

DVB-S2 BC 모드를 위한 새로운 계층적 변조방식 연구

*김유숙, *손원, **김내수, **김태훈
*경희대학교 전파통신공학과 멀티미디어전송연구실,
**한국전자통신연구원 통신위성연구그룹

Studies on Methods of New Hierarchical Modulation for DVB-S2 BC Mode

*Yusook Kim, *Won Sohn, **Naesoo Kim, **Taehoon Kim
*Multimedia Transmission Lab., Radio Engineering Dept., Kyung Hee Univ.
**Communication Satellite Research Group, ETRI
vegas79@empal.com

요 약

이 연구는 DVB-S2 BC(Backward Compatibility) 모드에서 대역폭 효율을 개선하기 위한 새로운 계층적 변조방식을 제안하였다. DVB-S2 표준은 기존 DVB-S 방송 서비스와의 역호환성을 위하여 비대칭 8-PSK를 사용하며, 이 방식은 DVB-S의 경우보다는 대역폭 효율이 개선되나 DVB-S2 NBC(Non Backward Compatibility) 모드보다는 개선도가 미약하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 DVB-S2 NBC에서 사용하는 16APSK 변조방식을 DVB-S2 BC 모드에서 사용할 수 있도록 변형하였으며, 변형된 16-APSK 방식에 대한 수신 성능을 통계적 방법을 통하여 분석하였다.

I. 서론

지난 30년간 방송 채널의 연구에서 모든 채널 환경에서 기본 수신을 보장하기 위한 하나의 전략은 정보를 두 개 이상의 계층으로 나누어서 각 계층마다 중요도에 따라 다른 정도의 보호율을 주어 전송하는 것이다[1]. 계층적 전송의 목적은 가장 중요한 정보는 모든 수신기들에게 정확하게 전송되고 덜 중요한 정보는 좋은 채널 환경에 있거나 더 좋은 RF 소자를 가진 수신기들에게 전송될 수 있도록 하는 것이다. 이러한 개념들을 기본으로 최근에는 여러 가지 요구 품질을 가지는 여러 가지 통신 채널의 전송을 동시에 하는 멀티미디어 서비스가 연구되고 있고, 계층적 QAM 변조방식을 이용하는 DVB-T 표준[4]에서도 계층적 전송방식이 사용되고 있다.

계층적 전송 시스템은 무선통신 시스템에서 효율적인 정보의 전송을 위해 널리 사용되는 방법이다. 소스코딩과 채널코딩이 계층적으로 구성되어 있는 계층적 전송 시스템은 더 좋은 수신 성능을 위해 정보의 크기에 따라 여러 계층으로 나누고, 계층에 따라 다른 신뢰도를 주어서 전송하게 된다. 계층적 변조방식은 변조방식에 따라 결정되는 성상도 간의 거리를 차등적으로 할당하고 비트들간의 가중치를 다르게 함으로써 비트들의 성능을 차등화 시키는 방법이다[6]. 입력 스트림을 가중치가 높은 우선권 비트 스트림과 가중치가 낮은 우선권 비트 스트림으로 구분하여 매핑한다. 이 변조 방식을 이용하여 정보를 전송하

게 되면 채널 조건이 열악한 경우에도 높은 우선권(High Priority, HP)을 가지는 정보는 낮은 우선권(Low Priority, LP)을 가지는 정보보다 잡음 면역성이 강해 모든 수신기는 HP 스트림을 수신할 수 있다. 계층적 변조를 구현하기 위해서는 여러 가지 변조방식이 가능하지만 위성방송에서는 위성 채널 조건을 고려한 변조 방식을 사용해야 한다.

DVB-S2 표준[3]은 기존 DVB-S[1] 방송 서비스와의 역호환성을 위하여 HP 스트림에 기존 방송 서비스를 LP 스트림에 새로운 방송 서비스를 보내고 있다. 이 때, 적용하는 계층적 변조방식은 비대칭 8-PSK를 사용하고 있어 기존의 DVB-S 경우보다는 주파수 효율이 개선되나 DVB-S2 NBC 경우보다는 개선도가 미약하여 기존 방송 사업자에게 큰 혜택을 주지 못하고 있다. 이러한 점을 해결하기 위하여 비대칭 8-PSK보다 주파수 효율이 높은 계층적 변조방식이 필요하게 된다.

