도에 의해 한 그룹 내에 주파수 응답이 거의 동일한 값을 갖기 때문이다. 또한, 안테나 선택 기법을 적용하지 않는 시스템과 비교할 때 제안한 시스템은 여전히 큰 성능 차이를 보이며 이것은 서로 다른 안테나 구성에 대해서도 동일하다. 그림 4의 경우 안테나 구성이 6×4 이고 ZF 수신기를 사용하므로 모든 부반송파의 선택 정보를 활용하는 시스템과 안테나 선택 기법을 사용하지 않는 시스템의 다이버시티 차수는 각각 3과 1이며 제안한 시스템도 3에 가까운 다이버시티 차수를 보이고 있다.

그림 5는 안테나 구성이 3×2 인 시스템에서, $R_{feedback}$ 이 고정된 경우의 $f_d T_s$ 에 따른 BER 성능을 나타낸다. 이 그림에서 약 $1 \times 10^{-4} \leq f_d T_s \leq 4 \times 10^{-4}$ 인 구간이 모의실험에서 적용한 채널 모델의 목표 속도이며 [11], $E_b/N_0=20$ dB인 경우에 해당하는 실험 결과이다. $R_{feedback}$ 이 256Kbps로 고정된 경우, N_g 를 줄일수록 f_b 를 작게 할 수 있다. 따라서 $\tau_{r.m.s}$ 가 일정한 채널 환경에 대하여 PRT 이동체 속도가 높아질수록 갱신률이 빠른 쪽이 채널 변화에 유리하므로 높은 $f_d T_s$ 에서 제안한 기법이 더 좋은 BER 성능을 보이게 된다. 그림 5에서 32개의 그룹에 대한 안테나 선택 정보를 귀환하는 경우는 64개의 그룹의 경우보다 $f_d T_s \geq 7.5 \times 10^{-6}$ 인 지점에서 좋은 BER 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 5에서 보여 지듯이 제안한 기법은 이동체의 속도에 따라 최적 성능을 나타내는 그룹 수를 구할 수 있다. 예를 들어, $f_d T_s \leq 7.5 \times 10^{-6}$ 인 경우에는 모든 부반송파에 대한 안테나 선택 정보를 사용하는 것이 유리하고 2.3×10^{-4} 인 경우까지는 32개의 그룹을 사용하는 것이 유리하며 그 이상의 경우에 대해서는 16개의 그룹에 대한 안테나 선택 정보를 사용하는 것이 좋은 방법이 된다.

5. 결론

본 논문에서는 안테나 선택 기법을 적용한 공간다중화 MIMO-OFDM 시스템에서 귀환 정보를 효과적으로 줄이는 방법을 제안하였다. 귀환 채널의 전송률이 제한되지 않은 경우라 할지라도 모든 부반송파에 대한 채널 정보를 활용하는 시스템에 비해 제안한 시스템의 BER 성능은 크게 차이가 없었고 귀환 정보의 양은 크게 줄일 수 있었다. 귀환 채널의 전송률이 제한되어 있는 경우, 이동체의 속도가 증가할수록 제안한 기법은 더 좋은 BER 성능을 보였으며 이는 제안한 기법이 채널의 시간 변화에 더욱 강인한 특성을 갖기 때문이다. 이를 이용해 다양한 속도의 PRT 시스템에 적합한 수를 선택함으로써 하여 PRT 채널의 시간 변화에 민감하게 동작하는 시스템 설계를 할 수 있다.

참고 문헌

1. Alamouti, S.M "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE J. Select. Areas Communications, Vol. 16 pp.1451 -1458, Oct. 1998.
2. E. N. Onggosanusi, A. Gatherer, A. G. Dabak, and S. Hosur, "Performance analysis of closed-loop transmit diversity in the presence of feedback delay," IEEE Trans. Commun., vol. 49, pp. 1618-1630, Sept. 2001.
3. A. Paulraj, D. Gore, and R. Nabar, Multiple Antenna Systems, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
4. G. J. Foschini, D. Chizhik, M.J. Gans, C. Papadias, and R.A. Valenzuela, "Analysis and performance of some basic space-time architectures," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 21, pp. 303-320, 2003.
5. R.W. Heath, Jr., S. Sandhu, and A. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing with linear receivers," IEEE Comm. Letters, vol. 5, pp. 142-144, April 2001.
6. D. Gore, R. Nabar, and A. Paulraj, "Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel," in Proc. Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Processing, June 2000.
7. Y.S. Choi, A.F. Molisch, M.Z. Win, and J.H. Winters, "Fast antenna selection algorithms for MIMO systems," in Proc. VTC, 2003, in press.
8. M.A. Jensen and J.W. Wallace, "Antenna selection for MIMO systems based on information theoretic considerations," in IEEE antennas and Propagation Society Int. Symp. Dig., vol. 2, pp. 515-518, 2003.
9. I. Berenguer, X. Wang, I.J. Wassell, "Transmit antenna selection in linear receivers: geometrical approach," IEE Electronics Letters , Volume: 40 , Issue: 5, Pages:292 - 293, 4 March 2004.
10. Robert W. Heath Jr. and David J. Love, "Multi-mode antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," Proc. of allerton conf. on Comm. Control and Comp., Monticello, IL, Oct. 1-3, 2003.
11. Draft 802.20 Permanent Document, Channel models for IEEE 802.20 MBWA System Simulations, Rev 05, 2004.3

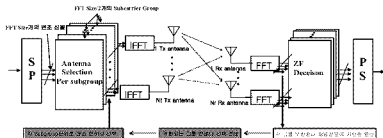


그림 1. 3채널 시스템의 구성도 ($N_t \times N_r$ 인 경우)

표 1. 모의실험에서 사용된 파라미터

× 파라미터	
Number of Subcarrier in OFDM	64
Channel Model	진행적인 이동 수신 환경 (NLOS)
Number of Subcarrier in a group	1, 2, 4
Modulation	QPSK
Channel Bandwidth	8MHz
Guard Time	1us

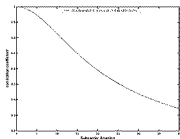


그림 2. 3x2 채널적인 이동수신채널의 무반송과 간섭에 대한 성능도

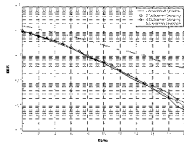


그림 3. 3x2 시스템에서의 무반송과 그룹 크기에 따른 BER 성능

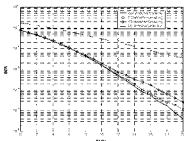


그림 4. 6x4 시스템에서의 무반송과 그룹 크기에 따른 BER 성능

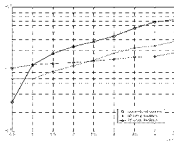


그림 5. 피드백 채널이 고정된 환경에서의 BER 성능 (안테나 구성 3x2, $R_{total} = 250Kbps$)