

특집논문-10-15-6-05

DVB-T2 16K LDPC 부호가 적용된 MIMO-OFDM 시스템에서의 성분 맞교환 기술 이득

전 성 호^{a)†}, 임 중 곤^{a)}, 경 일 수^{a)}, 김 만 식^{a)}

On the Gain of Component-Swapping Technique with DVB-T2 16K LDPC Codes in MIMO-OFDM Systems

Sungho Jeon^{a)†}, Zungkon Yim^{a)}, Ilsoo Kyung^{a)}, and Man-Sik Kim^{a)}

요 약

신호 공간 다이버시티 기술은 차세대 모바일 방송의 핵심 전송 기술로 주목받고 있는 기술 중 하나이다. 기존의 DVB-T2에 사용되는 Cyclic Q-delay 방식을 MIMO 시스템에 사용할 경우에는 심볼 간 상호 의존성이 증가하여 수신기 복잡도가 크게 증가하는 반면, 이러한 문제를 해결하기 위해서 제안된 ‘성분 맞교환(Component-Swapping)’ 기술을 적용할 경우 상호 의존성이 제한되어 수신기 복잡도가 크게 줄어든다. 본 논문에서는 DVB-T2 16K LDPC 부호를 적용한 경우에 제안된 ‘성분 맞교환’ 기술을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 분석하고, 기존 기술 대비 BER 성능 및 복잡도 면에서 이득을 가짐을 확인하였다.

Abstract

The signal space diversity is one of the promising transmission techniques in next generation mobile TV service. However, DVB-T2 does not consider the multiple antennas (MIMO) so that the cyclic Q-delay method, a component interleaver in DVB-T2, causes a critical issue in detecting symbols at the receiver side by increasing the inter-symbol dependency. To solve this problem, the component-swapping technique is proposed, which limits the inter-symbol dependency in order to reduce detection complexity. In this paper, the achievable gain of a component-swapping technique combined with 16K LDPC code defined in DVB-T2 is evaluated by computer simulations. From the results, the gain is confirmed in terms of BER and receive complexity compared to legacy component interleaver methods.

Keywords: DVB, NGH, LDPC, Component-Swapping, Signal Space Diversity (SSD), MIMO-OFDM

I. 서 론

a) KBS 뉴미디어 · 테크놀로지본부 기술연구소
KBS Technical Research Institute

† 교신저자 : 전성호 (jeonsh@kbs.co.kr)

※ 본 연구는 방송통신위원회, 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT 원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구로부터 도출된 것임.
[2009-F-029-01, 방통융합형 차세대 모바일방송 핵심기술 개발]
· 접수일(2010년8월29일), 수정일(2010년10월19일), 개재확정일(2010년11월12일)

나날이 증대되는 모바일방송에 대한 기대에 부응하고자 각 표준단체에서는 ‘2세대 모바일방송 시스템’ 개발에 착수하였다. 특히, DVB (Digital Video Broadcasting) 표준그룹 산하 차세대 모바일 방송 표준 제정을 위한 조직인 DVB-NGH(Next Generation Handheld)의 활동이 가장 활

발한데, 물리계층 요소 기술로써 다중 안테나 (MIMO; Multiple Input Multiple Output) 기술을 방송 시스템에 처음 도입하고자 관련 논의가 활발하게 이루어지고 있다. MIMO 기술은 통신시스템에서는 이미 상용화되어 보편적으로 활용되고 있으나, 방송 표준에 적용은 아직 이루어진 바 없으며 최근에서야 UHF 방송 대역에서의 MIMO 채널이 BBC에 의해서 모델링되었다.