이 논문의 II장에서는 위성통신에서 송수신 신호에 영향을 주는 비선형 채널 환경과 이 채널을 통과한 신호 모델을 소개하였고, III장에서는 DVB-S2 BC 모드에서 사용하는 계층적 변조방식에 대해 논하였다. IV장에서는 기존 BC 모드에서 사용하는 변조방식보다 높은 고차원 계열의 계층적 16-PSK와 16-APSK 변조방식을 AWGN 채널과 비선형 채널에 대하여 이론적으로 성능을 분석하였고, 끝으로 V장에서는 결과를 바탕으로 본문의 결론을 맺는다.

II. 비선형 채널 모델

위성의 전력증폭기는 비선형 특성을 가지기 때문에 비선형 채널을 통과한 신호는 AWGN 채널을 통과한 신호와 다른 성능을 보이게 된다. 따라서 여기서는 위성에서 사용하는 증폭기의 비선형 특성을 알아보고, 비선형 채널을 통과한 신호의 결합 확률밀도를 구하였다.

1. 비선형 채널환경의 특성

위성통신에서는 전력 증폭기에 의한 비선형 특성을 고려한 AWGN 채널로써 채널 모델링을 한다. 이론적인 증폭기의 입출력 특성은 거의 선형 계수를 가지지만 실제로는, 특히 고출력의 경우에 출력 전압이 입력 신호의 진폭에 비례하여 변화하지 않는다. 이는 또한 신호의 위상에도 마찬가지로 비선형성을 볼 수 있다. 위성의 전력 증폭기로 들어오는 신호의 진폭과 위상을 비선형적으로 증폭시키는 특징은 일반적으로 AM/AM (amplitude to amplitude)과 AM/PM(amplitude to phase) 전달 특성으로 알려져 있다.

전력 증폭기의 입력 신호를 다음과 같다고 하자.

$$x(t) = r(t)\cos[w_0 t + \psi(t)] \quad (1)$$

여기서 w_0 는 캐리어 주파수, $r(t)$ 와 $\psi(t)$ 는 포락선과 위상을 나타낸다. 진폭-위상 모델에서 입력신호에 대한 출력은 아래와 같다.

$$y(t) = A[r(t)]\cos\{w_0 t + \psi(t) + \Phi[r(t)]\} \quad (2)$$

여기서 $A(r)$ 은 r 의 우함수(AM/AM 변환), $\Phi(r)$ 은 r 의 기함수(AM/PM 변환)이다.

Adel[7]은 $A(r)$ 과 $\Phi(r)$ 을 두 가지 파라미터의 방정식으로 만들었다.

$$A(r) = \alpha_a r / (1 + \beta_a r^2) \quad (3)$$

$$\Phi(r) = \alpha_\phi r^2 / (1 + \beta_\phi r^2) \quad (4)$$

각 방정식의 파라미터값은 Bermom과 Mahle[8]의 파라미터값인 식 (5)를 사용하였다. 이 결과는 (그림 1)과 같다. 결과에서 보이는 위성 증폭기에 의한 비선형 효과는 채널 상황을 보다 악화시키는 요인이 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_a &= 1.9638, \beta_a = 0.9945 \\ \alpha_\phi &= 2.5293, \beta_\phi = 2.8168 \end{aligned} \quad (5)$$

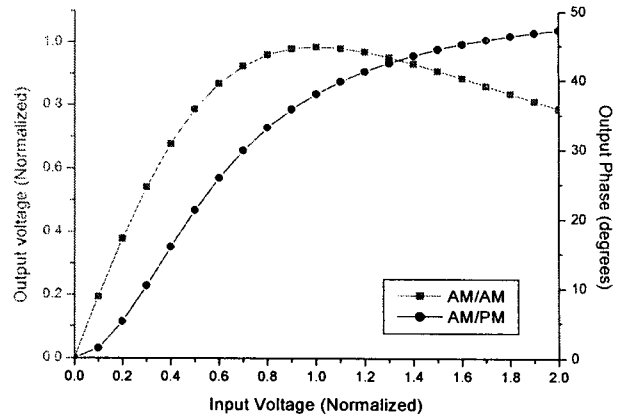


그림 1. TWTA AM/AM, AM/PM

2. 비선형 채널에서 신호의 확률 밀도

잡음이 부가된 정현파 신호의 포락선과 위상에 대한 확률밀도 함수[5]를 알게 되면, 각 포락선과 위상에 따른 오류 확률을 알 수 있다. 따라서 PSK 변조와 APSK 변조 방식의 오류 확률을 구할 수 있다.

