

DQPSK 기반 계층변조 기법에서의 DQPSK 복조 성능 열화 분석

서기환*, 김완진*, 김형남*

* 부산대학교 전자전기공학과

Analysis of Performance Degradation in DQPSK demodulation in Hierarchical DQPSK Modulation

Ki-Hwan Suh*, Wan-Jin Kim*, Hyoung-Nam Kim**

* Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Pusan National University

E-mail: hnkim@pusan.ac.kr

요 약

독립적인 두 개의 데이터 스트림을 하나의 스트림으로 변조하여 전송하는 계층변조 (hierarchical modulation, HM) 기법은 데이터 전송 용량을 증가시키면서도 기존 수신기와 역호환성을 유지할 수 있어 다양한 시스템에서 사용되고 있다. 계층변조 방법은 국외의 경우 Media-FLO나 DVB-T 등의 시스템에, 국내의 경우 차세대 T-DMB (advanced T-DMB, AT-DMB)에 적용된 사례가 있다. 그러나 AT-DMB에서 사용되는 계층변조 기법은 DVB-T와 같은 QAM 형태의 계층변조가 아닌 DQPSK 기반 계층변조 기법을 사용하기 때문에, QAM 형태의 계층변조 보다 기존 수신기의 성능 열화가 심한 단점이 있다. 본 논문은 이러한 DQPSK 기반 계층변조 기법이 DQPSK 복조 방법별로 성능에 미치는 영향을 수학적으로 분석하고 시뮬레이션을 통해 그 결과를 확인하였다.

I. 서론

계층 변조 기법은 기존 데이터 스트림 (high priority, HP)에 새로운 데이터 스트림 (low priority, LP)을 더해 하나의 데이터 스트림으로 만들어 전송하는 변조하는 기법으로, 계층변조를 지원

하는 수신기에서는 수신신호의 품질에 따라 선택적으로 데이터 스트림을 수신할 수 있는 장점이 있다. 계층변조가 사용된 예로는 DVB-T, Media-FLO, 그리고 AT-DMB 등과 같은 시스템이 있다. 그러나 설계 시 부터 계층변조를 반영되어 수신기에서 확보 가능한 신호의 품질에 계층변조를 선택적으로 수신할 수 있는 DVB-T나 Media-FLO 시스템과는 달리, 기존 T-DMB 시스템에 계층변조 신호를 추가한 AT-DMB 시스템의 경우에는 계층변조 신호가 기존 수신기에 대해 잡음으로만 작용한다. T-DMB와 AT-DMB의 역호환성을 보장하면서 LP 신호의 성능도 확보하기 위해서는, 우선 계층변조 신호로 인한 기존 수신기에서의 영향을 분석하여 정량화한 후, 이를 바탕으로 최적화된 계층변조 기법을 설계해야 한다. 기존의 연구에서는 QPSK-QPSK 계층변조 (HM I) 기법과 DAPSK와 DA16PSK 계층 변조 기법에 대해 성능 분석이 이루어졌으나 [1]-[3], DQPSK-QPSK (HM II), DQPSK-BPSK (HM III) 그리고 DQPSK-ADPSK (HM IV) [4]-[6]와 같이 DQPSK 기반의 계층변조 기법에 대해서는 성능 분석이 정확히 이루어지지 않았다.

DQPSK 기반의 계층변조 기법에서의 복조 성능을 분석하기 위해서는 계층변조에 따른 어떤 열화가 발생하는지 파악해야 하는데, 첫 번째는 계층변조 신호를 차등 복조하는 과정에서 발생하는 변조 잡음의 증폭에 의한 것이며, 두 번째는 복조 신호를 처리하

