

3 계층 LDM-MIMO 시스템의 파일럿 배치에 따른 채널 추정 성능 분석

김호재, 권순영, 배재휘*, 허남호*, 김형남[Ⓞ]
 부산대학교, 한국전자통신연구원*

hnkim@pusan.ac.kr[Ⓞ]

Performance analysis of channel estimation according to pilot arrangement of the three layer LDM-MIMO system

Ho Jae Kim, Soon-Young Kwon, JaeHwui Bae*, Namho Hur*, Hyoung-Nam Kim[Ⓞ]
 Pusan National Univ., ETRI*

요 약

최근 디지털 전송 기술의 발전에 따라 대용량 전송 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이와 관련하여 복미의 지상파 DTV 전송 표준화 기구인 ATSC (Advanced Television Systems Committee)에서는 차세대 방송 표준으로 ATSC 3.0 을 제정하였다. ATSC 3.0 시스템에서는 대용량 전송을 위하여 2 계층을 사용하는 계층 분할 다중화 (Layered Division Multiplexing, LDM) 시스템 및 다중 입력-다중 출력 (Multiple-input Multiple-Output, MIMO) 기술이 채택되었다. 그러나, 향후 8K UHD 와 같은 대용량의 콘텐츠를 전송하기 위해서는 추가적인 스펙트럼의 효율성 확보가 필수적이며, 이에 대한 방안으로 3 계층 이상의 LDM 시스템이 고려되고 있다. 이러한 요구에 대비하기 위하여, 본 논문에서는 3 계층 LDM-MIMO 시스템에서 Walsh-Hadamard 파일럿 및 Null 파일럿을 사용할 경우에 따른 채널 추정 및 수신 신호 성능을 비교 분석한다.

I. 서 론

디지털 전송 기술의 발전에 따라 대용량 전송 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 복미의 표준화 기구인 ATSC (Advanced Television System Committee)에서는 초고품질 데이터 전송이 가능하며, 동시에 HD 급 이동방송 서비스가 가능한 차세대 방송 표준인 ATSC 3.0 시스템을 표준으로 제정하였다 [1]. ATSC 3.0 의 핵심 기술 중 하나인 계층 분할 다중화 (Layered Division Multiplexing, LDM) 시스템은 두 개 이상의 서비스를 하나의 RF 채널로 전송하는 기술이며, ATSC 3.0 시스템에서는 2 계층 LDM 시스템이 표준으로 채택되었다. 이러한 LDM 시스템은 기존의 시 분할 다중화 (Time Division Multiplexing, TDM) 및 주파수 분할 다중화 (Frequency Division Multiplexing, FDM) 시스템보다 3~6 dB 정도의 높은 시스템 이득을 제공할 수 있다 [2]. 또한, 채널 용량 증가를 위하여 다중 입력-다중 출력 (Multiple-input Multiple-Output, MIMO) 기술이 채택되었다[1]. MIMO 시스템은 공간 다중화를 이용하여 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다[3].

대용량 콘텐츠의 보급 및 수요가 증가함에 따라 8K-UHD 방송, IoT (Internet of Things) 등 미래 기술들에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 한정된 주파수 대역에서 다양한 콘텐츠를 제공하는 것은 한계가 있으므로 추가적인 스펙트럼 효율에 대한 연구가 필요하다. 이에 대한 연구로 3 계층 이상의 LDM 시스템이 필요하다고 판단되며, 이를 통해 다양한 콘텐츠 전송이 가능할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 3 계층 LDM-MIMO 시스템에서 MIMO 에 주로 사용되는 2 가지 파일럿인 Walsh-Hadamard 파일럿 및 Null 파일럿 사용에 따른 채널 추정 성능 및 수신 신호의 성능을 분석한다.