신호 공간 다이버시티^[1]는 2008년도에 개발된 ‘고정형 디지털 지상파 시스템’인 DVB-T2 표준[2]에 포함된 기술로서, 추가적인 전력이나 대역폭의 희생 없이 검파에 있어 성능 이득을 얻을 수 있어 DVB-T2의 핵심적인 기술 중 하나로 평가받으며, 후속 표준인 DVB-NGH에도 적용 가능성이 높은 기술이다. 실제적인 MIMO 전송 환경으로의 확장과 그 성능평가는 논문 [3][4]에서 이루어졌다. [3]에서는 SIMO (Single Input Multiple Output) 환경에서 수신 MRC (Maximal Ratio Combining) 검파에 신호 공간 다이버시티를 적용하는 경우에도 기존 MRC로부터 획득 가능한 ‘Nr (수신 안테나 개수)’만큼의 다이버시티 이득에 대해 손실 없이 신호 공간 다이버시티 이득이 곱해져 ‘2Nr’로 증가함을 이론적으로 증명하였다. 이를 확장하여, 송신단에 개루프 (Open-Loop) 다이버시티 기술인 ‘Alamouti Code [4]’를 적용한 경우에도 각각의 다이버시티 이득 간의 손실 없이 결합되어 총 ‘4Nr’만큼의 다이버시티 이득 획득이 가능함을 이론적으로 증명하였다. 하지만, [3][4]의 이론적인 분석은 MIMO 다이버시티 전송 기법에 한정되었고, 실제 DVB-NGH 등에서 요구되는 전송용량 증대를 위해서는 MIMO 공간 다중화(Spatial Multiplexing) 기법에서의 성능 평가가 필수적으로 요구된다.

본 논문에서는 ‘신호 공간 다이버시티’ 기술을 MIMO 시스템으로 확장·적용함에 있어서 공간 다중화 방식으로 전송 시 발생하는 문제점에 대해서 분석한 뒤, 이를 해결하기 위해 제안된 ‘성분 맞교환(Component-Swapping)’ 기술 [6]-[8]을 현재 논의 중에 있는 DVB-NGH 시스템에 적용하여 그 이득을 실험적으로 분석하였다. 본 논문은 DVB-T2 표준에 정의된 16K (16800) 크기 LDPC (Low Density Parity Check) 부호가 적용되어도 ‘성분 맞교환’ 기술의 이득이 존재함을 실험적으로 확인함으로서 향후

표준화 논의에 있어서 객관적 성능 비교 자료로서 활용 가능하다는 데 의의가 있고, UHF 방송 대역에서 정의된 DVB-NGH MIMO 채널을 처음으로 적용하여 MIMO-OFDM 방송 시스템 성능을 객관적으로 평가하였다는 데 큰 의의가 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델 및 성능 평가를 위한 시뮬레이터 구현의 구체적인 내용을 알아본다. III장에서는 기존 기술의 문제점에 대해서 논의한 뒤, 성분 맞교환 기술의 필요성과 제안하는 기법의 구체적인 내용을 설명하고, IV장에서 LDPC 부호가 적용된 MIMO-OFDM 환경에서의 BER (Bit Error Ratio) 성능에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실험결과를 분석한다. V장에서는 결과에 대해서 정리한 뒤, 추후 연구 진행 방향에 대해서 언급한다.

II. 시스템 모델과 방송 대역에서의 MIMO 채널 모델

1. 성능 평가를 위한 시스템 모델

그림 1은 현재 DVB-NGH 분과위원회에서 논의 중인 기본 시스템 골격을 바탕으로 구현된 시뮬레이터의 구조를 나타낸다. 방송 시스템에 MIMO 기술을 적용하고자 하는 시도는 현재 DVB-NGH가 유일하기 때문에 이를 바탕으로 하였다. DVB-T2 시스템을 근간으로 하고 MIMO 기술이 확장 적용된 형태이다. 낮은 주파수 대역으로 긴 안테나 크기가 요구되는 VHF/UHF 특성과 모바일 수신기 크기를 고려할 때 최대 2개의 수신 안테나를 고려하는 것이 타당하다고 판단되어, 2×2 MIMO를 기본으로 4×2 MIMO도 고려할 수 있다. 채널 부호화로는 DVB-T2에 정의된 LDPC 부호를 사용하나, 그 중에서도 모바일의 수신기 복잡도를 고려하여 16K 크기의 LDPC 부호만 적용하였다. 또한, DVB-T2 파일럿 구조를 기반으로 MIMO 환경에 맞도록 확장·변형하여 구현하였으며, 파일럿을 통해 추정된 채널은 3차 보간법(Cubic Interpolation)에 의해 데이터 심볼 검파에 적용된다. LDPC 복호를 위해서는 근사화 되지 않은 ‘Exact LLR (Log-Likelihood Ratio)’ 값을 계산한다.