송신신호의 I, Q 성분을 (s_I, s_Q)라 할 때, 식 (2)에서 비선형 채널을 통과한 송신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} s(t) &= A(a_0)\cos(w_0 t + \theta_0 + \phi(a_0)) \\ &= A(a_0)(\cos(w_0 t)\cos(\theta_0 + \phi(a_0)) \\ &\quad + \sin(w_0 t)\sin(\theta_0 + \phi(a_0))) \\ a_0 &= \sqrt{s_I^2 + s_Q^2}, \quad \theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{s_I}{s_Q}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

신호 $x(t)$ 에 부가되는 잡음 $n(t)$ 가 전력 $E[N^2(t)] = \sigma^2$ 을 가지는 평균이 0인 가우시안 대역통과 프로세스 $N(t)$ 의 표본함수라고 가정하자. 그러면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} s(t) + N(t) &= [A(a_0)\cos(\theta_0 + \phi(a_0)) + X(t)]\cos(w_0 t) \\ &\quad - [A(a_0)\sin(\theta_0 + \phi(a_0)) + Y(t)]\sin(w_0 t) \\ &= R(t)\cos(w_0 t + \Theta(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 는 전력이 $E[X^2(t)] = E[Y^2(t)] = E[N^2(t)] = \sigma^2$ 이고, 평균값이 0인, 가우시안 저역통과 프로세스이다.

신호와 잡음의 합에 대한 포락선과 위상을 각각 $R(t)$

와 $\Theta(t)$ 라 하면, 다음과 같이 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 변환으로 나타낼 수 있다.

$$R = T_1(X, Y) = \{ [A(a_0)\cos(\theta_0 + \phi(a_0)) + X]^2 + [A(a_0)\sin(\theta_0 + \phi(a_0)) + Y]^2 \}^{1/2} \quad (8)$$

$$\Theta = T_2(X, Y) = \tan^{-1} \left[\frac{A(a_0)\sin(\theta_0 + \phi(a_0)) + Y}{A(a_0)\cos(\theta_0 + \phi(a_0)) + X} \right] \quad (9)$$

위 식의 역변환은 다음과 같다.

$$X = T_1^{-1}(R, \Theta) = R \cos(\Theta) - A(a_0)\cos(\theta_0 + \phi(a_0)) \quad (10)$$

$$Y = T_2^{-1}(R, \Theta) = R \sin(\Theta) - A(a_0)\sin(\theta_0 + \phi(a_0)) \quad (11)$$

$X(t)$ 와 $Y(t)$ 는 가우시안이고 상관관계가 없기 때문에 통계적으로 독립이다. 따라서 랜덤변수 X 와 Y 의 결합밀도는 다음과 같다.

$$f_{X,Y}(x, y) = \frac{e^{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2}}{2\pi\sigma^2} \quad (12)$$

랜덤변수 변환을 이용하면 랜덤변수 R 과 Θ 의 결합 확률밀도는 다음과 같다.

$$f_{R,\Theta}(r, \theta) = \frac{u(r)r}{2\pi\sigma^2} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} [A^2(a_0) + r^2 - 2rA(a_0)\cos(\theta - \theta_0 - \phi(a_0))] \right) \quad (13)$$

따라서 결합 밀도를 이용하여 비선형 채널을 통과한 신호에 대한 포락선과 위상에 따른 오류 확률을 구할 수 있다.

