비선형 증폭에 의한 효율적인 16 - QAM 신호의 발생

임 춘 성* 강 창 언
연세대학교 전자공학과

An Efficient 16-QAM Signaling by Nonlinear Amplification

Chun Seong Lim
Dept. of Electronic Eng.,

Chang Eon Kang
Yonsei University

ABSTRACT

Due to the increasing spectrum congestion of the limited frequency bandwidth, it is necessary to improve the spectrum utilization by transmitting as many bits per second in a given band. To improve the spectral efficiency and maintain the error performance, it is required to increase the transmission power. A modified modulation technique for generating 16-QAM signals which has the spectral efficiency of 4 bps/Hz and permits the nonlinear amplification is presented.

One feature of this technique is that the same demodulator as that of the conventional system could be applied to. And the differences in the error performances of both systems in the presence of AWGN are shown to be negligible.

1. 서 론

오늘날 위성통신이나 지상 마이크로파 통신에서 가장 널리 사용되고 있는 QPSK 는 이론적으로 2 bps/Hz 의 대역 효율을 갖는다.그러나 통신정보량의 급속한 증가로 인하여 주파수 대역의 혼잡도가 심화되어 보다 대역 효율이 높은 변조방식을 필요로하게 되었다.이에 다중레벨변조방식과 진폭과 위상의 혼합변조방식인 APK 가 등장하였다.

APK 는 1960년대 초 C.Cahn,J.Hancock그리고 C.Campopiano 등에 의해 여러 방법이 제안 및 분석되었으나 하드웨어의 복잡성과 Performance 의 저하로 실제 사용되지는 못하였다.APK 의 일종으로서 서로 직교하는 4 위상과 다중레벨의 진폭을 혼합 변조하는 새로운 QAM 방식은QPSK 와PAM 이 결합된 방식으로서 SNR ,Performance 등에 있어서 같은 대역효율을 갖는 PSK 보다 우수하다는 것이 입증되었다.

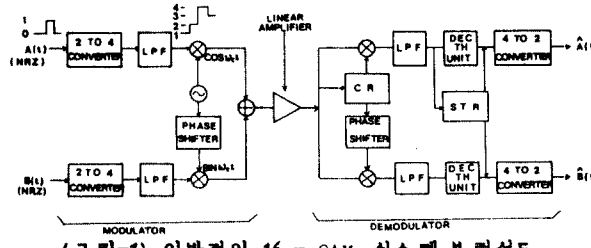
다중레벨의 신호를 전송함으로써 보다 높은대역효율을 얻을 수 있으나 높은 전송 전력을 필요로한다.신호의 전송전력을 극대화하기 위하여 전력 증폭기를 비선형 영역에서 동작하게해야 한다.그러나,일반적으로 혼합 변조 방식은 AM 과 PM 성분을 모두 포함하기 때문에 전송단의 비선형성에 매우 민감하며 비선형 증폭을 하기 위해 이를 보상하는 Predistortion 회로를 첨가해야한다.

본 논문에서는 4 bps/Hz의 대역효율을 갖는 일반적인 16-QAM 변조 방식을 소개하고 Predistortion 회로 없이 비선형 증폭을 가능하게하는 방법을 제안하여 기존의 16-QAM 변조방식과 비교 하였다.

2. QAM 시 스 템

(1) 일반적인 16- QAM

16-QAM 과 16-PSK 는 4bps/Hz 대역효율을 갖고 변조방식의 차이에도 불구하고 거의 유사한 복조단을 사용할 수 있는 특징이 있으나 같은 에러 확률 Performance 를 얻는 데 필요한 SNR 의 관점에서는 전자가 후자보다 우수하다.일반적인 16-QAM 시스템을 (그림-1) 에 나타내었다.



