

레터논문 (Letter Paper)

방송공학회논문지 제27권 제1호, 2022년 1월 (JBE Vol.27, No.1, January 2022)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.1.146>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

LDM-MIMO ATSC 3.0 방송 시스템의 Core-Layer 신호를 위한 저복잡도 HPGA 복호 기법들

김 승 현^{a)}, Yulong Shang^{b)}, 정 태 진^{a)†}

Low-Complexity HPGA Decoding Methods for Core-Layer Signal in LDM-MIMO ATSC 3.0 Broadcasting Systems

Seunghyeon Kim^{a)}, Yulong Shang^{b)}, and Taejin Jung^{a)†}

요 약

본 레터는 Layered-Division-Multiplexing Multiple-Inputs-Multiple-Outputs ATSC 3.0 방송 시스템의 Core-Layer신호에 대한 저복잡도 Hybrid-Partial-Gaussian-Approximation(HPGA) 복호 기법들을 제안하고자 한다. 제안된 HPGA 기법들은 각 수신 안테나 신호의 Injection-Level 값에 따라 기존의 제안된 GA 및 PGA 기법들을 선택적으로 사용하여 기존의 PGA 기법에 비해 큰 성능 저하 없이 복호 복잡도를 크게 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

Abstract

In this letter, we propose low-complexity Hybrid-Partial-Gaussian-Approximation (HPGA) decoding methods for core-layer signal of Layered-Division-Multiplexing Multiple-Inputs-Multiple- Outputs ATSC 3.0 broadcasting systems. The proposed HPGA decoding methods have an advantage of being able to greatly reduce decoding complexity without significant performance degradation compared to a conventional PGA method, by selectively using existing GA and PGA methods according to a received injection-level at an each receive antenna.

Keyword : ATSC 3.0, LDM, MIMO, LLR, Injection level

a) 전남대학교 ICT융합시스템공학과(Dept. of ICT Convergence System Engineering, Chonnam National University)

b) Dept. of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology

† Corresponding Author : 정태진(Taejin Jung)

E-mail: tjung@jnu.ac.kr

Tel: +82-62-530-0722

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3220-0878>

※ This research was supported by the BK21 FOUR Program(Fostering Outstanding Universities for Research, 5199991714138) funded by the Ministry of Education(MOE, Korea) and National Research Foundation of Korea(NRF).

· Manuscript received November 26, 2021; Revised December 16, 2021; Accepted December 16, 2021.

I. 서론

ATSC 3.0 디지털 방송 표준 내 주요 기술 중 하나인 Layered-Division-Multiplexing(LDM) 전송 기법은 독립적인 Core-Layer(CL) 신호와 Enhanced-Layer(EL) 신호를 동시에 전송하여 다양한 고급 방송 기술들을 제공한다^[1,2]. 현재 이러한 LDM 기법은 전송 효율을 더욱 증대하기 위하여 Multiple-Inputs-Multiple-Outputs(MIMO)와 결합하는 LDM-MIMO 연구들이 진행되고 있다^[3,5,6]. 특히 ^[5]는 기존의 EL 신호를 모두 잡음으로 가정하여 CL 신호를 복호하는 Gaussian-Approximation(GA) 기법^[4] 대신, EL 신호의 일부만을 잡음으로 고려하여 성능을 향상시키는 Partial-GA (PGA) 기법을 제안하였다. 하지만 PGA 기법은 이러한 성능 이득을 가지더라도 기존의 GA 기법에 비하여 상대적으로 높은 복호 복잡도를 가진다는 큰 문제점이 존재한다.

따라서 본 논문에서는 LDM-MIMO 방송 시스템에서 기존의 PGA 기법과 큰 성능 저하 없이 복호 복잡도를 줄이기 위하여 각 수신 안테나 신호의 Injection-Level(IL) 값에 따라 기존의 GA 기법과 PGA 기법을 선택적으로 사용하는 저복잡도 Hybrid-PGA(HPGA) 복호 기법들을 제안하고자 한다.

