

# 성상회전 변조기법을 이용한 새로운 계층변조 기법

김 호 준\*, 상 위 룡\*, 박 재 형\*, 정 태 진<sup>o</sup>

## New Hierarchical Modulation Scheme Using a Constellation Rotation Method

Hojun Kim\*, Yulong Shang\*, Jaehyung Park\*, Taejin Jung<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문은 DVB-NGH 내 계층(HP : High Priority) 신호와 항상 계층(LP : Low Priority) 신호로 구성된 계층 변조 기법에서 LP 신호의 성능저하 문제를 개선하기 위해 LP 신호에 성상회전(Constellation-Rotation) 변조기법을 적용한 새로운 계층변조 기법을 제안한다. 제안된 기법은 연속된 LP 신호들에 대하여 기존의 성상회전 선부호기를 적용하여 수신단에서 향상된 다이버시티 이득을 획득으로 성능 향상이 발생하며, 더불어 HP 신호들의 성능 저하는 거의 발생하지 않는다. 본 논문에서는 또한 제안된 새로운 계층변조 기법에 대한 수신 방법으로 HP 복조는 기존의 HP 수신기를 사용하고 LP 신호에 대하여만 CR 기반의 ML 복조를 수행하는 새로운 저 복잡도 수신 방법도 제시한다.

**Key Words** : Hierarchical Modulation, Constellation Rotation, Maximum Likelihood Decoding, DVB-NGH, Broadcasting Systems

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new hierarchical modulation scheme for DVB-NGH to improve the performance of LP (Low-Parity) signals by applying a conventional constellation-rotation method to the LP signals without virtually a loss of performance of a HP (High-Parity) signals. The improvement of the LP signals is mainly due to the increased diversity gain caused by the constellation-rotation method which barely affect the performance of the HP signals. For the new scheme, we also propose a hardware-efficient ML (Maximum-Likelihood) detection algorithm that first decodes the HP signals by using a conventional HP receiver, and then simply decodes the precoded LP signals based on the pre-detected HP signals.

### I. 서 론

방송 통신기술의 급격한 성장으로 인해 현재 방송 서비스는 HD(High Definition)와 3D를 넘어 UHD(Ultra HD)를 상용 서비스로 제공하고 있다. 이로 인해 수반되는 다양한 콘텐츠 전송을 위해서 대용

량 전송 및 효율적인 주파수 사용에 관한 연구가 진행되고 있다. 한정된 주파수 자원에서 대용량 데이터를 전송을 위해 전송률을 증가시키는 연구는 방송 통신을 비롯하여 무선통신의 전 분야에서 활발한 연구가 이루어져왔다. 그 중 가장 쉽게 전송률을 높이는 방법은 변조차수를 높이는 것이다. 하지만 방송통신 시스

\* 이 논문은 2013년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었음.

• First Author : Chonnam N. University Department of Electronics and Computer Engineering, friendlyguy@jnu.net, 학생회원

◦ Corresponding Author : Chonnam N. University Department of Electronics and Computer Engineering, tjjung@jnu.ac.kr, 종신회원

\* Chonnam N. University Department of Electronics and Computer Engineering, wxshangyulong@gmail.com, 학생회원, hyeoung@jnu.ac.kr, 정회원  
논문번호 : KICS2015-10-351, Received October 3, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 23, 2015

템에서 새로운 기술의 적용에서 중요하게 요구되어지는 역 호환성 유지의 측면에서 효과적이지 못한 방법이다. 데이터 전송률을 높이기 위해 변조차수를 높게 되면 전송하게 되면 높은 데이터 전송률로 인해 높은 수준의 서비스는 제공받을 수 있지만 기존의 수신기는 사용이 불가하여 방송통신 시스템에서 변조차수를 높이는 것은 효율적이지 못한 방법이다.

그래서 최근 역 호환성을 유지하면서 유효한 데이터 전송률을 높이는 방법으로 계층변조(Hierarchical Modulation) 기법<sup>[1-5]</sup>에 대한 많은 연구가 많은 분야에서 이루어져왔다. 계층변조 기법은 다양한 방송 시스템 표준<sup>[6-8]</sup>에 적용되었으며, 특히 차세대 이동방송 표준인 DVB-NHG (Digital Video Broadcasting-Next Generation broadcasting system to Handheld)<sup>[8]</sup>에 적용되어 있다. 계층변조 기법은 기본 계층(HP : High Priority) 신호를 중심으로 항상 계층(LP : Low Priority) 신호가 더해진 형태로 변조되어 채널의 상태가 다른 사용자들에게 효과적으로 데이터를 전송하기 위해서 채널의 상태에 따라 서로 다른 계층의 변조를 적용하여 서비스를 제공할 수 있다. 채널의 수신 상태가 좋은 사용자에게는 HP 신호와 LP 신호의 데이터를 모두 수신하여 고성능의 서비스를 제공하는 반면 채널의 수신 상태가 나쁜 사용자는 HP 신호의 데이터만 수신하여 저성능의 서비스를 제공하게 된다.<sup>[2]</sup> 따라서 사용자별로 채널 환경에 따라 선택적 서비스를 제공할 수 있다. 또한 계층변조 기법은 기존의 수신기는 기존의 신호인 HP 성상으로 복호를 진행하여 기본 서비스를 제공받고 새로운 수신기는 HP 신호에 추가로 더해진 LP 신호의 데이터를 모두 수신하여 고성능의 서비스를 제공받을 수 있어서 채널환경 뿐만 아니라 수신기의 형태에 따라서도 선택적 서비스를 제공할 수 있다.

하지만 일정한 송신 신호파워를 이용하여 HP 신호와 LP 신호를 생성하기 때문에 HP 신호와 LP 신호간의 성능 트레이드오프(Trade-off) 현상으로 인하여 최적화에 어려움이 있으며, 기존의 수신기인 HP 신호의 입장에서 보면 LP 신호는 잡음으로 간주하기 때문에 필연적으로 약간의 성능저하는 발생할 수밖에 없다. 그래서 현재 DVB-NHG에서는 역 호환성 유지를 위해 기본적으로 HP 신호가 LP 신호보다 최소 3배 이상의 송신파워를 할당하여 HP 신호의 성능저하를 최소화하였다. 하지만 상대적으로 낮은 LP 신호의 송신 파워로 인해 LP 신호의 성능저하 문제가 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 계층변조 기법에서 기존의 HP 신호의 성능 저하를 최소화 하면서 LP 신호의 성