III. DVB-S2 BC 모드의 계층적 변조방식

계층적 변조방식은 변조방식에 따라 결정되는 성상도 간의 거리를 차등적으로 할당하고 비트들간의 가중치를 다르게 함으로써 비트들의 성능을 차등화 시키는 방법이다. DVB-S2 BC 모드 시스템에서는 DVB-S 서비스를 HP 스트림으로 보내고 DVB-S2 서비스를 LP 스트림으로 보낸다. 즉 (그림 2)와 같이 DVB-S2 BC 모드에서는 입력 스트림에 따라 신뢰도를 다르게 할당해서 보내게 된다. 이것은 DVB-S 스트림과 DVB-S2 스트림을 병렬 비트열로 구성하고 비트 매핑해서 보내어지게 된다. DVB-S2 BC 모드 시스템에서 사용하는 계층적 변조방식

은 비대칭적 8-PSK이다. 이 변조방식에서 DVB-S의 HP 스트림은 QPSK 방식으로 매핑해서 성상도의 사분면을 결정하고, DVB-S2의 LP 스트림은 HP 스트림에서 결정되어진 성상도점에서 양쪽으로 θ 만큼 이동한 위치로 매핑되어진다. 이것은 (그림 3)에서 잘 나타내고 있다.

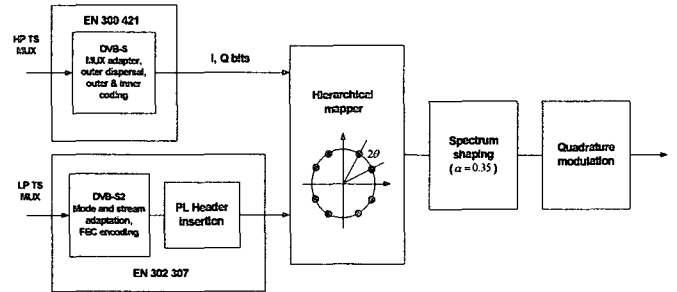


그림 2. DVB-S2 BC 계층적 시스템

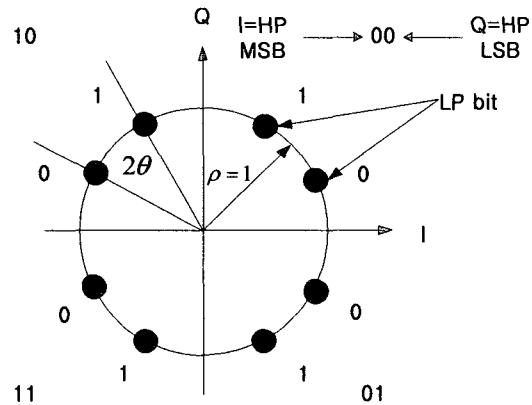


그림 3. 비대칭 8-PSK 성상도

계층적 변조에서 LP인 DVB-S2 신호는 부호화율이 1/4, 1/3, 1/2, 3/5인 LDPC와 BCH 채널 부호화를 한 후 물리적 계층 헤더(PL Header)가 삽입된 후 계층적 매핑에 입력되어진다. 계층적 매핑은 (그림 3)과 같이 한 비트는 DVB-S2 스트림에서, 나머지 두 비트는 DVB-S 스트림에서 매핑되어진다. 편각 θ 는 사용자의 요구에 따라 다르게 사용할 수 있는데, 편각이 클수록 노이즈와 간섭에 대하여 LP의 성능은 좋으나 HP의 성능은 떨어지게 된다. 따라서 사용자의 요구나 채널 환경에 따라 편각을 다르게 사용할 수 있다. (그림 4)는 비대칭 8-PSK의 편각 θ 에 따른 HP와 LP의 성능을 보여주고 있다. 여기서 사용되는 편각 θ 는 LP 성상도점간 크기의 1/2이다. SER이 2×10^{-4} 에서 계층적 8-PSK는 θ 가 12° 일 때, 같은 요구 C/N을 가진다.