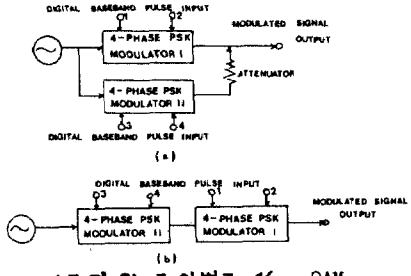
(그림-1) 일반적인 16 - QAM 시스템 블럭선도

16-QAM 은 4 레벨 PAM 과 QPSK 가 혼합된 변조방식이므로 진폭의 변화를 수반하며 특히 저역통과 여파기로 인하여 QPSK 변조된 신호의 포락선이 변동하게 된다.따라서 비선형 증폭을 할 경우 복조단에서 에러

가 발생할 확률이 증가하므로 선형증폭을 할 수 밖에 없다. 이를 보상하기 위해 Predistortion 회로를 첨가하여 비선형 증폭을 가능하게하는 방법도 있으나 회로가 복잡해지고 실용성이 떨어지는 단점을 갖고 있다.

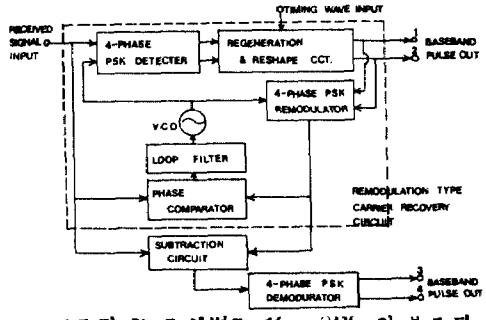
(2) 중첩 변조 16 - QAM

에러 확률 Performance 를 유지하고 Predistortion회로를 첨가하지않고 비선형 증폭을 가능하게 하는 방법으로 중첩 변조방식이 있으며 직렬형태와 병렬형태의 두 종류가 있다. 이를 (그림-2)에 나타내었다.



(그림-2) 중첩변조 16 - QAM
(a) 병렬형태 (b)직렬형태

직렬형태의 중첩변조방식은 QPSK 변조된 신호를 또 다시 QPSK 변조하게 되어 파형의 왜곡을 일으킬 가능성이 높으므로 다중 레벨QAM 에서는 병렬형태가 바람직하다. 중첩변조된 신호의 복조는 QPSK 복조단과 재변조단, 그리고 감산회로로 구성된 복조단에서 이루어지고이를 (그림-3)에 나타내었다.



(그림-3) 중첩변조 16 - QAM 의 복조단

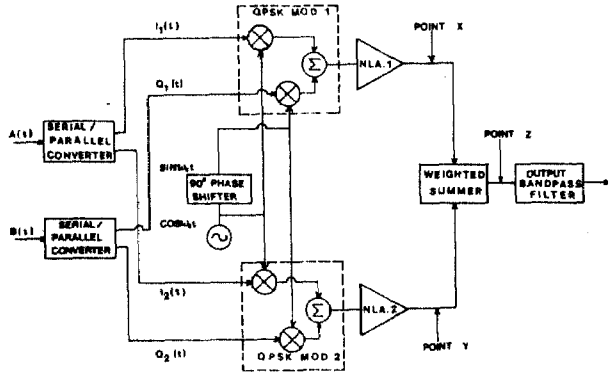
중첩변조방식의 16-QAM 시스템은 증폭기가 비선형영역에서 동작하는 것을 가능하게하여 신호의 출력효율을 제고하는 장점을 갖고 있으나, 복조회로가 기존의 16-QAM 과판이하고 또한 상당히 복잡하다는 단점을 갖고 있다.

3. 비선형 증폭이 가능한 QAM 시스템

이 장에서는 비선형 증폭이 가능하면서도 기존의 복조단을 거의 그대로 사용할 수 있는 또 다른 변조방식을 제안하고 분석하였다. 즉 변조 전저역 통과 여파기의 전달함수 $H_L(f)$ 를 반송파 주파수 f_c 만큼 천이시키고 f_c 를 중심으로 대칭인 전달함수 $H_B(f)$ 를 갖는 변조 후 대역 통과 여파기는 동가이다. 따라서 여파되지않고 QPSK 변조된 신호의 포락선은 일정하므로 비선형 증폭으로 인한 Performance 의 저하는 일어나지 않는다.