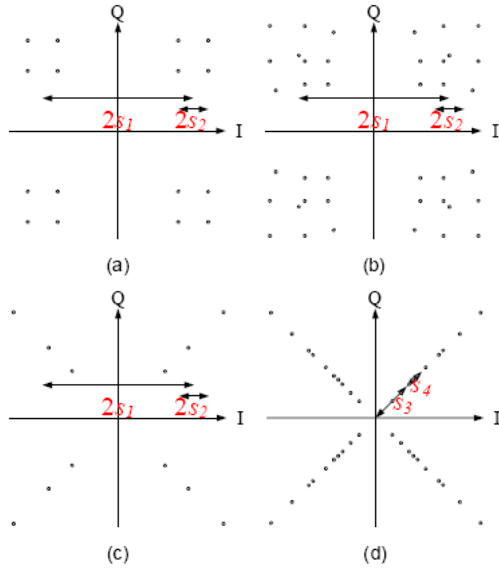


그림 1. 다양한 계층변조 기법이 적용된 신호의 복조 후 성상도 (a) HM I의 성상도 $\lambda=0.2$, (b) HM II의 성상도 $\lambda=0.2$, (c) HM III의 성상도 $\lambda=0.2$, (d) HM I의 성상도 $\mu=0.2$. [1],[4]-[6]

여 순방향 오류 정정 (forward error correction, FEC)을 위한 비터비 복호화기 (Viterbi decoder)의 입력으로 사용되는 연성 입력 (soft input)의 형태에 따라 발생하는 열화이다. 먼저 계층변조 신호에 의한 변조 잡음의 증폭은 LP 심볼이 가지는 크기와 위상에 의해 발생한다. DQPSK 변조 신호는 위상을 구하기 위한 나눗셈 연산에 대해 닫혀 있으나, LP 신호가 더해질 경우 복조과정에서 그 성질이 더 이상 유지되지 않고 성상도 상에서 LP의 크기에 비례해 더 넓게 퍼지게 된다. 이러한 현상의 기존 수신기의 입장에서는 잡음이 커지는 효과로 나타나므로 성능열화가 발생하게 된다. 다음으로 DQPSK 복조 출력에서는 심볼을 단순히 연속한 두 심볼의 위상차이로 판별하나, 일반적으로 대부분의 통신시스템에서는 전송과정에서 발생하는 오류를 보상하기 위해 비터비 디코더를 사용하므로 수신신호의 크기 정보도 사용해야 한다. 이 경우 차등 복조된 신호를 이용하여 어떻게 연성 입력 (soft input)을 생성하는가에 따라 수신기의 성능이 달라진다.

따라서 최적화된 DQPSK 기반의 계층변조 기법을 설계하기 위해서는 이러한 성능 열화 요인들이 반드시 분석되어야 하므로, 본 논문에서는 이를 위해 다

양한 계층변조(HM II, III, IV) 기법들에서 생기는 성능 열화를 수식적으로 분석한 후 다양한 복조 방법에 따라 성능 열화의 정도를 컴퓨터 모의 실험을 통해 검증하였다.

II. 계층변조 신호의 복조 성능 열화

계층변조 신호의 복조 성능 열화는, 반송파 대 잡음비 (carrier-to-noise, CNR)와 변조 잡음 비 (modulation noise ratio, MNR)의 차이로 계산되며, 대표적인 계층변조 기법인 HM I의 성능 열화는 참고문헌 [1]에 정의되어 있다. HM II의 전송 신호 성상도는 HM I과 동일하므로, 전송 신호의 에너지 E_s^H 는 HM I과 동일하므로, CNR 역시 HM I과 동일하므로 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$CNR_H = E_s^H / N_o = 2(1 + \lambda^2)s_1^2 / N_o, \quad (1)$$