II. LDM-MIMO 시스템과 기존 CL 연판정 복호 기법들

그림 1은 2×2 이중 편파(dual-polarization) 안테나들을 사용한 LDM-MIMO 시스템의 송수신 블록도이다^[5,6]. 먼저 송신 비트들은 변조차수가 M_c 인 하나의 CL 신호, x_c 와 M_c 인 두 개의 EL 신호들, $x_{e,i}$ 로 변조되어, MIMO 채널을 통과한 후 다음과 같이 수신단에 도착하게 된다.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c + x_{e,1} \\ x_c + x_{e,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{H} 는 이중 편파 Rician 페이딩 채널 행렬이며 \mathbf{n} 은 평균이 0, 분산이 N_0 인 복소 AWGN 벡터를 나타낸다. 특히 일반적으로 LDM 전송 시스템은 정상적인 CL 복조를

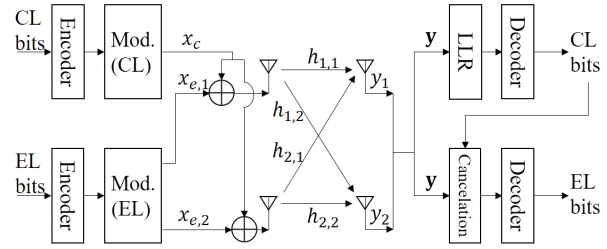


그림 1. LDM-MIMO 시스템 송수신 블록도^[5,6]
Fig. 1. A block diagram of LDM-MIMO systems^[5,6]

위해 CL 전력 $E_c = E\{|x_c|^2\}$ 는 EL 전력 $E_e = E\{|x_{e,i}|^2\}$ 보다 높은 값, 즉 1보다 큰 IL, $\rho_{TX} = E_c/E_e \geq 1$ 을 사용한다^[1].

먼저 GA 기법^[4]은 CL 복호 시 동시에 전송되는 모든 EL 수신 신호를 잡음으로 가정하게 된다.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} h_{1,1} + h_{2,1} \\ h_{1,2} + h_{2,2} \end{bmatrix} x_c + \mathbf{n}_{GA} + \mathbf{n} \quad (2)$$

여기에서 $\mathbf{n}_{GA} = [n_{GA}^1, n_{GA}^2]^T = [h_{1,1}x_{e,1} + h_{2,1}x_{e,2}, h_{1,2}x_{e,1} + h_{2,2}x_{e,2}]^T$ 로 EL 신호 잡음을 나타낸다. 식 (2)에 대한 CL 신호 x_c 내 k 번째 비트의 Log-Likelihood-Ratio (LLR), LLR_k^{GA} 값은 다음과 같다.

$$LLR_k^{GA} = \log \frac{\sum_{x_c \in \chi_k^1} \exp \left(- \sum_{i=1}^2 \frac{|y_i - (h_{1,i} + h_{2,i})x_c|^2}{N_{GA}^i + N_0} \right)}{\sum_{x_c \in \chi_k^0} \exp \left(- \sum_{i=1}^2 \frac{|y_i - (h_{1,i} + h_{2,i})x_c|^2}{N_{GA}^i + N_0} \right)} \quad (3)$$

여기에서 χ_k^b 는 x_c 의 k 번째 비트가 $b \in \{0,1\}$ 인 모든 성상이며, $N_{GA}^1 = (|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2)E_e$ 와 $N_{GA}^2 = (|h_{1,2}|^2 + |h_{2,2}|^2)E_e$ 는 식 (2)에서 정의한 n_{GA}^i 의 평균 전력을 나타낸다.

본 논문에서는 LLR 복잡도 계산으로 특정 비트 값 b 에 대하여 두 수신 안테나들에서의 총 Euclidean 거리 계산 개수를 사용한다. 따라서 식 (3)의 GA의 복잡도 O_{GA} 는 각 수신 안테나에서 총 $M_c/2$ 의 거리 계산 개수가 필요하여 총 M_c 가 되며, 따라서 복잡도 측면에서 큰 이득을 갖게 된다.