(1) 제안된 16 - QAM

변조단의 동가 모델을 적용하여 에러확률 Performance 를 유지하고 비선형증폭이 가능하며, 또한 기존의 복조회로를 그대로 사용할 수 있는 16 - QAM 변조 시스템을 (그림-4)에 나타내었다.



(그림-4) 비선형 증폭이 가능한 16- QAM 의 변조단

이진입력 NRZ 신호를 직/병렬 변환하고 (그림-4)와 같이 교차배분하여 각각을 QPSK 변조한 다음 비선형 증폭한다. 이 신호를 2:1의 가중치를 주어 가산한 후 최종 대역통과 여파기를 거쳐 전송한다. 이진 NRZ 신호 A(t)는 점 Z에서 다음과 같이 주어진다. $I_1(t)$와 $I_2(t)$의 진폭과 논리상태의 조합에 따라 $Z_A(t)$ 진폭과 코드 레벨을 (표 -1)에 나타내었다.

$2I_1(t)$		$I_2(t)$		$Z_A(t)$	
논리상태	진폭	논리상태	진폭	코드 레벨	진폭
0	-2	0	-1	0	-3
0	-2	1	1	1	-1
1	2	0	-1	2	1
1	2	1	1	3	3

(표 -1) $Z_A(t)$의 코드 레벨과 진폭

신호 B(t)의 경우도 A(t)와 같으며 $S_{ZA}(t)$와 $S_{ZB}(t)$를 합한 신호가 최종적으로 16 - QAM 신호를 이루게 된다. 즉,

$$S_{ZA}(t) = 2S_{IA}(t) + S_{QA}(t)$$
$$= G[2I_1(t) + I_2(t)]\cos\omega_c t$$
$$= G Z_A(t)\cos\omega_c t \qquad (1)$$

$$S_Z(t) = S_{ZA}(t) + S_{ZB}(t)$$
$$= G\{[2I_1(t)+I_2(t)]\cos\omega_c t + [2Q_1(t)+Q_2(t)]\sin\omega_c t\} \qquad (2)$$

(2) 시스템 분석

1) 전력 밀도 스펙트럼

이진 NRZ 신호의 baseband 스펙트럼은 펄스의 전송 확률이 같은 경우 다음과 같이 주어진다.

$$2S_0(f) = 2A^2T_s\left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s}\right)^2 \quad (3)$$

선형변조된 신호의 스펙트럼은 baseband 신호의 스펙트럼을 반송파 주파수 f_c 만큼 천이시키는 효과를 가지므로 QPSK 와 16 - QAM 의 정규화된 전력밀도 스펙트럼을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$S_{qpsk}(f) = \left(\frac{\sin 2\pi(f-f_c)T_b}{2\pi(f-f_c)T_b}\right)^2 \quad (T_s = 2T_b) \quad (4)$$

$$S_{16\text{-}QAM}(f) = \left(\frac{\sin 4\pi(f-f_c)T_b}{4\pi(f-f_c)T_b}\right)^2 \quad (T_s = 4T_b) \quad (5)$$

2) 에러 확률 Performance

전송신호와 AWGN 이 함께 수신되는 경우 수신단에 협대역 가우시안 랜덤 과정을 적용하여 수신신호의 포락선과 위상의 확률 밀도 함수를 구하면 다음과 같다.

$$g(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2/2\sigma^2+2)} \cdot I_0(r\sqrt{2}) \quad (6)$$

$$g(\theta) = \frac{e^{-2}}{2\pi}\left[1+\sqrt{4\pi z}\cos\theta \cdot e^{z\cos^2\theta} \cdot \Phi(\sqrt{2z}\cos\theta)\right] \quad (7)$$

