

논문 2008-45IE-1-7

비선형 위성 채널에서 QAM-OFDM 방식의 적용에 관한 연구

(The Study on the Application of QAM-OFDM Scheme for Nonlinear Satellite Channel)

이 해 선*

(Haeseon Lee)

요 약

본 논문에서는 중계기의 군 지연 및 이득 변동 특성을 포함한 비선형 위성 채널에서 다중 레벨 QAM 방식을 적용한 OFDM 기반 시스템에 대하여 성능을 분석하였다. 일반적인 OFDM을 적용하는 경우와 반송파 간섭 OFDM을 적용하는 경우를 부가 백색 가우시안 잡음 환경에서 지정된 위성 채널의 비선형 정도에 대하여 적용한 QAM 방식에 따른 BER 성능을 비교하여 성능 개선 정도를 제시하였다. 36MHz 대역폭의 중계기 채널에 120Mbps 전송률의 정보를 QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM을 사용하여 전송하는 경우에 대하여 위성 채널의 특성을 통상적인 경우와 최악 조건의 경우로 나누어 모의 실험을 적용하였다. 모의실험 결과를 통하여 통상적인 채널 환경에서 고차 레벨의 QAM을 적용하는 경우에 반송파 간섭 OFDM에 의한 개선 정도가 이득 변동 특성보다는 성능 열화에 상대적으로 심각한 영향을 미치는 군 지연과 고출력 증폭기의 비선형 특성에 의한 개선 정도가 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었다. 아울러 최악의 조건의 경우에 32QAM 이상의 QAM-OFDM을 적용하는 경우에는 채널 부호화나 비선형 특성의 보상 방법과 같은 추가의 기법이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, the performance for the non-linear satellite channel including the characteristics of group delay and gain ripple of transponder is analyzed with multi-level QAM-OFDM schemes. Comparing the BER performances between general OFDM and CI(Carrier Interferometry)-OFDM for various QAM schemes, the degree of performance improvement is presented in AWGN environments for specified nonlinear characteristics. The simulations are performed with the 36MHz bandwidth of transponder channel and 120Mbps transmission rate for QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM schemes between normal and worst case condition. It is shown that the improvement measure by the CI-OFDM for the group delay of channel and nonlinear characteristic of HPA outperforms that for the gain ripple in the case of higher level QAM scheme in normal condition. And the simulation results show that the additional techniques like the channel coding and compensation scheme against the nonlinear characteristic are required for 32QAM and higher level QAM in worst case condition.

Keywords : satellite, ofdm, CI-ofdm, nonlinearity

I. 서 론

과거의 위성 통신 시스템은 주파수 효율이 높은 방식보다는 상대적으로 안정적인 QPSK 방식이 널리 사용되었다. 최근 정보통신 서비스의 뚜렷한 변화 추세로 개인화와 멀티미디어화를 꾀할 수 있다. 이를 위성 통

신 시스템에서도 적용하기 위해서는 위성 통신에서도 한정적인 주파수 자원에 대하여 효율적인 주파수 사용 기술의 적용이 절실히 요구되고 있다. 이러한 경우에 적용할 수 있는 변조 방식으로 고차 레벨 QAM 방식을 들 수 있다. 하지만 일반적인 단일 반송파 QAM 방식은 채널의 비선형 특성으로 인한 혼변조 잡음으로 인하여 심각한 성능 저하를 가져올 수 있다. 이러한 상황에서 최근에 널리 사용되는 변조 방식으로 다중 반송파를 이용하는 QAM-OFDM 방식을 들 수 있다. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은

* 평생회원, 동양공업전문대학 전기전자통신공학부
(Dongyang Technical College, School of Electrical Engineering)
접수일자: 2007년12월26일, 수정완료일: 2008년2월29일

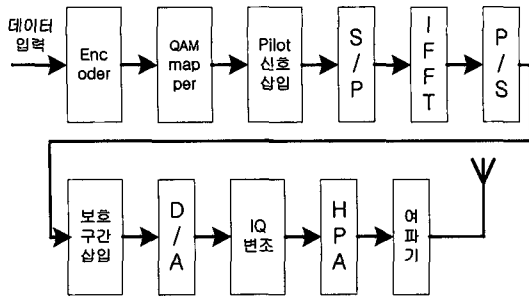


그림 1. OFDM 송신 시스템 구성도
Fig. 1. Block diagram of OFDM TX System.