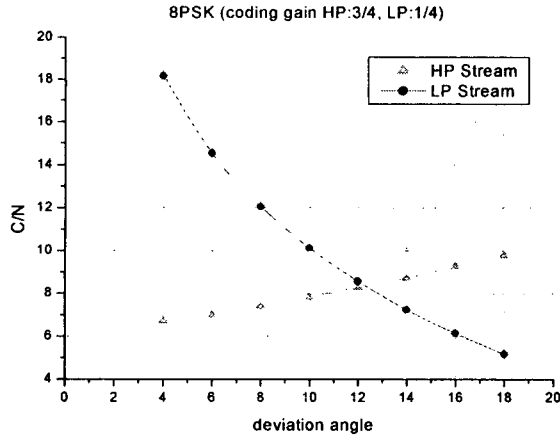


그림 4. θ 에 따른 요구 C/N

IV. 고차원 계열의 계층적 변조방식

1. 계층적 16-PSK 변조방식

일반화된 계층적 M-PSK[6]에 대하여 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{m-2}$ 은 각각 첫 번째, 두 번째, ..., (m-1) 번째 계층구조를 나타내며 θ_{m-1} 은 계층의 마지막인 m ($m = \log_2 M$) 번째 비트의 위상레벨을 나타낸다. M-PSK 계층변조에서 사용되는 모든 편각을 크기순으로 한 개의 각 벡터로 표현하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{m-1}]_{1 \times (m-1)} \quad (14)$$

만약 우선순위 벡터 P를 마지막 비트의 위상각인 θ_{m-1} 에 대해 우선순위로 나타내면 다음 식과 같다.

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_{m-1}] = \left[\frac{\theta_1}{\theta_{m-1}} \ \frac{\theta_2}{\theta_{m-1}} \ \dots \ \frac{\theta_{m-2}}{\theta_{m-1}} \ 1 \right]_{1 \times (m-1)} \quad (15)$$

이 벡터는 메시지의 우선순위를 조절하므로 P_i/P_{i+1} 의 값이 커질수록 i에 위치한 비트가 (i+1)에 위치한 비트보다 보호율이 커진다. 따라서 오류 발생에서 우선순위가 높은 비트가 낮은 우선순위 비트보다 더 오류 발생 확률이 적다.

계층적 MPSK에 대한 BER 성능을 구하기 위하여 여기서는 회귀방법(recursive)[6]을 이용한다. 이 방법은 간단한 BPSK부터 시작해서 계층적으로 M-PSK의 BER을 계산하는 방법이다.

(그림 5)는 계층적 16-PSK의 성상도를 보여준다. 이것

은 두 개의 계층으로 나누어서 두 비트씩 HP와 LP가 되어 $2\theta_3$ 의 간격으로 4개의 성상도점이 있음을 볼 수 있다.

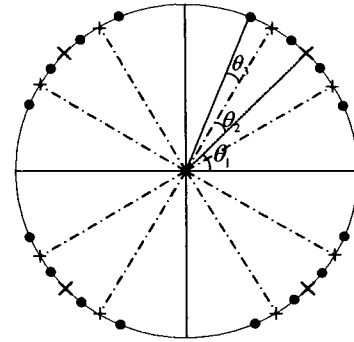


그림 5. 계층적 16-PSK 성상도

이러한 성상도를 가지는 계층적 16-PSK의 성상도점 간의 편각 $2\theta_3$ 에 따른 HP와 LP의 요구 C/N을 보면 (그림 6)과 같다. SER이 2×10^{-4} 에서 계층적 16-PSK 성상도점 간격이 16° 일 때, HP와 LP가 같은 요구 C/N을 가진다.