여기서 z 는 반송파전력 C 와 잡음전력 N 의 비, 즉 C/N 이다. M-ary PSK 와 PAM 의 P(e) performance 를 식 (6),(7)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$P(e)_{psk} = 1 - \int_{-\pi/m}^{\pi/m} g(\theta)\,d\theta = \frac{e^{-(C/N)\sin^2(\pi/m)}}{\sqrt{\pi(C/N)}\sin(\pi/m)} \quad (8)$$

$$P(e)_{PAM} = \left(1-\frac{1}{M}\right) erfc\left(\sqrt{\frac{3}{2(M^2-1)}\frac{C}{N}}\right) \quad (9)$$

식 (8),(9)에 의하여 16 - QAM 의 P(e)를 구하면

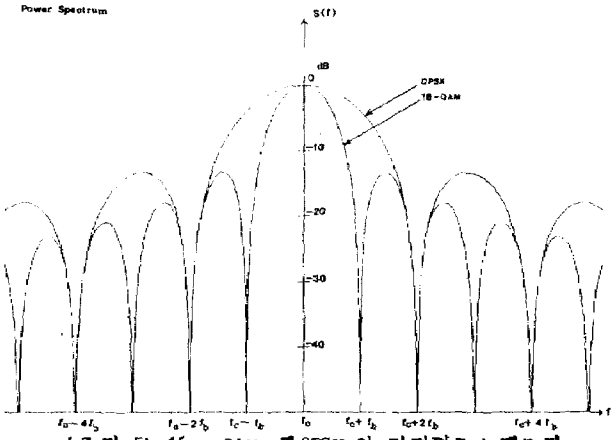
$$P(e)_{conventional} = \frac{3}{8} erfc\left(\sqrt{\frac{1}{10}\cdot\frac{C}{N}}\right) \quad (10)$$

$$P(e)_{modified} = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{1}{10}\cdot\frac{C}{N}}\right) \quad (11)$$

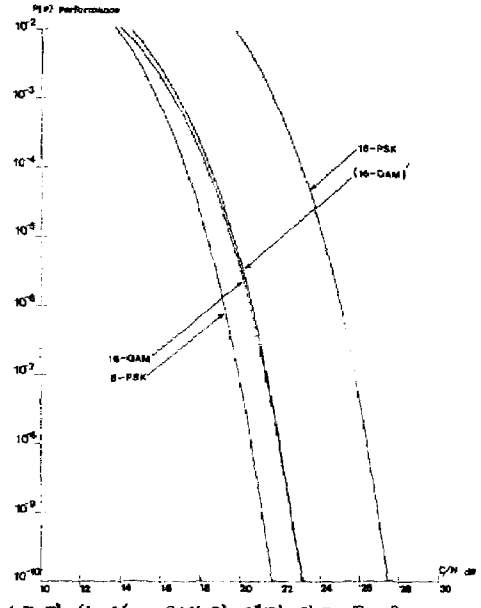
이다.

4. 실험 및 결과 고찰

16-QAM 의 정규화된 전력 밀도 스펙트럼을 식(5)에 의거 Plotting 한 결과를 (그림-5)에 나타내었다. 여기서 16- QAM은 2 bps/Hz 의 대역효율을 갖는 QPSK 의 2배 즉, 4 bps/Hz 의 대역효율을 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 (그림-6)에 AWGN 하에서 수신단에 발생하는 에러 확률 Performance 를 반송파대 잡음비 (C/N)의 함수로서 나타내었다. 동일한 C/N 으로 얻을수 있는 P(e) performance 가 3 bps/Hz의 대역효율을 갖는 8-PSK 보다 16-QAM 이 떨어지지만, 같은 대역효율을