II. 3 계층 LDM-MIMO 시스템

그림 1 은 2 개의 송신기 및 2 개의 수신기를 사용한 3 계층 LDM-MIMO 시스템의 송신 블록도이다. MIMO 시스템은 두 안테나의 파형을 다르게 전송하여 (예시: Tx 1 - 중파, Tx 2 - 횡파) 공간적 이득을 획득한다[3]. 그러나, 안테나의 위치가 수시로 변하는 이동 채널은 파형의 극을 고정하기가 어려우므로 고정 수신을 목표로 하는 하위 계층(Lower Layer)만 MIMO 시스템을 적용하여 그림 1 과 같이 3 계층 LDM-MIMO 시스템을 구현할 수 있다.

III. MIMO 시스템의 파일럿 배치 및 채널 추정

MIMO 시스템에 사용되는 파일럿 배치 방식은 Walsh-Hadamard 파일럿과 Null 파일럿이 있다. Walsh-Hadamard 파일럿 배치는 그림 2와 같다. 1 번 송신기의 파일럿 배치는 기존 단일 안테나 배치와 동일하며, 2 번 송신기의 파일럿 배치는 파일럿의 짝수 열의 부호를 반전시켜 사용한다. 이렇게 배치한 파일럿은 수신기에서 다음과 같이 채널 추정을 진행한다[4].

$$\tilde{H}_{sum1}[l_{sum}, k_{sum}] = \frac{Y_{R1}[l_{sum}, k_{sum}]}{X_{T1}[l_{sum}, k_{sum}]} \quad (1)$$

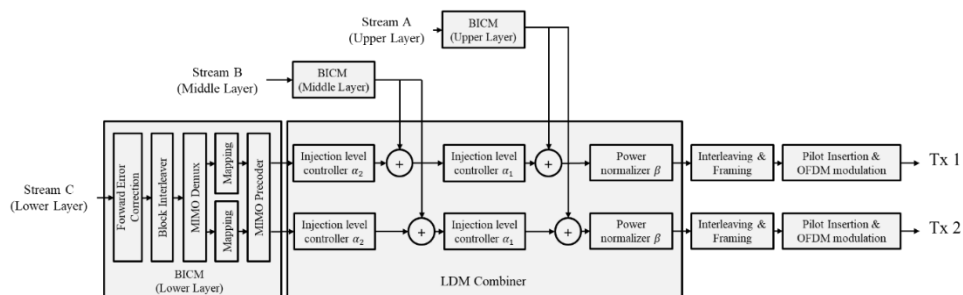


Figure 1. 3 계층 LDM-MIMO 시스템의 송신 블록도

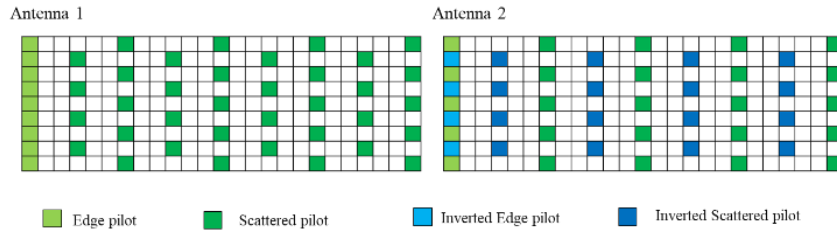


Figure 2. 송신 안테나별 Walsh-Hadamard 파일럿의 배치

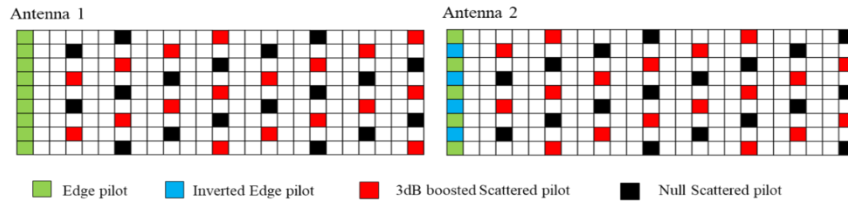


Figure 3. 송신 안테나별 Null 파일럿의 배치

$$\tilde{H}_{sum2}[l_{sum}, k_{sum}] = \frac{Y_{R2}[l_{sum}, k_{sum}]}{X_{T1}[l_{sum}, k_{sum}]} \quad (2)$$