능 향상을 위한 방법으로, 성상회전(CR: Constellation Rotation) 변조기법<sup>[9-10]</sup>을 LP 신호에 적용한 새로운 계층변조 기법을 제안한다. CR 기법은 먼저 각 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)변조된 연속된 두 시간의 송신 신호를 선부호기를 이용하여 성상 회전하여 회전된 성상을 생성하여 전송하는 방법이다. 이때 사용하는 선부호기는 실수 선부호기와 복소 선부호기를 사용할 수 있다. 하지만 복소 선부호기는 수신단의 복호 복잡도가 크게 증가하는 단점이 있기 때문에 본 논문에서는 실수 선부호기를 이용한 CR 기법을 적용한 새로운 계층변조 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 계층변조 기법에 대하여 설명하고, III장에서는 성상회전 변조기법이 적용된 새로운 계층변조 기법을 제안하고 기존의 성상 회전 각도와 연관성을 실험을 통해 알아본다. 그리고 IV장에서는 모의실험을 통해 기존의 계층변조 기법과 성능을 비교하고, V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 계층변조 기법

계층변조 기법<sup>[1-5]</sup>은 기존의 변조방식에 추가적인 데이터를 삽입한 형태로 채널 환경과 조건에 따라 전송 가능한 유효 데이터를 증가시킬 수 있는 기법이다. 계층변조의 구조는 기본계층(HP) 신호에 항상계층(LP) 신호를 추가로 삽입하여 구성된다. 본 논문에서 사용하는 계층변조 기법의 송신구조는 그림 1과 같다.

각각 독립된 채널 인코더를 통과한  $k$ 번째 입력비트 벡터  $b_k^h$ 와  $b_k^l$ 는 각각 QAM성상으로 변조된 후 계층변조계수  $\alpha$ 에 의해 각각 HP 신호  $s_k^h$ 와 LP 신호  $s_k^l$ 로 신호의 파워가 결정된다. 그 후 하나의 성상으로 더해진 형태의 계층적인 하나의 신호인  $s_k$ 로 계층변조된 후 송신안테나를 통해 전송된다. 여기에서 계층

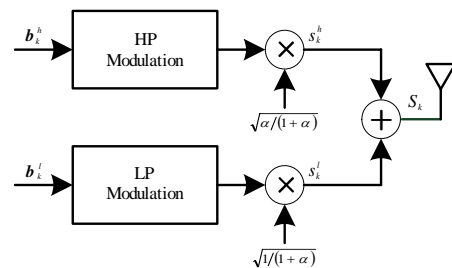


그림 1. 계층변조의 송신 블록도  
Fig. 1. Transmitter block diagram of hierarchical modulation

변조계수  $\alpha$ 는 HP 신호와 LP 신호의 파워비를 결정하는 계수로  $\alpha$ 값이 커지면 HP 신호가 갖고 있는 상대적인 파워가 커지며,  $\alpha$ 값이 작아지면 LP 신호가 갖고 있는 상대적인 파워가 작아지게 된다.

이렇게 설계된 일반적인 계층변조 기법은 기존의 변조 방식인 HP 신호에 추가적인 데이터인 LP 신호를 삽입함으로써 채널환경이 좋은 상황에서 높은 전송효율을 기대할 수 있는 기법이다. 그리고 기존의 변조 방식인 HP 신호에 LP 신호를 삽입한 형태이므로 HP 신호와 LP 신호를 독립적으로 복호 수 있어서 역호환성이 중요시되는 시스템에 효과적으로 적용할 수 있는 기법이다.

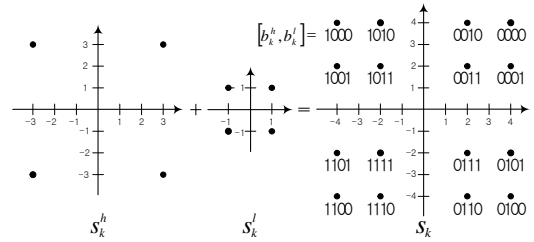
그림 2는 DVB-NGH<sup>[8]</sup> 표준에 제시된 3가지 계층 변조 방법들로 HP 신호와 LP 신호로 구성된 최종 계층변조 신호 성상들을 나타낸다. 그림 2(a)는  $s_k^h$  신호를 크기가 3인 4QAM으로 변조하고  $s_k^l$  신호를 크기가 1인 4QAM으로 변조한 계층변조의 성상도이며, 그림 2(b)는  $s_k^h$  신호를 크기가 5인 4QAM으로 변조하고  $s_k^l$  신호를 크기가 1인 4QAM으로 변조한 계층변조의 성상도 이다.

따라서 그림 2(a)에서의 계층변조 계수  $\alpha$ 는 3이 되고 그림 2(b)에서의  $\alpha$ 는 5가 된다. 그림 2(c)는  $s_k^h$  신호는 16QAM으로 변조하고  $s_k^l$  신호는 4QAM으로 변조한 계층변조의 성상도이며, 이때  $\alpha$ 는  $5\sqrt{10}$  이 된다. 물론, 실제 계층변조 시스템에서 전송을 위한 송신 신호파워는 1이 되도록 전체 성상 신호들에 대하여 정규화가 필요하며, DVB-NGH<sup>[8]</sup> 내 정규화 계수(normalization factor)는 표 1과 같다. 그리고 최종 계층변조된  $s_k$  성상들과 전송 비트들 간의 맵핑은 그 레이 맵핑이 적용되었다.<sup>[8]</sup>

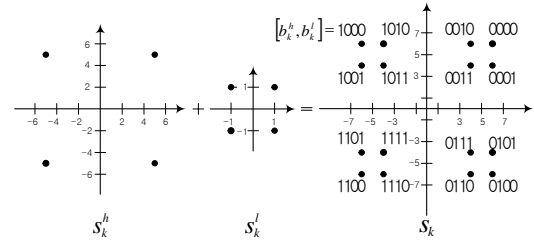
이렇게 계층변조 신호로 변조된 신호는 송신안테나를 통해 수신단으로 전송되며, 수신안테나에 수신되어

표 1. 계층변조 별 정규화 계수  
Table 1. Normalization factor for each hierarchical modulation constellation

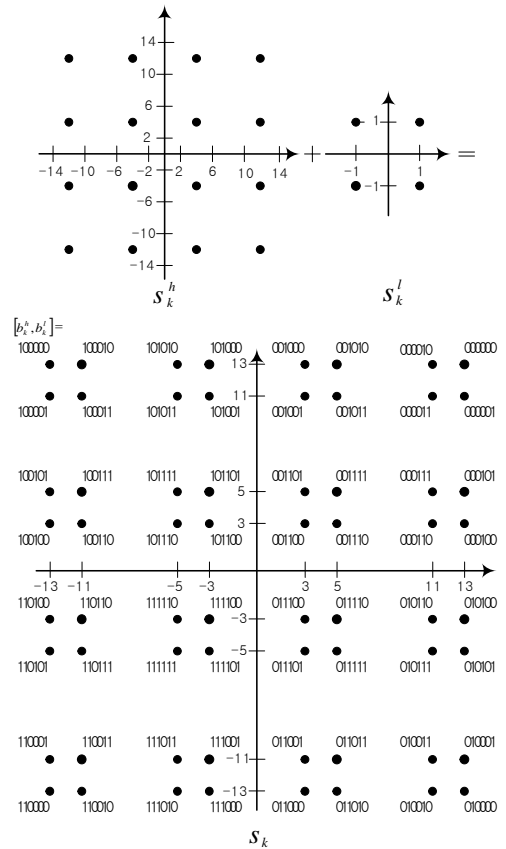
Constellation of Hierarchical Modulation	$\alpha$	Normalization Factor <sup>[7]</sup>
$s_k^h : 4QAM, s_k^l : 4QAM$	3	$1/\sqrt{20}$
$s_k^h : 4QAM, s_k^l : 4QAM$	5	$1/\sqrt{52}$
$s_k^h : 16QAM, s_k^l : 4QAM$	$5\sqrt{10}$	$1/\sqrt{162}$