여기서, $2s_1$ 은 그림 1에서와 같이 HP 인접 사분면 간의 HP 심볼간의 거리를, $2s_2$ 는 한 사분면 내에서 인접한 LP 심볼간의 거리를 의미한다. N_o 는 잡음 파워, λ 는 계층변조 인덱스로서 s_2/s_1 으로 정의된다. MNR을 구하기 위해서는 복조 신호의 성상도를 살펴 봐야 하는데, HM I의 경우 그림 1. (a)와 같이 전송 성상도와 수신 성상도가 일치하므로 MNR을 구하기 쉬우나, HM II의 경우에는 그림 1. (b)와 같이 전송 성상도와 수신 성상도가 다르므로 변조에 의해 발생하는 모든 심볼을 계산한 후 MNR을 구해야 한다. 복조된 HM II 신호는 아래와 같이 표현할 수 있으며

$$d_{l,k}^H = (z_{l,k} + \lambda c_{l,k}) \cdot z_{l-1,k}^* + (z_{l,k} + \lambda c_{l,k}) \cdot (\lambda c_{l-1,k}^H)^*, \quad (2)$$

여기서 짝수 심볼은 $z_{l,k}, c_{l,k}^H \in \{e^{j\pi/4}, e^{j3\pi/4}, e^{j5\pi/4}, e^{j7\pi/4}\}$, 홀수 심볼은 $z_{l,k}, c_{l,k}^H \in \{e^{j0}, e^{j\pi/2}, e^{j\pi}, e^{j3\pi/2}\}$ 의 값을 가진다.

여기서 $z_{l,k}$ 와 $c_{l,k}^H$ 은 각각 HM II의 HP와 LP 심볼을 의미하고, l 은 OFDM 심볼 인덱스를, k 는 서브캐리어의 인덱스를 의미한다. 식 (2)에서 $z_{l,k} \cdot z_{l-1,k}^*$, 즉 HP 심볼간의 차등 복조 심볼을 제외한 모든 값은 변조 잡음으로 작용하므로, 이때의 파워 N_{MN} 을 구해보면 다음과 같다.

$$N_{MN}^{\text{II}} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (d^{\text{II}}(m) - E[d^{\text{II}}(m)])^2 = 2(2 + \lambda^2)s_2^2. \quad (3)$$

이때의 $d^{\text{II}}(m)$ 은 $d_{l,k}^{\text{II}}$ 가 가질수 있는 모든 경우의 값을 원소로 가지는 집합을 의미하며, M 은 집합내의 원소개수를 의미한다. 식 (3)을 이용하여 HM II의 MNR을 구하면 아래와 같다.

$$\text{MNR}_{\text{II}} = \frac{E_s^{\text{HP}}}{N_0 + N_{MN}^{\text{II}}} = \frac{\text{CNR}_{\text{II}}}{1 + \lambda^2[1 + (2 + \lambda^2)\text{CNR}_{\text{II}}]}. \quad (4)$$

이때의 E_s^{HP} 여는 DQPSK 변조 심볼의 에너지를 의미한다. HM II의 성능 열화 지표인 P_{II} 는 CNR_{II} 과 MNR_{II} 사이의 비로 정의할 수 있으며 이는 식 (4)에 의해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{\text{II}} = \text{CNR}_{\text{II}} / \text{MNR}_{\text{II}} = 1 + \lambda^2[1 + (2 + \lambda^2)\text{CNR}_{\text{II}}]. \quad (5)$$