고속의 데이터 전송 및 잡음원의 증가로 인해 점점 열악해져 가는 무선 통신 환경에 대처하기 위해 최근 무선 LAN과 디지털 오디오 방송 및 디지털 TV 방식에서도 표준으로 선정된 통신 방식이다. 또한 고속 무선 인터넷 서비스를 위한 무선 광대역 멀티미디어 통신 시스템(WBMCS, Wireless Broadband Multimedia Communication Systems)의 표준화 작업에서도 범세계적으로 OFDM 방식이 표준안으로 채택되었다. 전형적인 OFDM 송신 시스템의 구성도는 그림 1과 같다.

OFDM 방식은 다중 반송파 방식이므로 기본적으로 주파수 선택적 페이딩이나 협대역 간섭에 강한 방식이다. 또한 전송 심볼의 길이가 원래 데이터의 주기에 비해 병렬화를 위해 모인 데이터 수만큼 길어지게 되므로 고속 데이터 전송시에 발생하는 심볼간 간섭 문제도 쉽게 처리할 수 있다. 반면에 OFDM 방식은 단일 반송파 변조 방식에 비해 주파수 편차와 위상 잡음에 민감하며 OFDM 변조된 신호는 다중 반송파를 사용하므로 최대 전력 대 평균 전력의 비(PAPR, Peak to Average Power Ratio)가 상대적으로 커서 고출력 증폭기의 비선형 특성에 의한 신호의 왜곡이 심하게 발생하여 이를 줄이기 위해 전력 효율성을 감소시켜 사용해야하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 비선형 특성을 보상하는 회로를 추가로 사용하기도 한다.^[1] 이와 더불어 OFDM을 적용한 위성 통신 시스템의 경우에는 TWTA와 같은 고출력 증폭기의 비선형 특성과 더불어 IMUX와 OMUX와 같은 여파기의 특성에서 기인하는 대역내의 균 지연 특성과 이득 변동 특성도 함께 고려하여야 한다.

본 논문에서는 위성 통신을 이용한 멀티미디어 서비스 구현 관점에서 위성 통신에 다중 레벨 QAM과 OFDM 방식을 적용하였다. II장의 1.에서는 적용된 위성 채널의 특성에 대하여 기술하였다. II장의 2.에서는 적용된 QAM-OFDM 방식의 일반적인 OFDM과 반송

파 간섭 OFDM 시스템에 대한 개요와 특성 그리고 시스템 구현상의 적용 기술에 대하여 기술하였다. III장에서는 적용된 QAM 방식에 대하여 시스템의 성능에 주요한 영향을 미치는 변수들의 변화에 따른 시스템 성능을 모의실험한 과정과 결과를 기술하였다. IV장에서는 시스템 성능 분석 대한 결론을 제시하였다.

II. 본 론

1. 적용된 위성 채널의 특성

통신용 위성 증계기는 그림 2에 나타낸 바와 같이 상향 링크를 통해 수신된 신호를 하향 링크 주파수로 신호의 주파수를 변환하고, 채널로 분류된 상태에서 증폭 과정을 거쳐 하향 링크로 전송하는 기능을 수행한다. 증계기에 사용되는 증폭기는 고출력 및 전력 효율을 감안하여 TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier)가 널리 사용한다. 통상적으로 TWTA와 같은 고출력 증폭기는 비선형 특성을 가지고 있어 통신 시스템의 성능에 심각한 영향을 미친다. 고출력 증폭기의 특성은 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 크기 특성을 나타내는 AM-AM 특성과 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 위상 특성을 나타내는 AM-PM 특성을 사용하여 증폭기의 비선형 왜곡 정도를 나타낼 수 있다. AM-AM 특성과 AM-PM 특성은 입력 신호 $x(t)$ 가 $x(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$ 인 경우에 각각 (식1)과 (식2)와 같이 나타낼 수 있어 출력 신호 $y(t)$ 는 (식3)과 같이 나타낼 수 있다.^[2]