$$\tilde{H}_{diff1}[l_{diff}, k_{diff}] = \frac{Y_{R1}[l_{diff}, k_{diff}]}{X_{T1}[l_{diff}, k_{diff}]} \quad (3)$$

$$\tilde{H}_{diff2}[l_{diff}, k_{diff}] = \frac{Y_{R2}[l_{diff}, k_{diff}]}{X_{T1}[l_{diff}, k_{diff}]} \quad (4)$$

여기서 X_{Ti} 는 i 번째 송신기 신호, Y_{Rj} 는 j 번째 수신기 신호를 나타낸다. $[l_{sum}, k_{sum}]$ 은 반전되지 않은 파일럿 위치 (녹색 파일럿)이며, 이 위치에서 추정된 k 번째 수신기의 합 채널 $\tilde{H}_{sum,k}$ 를 구할 수 있다. $[l_{diff}, k_{diff}]$ 는 반전된 파일럿 위치 (파란색 파일럿)이며, 이 위치에서 추정된 k 번째 수신기의 차 채널 $\tilde{H}_{diff,k}$ 를 구할 수 있다. 각 파일럿 위치에서 채널 추정 후 보간을 통하여 나머지 데이터 위치의 채널을 추정한다. 이렇게 추정된 4 개의 채널은 다음과 같이 합과 차를 이용하여 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기를 경로로 하는 채널 $\hat{H}_{Rj,Ti}$ 추정을 한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{H}_{R1,T1} & \hat{H}_{R1,T2} \\ \hat{H}_{R2,T1} & \hat{H}_{R2,T2} \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} \tilde{H}_{sum1} + \tilde{H}_{diff1} & \tilde{H}_{sum1} - \tilde{H}_{diff1} \\ \tilde{H}_{sum2} + \tilde{H}_{diff2} & \tilde{H}_{sum2} - \tilde{H}_{diff2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Null 파일럿의 배치는 그림 3 과 같다. 1 번 송신기의 배치는 그림에서 제시된 것과 같이 빨간색 위치에서 기존 파일럿 신호보다 3 dB 강한 신호를 배치하며, 검은색 위치에는 Null 신호를 배치한다. 2 번 송신기의 배치는 1 번 송신기와 반대 유형으로 빨간색 위치의 3 dB 강한 신호를 배치하며, 검은색 위치에는 Null 을 배치한다. 이렇게 배치한 파일럿은 수신기에서 다음과 같이 채널 추정을 진행한다[4].

$$\tilde{H}_{R1,T1}[l_{T1}, k_{T1}] = \frac{Y_{R1}[l_{T1}, k_{T1}]}{X_{T1}[l_{T1}, k_{T1}]} \quad (6)$$

$$\tilde{H}_{R2,T1}[l_{T1}, k_{T1}] = \frac{Y_{R2}[l_{T1}, k_{T1}]}{X_{T1}[l_{T1}, k_{T1}]} \quad (7)$$

$$\tilde{H}_{R1,T2}[l_{T2}, k_{T2}] = \frac{Y_{R1}[l_{T2}, k_{T2}]}{X_{T2}[l_{T2}, k_{T2}]} \quad (8)$$

$$\tilde{H}_{R2,T2}[l_{T2}, k_{T2}] = \frac{Y_{R2}[l_{T2}, k_{T2}]}{X_{T2}[l_{T2}, k_{T2}]} \quad (9)$$

여기서 $[l_{Ti}, k_{Ti}]$ 은 i 번째 송신기에서 빨간색 위치의 파일럿이며, 이 위치에서 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기를 경로로 하는 채널 $\tilde{H}_{Rj,Ti}$ 를 추정할 수 있다. 각 파일럿 위치에서 채널 추정 후 보간을 통하여 나머지 데이터 위치의 채널을 추정한다. 이렇게 추정된 4 개의 채널이 각 경로별 최종 채널 $\hat{H}_{Rj,Ti}$ 추정 값이 된다.