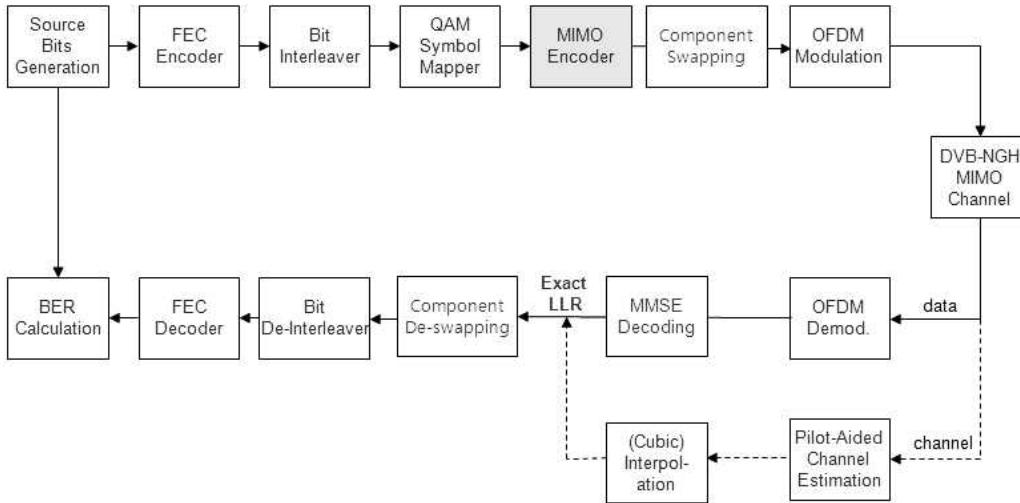


그림 1. 제안 기술 성능 평가를 위한 시뮬레이터 구조

Fig. 1. Simulation chain to evaluate the performance of a proposed technique

2. UHF 방송 대역에서의 MIMO 채널 모델

MIMO 다중화 기술은 현재까지 방송 시스템에 아직까지 적용된 바가 없다. 더불어 기존 통신 모델을 바탕으로 예측 적용할 수 있는 방송 주파수 대역에서 MIMO 채널 모델은 존재할 수 있으나, 실측에 기반을 둔 검증된 MIMO 채널 모델은 존재하지 않았다. DVB-NGH에서는 MIMO 기술의 도입과 객관적인 시뮬레이션 성능 평가를 위해서 기준 채널모델이 필수적이라고 판단하고, 영국의 공영방송사 BBC를 포함한 10여 개의 회원사들이 참여하여 500MHz~1000MHz UHF 대역에서의 MIMO 채널 실측을 핀란드 헬

표 1. 실측에 기반을 둔 UHF 대역에서의 MIMO 채널 모델
Table 1. MIMO channel model based on the measurement campaign in UHF band

Tap number	Excess Delay [μs]	Power Gain [dB]
1	0.0	-3.5
2	0.5	-5.5
3	1.0	-7.5
4	2.0	-11.5
5	4.0	-15.5
6	8.0	-21.5

싱키 일원에서 실시하였다. 획득한 실측 데이터를 바탕으로 표 1과 같은 채널 프로파일을 정의^[9]하였다.

III. 신호 공간 다이버시티를 위한 성분 맞교환 기술

1. SISO 시스템에 적용된 '성분 인터리빙' 기술을 MIMO 시스템에 그대로 적용했을 때 문제점

신호 공간 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 신호집의 실수부와 허수부 성분의 직교화를 위해 '성분 인터리빙'이 필수적으로 요구된다. 즉, 실수부와 허수부 성분이 서로 다른 독립된 채널 상황을 겪어야 한다. SISO(Single Input Single Output)에 기반을 둔 DVB-T2에서는 허수부 성분을 하나씩 지연시키는 형태의 'Cyclic-Q Delay 기법'을 성분 인터리빙으로 채택하였는데 간단하게 성분의 직교화를 얻을 수 있는 좋은 방법이다. 이를 MIMO 기술이 적용된 시스템에 그대로 적용하면 그림 2(a)와 같다. 단, 그림 2에서는 두 개의 안테나에 4개의 부반송파를 전송하는 상황을 가정하고, 심볼은 $S_{ij} = I_{ij} + jQ_{ij}$ 로 구성되었다고 가정한다.