비슷한 방법으로, HM III의 성능 열화의 정도를 구할 수 있으며 DQPSK 기반으로 계층변조를 QPSK에서 BPSK 바뀐 차이가 있는 HM III의 경우 LP 심볼간 가질 수 있는 최소거리가 HM II와 동일하므로 CNR_{III} , MNR_{III} 의 값이 HM II와 같고, 따라서 성능 열화 정도인 P_{III} 역시 P_{II} 와 같게 된다. 마지막으로 HM IV의 성능 열화를 구해보면, 먼저 HM IV의 수신 심볼 $r_{l,k}$ 에서의 HP 는 수식 (2)에서의 값과 같으며 $r_{l,k} = z_{l,k} \cdot c_{l,k}^{\text{IV}}$ 와 같이 표현할 수 있으며 LP 부분인 $c_{l,k}^{\text{IV}}$ 는 $\{s_3, s_3+s_4, s_3+2s_4, s_3+3s_4\}$ 과 같다. 여기서 s_3 는 원점과 LP 심볼간의 최소 거리를 의미하고 s_4 는 동일한 HP 심볼상에 LP 심볼들간의 거리를 의미한다. HM IV에서의 계층변조 인덱스 μ 는 s_3/s_4 로 정의된다 [6]. HM IV의 CNR_{IV} 을 구하기 위해서는 먼저 HM IV의 전송 심볼의 평균과 분산 값을 구해야 하며 $r_{l,k}$ 와 $c_{l,k}$ 를 통하여 구할 수 있다. HM IV의 분산 값은 $2s_1^2 \cdot s_4^2 A$ 이며, 여기서 A 는 $2\mu^2 + 16\mu + 7$ 이다. 이를 이용해 CNR_{IV} 을 구해보면 아래와 같다.

$$\text{CNR}_{\text{IV}} = E_s^{\text{IV}} / N_0 = s_1^2 s_4^2 (2\mu^2 + 16\mu + 7) / N_0. \quad (6)$$

P_{IV} 를 구하기 위하여 다음으로 HM IV의 변조 잡음 파워 N_{MN} 을 구하면 먼저 복조된 심볼은 아래와 같이 표현할 수 있으며

$$d_{l,k}^{\text{IV}} = r_{l,k} \cdot r_{l-1,k}^* = (z_{l,k} \cdot z_{l-1,k}^*) \cdot [c_{l,k}^{\text{IV}} \cdot (c_{l-1,k}^{\text{IV}})^*], \quad (7)$$

이때의 N_{MN} 은 $2s_1^2 \cdot B/16$ 이며 B 의 값은 $(16\mu^4 + 96\mu^3 + 256\mu^2 + 336\mu + 196)s_4^4 - (36\mu^2 + 96\mu + 72)s_4^2 + 16$ 이다. 위의 결과들을 종합하여 HM IV의 MNR_{IV} 을 구하면 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\text{MNR}_{\text{IV}} = \frac{E_s^{\text{HP}}}{N_0 + N_{MN}^{\text{IV}}} = \frac{\text{CNR}_{\text{IV}}}{\frac{s_4^4 A}{2} + B \cdot \text{CNR}_{\text{IV}}}, \quad (8)$$

따라서 P_{IV} 를 구해보면 $s_4^2(2A + B\text{CNR}_{\text{IV}})$ 와 같다.

이상의 결과는 복호 전 비트 오류율 (uncoded bit error rate)을 계산한 값이나, 지금까지 구한 복조 성능의 열화 값은 FEC 복호기에 따라 달라지므로 실제 수신 성능과 일치하지 않는다. 강성 판정 (hard decision)을 사용하는 FEC 디코더의 경우에는, 수신 심볼의 크기에 관계없이 위상으로만 심볼이 판정되어 FEC 디코더의 입력으로 들어가므로 차등 복조 방법에 대한 영향이 없다. 그러나 연성 판정 (soft decision)을 할 경우 복조 방법에 따라 크기 정보가 바뀌고, 이에 따라 FEC 디코더 출력의 성능도 달라진다. 최적화된 차등 복조 방법은 참고문헌 [7]에 제시된 $r_{l,k} \cdot r_{l-1,k}^*$ 방법 (DM I)이 있으며, 이외에도 현재 심볼의 크기만을 사용하는 방법 $|r_{l,k}| \exp(j\angle r_{l,k})$ (DM II), 심볼의 크기를 나누는 방법 등이 있으나 모의 실험에서는 DM I과 II만을 사용하였다.