IV. 모의실험 결과

모의 실험은 파일럿에 따른 채널 추정 오류 및 하위 계층 신호의 BER (Bit Error Rate) 성능 분석을 진행하였다. 파라미터는 FFT 크기 8K, 보호 구간 (Guard Interval, GI) 길이 1/16, 상위 계층은 QPSK (code rate: 2/15), 중간 계층은 QPSK (code rate: 1/4), 하위 계층은 64QAM (code rate: 2/3)을 사용하였다. 파일럿 패턴은 ATSC 3.0 표준에 명시된 PP_3_2 를 사용하였으며, 하위 계층과 중간 계층의 전력 차이 $\alpha_1=1$ dB, 중간 계층과 상위 계층의 전력 차이 $\alpha_2=0.45$ dB 를 사용하였다. 채널 추정 오류는 MSE (Mean-square Error)를 사용하여 측정하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$MSE = E \left[\frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \|\hat{H}_{Rj,Ti} - H_{Rj,Ti}\|^2 \right] \quad (10)$$

여기서 $H_{Rj,Ti}$ 는 실제 채널 값을 나타내며, $\hat{H}_{Rj,Ti}$ 는 추정된 채널 값을 나타낸다. 교차 편파 분리도 (Cross Polarization Discrimination, XPD)는 18 dB 를 사용하였다.

그림 4 는 AWGN (Additive white Gaussian noise) 채널에서 각 파일럿에 따른 채널 추정 오류에 대한 모의실험 결과이다. 두 파일럿 패턴의 성능이 거의 유사하나, Null 파일럿을 사용할 경우 Walsh-Hadamard 파일럿보다 약 0.1 dB 정도 채널 추정 성능이 우수한 것을 확인하였다.

그림 5 는 AWGN 채널에서 하위 계층 신호의 수신 BER 성능 모의실험 결과이다. Null 파일럿을 사용할 경우 Walsh-Hadamard 파일럿보다 약 0.2 dB 정도 하위 계층 신호의 수신 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

그림 6 은 2-tap 을 고려한 단일 주파수 망 (Single Frequency Network, SFN) 채널에서 하위 계층 신호의 수신 BER 성능 모의실험 결과이다. 2-tap 채널 경로의 전력은 [0, -4]dB 를 사용하였으며, 지연 시간은 [0, 0.9*GI]s 를 사용하였다. Null 파일럿을 사용할 경우 AWGN 채널 보다 약 2.1 dB 정도 성능 열화가 발생하는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 추가적인 주파수 자원을 획득하기 위해 3 계층 LDM 시스템에 대한 2x2 MIMO 를 결합한 시스템의 채널 추정에 대한 연구를 진행하고, 각 파일럿 배치에 대한 채널 추정 성능 및 수신 신호 BER 성능을 분석하였다. MIMO 시스템에 사용되는 Null 파일럿 및 Walsh-Hadamard 파일럿을 이용하여 채널 추정 성능을 비교하였으며, AWGN 채널에서 두 파일럿 패턴의 성능이 유사하나, Null 파일럿을 사용할 경우 Walsh-Hadamard 파일럿보다 약 0.2 dB 정도 수신 성능이 우수한 것을 확인하였다. 또한 2-tap SFN 채널을 고려한 경우 AWGN 채널보다 약 2.1 dB 성능 열화가 발생하는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 2017 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임[2017-0-00081, 초고품질 UHD(UH) 전송기술 개발]"

참 고 문 헌

[1] ATSC Standard: Physical Layer Protocol (A/322), ATSC (Advanced Television Systems Committee, Jun. 2017.