Cyclic-Q Delay 기법은 기존의 방식을 간단히 확장, 적용

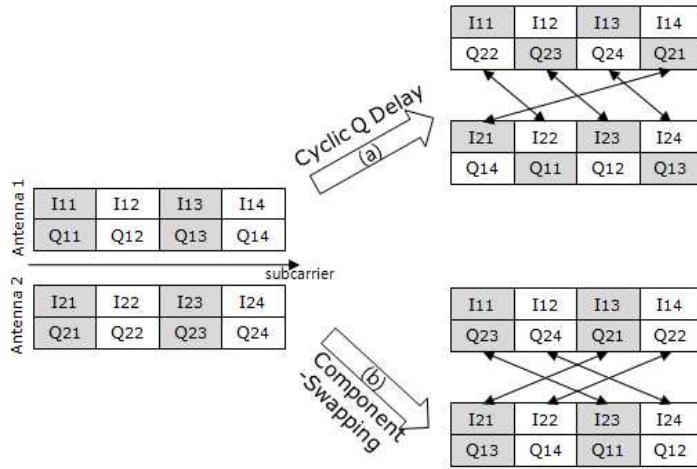


그림 2. 성분 인터리빙 기술로서 (a) Cyclic Q Delay를 적용한 경우 (b) 성분 맞교환 기술이 적용된 경우
Fig. 2. The case when (a) cyclic-Q delay (b) component-swapping is applied as a component-interleaver

되어 송신단에서 늘어난 공간 자원을 충분히 활용할 수 있는 것처럼 보인다. 하지만, 수신단에서는 V-BLAST 적용을 위해 필요한 ‘검파 순서(Detection Ordering)’를 계산하거나 ML(Maximum Likelihood) 등의 검파 방식을 적용한 후 채널 복호기 입력으로 LLR 값을 계산하기 위해서는 전송되는 모든 심볼을 고려해야 하기 때문에 복잡도가 크게 증가한다. 첫째, MIMO 채널에는 SISO 채널에서와 달리 안테나 간 간섭이 필연적으로 발생하고, 둘째, 하나씩 밀어서 인터리빙하기 때문에 S_{11} 심볼 검파를 위해서는 S_{11} 심볼의 허수부 성분 Q_{11} 을 가지고 있는 S_{22} 심볼 검파가 필요하며, S_{22} 심볼 검파를 위해서는 안테나 1에서 전송되는 S_{12} 심볼의 검파가 필요하다. 이는 결국 S_{12} 심볼의 허수부 성분인 Q_{12} 을 가지고 있는 S_{23} 심볼의 검파가 필요하게 된다. 결과적으로 모든 이웃하는 안테나-부반송파 간 상호 의존성을 가지게 되어 한 OFDM 심볼을 구성하는 모든 부반송파에 실린 전송 심볼을 동시에 고려해야 원하는 최종 LLR 값을 계산해 낼 수 있다. 이는 수신기에서 실시간 처리가 어려울 정도의 복잡도가 요구된다.

2. 성분 맞교환 기술

(III-1)에서 논의된 수신 복잡도를 해결하면서 다이버시티 이득을 유지하는 방안으로서 성분 맞교환 기술^{[5][7]}이 제

안되었다. 수신기 복잡도 증가의 원인인 Cyclic-Q Delay로 인한 상호 의존성을 끊는 방법으로 본 논문에서는 ‘맞교환’이라는 개념을 도입하여 간단하게 문제를 해결하였다. 그림 2(b)에서와 같이 먼저 송신 안테나 심볼 간에 일정 규칙을 기반으로 맞교환의 대상이 되는 심볼쌍을 결정한 후 그 대응되는 심볼들도 역시 동일 심볼쌍으로 구성한다. 그리고 결정된 심볼쌍 내에서만 허수부성분을 맞교환 한다.

따라서, S_{11} 심볼 검파를 위해서는 S_{23} 심볼 검파가 필요하게 되고, S_{23} 심볼 검파를 위해서는 S_{13} 심볼, S_{13} 심볼 검파를 위해서는 결국 S_{11} 심볼 검파가 필요하게 되어 상호 의존성이 단절되게 된다. 즉, 두 심볼 간에 허수부를 맞교환하기 때문에 심볼 상호 간 의존성은 두 심볼로 제한되며, 안테나 간 간섭 성분을 고려한다면 결국 상호 의존성은 최대 네 심볼로 한정된다. 따라서, 낮은 수신기 복잡도를 기반으로 회전 성상도(Rotated Constellation)가 결합된 MIMO 환경에서 신호 공간 다이버시티 이득 획득을 가능하게 해준다.