(그림-5) 16 - QAM 과 QPSK 의 전력밀도 스펙트럼

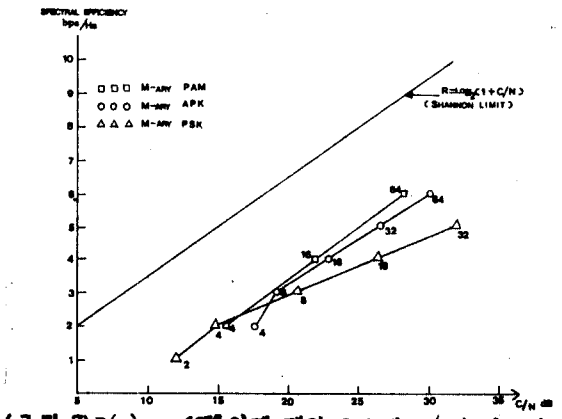


(그림-6) 16 - QAM 의 에러 확률 Performance

갖는 16-psk 보다는 월등하다. 기존의 16-QAM 과 비선형증폭이 가능하도록 설계된 16-QAM 의 Performance 를 비교하면 후자가 전자보다 약간 떨어지나 10^{-4}-10^{-6}의 실제 범위에서는 그 차이가 약 0.1 dB 에 불과하므로 거의 같다고 볼 수 있다. 따라서 비선형 증폭에 의한 Performance 의 저하는 무시할 수 있다. (그림-7) 에 Performance 가 10^{-6} 일 경우에 대역효율과 C/N 의 함수관계를 나타내었다. 대역효율을 높이기 위하여 전송 레벨 수를 증가하고, 같은 에러 Performance 를 유지하려면 보다 높은 C/N 즉, 전송전력을 필요로 한다.

QPSK 변조된 신호를 A급 증폭기를 통하여 비선형 증폭한 결과 선형 증폭의 경우 보다 약 3.8 dB 높은

전력을 가진 신호를 발생하였다.전력 증폭기로 증폭 효율이 떠어난 C급 증폭기나 TWT 혹은 GaAsFET 증폭기를 사용할 경우 기존의 16-QAM 신호보다 약 5dB 정도 높은 전력을 가진 신호를 발생할 수 있으리라 기대된다.



(그림-7) P(e) = 10^{-6} 일때 대역 효율과 C/N의 함수관계

5. 결 론

한정된 주파수 대역을 효과적으로 사용하기 위하여 높은 대역 효율을 갖는 변조 방식을 필요로한다.진폭과 위상의 혼합 변조 방식의 일종으로서 4 bps/Hz 의 대역 효율을 갖고 높은 전송 전력을 얻을 수 있도록 비선형 증폭이 가능한 16-QAM방식을 제안하여 기존의 방식과 비교 및 분석하였다.비선형 증폭을 통하여 기존의 16-QAM방식보다 약 3.8 dB정도 높은 전력을 갖는 신호를 발생할 수 있었으며 AWGN 하에서 수신단의 Performance 가 약 0.1 dB정도 저하되나 10^{-4}-10^{-9} 의 실제 범위에서는 거의 같음을 보였다.

6. 참 고 문 헌

1. K. Feher, "Digital Communications:Satellite/ Earth Station Engineering", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1983
2. V. Prabhu," On the Bandwidth Efficiency of 16-QAM Digital Radio ", IEEE Int'l. Conf. Comm., Philadelphia, June, 1982, pp. 4B.5.1-4B.5.3
3. K. Miyauchi, et al.," New Technique for Generating and Detecting Multilevel Signal Formats " IEEE Trans. Comm., vol.com-24,No.2, pp.263-267 Feb, 1976
4. V. Prabhu, " The Detection Efficiency of 16-ary QAM ", BSTJ,vol.59,No.4, pp.639-656,April, 1980
5. W. Bennett," Statistics of Regenerative Digital Transmission ",BSTJ, vol.37, pp. 1501-1542, Nov, 1958
6. S. Rice," Statistical Properties of a Sine Wave Plus Random Noise ", BSTJ, vol.24, pp. 109-157, Jan, 1948
7. D. Docherty and C. Pallemaerts, " Spectral Compatability of 16-state QAM ", IEEE Int'l. Conf. Comm., Saattle, June, 1980, pp. 34.4.1-34.4.6
8. J. Salz, et al., " Data Transmission by Combined AM and PM ", BSTJ, vol.50, No.7, pp. 2399-2419, Sep, 1971