[2] 권선형, 박성익, 이재영, 임보미, 김홍목, "ATSC 3.0 물리계층 표준기술," 방송과 미디어(한국방송·미디어공학회), vol. 20, no. 4, pp. 17-27, 2015년 10 월

[3] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB," John Wiley & Sons, 2010

[4] Takuya Shitomi, Eduardo Garro, Kenichi Murayama, and David Gomez-Barquero, "MIMO Scattered Pilot Performance and Optimization for ATSC 3.0," *IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING*, VOL. 64, NO. 2, JUNE 2018

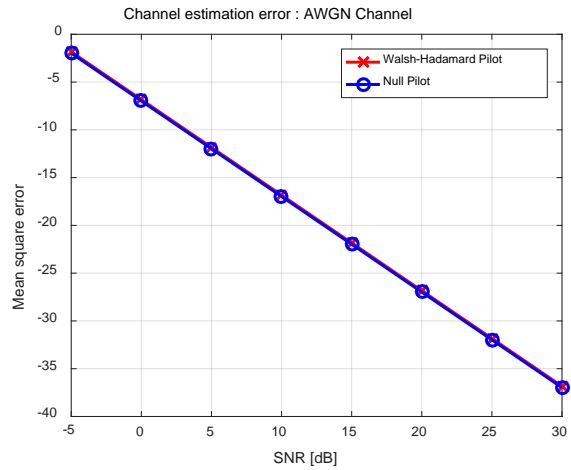


Figure 4.3 계층 LDM-MIMO 시스템의 파일럿 배치에 따른 채널 추정 성능: AWGN 채널

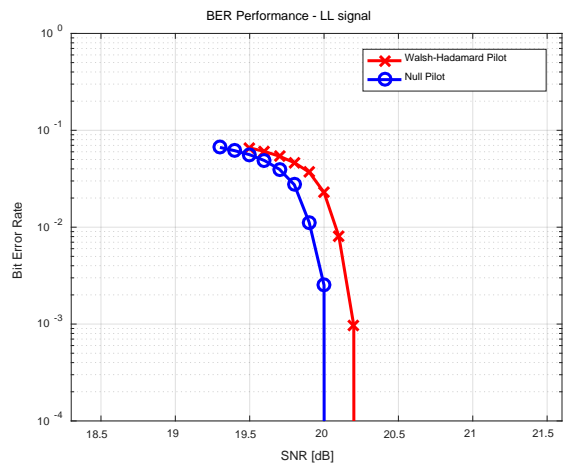


Figure 5.3 계층 LDM-MIMO 시스템의 파일럿 배치에 따른 하위 계층 BER 수신 성능: AWGN 채널

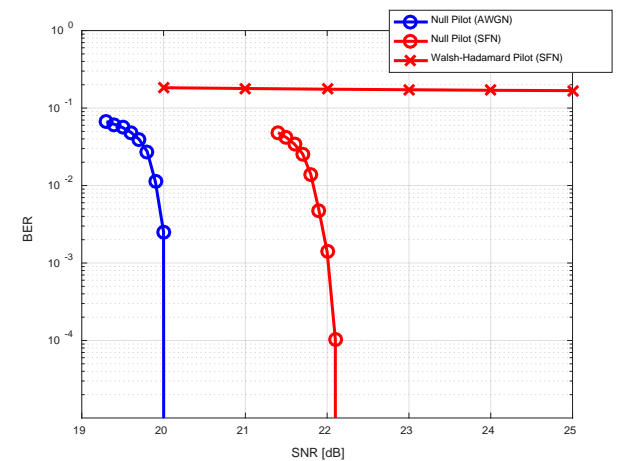


Figure 6.3 계층 LDM-MIMO 시스템의 파일럿 배치에 따른 하위 계층 BER 수신 성능: 2-tap SFN 채널