다음으로 기존의 PGA 기법^[5,6]은 먼저 EL 신호 $x_{e,i}$ 를 QPSK 신호 $x_{e,i}^{QPSK}$ 와 나머지 신호 $x_{e,i}^R$ 로 분리, $x_{e,i} = x_{e,i}^{QPSK}$

$+x_{e,i}^R$ 로 표현한 뒤, 식 (2)의 GA와 달리 $x_{e,i}^R$ 만을 잡음으로 가정하여 CL 복호를 수행한다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_c + x_{e,1}^{QPSK} \\ x_c + x_{e,2}^{QPSK} \end{bmatrix} + \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_{e,1}^R \\ x_{e,2}^R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{x}' + \mathbf{n}_{PGA} + \mathbf{n} \quad (4)$$

여기에서 $\mathbf{n}_{PGA} = [n_{PGA}^1, n_{PGA}^2]^T = [h_{1,1}x_{e,1}^R + h_{2,1}x_{e,2}^R, h_{1,2}x_{e,1}^R + h_{2,2}x_{e,2}^R]^T$ 이며, x_c 의 LLR_k^{PGA} 값은 다음과 같다.

$$LLR_k^{PGA} = \log \frac{\sum_{\mathbf{x}' \in \psi_k^1} \exp \left(- \sum_{i=1}^2 \frac{|y_i - [h_{1,i} \ h_{2,i}] \mathbf{x}'|^2}{N_{PGA}^i + N_0} \right)}{\sum_{\mathbf{x}' \in \psi_k^0} \exp \left(- \sum_{i=1}^2 \frac{|y_i - [h_{1,i} \ h_{2,i}] \mathbf{x}'|^2}{N_{PGA}^i + N_0} \right)} \quad (5)$$

여기에서 $N_{PGA}^1 = (|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2)E_c^R$ 와 $N_{PGA}^2 = (|h_{2,2}|^2 + |h_{1,2}|^2)E_c^R$ 는 식 (4)에서 정의한 n_{PGA}^i 의 평균 전력을 나타내며, $E_c^R = E\{|x_{e,1}^R|\} = E\{|x_{e,2}^R|\}$ 이다. 그리고 ψ_k^b 는 x_c 의 k 번째 비트가 b 인 모든 $(x_c, x_{e,1}^{QPSK}, x_{e,2}^{QPSK})$ 성상 조합들로서, 따라서 식 (5)의 PGA 복호 복잡도 O_{PGA} 는 총 $16M_c$ 의 Euclidean 거리 계산 개수를 갖는다.

III. 새로운 HPGA 복호 기법들

본 장에서는 먼저 기존의 PGA 기법의 성능 향상 이유로 수신 IL, ρ_{RX} 값을 가지고 간단히 고찰하고자 한다. 먼저 식 (1) 내 i 번째 수신 안테나의 신호에 대한 수신 IL 값은 $\rho_{RX}^i \equiv \frac{|h_{1,i} + h_{2,i}|^2}{|h_{1,i}|^2 + |h_{2,i}|^2} \rho_{TX} \leq 2\rho_{TX}$ 이며, 아래 그림 2는 정규화된 ρ_{RX}^i/ρ_{TX} 값의 확률분포도를 나타낸다. 채널 내 (K_1, K_2) 는 각각 동일 편파 경로, 서로 다른 편파 경로의 K factor 값들이고 $XPD = E[|h_{1,1}|^2]/E[|h_{2,1}|^2] = E[|h_{2,2}|^2]/E[|h_{1,2}|^2]$ 는 이중편파 discrimination 값으로 이 두 경로들의 상대 전력비를 나타낸다^[3].

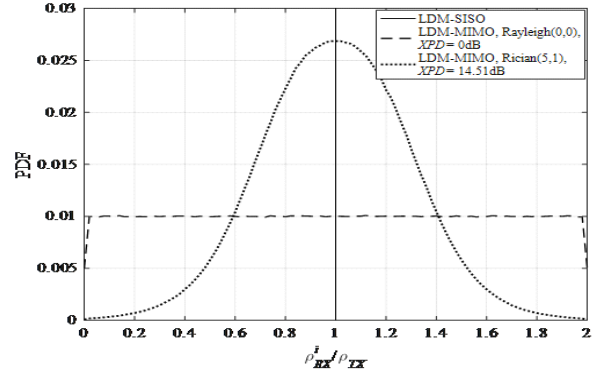


그림 2. LDM-SISO와 LDM-MIMO 채널에서 ρ_{RX}^i/ρ_{TX} 의 확률분포도
Fig. 2. PDF of ρ_{RX}^i/ρ_{TX} in LDM-SISO and LDM-MIMO channels