$$M[A(t)] = \frac{\alpha_A A(t)}{1 + \beta_A A^2(t)} \tag{1}$$

$$\Phi[A(t)] = \Phi_0 \frac{\alpha_\phi A^2(t)}{1 + \beta_\phi A^2(t)} \tag{2}$$

$$y(t) = M[A(t)]e^{j(\phi(t) + \Phi[A(t)])} \tag{3}$$

여기서 α 와 β 와 Φ_0 는 고출력 증폭기의 특성을 나타내는 계수로 curve-fitting 절차를 이용하여 측정 데이터로부터 구할 수 있다. OFDM 시스템에서 고출력 증폭기를 사용하는 경우에 OFDM 변조 신호의 크기가 일정하지 않은 신호이므로 선형성이 보장되도록 충분한 backoff를 갖게 하거나 선형화기(linearizer)를 고출력 증폭기와 함께 사용하고 있다.

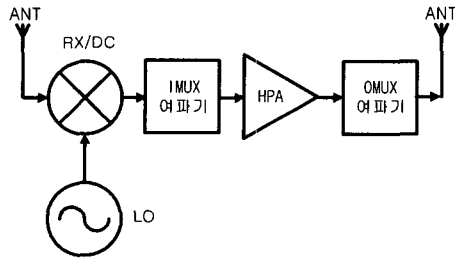


그림 2. 위성 중계기의 기능적인 채널 구성도
Fig. 2. Functional block diagram of satellite transponder.

중계기 채널 대역내의 여파기 이득 특성의 변화를 나타내는 변동(ripple) 특성은 OFDM을 적용한 시스템에서 부반송파에 따른 S/N의 감소를 야기하여 성능의 저하를 가져온다. 대역내의 위상 특성을 나타내는 군 지연(group delay) 특성은 신호의 여러 가지 주파수 성분의 지연을 다르게 함으로써 신호가 왜곡되어 성능을 저하시키게 된다. 군 지연은 (식4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_g = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{df} = A_0 + A_1 df + A_2 df^2 + \dots \quad (4)$$

여기서 A_0 는 일정한 지연 성분을 나타내고 A_1 와 A_2 등은 선형이나 포물선형 등과 같은 여러 가지 군 지연 성분을 나타낸다.^[3]

2. 적용된 QAM-OFDM 시스템 특성

그림 3은 OFDM 신호 발생 관점에서 통상적인 OFDM 송신기를 나타낸다. QAM 변조된 심볼들은 병렬화 및 IFFT 기능을 거쳐 (식5)와 같은 신호를 발생시킨다.

$$x_{OFDM}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \cdot e^{j2\pi k \Delta f \cdot t} \quad (5)$$

(식5)에서 d_k 는 QAM 변조된 심볼을 나타내고, Δf 는 $1/T_s$ 로 심볼 구간의 역수를 나타낸다. 앞서 설명하였듯이 OFDM 신호는 다중 반송파 신호로 최대 전력 대 평균 전력의 비인 PAPR이 큰 단점을 가진다. 이를 줄이기 위하여 블록 코딩이나 PTS(Partial Transmit Sequence)나 SM(Selective Mapping) 혹은 절단 등의 방법을 사용한다. 이러한 경우에 PAPR을 줄일 수는 있으나 시스템 복잡도가 상당히 증가한다. 반송파 간섭 OFDM의 경우에는 시스템의 복잡도의 증가를 최소화하면서 PAPR을 줄일 수 있는 방식 중의 하나로 알려져 있다. 또한 그림 4의 반송파 간섭 OFDM 송신기에서 볼 수 있듯이 각 심볼을 사용하는 모든 반송파와 결