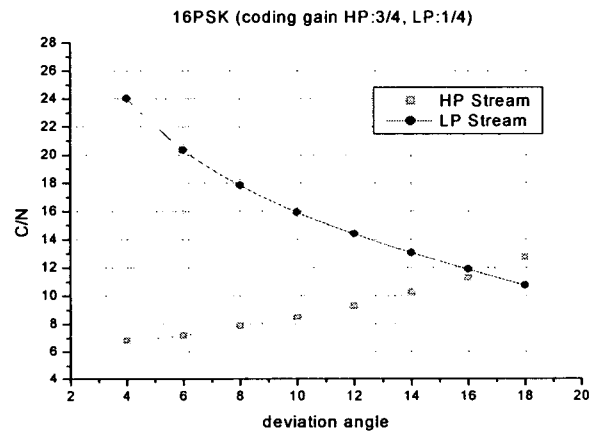


그림 6. θ 에 따른 요구 C/N

2. 계층적 16-APSK 변조방식

DVB-S2 BC 모드에서 사용하기 위한 계층적 16-APSK 변조방식은 한 심볼의 4비트 중 HP 두 비트는 성상도의 사분면을 결정하고, LP 두 비트는 정해진 사분면에서 4개의 다른 위치의 성상도점을 가진다. (그림 7)은 16-APSK의 Gray code된 성상도이다. 같은 사분면에서는 HP 두 비트는 같은 값을 가진다. 그리고 1 사분면에서 보면, 바깥 원의 성상도 점은 $\pi/4$ 인 성상도점을 기준으로 θ 만큼 양쪽으로 떨어진 곳에 위치해서 세 개의 성상도점이 있고, 안쪽 원의 $\pi/4$ 위치에 나머지 한 개의 성상도점이 위치하게 된다.

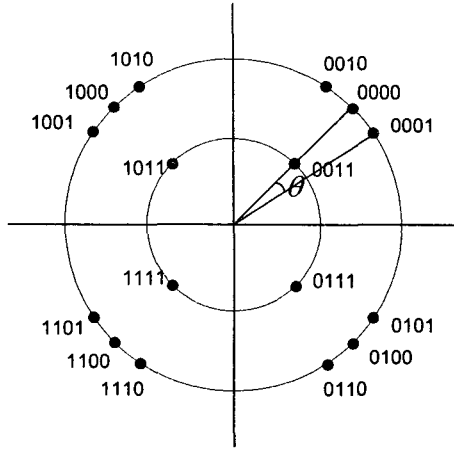


그림 7. 계층적 16-APSK 성상도

포락선 크기와 위상 검파 방법[9]은 (그림 8)과 같이 원 형태의 결정기준(decision threshold)을 가진다. 따라서 LP 스트림의 SER P_e 는 안과 밖의 원상의 신호를 정확하게 판단하는 확률 P_L 과 P_H , P_{H2} 에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$P_e = \frac{1}{4}(1 - P_L) + \frac{1}{4}(1 - P_{H1}) + \frac{1}{2}(1 - P_{H2}) \quad (16)$$

P_L : 안쪽 원상의 신호가 정확하게 판단될 확률

P_H : 바깥 쪽 원상의 신호 중 $\frac{\pi}{4} + 2k$ ($k=0,1,2,3$)의 위치에 있는 신호가 정확하게 판단될 확률

P_{H2} : 바깥 쪽 원상의 신호 중 $\frac{\pi}{4} + 2k$ ($k=0,1,2,3$)의 위치에서 $\pm \theta$ 만큼 이동한 위치의 신호가 정확하게 판단될 확률

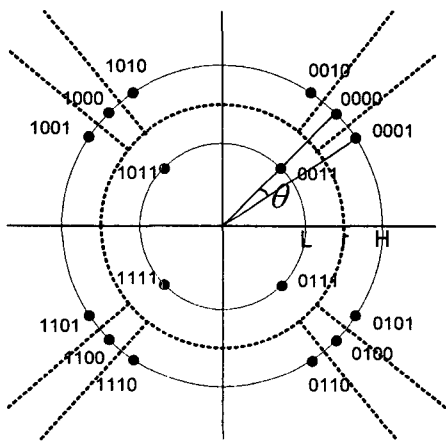


그림 8. 계층적 16-APSK 결정 영역

제 1 사분면에서 한 점은 안쪽 원상의 $\pi/4$ 인 곳에 위치하고, 바깥 원상의 한 점은 $\pi/4$ 인 곳에 위치하고, 이

점을 기준으로 나머지 두 점이 θ 만큼 떨어진 곳에 위치하기 때문에, 오류가 발생할 확률은 한 사분면의 4개의 성상도점이 각각 정확하게 판단될 확률을 계산해서 구할 수 있다.