그림 2와 같이 ρ_{RX} 값의 변화는 각 MIMO 채널 값의 독립적인 위상 값들의 의한 것이며, 따라서 채널 내 uniform 위상 분포도를 고려하면 ρ_{TX} 에 비하여 최대 2배 값을 가지고, 50% 확률로 ρ_{TX} 보다 큰 값을 가지게 된다. 즉 수신단에서 ρ_{RX} 값이 ρ_{TX} 보다 클 경우, 기존의 GA를 사용하더라도 큰 성능 저하가 발생하지 않음을 충분히 예측할 수 있다.

1. 새로운 HPGA-type1 복호 기법

먼저 제안하고자 하는 HPGA-type1 복호 기법은 아래와 같이 두 수신 ρ_{RX}^1, ρ_{RX}^2 값들이 모두 송신 ρ_{TX} 보다 크면 복잡도를 우선한 기존의 GA 기법을 사용하고, 한 값이라도 ρ_{TX} 보다 작으면 성능을 우선한 기존의 PGA 기법을 사용한다.

$$LLR_k^{HPGA-type1} = \begin{cases} LLR_k^{GA} & , \min(\rho_{RX}^1, \rho_{RX}^2) \geq \rho_{TX} \\ LLR_k^{PGA} & , otherwise \end{cases} \quad (6)$$

즉 식 (6)의 HPGA-type1 복호 기법은 25% 확률로 GA 기법을 사용하고 75% 확률로 PGA 기법을 사용하게 된다. 따라서 제안된 HPGA-type1의 복호 복잡도는 $O_{HPGA-type1} = \frac{1}{4}O_{GA} + \frac{3}{4}O_{PGA} \approx 12.25M_c$ 와 같다. 즉 제안된 HPGA-type1은 식 (5)의 기존 PGA 기법에 비하여 약 23.4% 복잡도가 줄어듦을 확인 할 수 있다.

2. 새로운 HPGA-type2 복호 기법

HPGA-type2 복호 기법은 모든 수신 안테나들에서 같은 복호 방법을 사용하는 HPGA-type1과 달리, 각 안테나 신호 y_i 의 모델링으로 ρ_{RX}^i 이 ρ_{TX} 보다 크면 식 (2)의 GA 수신 모델링을 사용하고, 작으면 식 (4)의 PGA 수신 모델링을 사용한다. 따라서 CL 신호에 대한 LLR 값은 다음과 같다.

$$LLR_k^{\text{HPGA-type2}} = \log \frac{\sum_{x_c \in \chi_k^1, \mathbf{x}' \in \psi_k^1} \exp(v_1 + v_2)}{\sum_{x_c \in \chi_k^0, \mathbf{x}' \in \psi_k^0} \exp(v_1 + v_2)} \quad (7)$$

$$\text{여기에서 } v_i = \begin{cases} -\frac{|y_1 - (h_{1,i} + h_{2,i})x_c|^2}{N_{GA}^1 + N_0}, & \rho_{RX}^i \geq \rho_{TX} \\ -\frac{|y_1 - [h_{1,i} + h_{2,i}]\mathbf{x}'|^2}{N_{PGA}^1 + N_0}, & \rho_{RX}^i < \rho_{TX} \end{cases} \quad \text{이다.}$$

식 (7)의 HPGA-type2 복호 기법은 25% 확률로 두 수신 신호 모두 GA 수신 모델링을 사용하고, 50% 확률로 각각 한개의 GA 및 PGA 수신 모델링을 사용하며, 25% 확률로 두 수신 신호 모두 PGA 수신 모델링을 사용한다. 따라서 HPGA-type2의 복호 복잡도 $O_{\text{HPGA-type2}} = \frac{1}{4}O_{GA} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}O_{GA} + \frac{1}{2}O_{PGA}\right) + \frac{1}{4}O_{PGA} = 8.5M_c$ 와 같다. 식 (7)의 제안된 HPGA-type2는 식 (5)의 기존 PGA 기법에 비하여 약 46.9% 복잡도가 줄어들음을 확인 할 수 있다.

