

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

*전성호 임중곤 경일수 김만식

KBS 방송기술연구소

*jeonsh@kbs.co.kr

On the Gain of Component-Swapping Technique in LDPC-Coded MIMO-OFDM Systems

*Jeon, Sungho Yim, Zungkon Kyung, Ilsoo Kim, Man-Sik

Broadcast Technical Research Institute, Korean Broadcasting System (KBS)

요약

'신호 공간 다이버시티(Signal Space Diversity)' 기술은 DVB-T2 표준에 포함된 기술로써, 추가적인 전력이나 대역폭의 희생 없이 고품에 있어 성능 이득을 얻을 수 있어 DVB-T2 물리계층 핵심적인 기술 중 하나로 평가받으며, 후속 표준인 DVB-NGH 에도 적용 가능성이 높은 기술이다. 본 논문에서는 '신호 공간 다이버시티' 기술을 MIMO 시스템으로 확장하기 위해서 발생하는 문제점에 대해서 분석한 뒤, 이를 해결하기 위해 제안된 '성분 맞교환(Component-Swapping)' 기술을 현재 논의 중에 있는 DVB-NGH 시스템에 적용하여 주어진 실험 환경에서 2.2~3.0dB 가량의 이득을 가짐을 실험적으로 확인하였다.

1. 서론

나날이 증대되는 모바일방송에 대한 기대에 부응하고자 각 표준단체에서는 '2세대 모바일방송 시스템' 개발에 착수하였다. 특히, DVB 표준그룹 산하 차세대 모바일 방송 표준 제정을 위한 조직인 DVB-NGH(Next Generation Handheld)의 활동이 가장 활발한데, 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. 참고로 KBS에서는 2010년 2월에 물리계층 전송핵심 기술 2건에 대해서 기술 기고를 제출하였고, 이를 프로모션 하자 2010년 3월 DVB-NGH 정기회의에 참석하였다.

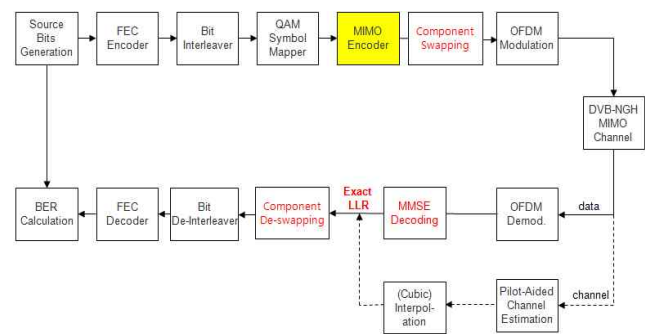
신호 공간 다이버시티[1]는 2008년도에 개발된 '고정형 디지털 지상파 시스템'인 DVB-T2 표준[2]에 포함된 기술로써, 추가적인 전력이나 대역폭의 희생 없이 고품에 있어 성능 이득을 얻을 수 있어 DVB-T2의 핵심적인 기술 중 하나로 평가받으며, 후속 표준인 DVB-NGH에도 적용 가능성이 높은 기술이다. 본 논문에서는 '신호 공간 다이버시티' 기술을 MIMO 시스템으로 확장하기 위해서 발생하는 문제점에 대해서 분석한 뒤, 이를 해결하기 위해 제안된 '성분 맞교환' 기술[3]-[5]을 현재 논의 중에 있는 DVB-NGH 시스템에 적용하여 그 이득을 실험적으로 분석하였다.

본 논문은 DVB-T2 표준에 정의된 16K (16800) 크기 LDPC 부호가 적용되어도 '성분 맞교환' 기술의 이득이 존재함을 확인 본 연구는 방송통신위원회, 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT 원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구로부터 도출된 것이며, [2009-F-029-01, 방통융합형 차세대 모바일방송 핵심기술 개발] 본 논문의 내용은 DVB-NGH 국제 표준화 기고문(TM-NGH068)으로 제출·발표되었음.

함으로써 향후 표준화 논의에 있어서 객관적 성능 비교 자료로써 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.