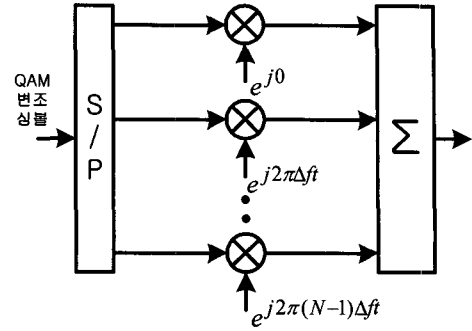


그림 3. 전형적인 OFDM 송신기
Fig. 3. Traditional OFDM transmitter.

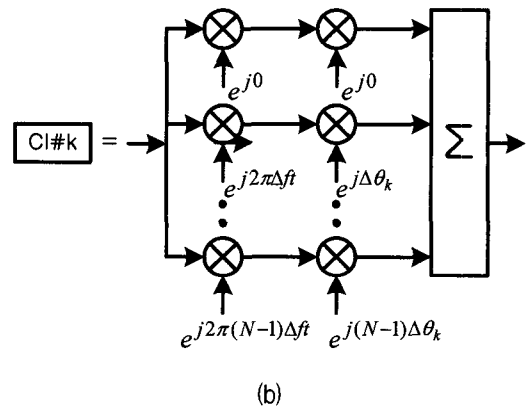
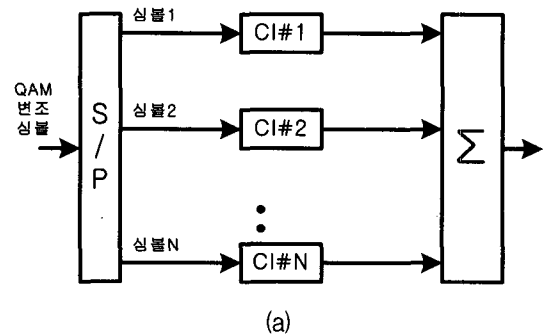


그림 4. 반송파 간섭 OFDM 송신기
Fig. 4. CI-OFDM transmitter.

합하여 전송함으로써 주파수 다이버시티 효과를 개선시킬 수 있다.^[4] (식6)은 한 개의 심볼에 대한 CI-OFDM 신호를 나타낸다.

$$S_{CI-OFDM}^k(t) = \frac{d_k}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi n \Delta f t + n \Delta \theta_k)} \quad (6)$$

(식 6)에서 d_k 는 QAM 변조된 k번째 심볼을 나타내고, $1/\sqrt{N}$ 은 정규화를 위한 값이다. 사용된 QAM 방식이 QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM에 따라 정규화를 위한 N이 2, 6, 10, 20, 42를 각각 적용한다. Δf 는 $1/T_s$ 로 심볼 구간의 역수를 나타내고, $\Delta \theta_k$ 는 k 번째 심볼과 나머지 (N-1)개의 심볼을 구분하기 위한

위상offset으로 $2\pi k/N$ 으로 나타낼 수 있다. N개의 심볼 전체의 반송파 간섭 OFDM 신호는 (식7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{CI-OFDM}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi n \Delta f t + n \Delta \theta_k)} \quad (7)$$

반송파 간섭 OFDM의 경우에는 각각의 심볼이 직교성을 가지기 위해 각 심볼에 적용된 특정한 위상 offset이 모든 반송파와 결합되어 전송된다. (식7)로 표현된 반송파 간섭 OFDM 신호의 피크 전력은 다른 심볼의 반송파들이 일관되게 더해지지 않으므로 (식5)로 표현된 OFDM 신호에 비해 작아 PAPR이 낮아진다.^[5] 반송파 간섭 OFDM 신호는 증계기내의 비선형 특성을 나타내는 TWTA와 같은 고출력 증폭기를 거쳐 채널을 통해 왜곡과 감쇠와 지연을 겪게 된다. 수신 신호 $r(t)$ 는 (식8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n e^{j(2\pi n \Delta f t + n \Delta \theta_k + \phi_n)} + n(t) \quad (8)$$

(식 8)에서 γ_n 과 ϕ_n 은 n번째 반송파의 고출력 증폭기의 왜곡을 포함한 채널의 감쇠와 위상 특성을 각각 나타낸다. $n(t)$ 은 부가 백색 가우시안 잡음을 나타낸다.