IV. 실험 결과 및 결론

실험 내 송신단에서 CL과 EL 신호들은 $\rho_{TX}=0, 2, 4\text{dB}$ 값으로 각각 QPSK, 64-NUC^[1]을 사용하고, 채널 부호화로 부호율=7/15, 부호길이=64,800의 LDPC 부호를 사용하였다. 그리고 MIMO 채널은 $XPD=14.5\text{dB}$ 인 ($K_1=1, K_2=0$) MGM Rician 페이딩 채널^[3]로, 완벽한 채널 값으로 sum-product LDPC 연판정 복호 방법을 수행하였다.

그림 3 결과로, 제안된 두 HPGA 기법들 모두 기존의 PGA에 비하여 약 0.1dB 이내의 성능 저하를 보이고, 기존의 GA에 비하여 향상된 성능을 가짐을 확인 할 수 있다.

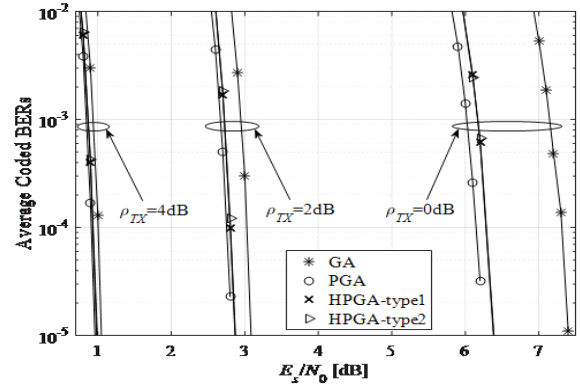


그림 3. $\rho_{TX} = 0, 2, 4\text{dB}$ 일 경우 CL 신호의 평균 복호 에러율 값들
Fig. 3. Average coded BERs for CL signal when $\rho_{TX} = 0, 2, 4\text{dB}$

이는 제안된 기법들 모두 수신단에서 ρ_{RX} 값이 낮을 경우 성능 위주의 PGA 기법을 사용하여 큰 성능 저하가 발생하지 않기 때문이다. 특히 HPGA-type2는 HPGA-type1과 비교하여 거의 동일한 성능을 가지는데, 이는 수신단에서 PGA 적용 여부를 HPGA-type1와 달리 각 수신 안테나에 독립적으로 따로 적용하더라도 큰 성능 저하가 발생하지 않음을 보여준다. 특히 HPGA-type2는 기존 PGA 기법에 비하여 약 반 정도 복잡도가 줄어드는 큰 잇점이 있어, LDM-MIMO 시스템에서 CL 복조 방법으로 효율적일 것으로 판단된다.

참고 문헌 (References)

- [1] ATSC, ATSC Standard:Physical Layer Protocol A/322, 2021.
- [2] L. Zhang, X. Wang, H. Kim, and P. Angueira, "Layered-Division-Multiplexing: Theory and Practice," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.62, No.1, pp.216-232, March 2016.
- [3] P. Moss, "2-by-2 MIMO Fixed Reception Channel Model for Dual-Polar Terrestrial Transmission," White Paper, British Broadcasting Corporation, 2008.
- [4] S. Park, J. Lee, S. Myeong, L. Zhang, Y. Wu, J. Montalbán, S. Kwon, B. Lim, P. Angueira, H. Kim, N. Hur, and J. Kim, "Low Complexity Layered Division Multiplexing for ATSC 3.0," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.62, No.1, pp.233-243, March 2016.
- [5] H. Baek, S. Kim, H. Kim, and T. Jung, "New Core-Layer Soft Decoding Method for ATSC 3.0 LDM-MIMO Broadcasting Systems," Journal of Broadcast Engineering, Vol.24, No.6, pp.1072-1075, Nov. 2019.
- [6] Y. Shang, S. Kim, H. Kim, J. Seo, N. Hur, and T. Jung, "Partial Gaussian-Approximation Soft Demapper for the Core Layer of MIMO-LDM in ATSC 3.0," IEEE Transactions on Broadcasting, Accepted for publication.