(a)  $s_k^h : 4QAM, s_k^l : 4QAM, \alpha=3$



(b)  $s_k^h : 4QAM, s_k^l : 4QAM, \alpha=5$



(c)  $s_k^h : 16QAM, s_k^l : 4QAM, \alpha=5\sqrt{10}$

그림 2. DVB-NGH의 계층변조 성상도  
Fig. 2. Constellations of hierarchical modulation for DVB-NGH

ML 복호기에 의해 복호된다. 따라서 수신안테나의  $k$  번째 정합필터(Matched Filter) 출력 값인  $y_k$ 는 아래와 같다.

$$y_k = h_k \{ \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} s_k^h + \sqrt{1/(1+\alpha)} s_k^l \} + n_k \quad (1)$$

$$= h_k s_k + n_k \quad (2)$$

여기에서  $h_k$ 는  $k$ 번째 신호의 송신안테나와 수신안테나 사이의 i.i.d.(independent and identically distributed) Rayleigh 채널값을 나타내며,  $n_k$ 은  $k$ 번째 신호에 대한 수신안테나의 i.i.d. AWGN(Addictive White Gaussian Noise) 샘플값이며, 실수부와 허수부가 각각  $N_0/2$ 의 양방향 전력밀도를 갖는다. 따라서 식 (2)의 계층변조 신호에 대한 ML 복호는 다음과 같다.

$$\hat{s}_k = \underset{s_k}{\operatorname{argmin}} |y_k - h_k s_k|^2 \quad (3)$$

$$= \underset{s_k(s_k^h, s_k^l)}{\operatorname{argmin}} \left| y_k - \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} h_k s_k^h - \sqrt{1/(1+\alpha)} h_k s_k^l \right|^2 \quad (4)$$

하지만 식 (4)와 같은 ML 복호 방법은  $s_k^h$ 와  $s_k^l$ 를 모두 복조하고자 하는 새로운 수신기에서는 가능하지만, 계층복조 적용 이전의 기존 수신기는 수신 신호  $y_k$ 에  $s_k^h$  신호만 존재한다고 여전히 가정하기 때문에 불가능하며 계층복조 적용 이전과 동일한 방법으로 다음과 같이  $s_k^h$ 만을 복조하게 된다.

$$\hat{s}_k^h = \underset{s_k^h}{\operatorname{argmin}} \left| y_k - \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} h_k s_k^h \right|^2 \quad (5)$$

즉 식 (5)의 기존 수신기의  $s_k^h$  복호는  $s_k^l$ 를 추가된 노이즈 신호로 가정하여 복조하게 되며, 따라서 당연히 식 (3)의 ML 복호에 비하여 성능 저하가 발생, 즉 역호환성 측면에서 문제가 발생하게 된다.

이러한 이유로 DVB-NGH<sup>[8]</sup>에서는 이러한 역호환성 문제를 최소화하기 위하여 먼저 기존의 수신기에서 수행하는 식 (5)의  $s_k^h$  복조 성능이 식 (4) ML 복조에 의한  $s_k^h$  성능과 동일하도록 LP 신호  $s_k^l$ 의 전력을 조절하게 된다. 즉  $s_k^h$ 에  $s_k^l$ 가 더해져서 계층변조를 이룬다고 하더라도 DVB-NGH<sup>[8]</sup>에서 사용된 그림

2(a)~(c)와 같이  $s_k^h$ 의 기존 ML 복호 영역을 넘어가지 않는다면  $s_k^h$ 의 기존의 복호 방법 식 (5)는 당연히 ML 복호가 되며 따라서 식 (4)의 ML 복호 성능과 동일하게 된다. 한 예로 그림 2(a)내  $s_k^h$ 의 4QAM ML 복조 영역은 계층변조 이전 또는 이후 모두 동일하게 각 사분면임을 쉽게 확인할 수 있으며, 따라서 식 (5)의 기존 수신 기법  $s_k^h$  복조는 식 (4)의 복조와 동일한 ML 성능을 갖게 된다.

다음으로 위와 같이  $s_k^h$ 의 이전 수신기의 복호 방법 식 (5)가 식 (4)와 동일한 ML 성능을 갖는다 하더라도  $s_k^l$ 에 의한 추가된 노이즈로 인하여  $s_k^h$  수신 성능은 계층변조 이전에 비하여 필히 발생하게 된다. 즉  $s_k^h$  신호는 계층변조가 적용된 이후 그림 2(a)~(c)와 같이 ML 복호 영역은 변하지 않지만 대신 성상들간의 최소 Euclidean 거리는 줄어들게 되며, 따라서서 HP 신호  $s_k^h$ 의 성능 저하가 발생하게 된다. 하지만 이러한  $s_k^h$ 의 성능 저하는 계층변조로 추가로 전송되는 LP 신호  $s_k^l$ 의 이득을 위하여 감수하게 되며, 또한  $s_k^h$ 는  $s_k^l$ 에 대하여 Table 1과 같이 상대적으로 높은 전력 사용으로 인하여 실제 서비스 품질 차원에서 큰 영향을 주지 않는다.

마지막으로 계층변조 신호를 이용하여 LP 신호  $s_k^l$ 를 복원하는 새로운 수신기는 당연히 식 (4)를 이용하여 ML 복호를 수행해야 하지만, 식 (5)의  $s_k^h$  ML 복호 방법을 이용하여 다음과 같이 간단히 수행할 수 있다.

$$\hat{s}_k^l = \underset{s_k^l}{\operatorname{argmin}} \left| y_k' - \sqrt{1/(1+\alpha)} h_k s_k^l \right|^2 \quad (6)$$

여기에서  $y_k' = y_k - \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} h_k \hat{s}_k^h$ 이다. 즉 식 (6)은 먼저 이전에 식 (5)에 의하여  $s_k^h$ 의 ML 복호된  $\hat{s}_k^h$ 를 수신신호에서 제거하고, 다음으로 제거된 새로운 수신 신호를 가지고 최종  $s_k^l$ 를 최종 ML 복조를 수행하게 된다.