IV. 모의실험 결과

1. 시뮬레이션 환경

주요 시뮬레이션 환경은 2×2 MIMO-OFDM을 기본으

표 2. 주요 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Major parameters used for a simulation

파라미터	설정값
FFT size (유효 부반송파 수)	4K mode (3409)
채널대역폭 (elementary period)	8 MHz ($T=7/64\mu s$)
Guard Interval	Cyclic Prefix, 1/4
FEC	16K LDPC (16200)
채널 부호율	1/4(∇), 1/3(\circ), 2/5(*), 1/2(-)
변조방식	4-QAM, 16-QAM
Bit Interleaving 방식	Random within Codeword
도플러 주파수 (이동체속도)	33.3 Hz (60km/h@600MHz)

로 하고, (II-2)에 정의된 DVB-NGH MIMO 채널 모델을 적용하였다. 주요 파라미터 설정값은 표 2와 같이 모바일 방송 시스템에 적합한 파라미터를 선정하여 사용하였다. 성능 평가 지점은 LDPC 복호 후 BER을 기준으로 10^{-5} 지점이다.

그림 3과 그림 4의 그래프 상에서 빨간색 선은 제안된 ‘성분 맞교환’ 기술이 적용된 경우, 파란색 선은 기존의 심볼 단위 인터리빙이 적용된 경우, 검정색 선은 인터리빙을 적용하지 않은 경우를 나타낸다. 채널 부호율은 표 2의 나타낸 표시자(Marker)로 구분하여 나타내었다.

2. C/N에 따른 LDPC-Coded BER 성능

그림 3은 4-QAM 변조가 사용된 경우, 그림 4는 16-QAM 변조가 사용된 경우 C/N에 따른 BER 성능을 나

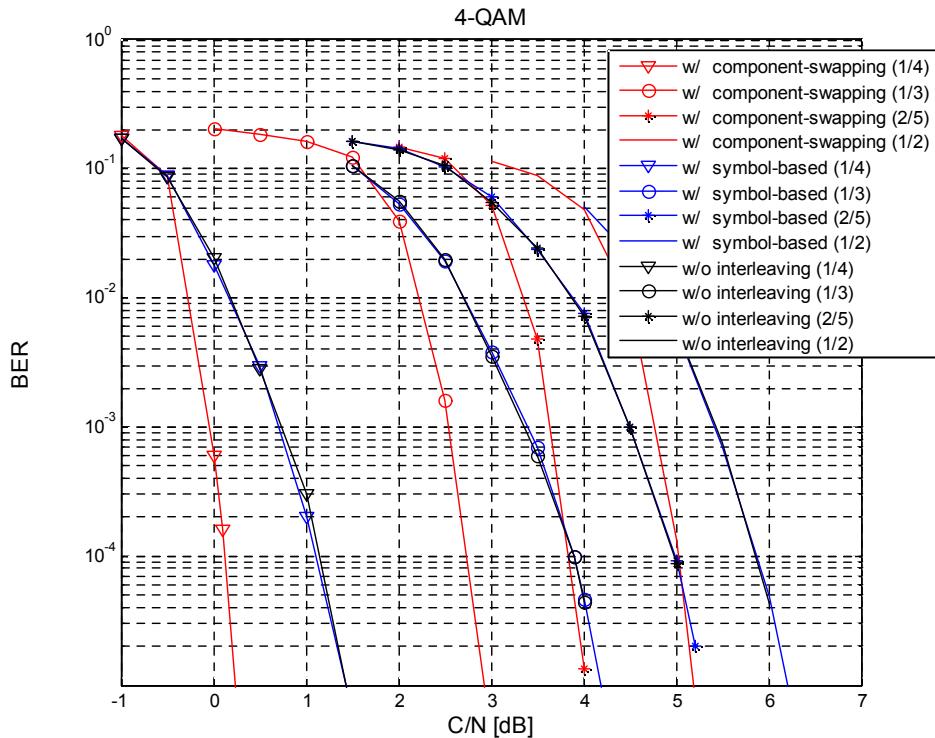


그림 3. LDPC가 적용된 2x2 MIMO-OFDM 시스템에서 DVB-NGH 채널 적용 시 C/N 값에 따른 BER 성능 (4-QAM)
Fig. 3. LDPC coded BER performance of 2x2 MIMO-OFDM systems in DVB-NGH channel (4-QAM)