2. 시스템 모델 및 시뮬레이터 구현

가. DVB-NGH 시스템 모델



[그림 1] DVB-NGH 시스템 모델 및 KBS 시뮬레이터 구조

[그림 1]은 2010년 정기회의까지 논의된 DVB-NGH 시스템의 기본 골격을 바탕으로 구성된 KBS 시뮬레이터의 구조를 나타낸 것이다. DVB-NGH MIMO 기술 분과에서는 낮은 주파수 대역으로 긴 안테나 크기가 요구되는 VHF/UHF 특성과 모바일 수신기 크기를 고려할 때 최대 2개의 수신 안테나를 고려하는 것이 타당하다고 공감대를 형성하고 있으며, 2x2 MIMO를 기본으로 4x2 MIMO도 고려하고 있다. 채널 부호화로는 DVB-T2에 정의된 LDPC 부호를 활용하나, 그 중에서도 모바일의 수신기 복잡도를 고려하여 16K 크기의 LDPC 부호와 신규로 제안된 4K (4320) 부호의 도입이 유력하다. KBS 시뮬레이터

에는 DVB-T2 파일럿 구조를 기반으로 MIMO 환경에 맞도록 변형하여 구현·적용하였으며, 파일럿을 통해 추정(Estimation)된 채널은 3차 보간법(Cubic Interpolation)에 의해 데이터 심볼 검파에 적용된다. LDPC 복호를 위해서는 근사화 되지 않은 'Exact LLR(Log-Likelihood Ratio)' 값을 계산한다.

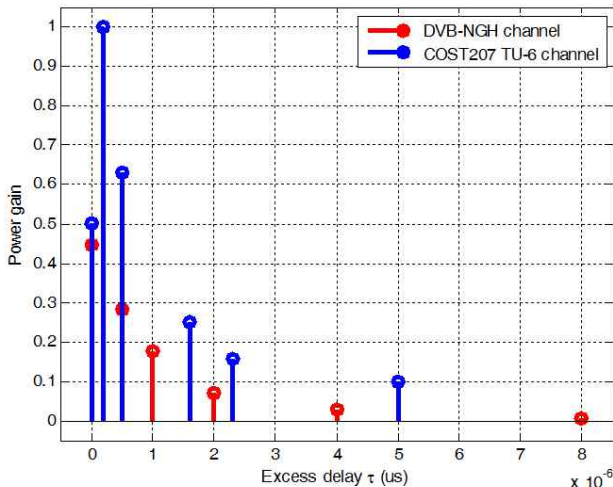
나. UHF 방송 대역에서의 MIMO 채널 모델

방송 시스템에서 MIMO 기술은 아직까지 적용된 바가 없다. 이는 방송 주파수 대역에서의 MIMO 채널 모델이 존재하지 않는다는 것과 그 맥을 같이 한다. DVB-NGH에서는 MIMO 기술의 도입과 객관적인 시뮬레이션 평가를 위해서 영국의 공영방송사 BBC를 포함한 10여 개의 회원사들이 참여하여 500MHz~1000MHz UHF 대역에서의 MIMO 채널 실측을 최초로 실시하였다. 획득한 실측 데이터를 바탕으로 [표 1]과 같은 채널 프로파일을 정의[6]하였다.

[표 1] 실측에 기반을 둔 UHF 대역에서의 MIMO 채널 모델

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

새롭게 정의된 DVB-NGH MIMO 채널 모델을 모바일 방송 시스템 평가에 널리 활용되는 COST207 TU-6 (Typical Urban 6-path) 채널과 비교해 보면 [그림 2]와 같다. 우선 동일하게 6개의 Multipath로 정의되어 있음을 알 수 있으나 Pre-Ghost 성분 없이 첫 번째 Path에 주 신호가 들어오고 이후에 들어오는 Multipath 성분은 마치 Exponential Decay 이론 모델과 닮아있는 것을 알 수 있다.