### III. CR 변조 기법이 적용된 새로운 계층변조 기법

앞에서 언급했듯이 HP 신호와 LP 신호간에는  $\alpha$ 값이 커지면, HP 신호의 성능이 좋아지고,  $\alpha$ 값이 작아지면 LP 신호의 성능이 좋아지는 Trade-off 관계가 있다. DVB-NGH와 같은 방송 시스템에서는 새로운 기법에 대한 역 호환성을 유지하는 것이 중요한 요소

이기 때문에 LP 신호의 송신파워를 무작정 늘릴 수 없다. 그래서 DVB-NHG에서는 최소 3 이상의  $\alpha$  값을 사용함으로써 HP 신호의 성능 저하는 최소화 하면서 LP 신호를 통해 추가적인 데이터 전송이 가능하도록 설계되어 있다. 하지만 상대적으로 적은 LP 신호의 송신파워로 인해 LP 신호는 높은 신호대 잡음 비율 (SNR : Signal to Noise Ratio)이 요구되며, 많은 지역에서 해당 SNR을 만족하지 못해 LP 신호의 수신이 어려운 문제점이 있다. 그래서 본 논문에서는 LP 신호에 CR 변조 기법<sup>9-10)</sup>을 적용하여 기존의 HP 신호의 성능 저하를 최소화 하면서 신호의 성능을 높일 수 있는 새로운 기법을 제안한다.

### 3.1 기존의 CR 변조 기법

CR 변조기법<sup>9,10)</sup>은 두 구간의 시간동안 입력된 신호 벡터  $\mathbf{s} = [s_1, s_2]^T$ 를 각각 QAM 변조한 후 해당 신호들을 선부호기를 이용하여 성상 회전하여 회전 벡터  $\mathbf{r} = [r_1, r_2]^T$ 을 생성한다. 이때 선부호기는 실수 선부호기를 사용하며 생성된 회전 벡터  $\mathbf{r}$ 은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때 최적의 성상회전 각도  $\theta$ 는 표 2와 같이 제시하였다.<sup>9,10)</sup>

이러한 CR 변조된 신호  $r_1$ 과  $r_2$ 에는 모두 독립적인 페이딩 채널을 거치게 되면 두 신호 중 하나 이상의 신호가 수신단에서 여러 없이 수신되면  $s_1$ 과  $s_2$ 를 완벽히 복호할 수 있어 다이버시티 이득 2를 갖는다. 하지만 CR 변조 기법은  $r_1$ 과  $r_2$  두 신호를 보고 ML 복호를 진행하기 때문에 ML 복호 복잡도가 다소 증가하는 단점이 있다.<sup>9-10)</sup>

표 2. 각 변조에 따른 최적 회전각<sup>9,10)</sup>  
Table 2. Optimum rotation angle for each modulation<sup>9,10)</sup>

Mod.	4QAM	16QAM	64QAM	256QAM
$\theta$	29.0°	16.8°	8.6°	3.6°

### 3.2 새로운 계층변조 기법

본 절에서는 1절에서 설명한 CR 변조기법을 계층변조 기법에서 상대적으로 성능이 떨어지는 LP 신호부에 적용하여 전송하는 새로운 계층변조 기법을 제안한다. 제안하는 CR 변조기법이 적용된 새로운 계층

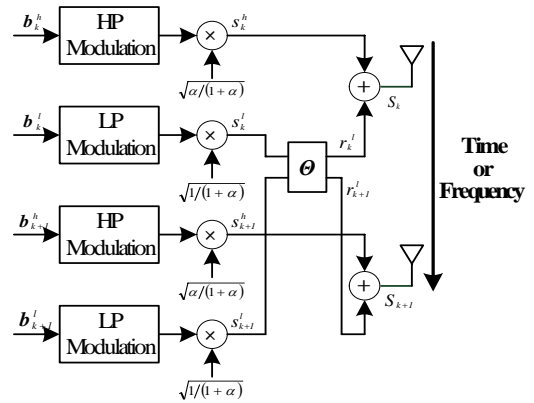


그림 3. CR 변조기법이 적용된 새로운 계층변조 기법의 블록도

Fig. 3. Block diagram of new hierarchical modulation adopted on CR modulation scheme.

변조 기법의 블록도는 그림 3과 같다.

그림 3의 새로운 계층변조 기법은 그림 1의 기존의 계층변조 기법에서 두 구간의 시간동안 들어오는 LP 신호  $\mathbf{s}_k^l = \sqrt{1/(1+\alpha)} [s_k^l, s_{k+1}^l]^T$ 를 실수 선부호기  $\boldsymbol{\Theta}$ 를 이용하여 식 (8)과 같이 성상 회전된 두 개의 R-LP(Rotated LP) 신호  $\mathbf{r}_k^l = [r_k^l, r_{k+1}^l]^T$ 로 생성한다.

$$\mathbf{r}_k^l = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s}_k^l = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1/(1+\alpha)} s_k^l \\ \sqrt{1/(1+\alpha)} s_{k+1}^l \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고 두 구간의 시간동안 전송된 HP 신호  $\mathbf{s}_k^h = \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} [s_k^h, s_{k+1}^h]^T$ 는 그대로 계층변조기에 전송되어 성상 회전된 R-LP 신호  $\mathbf{r}_k^l$ 과 계층변조된 송신신호  $\mathbf{s}_k = [s_k, s_{k+1}]^T$ 가 되어 송신안테나를 통해 전송된다. 이때 송신신호  $s_k$ 와  $s_{k+1}$  독립적인 페이딩 채널을 통과하며 전송된다. 이렇게 전송된 신호의 수신단에서의 정합필터 통과 후 결과 값  $\mathbf{y}_k = [y_k, y_{k+1}]^T$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+i} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_k & 0 \\ 0 & h_{k+1} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} s_k^h \\ \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} s_{k+1}^h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1/(1+\alpha)} s_k^l \\ \sqrt{1/(1+\alpha)} s_{k+1}^l \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} n_k \\ n_{k+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$= \mathbf{H}_k (\mathbf{s}_k^h + \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s}_k^l) + \mathbf{n}_k = \mathbf{H}_k (\mathbf{s}_k^h + \mathbf{r}_k^l) + \mathbf{n}_k \quad (10)$$

$$= \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{n}_k \quad (11)$$

식 (11)과 같이 제안된 새로운 계층변조 신호의 ML 복호는 아래와 같이 구성된다.