그림 5는 k번째 심볼에 대한 반송파 간섭 OFDM 수신기를 나타낸다. 수신 신호 $r(t)$ 는 수신기에서 N개의 직교 반송파로 분리되어 FFT 과정을 거쳐, 각 반송파의 k번째 심볼의 위상 오프셋을 제거한다. k번째 심볼의 결정을 위한 N개의 결합기 입력은 (식 9)와 같고, 각각의 입력은 (식10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r^k = (r_0^k, r_1^k, \dots, r_{N-1}^k) \quad (9)$$

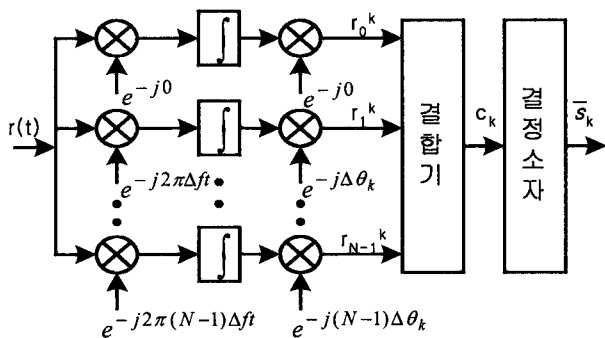


그림 5. 반송파 간섭 OFDM 수신기
Fig. 5. CI-OFDM receiver.

$$r_i^k = \frac{1}{\sqrt{N}} \gamma_i d_k + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0, n \neq k}^{N-1} \gamma_n d_n e^{j(i(\Delta\theta_k - \Delta\theta_n))} + n_i \quad (10)$$

III. 모의실험과 결과

모의실험에 적용한 데이터는 36(MHz) 증계기 대역폭에 120(Mbps)의 정보를 QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM을 적용하여 생성된 심볼을 64개의 부반송파를 이용하여 전송하는 것으로 설정하였다. 순환적인 보호구간은 초기 심볼 구간의 1/4을 적용하였으며 여파기 특성을 적용하기 위하여 심볼 당 8개의 표본으로 확장하였다. 그림 6은 적용한 HPA의 AM-AM 및 AM-PM 특성을 나타내고, 그림 7은 위성 채널의 군 지연 및 이득 변동 특성을 나타낸다.

그림 8은 입력 backoff가 -15dB이며 군 지연 및 주파수 이득 특성이 통상적인 경우의 성능을 나타낸다. 일반적인 OFDM에서 10^{-2} BER을 맞추기 위해서 요구

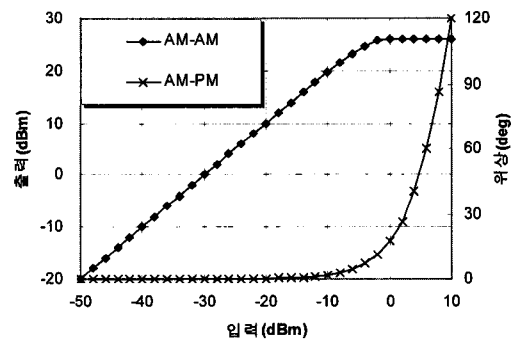


그림 6. 고출력 증폭기 특성
Fig. 6. Characteristics of HPA.