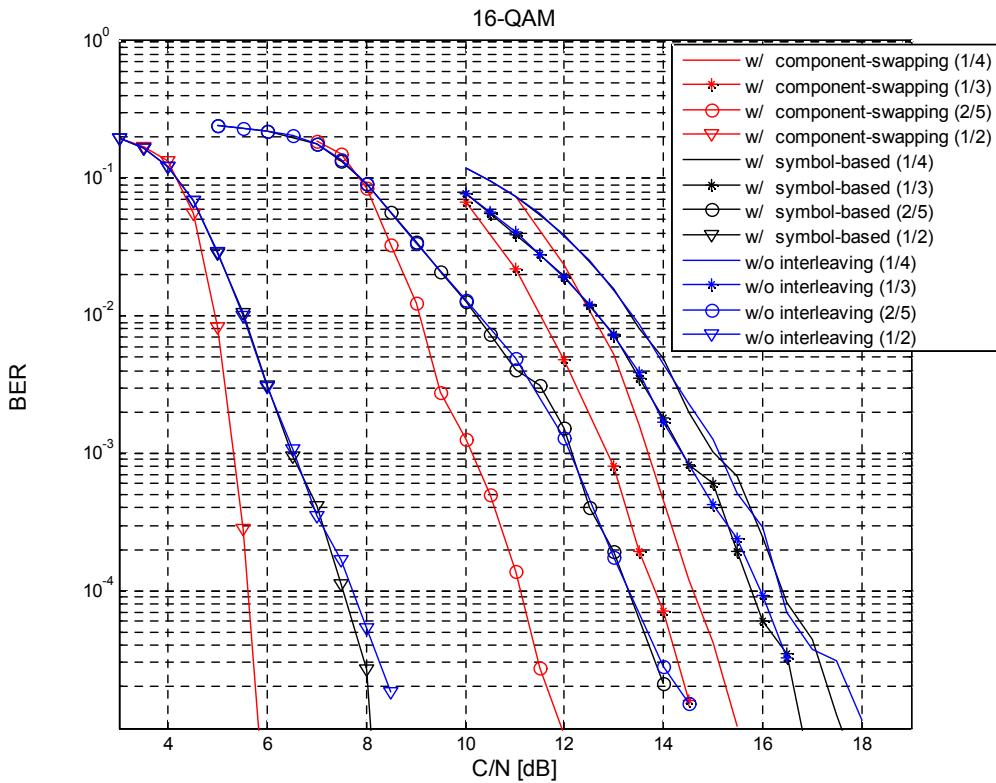


그림 4. LDPC가 적용된 2×2 MIMO-OFDM 시스템에서 DVB-NGH 채널 적용 시 C/N 값에 따른 BER 성능 (16-QAM)
Fig. 4. LDPC coded BER performance of 2x2 MIMO-OFDM systems in DVB-NGH channel (16-QAM)

타내는 그래프이다. 제안된 '성분 맞교환' 기술의 이득 검증을 위해서 주파수 인터리빙을 적용하지 않은 경우와 OFDM 한 심볼 내에서 변조 심볼 단위로 인터리빙을 적용했을 때의 BER 성능을 비교하였다. 동일한 수신기 복잡도를 적용하기 위해서 MMSE 수신 등화 기법을 사용하였으며, 그 때의 수신 복잡도는 '(안테나 수)×(총 성상점 개수)'로 동일하다.

그림 3와 그림 4에서 공통적으로 LDPC와 같은 우수한 오류 정정 부호가 적용된 경우에도 모든 부호율에서 이득을 나타낸다. 변조방식에 따라 이득의 차는 있지만, 기존 인터리빙 대비 4-QAM의 경우는 0.9~1.1dB 가량, 16-QAM의 경우는 2.2~3.0dB 정도의 이득을 갖는다. 성분 맞교환 기술이 적용된 BER 그래프 기울기가 대조군에 비해 급격해졌다는 점에서 성분 맞교환이 공간 인터리빙로써 작용하

여 다이버시티 이득을 가져다줄을 알 수 있다. 즉, [4][5]에서 분석된 바와 같이 공간 다중화 전송 방식에서도 성분 맞교환 기술을 적용하면 추가된 안테나(공간) 자원을 충분히 활용하여 수신 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