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \arg \min_{\mathbf{s}_k} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k\|^2 \quad (12)$$

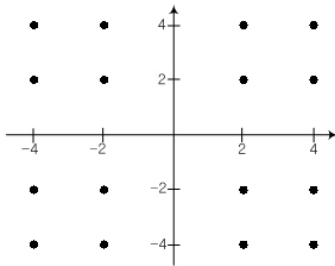
식 (12)의 새로운 계층변조 신호의 ML 복호는 최대 성상의 파워가 상대적으로 큰  $r'_k$ 가 R-LP 신호로 더해지기 때문에 기존의 계층변조와 같이 HP 신호와 R-LP 신호를 따로 복호하는 것이 식 (12)의 ML 성능과 같음을 보장하지 못해서 ML 복호 복잡도가 다소 증가하게 된다.

이렇게 제안된 새로운 계층변조 기법은 두 가지 변수에 의해서 성능이 결정된다. 첫째는 계층변조 기법에서 HP 신호와 LP 신호의 파워비를 결정하는 계수인  $\alpha$ 값과, 둘째는 LP 신호를 성상회전 할 선 부호기  $\Theta$ 에서 사용하는 회전각  $\theta$ 이다. 본 논문에서는  $\alpha$ 값은 DVB-NGH<sup>[8]</sup> 표준에서 제시된 파워비를 기준으로 최적의 성상회전 각도  $\theta$ 를 찾아 표 2에 언급된 기존

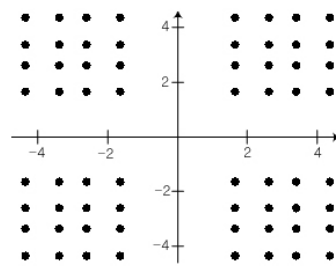
의 CR 변조 기법에서의 성상회전 각도와와의 연관성을 찾고 해당 회전각도  $\theta$ 로 기존의 계층변조 기법과 성능비교를 제시한다. DVB-NGH<sup>[8]</sup> 표준에서 제시된 계층변조 기법의 성상은 그림 2에서의와 같이 총 3가지가 있다.

그림 4 ~ 그림 6은 DVB-NGH 표준에서 사용하는 3가지의 계층변조 성상과 LP 신호에 CR 변조 기법을 적용한 성상을 각각 나타낸다. 모든 성상은  $\mathbf{s}_k = [s_k, s_{k+1}]^T$ 에 대한 성상도로  $s_k$ 와  $s_{k+1}$ 은 같은 성상이다.

그림 4는 그림 2(a)와 같이 HP 신호와 LP 신호 모두 4QAM 이고  $\alpha = 3$ 인 계층변조에 대하여 CR 변조가 수행되면 계층변조의 성상이 어떻게 변하는지 알려주는 그림이다. 그림 4(a)는 CR 변조를 하지 않은 ( $\theta = 0^\circ$ ) 경우이며, 그림 4(b)는 기존의 CR 변조 각도인 ( $\theta = 29^\circ$ )인 경우의 성상도이다. 그림 5는 HP 신호와 LP 신호 모두 4QAM 이고  $\alpha = 5$ 인 계층변조에 대한 성상이고, 그림 6은 HP 신호는 16QAM이며 LP 신호는 4QAM 이고  $\alpha = 5\sqrt{10}$ 인 계층변조에 대한 성상이다.

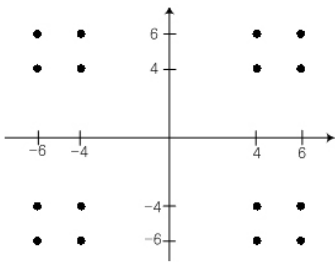


(a) 계층변조 신호  $\mathbf{s}_k$  : 성상회전 이전 ( $\theta = 0^\circ$ )

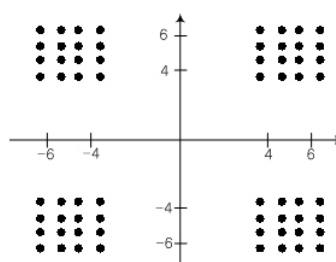


(b) 계층변조 신호  $\mathbf{s}_k$  : 성상회전 이후 ( $\theta = 29^\circ$ )

그림 4.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 4QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 3$   
 Fig. 4.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 4QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 3$

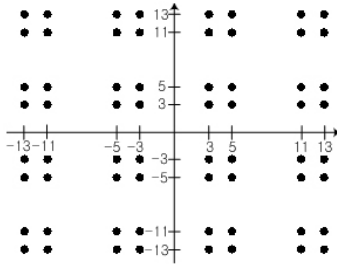


(a) 계층변조 신호  $\mathbf{s}_k$  : 성상회전 이전 ( $\theta = 0^\circ$ )

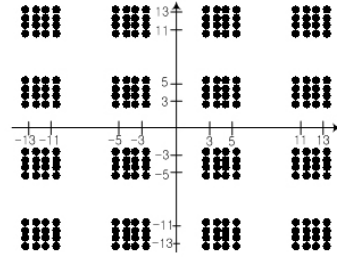


(b) 계층변조 신호  $\mathbf{s}_k$  : 성상회전 이후 ( $\theta = 29^\circ$ )

그림 5.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 4QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 5$   
 Fig. 5.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 4QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 5$



(a) 계층변조 신호  $s_k$  : 성상회전 이전 ( $\theta = 0^\circ$ )



(b) 계층변조 신호  $s_k$  : 성상회전 이후 ( $\theta = 29^\circ$ )

그림 6.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 16QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 5\sqrt{10}$   
 Fig. 6.  $s_k^h, s_{k+1}^h$ : 16QAM,  $s_k^l, s_{k+1}^l$ : 4QAM,  $\alpha = 5\sqrt{10}$

그림 4(b)~ 그림 6(b)은 LP 신호에 CR 변조 기법을 적용하여 제안한 새로운 계층변조 기법의 성상도이다. 그림 4(b) ~ 그림 6(b)의 성상도를 보면 기존의 HP 신호에 새롭게 CR 변조된 R-LP 신호가 더해진 형태의 성상임을 알 수 있다.

그림 4(a)~ 그림 6(b)의 기존의 계층변조 기법에서는 각각의 HP 성상별로 4개의 성상이 4QAM 변조의 형태로 더해진 형태였는데 그림 6의 새로운 계층변조 기법의 성상도는 각각의 HP 성상별로 16개의 성상이 더해져 있다.