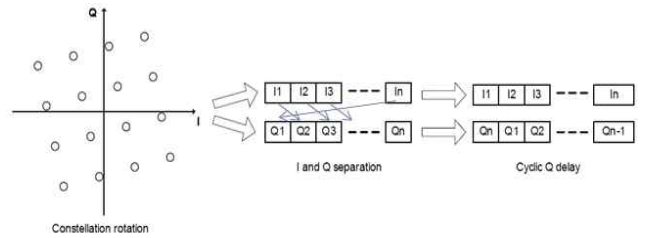


[그림 2] DVB-NGH 채널 모델과 COST207 TU-6 채널 모델의 비교

3. LDPC 부호가 적용된 성분 맞교환 기술

가. SISO 시스템에 적용된 '성분 인터리빙 기술'을 MIMO 시스템에 그대로 적용했을 때 문제점

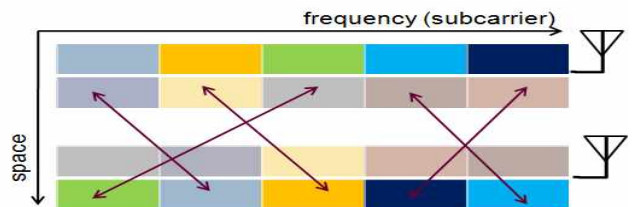
신호 공간 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 신호점의 실수부와 허수부 성분의 직교화(Orthogonalization)를 위한 '성분 인터리빙(Component Interleaving)'이 필수적으로 요구된다. SISO에 기반을 둔 DVB-T2에서는 허수부 성분(Quadrature)를 하나씩 지연시키는 형태의 Cyclic-Q Delay 기법을 성분 인터리빙으로 정의하였다. 따라서, 이를 MIMO 환경에 그대로 적용하게 되면 [그림 3]에서와 같이 2x2 MIMO를 가정하고 첫 번째 안테나에서 전송되는 스트림의 정상점을 $C_k^1 = I_k^1 + jQ_k^1$ (k 는 Subcarrier 인덱스)라고 할 때, 실수부 성분 I_k^1 는 k 번째 Subcarrier에 실리지만, 허수부 성분 Q_k^1 는 $k+1$ 번째 Subcarrier에 실리게 된다.



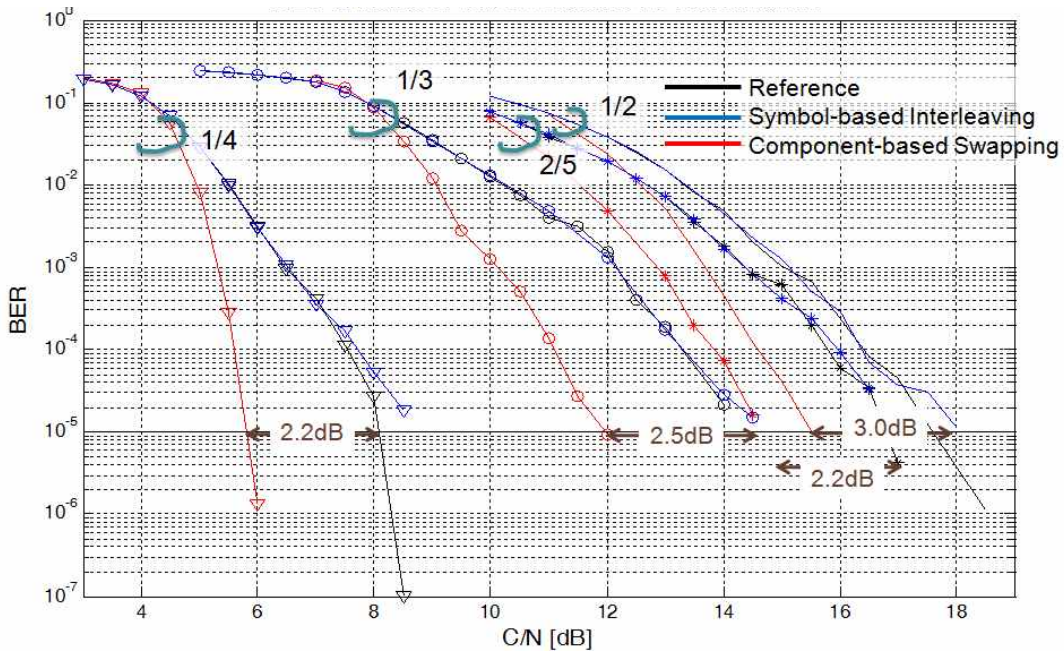
[그림 3] DVB-T2에 정의된 성분 인터리빙 기술인 Cyclic Q Delay를 MIMO에 적용한 경우

송신단에서는 기존 방식이 간단해 보일 수 있으나, ML (Maximum Likelihood) 등 각종 검파 방식을 적용한 후 채널 복호기 입력으로 LLR 값을 계산해야 하는 수신단에서 엄청난 계산량을 요구하게 된다. 왜냐하면 첫째, MIMO 채널에는 안테나 간의 Cross-term 채널 성분이 존재하여 안테나 간 간섭이 필연적으로 발생하고, 둘째, 하나씩 밀어서 인터리빙하는 방식은 C_k^1 심볼 검파를 위해서 k 번째와 $k+1$ 번째, C_{k+1}^1 심볼을 위해서는 $k+1$ 번째와 $k+2$ 번째 등 이웃하는 Subcarrier 간 상호 의존성(Interdependency)를 가지게 되어 결과적으로 모든 Subcarrier에 실린 심볼을 동시에 고려해야 원하는 LLR 값을 계산해 낼 수 있기 때문이다. 이는 명백히 수신기에서 처리 능에 가까운 수준의 복잡도가 요구된다.