III. 모의실험 결과

앞 절까지 분석한 LP 삽입으로 인한 기존 수신기의 성능 열화를 검증하고, 다양한 복조 방법에 의한 성능 열화 정도 보기위하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서는 계층 변조 기법이 적용되기 전 (w/o HM)과 HM II 계층 변조 기법이 적용된 후 경우에 대해 각각 DM I과 DM II 복조 방법을 사용한 경우를 사용하였다. 계층변조 인덱스인 λ 는 0.2로 하였으며 이외의 시뮬레이션 파라미터들은 참고문헌 [4]와 같이 적용하였으며, 모의실험 결과는 표 1에 정리하였다. 식 (5)에 의하면 HM II에 의한 기존 수신기(DQPSK만을 복조)의 성능 열화 정도는 $\text{CNR}=5.1$ dB 일 때 약 1.45 dB를 가지며 모의실험의 결과를 보면 성능 열화는 1 dB이며 두

표 1. 기존의 T-DMB 수신기의 BER 성능 요약

Vehicle Speed	DM I (w/o HM)	DM II (w/o HM)	DM I (HM II)	DM II (HM II)
AWGN	5.1	5.3	6.1	6.3
5 km/h	7.7	8.8	8.8	9.7
60 km/h	8.3	9.3	9.6	10.2
120 km/h	9.3	10.2	10.6	11.3
200 km/h	9.7	11.3	11.1	12.4
300 km/h	12.2	14.8	15.1	17.2

값의 차이는 코딩 이득에 의한 것이다. 표 1.과 같이 DM I과 DM II의 성능 차이는 수신기의 이동 속도와 계층변조에 의한 추가적인 데이터의 유무에 따라 변화하는 것을 보여준다. 이는 기존의 수신기의 성능 또한 복조 방법에 따라 열화 정도가 달라짐을 의미한다.

IV. 결론

본 논문에서는 DQPSK를 기반으로 하는 계층 변조기법이 기존 수신기에 미치는 영향을 복조 잡음과 HP 복조 방법에 따라 분석하였다. 계층변조 기법을 적용한 통신 시스템을 설계하는데 유용한 정보를 제공하여 주므로 이후 여러 방송 시스템에 계층 변조 기법을 적용할 때 주요한 가이드 라인을 제공할 것이라 기대 된다.

참고 문헌

- [1] H. Jiang and P. A. Wilford, "A Hierarchical Modulation for Upgrading Digital Broadcast Systems," *IEEE trans. Broadcasting*, Vol. 51, No. 2, pp. 223-229, Jun. 2005.
- [2] H. Rohling and V. Engels, "Differential amplitude phase shift keying (DAPSK)—A new modulation method for DTVB," in *Proc. Int. Broadcasting Convention Amsterdam*, The Netherlands, pp. 102-108, 1995.
- [3] Chih-Yang Kao, Ming-Chien Tseng, and chin-Yung Chen, "The Performance Analysis of Backward Compatible Modulation With Higher Spectrum Efficiency for DAB EUREKA 147," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 54, no. 1, pp. 62-69, Mar. 2008.
- [4] Ji-Hyun Kim, Wan-Jin Kim, Sangdoon Ha, Hyungsoo Lim, and Hyoung-Nam Kim, "Detection of Hierarchically-Modulated Data for Advanced T-DMB Receivers," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 39-46, Feb. 2008.
- [5] J. H. Lee, J.-S. Lim, S. W. Lee and S. W. Choi, "Development of Advanced Terrestrial DMB System," *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. 56, No. 1, pp. 28-35, Mar. 2010.
- [6] Dae-Ken Kwon, Wan-Jin Kim, Ki-Hwan Suh, Hyungsoo Lim, Hyoung-Nam Kim, "A Higher Data-Rate T-DMB System Based on a Hierarchical A-DPSK Modulation," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 55, no. 1, pp. 42-50, Mar. 2009.
- [7] T. C. Hewavithana and M. Brookes, "Soft decisions for DQPSK demodulation for the Viterbi decoding of the convolutional codes," in *Proceedings of ICASSP'03*, Apr. 2003, vol. 4, pp. 17-20.