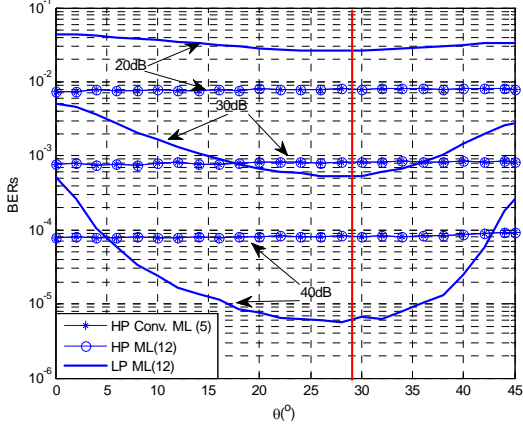
그러나 성상회전을 수행한 두 개의 R-LP 신호는 서로 상관관계가 있기 때문에 추가적인 전송을 증가하는 없다. 하지만 CR 변조 기법으로 인해 성상회전된 R-LP 신호  $r_{l1}, r_{l2}$ 에는 두 구간의 시간동안 전송된  $s_{l1}, s_{l2}$  신호가 모두 들어있어 독립적인 페이딩 채널을 통과하기 때문에 최대 다이버시티 이득 2를 얻게 된다. 한 예로 두 개의 R-LP 신호  $r_{l1}, r_{l2}$  중 적어도 한 개의 신호가 오류 없이 수신기에 도착하면 수신단에서는 도착한 R-LP 신호를 보고  $s_{l1}, s_{l2}$  신호 모두를 복원할 수 있다.

한편, DVB-NHG 표준에서 사용한 계층변조 기법 3 가지는 모두 LP 신호는 4QAM 변조를 사용하였다. 따라서 계층변조의 LP 신호에 적용된 CR 기법의 최적의 성능을 갖는 회전각도  $\theta$ 는 기존의 CR 변조 기법에서 4QAM의 최적각도와 관련성을 쉽게 유추할 수 있으며, 역 호환성 유지를 위해 HP 신호의 성능저하를 최소화 하며 LP 신호의 성능이득을 최대한 얻을 수 있는 최적 각도를 식 (13)의 ML 복호 방법으로 수행한 전산 실험으로 확인하고, 그때 식 (5)와 같이 기존의 HP 수신기로 ML 복호를 하였을 경우와 함께 비교 하였다.

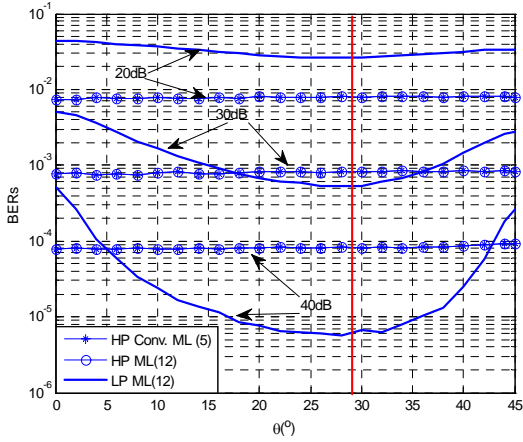
그림 7을 보면 식 (12)의 ML 복호 방법으로 복호

를 수행한 결과와 식 (5)의 기존의 HP ML 수신기로 복호하였을 경우 성능이 동일함을 알 수 있다. 즉, CR 변조기법을 적용한 새로운 계층변조 기법은 기존의 HP ML 수신기를 사용하여 복조가 가능하며 역 호환성을 유지한다는 장점이 있다. 그리고 앞에서 예상한 대로 4QAM 변조에서 기존의 성상회전 각도인  $29^\circ$  부근에서 LP 성능은 최적임을 알 수 있으며 이때 HP 성능저하는 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 DVB-NHG에서 사용하는 계층변조 기법은 HP 신호의 파워가 LP 신호의 파워보다 충분히 크기 때문에 LP 신호의 CR 변조로 인해 인접 HP 신호에 주는 영향이 미미하기 때문이다. 성상회전 각도  $29^\circ$ 를 사용한 자세한 HP 신호와 LP 신호의 성능 비교는 IV장의 실험결과에서 구체적으로 비교하겠다.

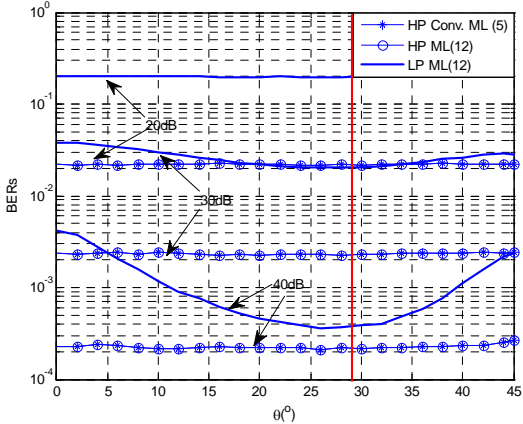
한편, 제안된 계층변조 기법의 ML 복호는 수신신호  $y_k = [y_k, y_{k+1}]^T$ 의  $y_k$ 와  $y_{k+1}$ 에  $k$ 번째 성분과  $k+1$ 번째 신호의 성분이 모두 들어있기 때문에  $y_k$ 과  $y_{k+1}$ 의 신호를 모두 보고 결합 ML 복호를 수행해야 하기 때문에 복호 복잡도가 크게 증가한다. 그런데 앞에서 언급했듯이 제안된 계층변조의 ML식에서 HP 신호의 성능은 식 (5)와 같이 기존의 계층변조 기법에서 HP ML 수신기로 복호하였을 경우와 동일하다.  $s_k^h$ 에 CR 변조된  $r_k^h$ 가 더해져서 계층변조를 이루더라도 그림 4~6과 같이  $s_k^h$ 의 기존 ML 복호 영역을 넘어 가지 않는다면 제안된 계층변조 기법에서도  $s_k^h$ 의 복호방법을 식 (5)와 같이 복호하여도 당연히 ML 복호가 되며 식 (12)의 ML 복호 성능과 동일하게 된다. 즉 CR 변조기법이 적용된 계층변조 기법도  $r_k^h$ 를 잡음으로 간주하고 ML 복호를 수행할 수 있으며, 식 (13)~(15)와 같이 표현된다.



(a) HP : 4QAM, LP : 4QAM,  $\alpha = 3$



(b) HP : 4QAM, LP : 4QAM,  $\alpha = 5$



(c) HP : 16QAM, LP : 4QAM,  $\alpha = 5\sqrt{10}$

그림 7.  $\theta$ 별 HP 와 LP ML 수신기 (12) 및 기존 HP 수신기(5)의 성능  
Fig. 7. Performance of HP, LP ML detector (12) and conventional HP detector (5) at each  $\theta$

$$\hat{\mathbf{s}}_k^h = [\hat{s}_k^h \ \hat{s}_{k+1}^h]^T = \arg \min_{\mathbf{s}_k^h} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k^h\|^2 \quad (13)$$

$$= \arg \min_{\mathbf{s}_k^h} \left\{ \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_k & 0 \\ 0 & h_{k+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} s_k^h \\ \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} s_{k+1}^h \end{bmatrix} \right\}^2 \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} \arg \min_{s_k^h} |y_k - \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} h s_k^h|^2 \\ \arg \min_{s_{k+1}^h} |y_{k+1} - \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} h s_{k+1}^h|^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