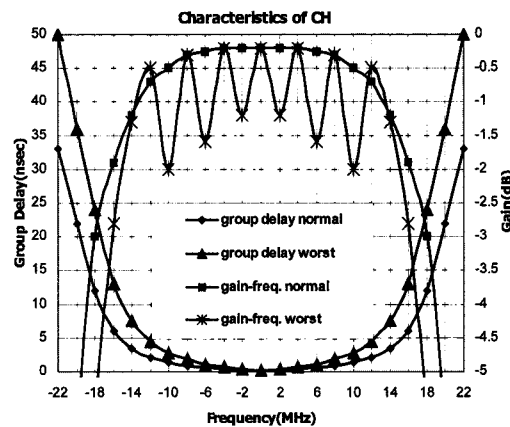


그림 7. 채널의 군 지연 및 이득 변동 특성
Fig. 7. Characteristics of group delay and ripple.

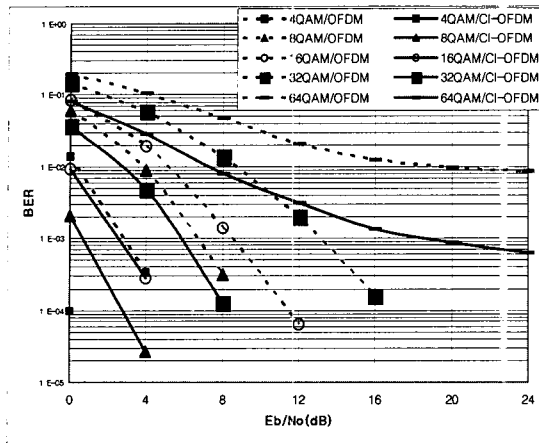


그림 8. 통상적인 조건에서의 BER 성능
Fig. 8. BER performance in normal condition.

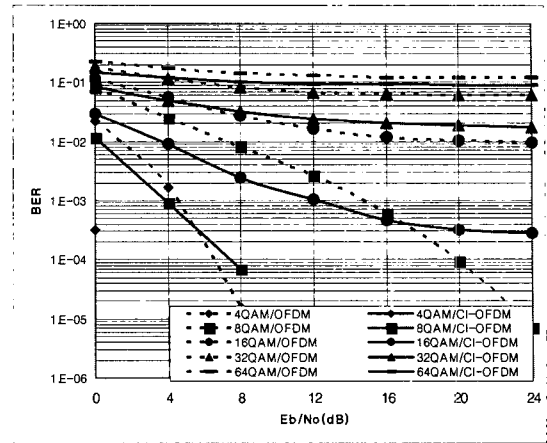


그림 10. 최악의 군 지연 특성에서의 BER 성능
Fig. 10. BER performance in worst group delay condition.

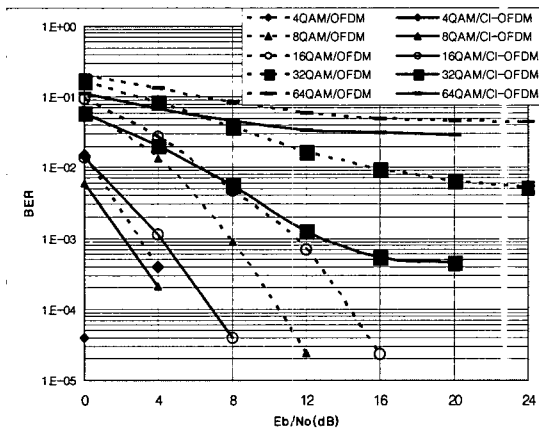


그림 9. 최악의 이득 변동 특성에서의 BER 성능
Fig. 9. BER performance in worst ripple condition.

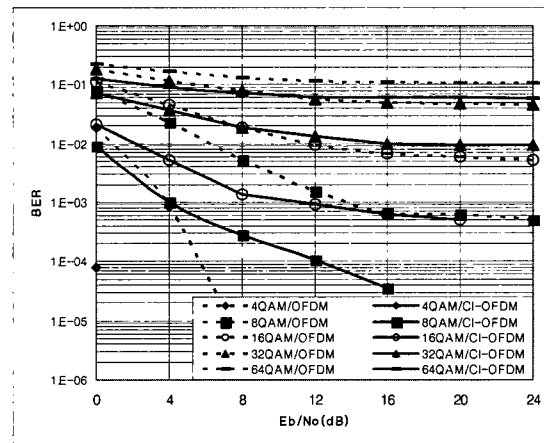


그림 11. -5dB IBO에서의 BER 성능
Fig. 11. BER performance at -5dB IBO.