나. 성분 맞교환 (Component-Swapping) 기술



[그림 4] 성분 맞교환 (Component-Swapping) 기술 : 먼저 안테나 간의 심볼쌍(pair)을 선택한 후, 선택된 심볼끼리 허수부 성분을 교환하는 방식



[그림 5] LDPC가 적용된 2x2 MIMO-OFDM 시스템에서 DVB NGH 채널 적용 시 C/N 값에 따른 BER 성능

(3-가)에서 논의된 수신 복잡도를 해결하면서 다이버시티 이득을 유지하는 방안으로써 성분 맞교환 기술[3]-[5]이 제안되었다. 수신기 복잡도 증가의 원인인 Cyclic-Q Delay로 인한 상호 의존성을 끊는 방법으로 '맞교환'이라는 개념을 도입하여 간단하게 문제를 해결하였다.

[그림 4]에서와 같이 먼저 송신 안테나 심볼 간에 무작위(Random), 이웃하는(Adjacent) 심볼 간 또는 일정 규칙(Pattern) 등을 바탕으로 심볼쌍을 결정한다. 그리고 결정된 심볼쌍 간에 허수부 성분 Q를 맞교환 한다. 즉, 두 심볼 간에 허수부를 맞교환하기 때문에 상호 의존성은 두 심볼로 제한되며, 채널 Cross-term까지 고려한다면 상호 의존성은 최대 네 심볼로 한정된다. 제안된 방법은 회전 성상도(Rotated Constellation)와 결합되어 MIMO 환경에서도 신호 공간 다이버시티 이득 획득이 가능하게 해준다.

4. 모의실험 결과

가. 시뮬레이션 환경

주요 시뮬레이션 환경은 2x2 MIMO-OFDM을 기본으로 하고, (2-나)에 정의된 DVB-NGH MIMO 채널 모델을 적용하였다. 주요 파라미터 설정값은 [표 2]와 같이 DVB-NGH 2010년 5월 정기 회의를 위해서 합의된 내용을 기반으로 하였다. 성능 평가 지점은 LDPC 복호 후 BER(Bit Error Ratio)을 기준으로 10⁻⁵ 지점이다.

나. C/N에 따른 LDPC-Coded BER 성능

[그림 5]는 C/N에 따른 BER 성능을 나타내는 그래프이다. 제안된 '성분 맞교환' 기술의 이득 검증을 위해서 주파수 인터리빙을 적용하지 않은 경우와 OFDM 한 심볼 내에서 Symbol 단위로 인터리빙을 적용했을 때의 성능과 비교하였다. 동일한

[표 2] 주요 시뮬레이션 파라미터

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

수신기 복잡도를 적용하기 위해서 MMSE 수신 등화 기법을 사용하였으며, 그 때의 수신 복잡도는 '(안테나 수)×(총 성상점 개수)'로 동일하다.

[그림 5]에서 표시된 바와 같이 LDPC와 같은 오류 정정 부호가 적용된 경우에도, 그리고 모든 부호율에서 기존 인터리빙 대비 2.2~3.0dB의 이득을 나타낸다. 또한 성분 맞교환 기술이 적용된 BER 그래프 기울기가 대조군에 비해 급격해졌다는 점에서 공간 인터리빙으로써 작용하여 다이버시티 이득을 가져다 줄 수 있다. 즉, 성분 맞교환 기술을 적용하면 추가적인 안테나(공간) 자원을 충분히 활용하여 수신 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

Symbol 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 Symbol 단위로 주파수 인터리빙을 실시하면, 인터리빙을 적용하지 않았을 때와 성능이 동일하다는 것을 알 수 있는데, Symbol 단위의 인터리빙은 OFDM 두 심볼 이상을 대상으로 고루 섞어주거나 시간 인터리빙과 결합되어 사용되어야 SNR 측면에서 이득이 발생한다는 점을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 신호 공간 다이버시티 기법을 MIMO 시스템에 도입하기 위해서 필수적으로 요구되는 기존 성분 인터리빙 기술의 문제점에 대해서 분석하고, 이를 해결하기 위해서 제안된 '성분 맞교환' 기술의 이득을 LDPC 부호가 적용된 MIMO-OFDM 시스템에서 분석하였다. 채널 부호가 적용된 경우에도 기존 기술 대비 이득을 가짐을 확인하였고, 추가적으로 최적 각도만큼 회전된 성상도가 적용될 경우 그 이득은 더 커질 것으로 판단된다. 이러한 실험적 결과 검증을 바탕으로 후속 연구를 통해 수학적으로 성능 이득을 분석한다면 보다 객관적인 성능 평가가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

[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. 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," *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia System and Broadcasting* (IEEE BMSB 2009), Bilbao, Spain, May 2009.
- [4] 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," *The 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (IEEE PIMRC2009), Tokyo, Japan, September 2009.
- [5] 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," *IEEE 69th Vehicular Technology Conference* (IEEE VTC Spring 2009), Barcelona, Spain, April 2009.
- [6] DVB Document, "DVB-NGH Channel Models," TM-NGH063, 2010.