즉, 새로운 계층변조 기법은 기존의 HP ML 수신기와 동일한 방법으로 복호가 가능하다. 그리고 수신 신호벡터  $\mathbf{y}_k$ 에  $\hat{\mathbf{s}}_k^h$ 을 빼서 새로운 수신 신호벡터  $\mathbf{y}'_k$  아래와 같이 구한다.

$$\mathbf{y}'_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{s}}_k^h = \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_k & 0 \\ 0 & h_{k+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} \hat{s}_k^h \\ \sqrt{\alpha/(1+\alpha)} \hat{s}_{k+1}^h \end{bmatrix} \quad (16)$$

이렇게 재 정리된 수신 신호벡터  $\mathbf{y}'_k$ 로  $\mathbf{s}'_k$ 의 ML 복호가 가능하며 아래와 같다.

$$\hat{\mathbf{s}}'_k = [\hat{s}'_k \ \hat{s}'_{k+1}]^T = \arg \min_{\mathbf{s}'_k} \|\mathbf{y}'_k - \mathbf{H}_k \mathbf{s}'_k\|^2 \quad (17)$$

$$= \arg \min_{\mathbf{s}'_k} \|\mathbf{y}'_k - \mathbf{H}_k \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s}'_k\|^2 \quad (18)$$

$$= \arg \min_{\mathbf{s}'_k} \left\| \begin{bmatrix} y'_k \\ y'_{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_k & 0 \\ 0 & h_{k+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1/(1+\alpha)} s'_k \\ \sqrt{1/(1+\alpha)} s'_{k+1} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (19)$$

이렇게  $\mathbf{s}'_k$ 에 대한 ML 복호는 진행되며  $\mathbf{y}'_k$ 의  $y'_k$ 과  $y'_{k+1}$ 에  $s'_k$ 과  $s'_{k+1}$ 성분이 모두 들어있기 때문에 LP 신호에 대한 ML 복호는  $\mathbf{y}'_k$ 에 대한 결합 ML 복호로 계산해야 한다. 하지만 앞에서 언급했듯이 CR 변조기법을 이용하여 새롭게 제안한 계층변조의 R-LP 신호는 여전히 ML 복호 영역을 벗어나지는 않기 때문에 HP 신호에 대한 복호는 기존의 HP 복호기로 간단하게 개별 HP 신호단위로 복호가 가능하다. 그래서 LP 신호에 대한 결합 ML 복호를 진행하기 때문에 ML 복호에 대한 복잡도 증가량은 크지 않다.



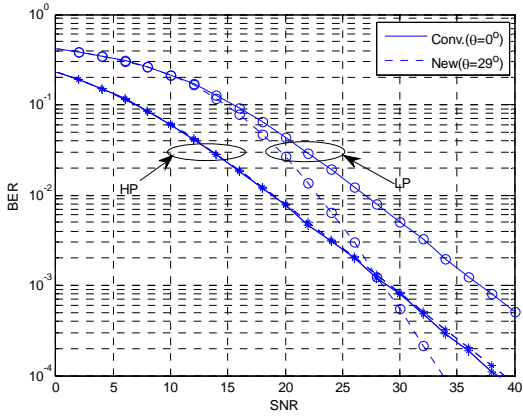


그림 8. 계층변조의 BER 성능(HP : 4QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=3$ )  
 Fig. 8. BERs of hierarchical modulation(HP : 4QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=3$ )

IV. 실험 결과

본장에서는 그림 3과 같이 CR 변조기법이 적용된 새로운 계층변조 기법과 그림 1의 기존의 계층변조 기법의 HP 및 LP 신호의 성능 결과를 비교한다. 이때 전송 신호마다 독립적인 Rayleigh 페이딩 채널을 거치며 수신단에서 채널 값들을 완벽히 추정 가능하다고 가정한다. 그리고 수신단에서 HP 복호는 식 (15)를 이용하였으며, LP 복호는 식 (19)를 이용하여 복호하였다.

그림 8과 그림 9는 HP 신호와 LP 신호 모두 4QAM 변조를 사용하는 16QAM 계층변조 성상으로 구성된 경우 새로운 계층변조 기법과 기존 계층변조 기법에 대하여 HP신호와 LP 신호의 성능을 나타낸 그림이다.  $\alpha=3$  경우인 그림 8을 보면, 제안된 계층변조 기법( $\theta=29^\circ$ )은 HP신호의 성능저하가 거의 없이 LP 신호의 성능을 크게 향상시킴을 알 수 있으며, 높은 SNR 영역에서 그 차이는 더욱 더 커짐을 알 수 있다. 이는 제안된 기법이 CR 변조기법을 사용함으로써 발생하는 다이버시티 이득으로 인해 성능의 향상을 얻을 수 있다.  $\alpha=5$ 인 그림 9도 동일하게 HP 신호의 성능저하가 거의 없이 LP 신호의 성능을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9를 보면 HP 신호의 성능저하는 낮은 SNR 영역에서는 거의 발생하지 않으며 높은 SNR 영역으로 갈수록 미세하게 차이가 남을 알 수 있다. 새로운 계층변조 기법은 LP 신호의 CR 변조로 인해 성상의 최소 Euclidean 거리가 다소 감소는 필연적으로 발생한다. 하지만 낮은 SNR 영역에서는 잡음의 크

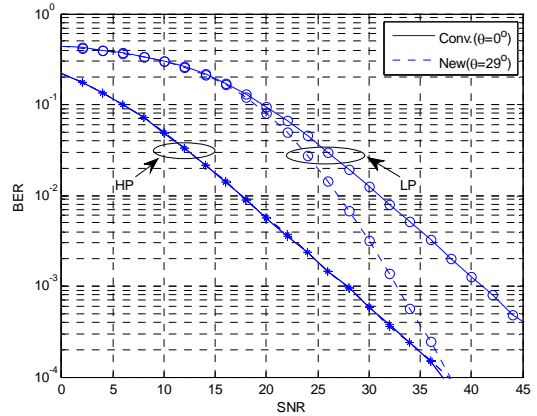


그림 9. 계층변조의 BER 성능(HP : 4QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=5$ )  
 Fig. 9. BERs of hierarchical modulation(HP : 4QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=5$ )

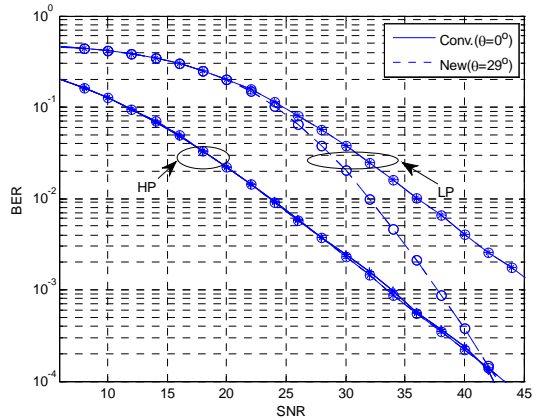


그림 10. 계층변조의 BER 성능(HP : 16QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=5\sqrt{10}$ )  
 Fig. 10. BERs of hierarchical modulation(HP : 16QAM, LP : 4QAM and  $\alpha=5\sqrt{10}$ )