되는 E_b/N_0 가 64QAM은 20dB, 32QAM은 8.8dB, 16QAM은 5.2dB, 8QAM은 4dB, QPSK는 0.4dB로 적용되는 QAM 방식에 따라 요구되는 E_b/N_0 가 20dB 가까이 차이가 날 수 있다. 일반적인 OFDM의 경우에 비하여 CI-OFDM을 적용함으로써 E_b/N_0 가 개선되는 정도가 10^{-2} BER을 기준으로 64QAM의 경우에 12.8dB이고, 32QAM의 경우에 6dB이며, 16QAM의 경우는 5.2dB이다. 또한 10^{-3} BER을 기준으로는 32QAM의 경우에 7.1dB이고, 16QAM의 경우는 6dB이며, 8QAM의 경우는 8.2dB이다. 그림 9는 위성 채널의 이득 변동 특성에 의한 성능의 변화를 나타낸다. 일반적인 OFDM에서 10^{-2} BER을 맞추기 위해서 요구되는 E_b/N_0 가 32QAM은 15.6dB, 16QAM은 6.2dB, 8QAM은 4.8dB, QPSK는 0.6dB로 평탄한 이득에서 2dB의 변동으로 변화함에 따라 성능 열화가 16QAM의 경우에는 1dB이지만 32QAM의 경우에는 6.8dB임을 알 수 있다. 일반적

인 OFDM의 경우에 비하여 CI-OFDM을 적용함으로써 E_b/N_0 가 개선되는 정도가 10^{-2} BER을 기준으로 32QAM의 경우에 9.8dB이고, 16QAM의 경우에 5.9dB이며, 64QAM의 경우는 일반적인 OFDM과 CI-OFDM 모두에서 채널 부호화와 별도의 개선 방식이 필요함을 알 수 있다. 그림 10은 채널의 군 지연 특성에 의한 성능의 변화를 나타낸다. 일반적인 OFDM에서 10^{-2} BER을 맞추기 위해서 요구되는 E_b/N_0 가 16QAM은 20dB, 8QAM은 7.1dB, QPSK는 1.2dB로 대역 끝에서 군 지연이 12(nsec)에서 24(nsec)로 변화함에 따라 성능 열화가 16QAM의 경우에 14.8dB이고 8QAM의 경우는 3.1dB이다. 일반적인 OFDM의 경우에 비하여 CI-OFDM을 적용함으로써 E_b/N_0 가 개선되는 정도가 10^{-2} BER을 기준으로 16QAM의 경우에는 16dB이고, 8QAM의 경우에는 7dB정도이다. 32QAM과 64QAM의 경우에는 개선 효과도 미미하며 일반적인 OFDM과 CI-OFDM 모두에서

표 1. CI-OFDM에 의한 성능 개선 요약
Table 1. Summary of performance improvement by CI-OFDM.

	64QAM	32QAM	16QAM	8QAM
통상적인 경우	12.8dB	6dB	5.2dB	-
이득 변동	-	9.8dB	5.9dB	-
균 지연	-	-	16dB	7dB
비선형(IBO)	-	-	10dB	6dB