수신된 신호의 확률밀도는 이차원의 Gaussian 분포로부터 극좌표로 변환되어 식 (17)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_L = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^r \rho \exp\left(-\frac{\rho^2 + L^2 - 2L\rho\cos\theta}{2\sigma_n^2}\right) d\rho d\theta$$

$$P_H = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \int_{\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\pi}{4}+\frac{\theta}{2}} \int_r^\infty \rho \exp\left(-\frac{\rho^2 + H^2 - 2H\rho\cos\theta}{2\sigma_n^2}\right) d\rho d\theta$$

$$P_{H2} = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \int_0^{\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}} \int_r^\infty \rho \exp\left(-\frac{\rho^2 + H^2 - 2H\rho\cos\theta}{2\sigma_n^2}\right) d\rho d\theta \quad (17)$$

ρ : 수신신호의 진폭, θ : 위상값, r : threshold

$$r = \frac{H+L}{2} - \frac{\sigma_n^2}{H-L} \left[\log\left(\frac{3}{\sqrt{H}}\right) - \log\left(\frac{1}{\sqrt{L}}\right) \right]$$

이러한 성상도와 결정 영역을 가지는 계층적 16-APSK 는 (그림 9)와 같이 편각 θ 에 따라 요구되는 CNR을 구할 수 있다. 여기서 사용된 H/L은 2.85이고, SER이 2×10^{-4} 에서 계층적 16-APSK 성상도점 간격이 18° 일 때, HP와 LP가 같은 요구 C/N을 가진다.

16APSK (coding gain HP:3/4, LP:1/4)

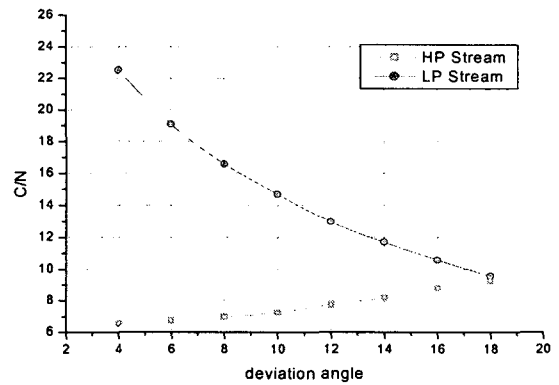


그림 9. θ 에 따른 요구 C/N

3. 지정된 θ 에 따른 성능 분석

계층적 8-PSK에서는 θ 가 12° 인 경우이고, 계층적 16-PSK에서는 θ 가 16° , 계층적 16-APSK에서 θ 가 18° 인 경우에 (그림 10)은 AWGN 환경에서 코딩 이득이

없을 때, 각 변조방식에 따른 LP의 이론적인 성능이다. AWGN 환경에서는 계층적 8-PSK가 성능이 가장 좋고, 계층적 16-APSK가 계층적 16-PSK 방식보다 성능이 좋음을 알 수 있다.

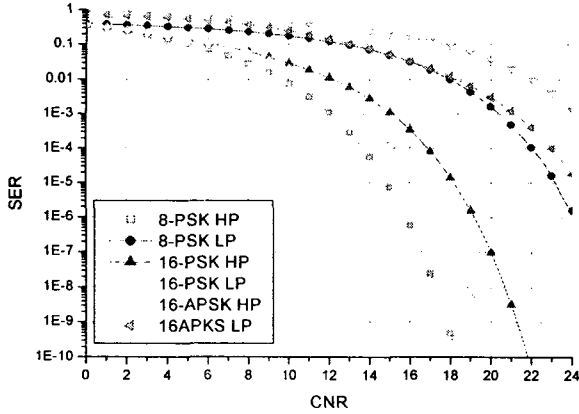


그림 10. AWGN 환경에서 성능

4. 비선형 채널 환경에서의 성능 분석

(그림 12)와 (그림 13)은 코딩 이득을 고려하지 않았을 경우, 비선형 채널 환경에서 계층적 16-PSK($\theta=16^\circ$)와 계층적 16-APSK($\theta=18^\circ$)의 이론적인 성능이다. 성능 비교는 수신기에서 위상 오류를 정확하게 정정했다는 가정 하에 한 것이다. (그림 12)는 비선형 환경과 AWGN 환경에서 HP의 성능을 비교한 것인데, 계층적 16-APSK가 계층적 16-PSK의 성능보다 좋음을 볼 수 있다. (그림 12)는 비선형 환경과 AWGN 환경에서 LP의 성능을 비교한 것인데, 비선형 환경에서는 AWGN 환경에서보다 성능이 떨어지고, 비선형 환경에서 계층적 16-APSK가 계층적 16-PSK 방식보다 성능이 좋음을 볼 수 있다.