기가 상대적으로 크기 때문에 큰 영향을 받지 않다가 높은 SNR 영역에서는 최소 Euclidean 거리가 성능을 결정하는데 주요한 요소이기 때문에 높은 SNR 영역으로 갈수록 HP 신호의 성능의 차이가 약간 발생하게 된다. 그리고  $\alpha$ 가 클수록 HP 신호의 성능저하가 줄어들음을 알 수 있다. 그 이유는  $\alpha$ 가 클수록 HP 신호의 파워가 커지기 때문에 LP의 CR 기법으로 인한 성능저하의 영향을 적게 받기 때문이다.

그림 10은 HP 신호는 16QAM 변조를 사용하고, LP 신호는 4QAM 변조를 사용하여 64QAM 계층변조 성상으로 구성되어 전송한 경우의 실험결과이다. 그림 6과 그림 7의 결과와 비슷하게 새로운 계층변조

기법( $\theta = 29^\circ$ )은 HP 성능 저하가 거의 없이 LP 신호의 성능을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 기존의 계층변조 기법에서 HP 수신기에 대하여 역 호환성을 유지하면서 상대적으로 송신파워가 작은 LP 신호의 성능을 개선시키는 새로운 계층변조 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 LP 신호를 CR 변조기법을 적용한 R-LP 신호로 CR 변조하여 HP 신호의 성능저하가 거의 없이 추가적인 LP 신호의 성능개선을 이끌어 냈다. 특히 제안된 기법은 기존의 CR 변조 기법에서 사용하였던 성상회전 각도  $\theta$ 를 동일하게 사용할 수 있으며, 계층변조 계수  $\alpha$ 가 클수록 HP 신호의 성능저하는 더욱더 미미함을 알 수 있다. 이는  $\alpha$ 가 클수록 LP 신호의 CR 변조로 인하여 발생하는 HP 신호에 주는 영향이 줄어들기 때문이다. 그리고 제안된 계층변조 기법의 ML 복호는 기존의 HP 수신기에 대하여 ML 복호가 가능하기 때문에 CR 변조 기법으로 인한 ML 복잡도 증가는 전체 계층변조 신호에 대한 결합 ML 복호가 아닌 LP 신호에 대한 결합 ML 복호로 복잡도 증가가 크지 않다.

### References

[1] H. Jiang and P. Wilford, "A hierarchical modulation for upgrading digital broadcast systems," *IEEE Trans. Broadcast*, vol. 51, no. 2, pp. 223-229, Jun. 2005.

[2] S. Lee, J. K. Kim, J. Lee, S. Yun, and J. M. Ahn, "Transmission performance analysis for terrestrial digital broadcast systems according to hierarchical modulation factor( $\alpha$ )," *J. KICS*, vol. 37, no. 9, pp. 728-737, Sept. 2012.

[3] D. You, S. R. Lee, and D. H. Kim, "Hierarchical modulation scheme for 3D stereoscopic video transmission over maritime channel environment," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1405-1412, Jul. 2012.

[4] D. H. Choi, D. K. Kang, J. H. Park, and D. K. Kim, "Performance enhancement using hierarchical modulation in distributed relaying systems," *J. KICS*, vol. 34, no. 1, pp. 18-26, Jan. 2009.

[5] J. H. Kim, J. B. Lee, H. N. Kim, H. Lim, and J. S. Lim, "Coherent detection for T-DMB receivers in hierarchical modulation mode," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 294-299, May 2007.

[6] A. Schertz and C. Weck, "Hierarchical modulation - the transmission of two independent DVB-T multiplexes on a single frequency," *EBU Technical Rev.(DVB-T)*, pp. 1-13, Apr. 2003.

[7] J. S. Lim, "AT-DMB Technology and Services," *TTA J.*, no. 115, pp. 72-77, Jan. 2008.

[8] "Digital Video Broadcasting (DVB); Next Generation broadcasting system to Handheld, physical layer specification (DVB-NGH)," DVB BlueBook A160, Nov. 2012.

[9] C. A. Nour and C. Douillard, "Rotated QAM constellation to improve BICM performance for DVB-T2," in *Proc. IEEE ISSSTA 2008*, pp. 354-359, Bologna, Italy, Aug. 2008.

[10] C. A. Nour and C. Douillard, "Improving BICM performance of QAM constellations for broadcasting applications," in *Proc. ISTCIRT 2008*, pp. 55-60, Lausa, Switzerland, Sept. 2008.

김 호 준 (Hojun Kim)



2009년 8월 : 전남대학교 전자  
컴퓨터공학부 졸업  
2011년 8월 : 전남대학교 전자  
컴퓨터공학과 석사  
2011년 9월~2012년 12월 : (주)  
LG 유플러스 사원  
2013년 3월~현재 : 전남대학교

전자컴퓨터공학과 박사과정  
<관심분야> 무선통신, 디지털통신, 방통 융합

**상 위 룡 (Yulong Shang)**



2010년 6월 : The PLA Information Engineering University 통신공학과 졸업  
2014년 3월 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사  
2014년 9월~현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신, MIMO 시스템

**정 태 진 (Taejin Jung)**



1996년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과  
1998년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사  
2003년 8월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사  
2003년 9월~2004년 2월 : ETRI 선임 연구원

2004년 3월~2006년 2월 : 전남대학교 전임강사  
2006년 3월~2010년 2월 : 전남대학교 조교수  
2010년 3월~2015년 2월 : 전남대학교 부교수  
2015년 3월~현재 : 전남대학교 교수

<관심분야> 디지털방송, 이동 통신, 무선 통신

**박 재 형 (Jaehyung Park)**



1991년 2월 : 연세대학교 전산학과 학사  
1993년 2월 : KAIST 전산학과 석사  
1997년 8월 : KAIST 전산학과 학과 박사  
1997년 9월~1998년 11월 :

KAIST 인공지능연구센터 Post-Doc. 연수연구원  
1998년 12월~2002년 2월 : ETRI 네트워크연구소 선임연구원

2002년 3월~2004년 2월 : 전남대학교 전임강사  
2004년 3월~2008년 2월 : 전남대학교 조교수  
2008년 3월~2013년 2월 : 전남대학교 부교수  
2013년 3월~현재 : 전남대학교 교수

<관심분야> 멀티캐스트 알고리즘, 인터넷 프로토콜 및 라우터, 이동 에드혹 네트워크, 분산 DoS