추가 개선 기법이 필요함을 알 수 있다. 그림 11은 고출력 증폭기의 입력 backoff를 -5dB로 비선형 특성을 강화시킨 상태에서의 성능을 나타낸다. 일반적인 OFDM에서 10^{-2} BER을 맞추기 위해서 요구되는 E_b/N_0 가 16QAM은 12dB, 8QAM은 6.1dB, QPSK는 0.9dB로 성능 열화가 16QAM의 경우에 6.8dB이고 8QAM의 경우는 2.1dB이다. 일반적인 OFDM의 경우에 비하여 CI-OFDM을 적용함으로써 E_b/N_0 가 개선되는 정도가 10^{-2} BER을 기준으로 16QAM의 경우에는 10dB정도이고, 8QAM의 경우에는 6dB정도이다. 균 지연에 의한 성능의 변화에서와 마찬가지로 32QAM과 64QAM의 경우에는 개선 효과도 미미하며 일반적인 OFDM과 CI-OFDM 모두에서 추가 개선 기법이 필요함을 알 수 있다. 표 1에 모의실험한 각 경우에 대하여 10^{-2} BER을 기준으로 CI-OFDM을 적용함으로써 개선된 정도를 요약하여 정리하였다.

IV. 결 론

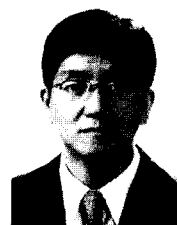
향후 위성 통신 시스템에서도 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해서는 높은 전송률의 정보 전송을 필요로 한다. 이를 위한 방법 중의 하나로 고차 레벨 QAM을 적용한 OFDM 방식을 들 수 있다. 중계기의 균 지연 및 이득 변동 특성을 포함한 비선형 위성 채널에서 다중 레벨 QAM 방식을 적용한 OFDM 기반 시스템에 대하여 성능을 분석하였다. 일반적인 OFDM을 적용하는 경우와 반송파 간섭 OFDM을 적용하는 경우를 부가 백색 가우시안 잡음 환경에서 지정된 위성 채널의 비선형 정도에 대하여 적용한 QAM 방식에 따른 BER 성능을 비교하여 성능 개선 정도를 제시하였다. 모의실험 결과를 통하여 통상적인 채널 환경에서 고차 레벨의 QAM을 적용하는 경우에 반송파 간섭 OFDM에 의한 개선 정도가 이득 변동 특성보다는 성능 열화에 상대적으로 심각한 영향을 미치는 균 지연과 고출력 증폭기의 비선형 특성에 대한 개선 정도가 두드러지게 나타남을 확인

할 수 있었다. 아울러 최악의 조건의 경우에 32QAM 이상의 QAM-OFDM을 적용하는 경우에는 채널 부호화나 비선형 특성의 보상 방법과 같은 추가 기법이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] P. Boonsrimuang, K. Naito, K. Mori, T. Paungma, and H. Kobayashi, "Proposal of QAM-OFDM System with IDAR Method for Non-Linear Satellite Channel," Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd Volume 6, 2006 pp.2587 - 2591, 2006
- [2] A. A. M. Saleh, "Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers," IEEE Trans. Comm., Vol. 29, no.11, pp.1715 - 1720, Nov. 1981.
- [3] Y. Kim, Y. Song, N. Kim, D. Park, "Performance Analysis of Channel Impairment in High Data Rate Satellite Communication Services", SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2001 Proceedings, Volume 1, pp.47-50, Aug. 2001.
- [4] D. A. Wiegandt, Z. Wu, C. R. Nassar, "High-throughput, high-performance OFDM via pseudo-orthogonal carrier interferometry spreading codes," IEEE Trans. Comm., Vol. 51, no.7, pp.1123 - 1134, July 2003.
- [5] D. A. Wiegandt, C. R. Nassar, Z. Wu, "Overcoming Peak-to-average Power Ratio Issues in OFDM via Carrier-Interferometry Codes", VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th Volume 2, pp.660-663, June 2001.

저 자 소 개



이 해 선(평생회원)
1984년 2월 서강대학교
전자공학과 졸업
1986년 2월 서강대학교
전자공학과 석사
1998년 2월 서강대학교
전자공학과 박사

1986년 1월~1991년 7월 금성전기(현 LG전자) 연구소

1991년 7월~1998년 2월 한국통신기술 연구소
1998년 2월~현재 동양공업전문대학 전기전자 통신공학부

<주관심분야 : 무선통신시스템, 초고주파공학>