변조 심볼 단위로 주파수 인터리빙을 적용한 경우와 비교하였을 때에도 성분 맞교환 기술이 이득을 가진다는 점은 실수부 성분과 허수부 성분이 서로 독립적인 페이딩을 겪게 됨으로써 SNR (또는 MER) 측면에서 이득이 발생함을 알 수 있다. 여기서 주목할 점은, OFDM 한 심볼 내에서 변조 심볼 단위로 주파수 인터리빙을 실시하면, 인터리빙을 적용하지 않았을 때와 성능이 동일하다는 것을 알 수 있는데, 변조 심볼 단위의 인터리빙은 OFDM 두 심볼 이상을 대상으로 고루 섞어주거나 시간 인터리빙과 결합되어 사용되어야 SNR 측면에서 이득이 발생한다는 점을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템에서 낮은 복잡도로 신호 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있도록 고안된 심볼 맞교환 기술의 이득을 분석하였다. 우선 기존 DVB-T2에 포함된 성분 맞교환 기술을 MIMO 시스템으로 단순 확장 적용하였을 때는 심볼 검파 시 복잡도가 크게 증가하는 문제가 발생하는 반면, 제안된 성분 맞교환 기술을 적용하면 심볼의 상호 의존성을 줄여 심볼의 복잡도가 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 DVB-T2 표준에 정의된 16K LDPC 부호가 적용된 경우에도 4-QAM의 경우는 0.9~1.1dB, 16-QAM의 경우는 2.2~3.0dB 가량의 이득을 가짐을 확인하였다.

이러한 실험적 결과 검증을 바탕으로 후속 연구를 통해 수학적으로 성능 이득을 분석한다면 보다 객관적인 성능 평가 및 검증이 이루어 질 것으로 기대되며, 추가적으로 최적 각도만큼 회전된 성상도가 함께 적용될 경우 그 이득은 더 커질 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] DVB Document A122, Framing Structure, Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2), June 2008.

- [2] J. Boutros and E. Viterbo, "Signal Space Diversity: A Power- and Bandwidth-Efficient Diversity Technique for the Rayleigh Fading Channel," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 4, pp. 1453-1467, July 1998.
- [3] S. Jeon, I. Kyung and M.-S. Kim, "Component-Interleaved Receive MRC with Rotated Constellation for Signal Space Diversity," in the 70th IEEE Semianual Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2009-Fall), Anchorage, Alaska, USA, September 2009.
- [4] S. Jeon, J. Lee, I. Kyung and M.-S. Kim, "Component-Interleaved Alamouti Coding with Rotated Constellations for Signal Space Diversity," in 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (IEEE BMSB 2010), Shanghai, March 2010.
- [5] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE Journal on Select Areas in Communications, vol. 16, no. 8, pp. 1451 - 1458, October 1998.
- [6] S. U. Hwang, J.-Y. Choi, S. Jeon, H. J. Ryu and J.-S. Seo, "Performance Evaluation of MIMO-OFDM with Signal Space Diversity over Frequency Selective Channels," in IEEE International Symposium on Broadband Multimedia System and Broadcasting (IEEE BMSB 2009), Bilbao, Spain, May 2009.
- [7] S. Hong, J.-Y. Choi, S. U. Hwang, S. Jeon and J.-S. Seo, "Spatial Diversity Transmission Technique with Rotated Constellation for MIMO-OFDM Systems," in The 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC2009), Tokyo, Japan, September 2009.
- [8] S. Hong, J.-Y. Choi, S. U. Hwang, S. Jeon and J.-S. Seo, "Interleaved Spatial Diversity Transmission with Coordinate Interleaver for MIMO-OFDM Systems," in IEEE 69th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC Spring 2009), Barcelona, Spain, April 2009.
- [9] DVB-NGH Technical Document, "DVB-NGH Channel Models," TM-NGH063, 2010.

저 자 소 개



전 성 호

- 2005년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)
- 2007년~현재 : KBS 기술연구소 주임연구원
- 주관심분야 : 차세대 지상파 모바일 방송 전송 기술, 개루프 디중 안테나 기술

저자소개

임 중 곤



- 1994년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 ~ 현재 : KBS 기술연구소 책임연구원
- 2000년 ~ 2001년 : NHK 기술연구소 초빙연구원 (ISDB-T 전송시스템 연구)
- 주관심분야 : AT-DMB 전송 기술 표준화, 차세대 지상파 모바일 방송 전송 기술

경 일 수



- 1984년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
- 1990년 12월 : 삼성종합기술원
- 현재 : KBS 기술연구소 책임연구원
- 주관심분야 : 차세대 지상파 모바일 방송 전송 기술 / 서비스 계층 규격 기술

김 만 식



- 1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1981년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
- 현재 : KBS 기술연구소 연구위원
- 주관심분야 : 차세대 지상파 모바일 방송 전송 기술, DMB/DGPS 서비스 광역화 기술