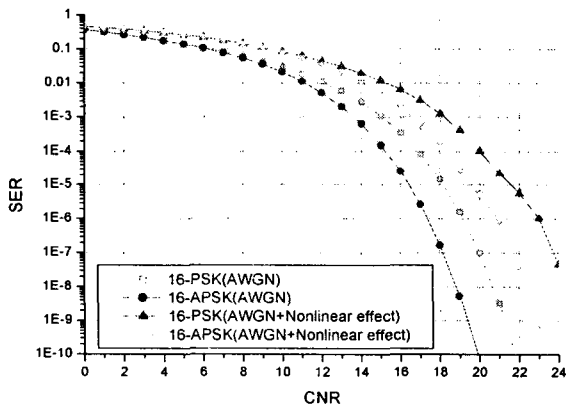


그림 12. 비선형 환경에서 HP의 성능

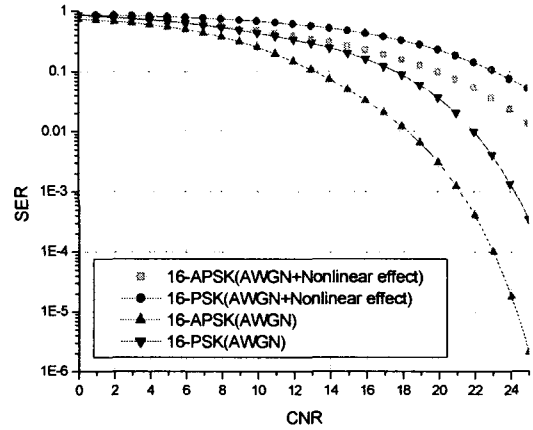


그림 11. 비선형 환경에서 LP의 성능

V. 결론

본 논문에서는 DVB-S2 BC 모드에서 사용하는 계층적 변조방식을 보고, 이 보다 주파수 효율이 좋은 계층적 변조방식인 비대칭 16-PSK 변조방식과 비대칭 16-APSK 변조방식을 분석하였다. AWGN 환경에서 이론적인 성능은 계층적 16-APSK 성능이 계층적 16-PSK 성능보다 좋음을 볼 수 있다. 또한 비선형 환경의 HP와 LP 부분은 계층적 16-APSK 성능이 계층적 16-PSK 보다 성능이 더 좋음을 볼 수 있다. 따라서 DVB-S2 BC 모드에서 적용되는 비대칭 8-PSK보다 주파수 효율이 좋은 비대칭 16-APSK 변조방식을 적용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] T. Cover, "Broadcast channels, " IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. IT-18, pp. 2-14, January 1972.
- [2] DVB, "Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services", EN 300 421 V1.1.2, August 1997.
- [3] DVB, "Second Generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications," ETSI DVB S2-74r13, Sept., 2003.
- [4] DVB, " Digital Broadcasting Systems for Television, Sound Data Services : Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television, " ETSI DVB EN300 744, 1999-1.

- [5] PEYTON Z.PEEBLES, JR, "Probability, Random Variable and Random Signal Principles", McGrawHil, pp. 398-401.
- [6] Pavan K. Vitthaladevuni and Mogamed-Slim Alouini, "Exact BER Computation of Generalized Hierarchical PSK Constellations," IEEE ICC 2002, Vol. 3, pp1974-1978, May, 2002.
- [7] Adel A. M. Saleh, "Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers," IEEE Trans. Commun. Syst., vol.COM-29, pp. 1715-1981, Nov. 1981.
- [8] A. L. Bermon and C. H. Mahle, "Nonlinear phase shift in traveling-wave tubes as applied to multiple access communication satellites," IEEE Trans. Commun. technol., col. COM-18, pp. 37-48, FEB. 1970.
- [9] M. Machida, S. Handa, and S. Oshita, "Theretical Analysis of Symbol Error Rates of (4,12) Circular-Signal-Set Constellation for Some Detection Schemes," Electronics and Comm. in Japan, Part 1, Col. 83, No. 10, 2000.