위성 중계기 특성을 감안한 OFDM 기반 위성 통신 시스템의 성능 개선

The Performance Improvement of the OFDM Based Satellite Communication System with the Consideration of Transponder Characteristics

이 해 선

Hae-Seon Lee

요 약

본 논문에서는 위성 중계기의 비선형 특성을 포함한 군 지연 및 이득 변동 특성을 감안하여 OFDM 기반 위성 통신 시스템에 반송파 간섭 OFDM 및 채널 부호화를 적용하여 성능을 비교함으로써 개선 효과를 분석하였다. 일반적인 OFDM을 적용하는 경우와 반송파 간섭 OFDM을 적용하는 경우를 부가 백색 가우시안 잡음 환경에서 중계기의 특성과 지정된 입력 backoff 상태에 따른 BER 성능을 비교하여 성능 개선 정도를 제시하였다. 36 MHz 대역폭의 중계기 채널에 120 Mps 전송률의 정보를 16 QAM을 사용하여 전송하는 경우에 대하여 중계기의 특성이 이상적인 경우와 최악 조건의 경우로 나누어 모의실험을 적용하였다. 모의실험 결과를 통하여 중계기 내의 성능 열화에 상대적으로 심각한 영향을 미치는 군 지연과 비선형 특성에 대한 반송파 간섭 OFDM과 채널 부호화에 의한 개선 정도가 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 최악의 조건으로 근접할수록 적용한 채널 부호화에 의한 개선보다 반송파 간섭 OFDM에 의한 개선 효과가 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, the effects of performance improvement for the OFDM based satellite communications are analyzed with applying the CI(Carrier Interferometry)-OFDM and channel coding scheme considering the group delay and gain ripple characteristic as well as the nonlinear characteristic of the transponder. Comparing the BER between traditional OFDM and CI-OFDM, the degree of performance improvement is presented in AWGN channel environments for specified backoff condition of HPA. The simulations are performed with the 36 MHz bandwidth of transponder channel, 120 Mbps transmission rate, and 16 QAM modulation scheme between ideal and worst case condition. It is shown that the improvement measure by the CI-OFDM and channel coding for the group delay and nonlinear characteristic outperforms that for the gain ripple in terms of performance degradation presented by the individual characteristics. And the simulation results show that the effects of improvement by the CI-OFDM outperforms the effect by the applied channel coding, particularly in worst case condition.

Key words : Satellite, OFDM, CI-OFDM, Group Delay, Nonlinear

I. 서 론

최근의 통신 시스템의 두드러진 특징으로 통신의 개인화와 멀티미디어화에 부응하여 사용자 단말에

동양공업전문대학 전기전자통신공학부(School of Electrical Engineering, Dongyang Technical College)

· 논 문 번 호 : 20070831-092
· 수정완료일자 : 2007년 10월 4일

서의 무선화 및 대용량화를 요구하고 있다. 이와 더불어 통신의 범세계적인 서비스에 대한 요구도 기본적인 사항으로 여겨지고 있다. 과거에는 위성 통신이 국제 통신과 장거리 통신 서비스 분야에 절대적인 역할을 수행해 왔다. 하지만 광통신이 국제 통신과 장거리 통신 분야에서 주된 역할을 수행하게 되고 위성 통신은 범세계적인 서비스상의 사용자와의 직접 접속 부문으로 변환되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 위성 통신에서도 이제까지 널리 사용되고 있는 전력 제한 시스템에 적합하고 안정적인 QPSK 방식보다는 이동성을 고려한 보다 효율적인 통신 방식의 기술 적용을 절실히 필요한 실정이다. 이러한 필요에 적합한 방식 중의 하나로 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 들 수 있다.

OFDM 방식은 고속의 데이터 전송 및 다중 경로에 적합한 방식으로 최근 무선 LAN과 디지털 오디오 방송 및 디지털 TV 방식뿐만 아니라 무선 광대역 멀티미디어 통신 시스템에서도 표준으로 널리 사용되고 있다. 하지만 OFDM 방식은 기본적으로 다중 반송파를 사용하므로 최대 전력 대 평균 전력의 비(PAPR: Peak to Average Power Ratio)가 상대적으로 크다는 단점을 가지고 있다. 이로 인하여 시스템 내의 비선형 특성을 포함한 채널 특성에 의한 신호의 왜곡이 심하게 발생하여 이를 줄이기 위해 전력 효율성을 감소시켜서 사용하거나 별도의 기법을 추가로 적용해서 사용되고 있다.

본 논문에서는 위성 통신 시스템에 OFDM을 적용한 경우에 기존에 발표된 논문들에서 제시한 고출력 증폭기에 의한 비선형 특성에 의한 영향뿐만 아니라 중계기의 구성을 감안하여 대역내의 군 지연과 이득 변동 특성을 포함하여 AWGN 채널 환경에서 성능 분석을 실시하였다. OFDM 방식의 높은 PAPR에 의한 성능 열화를 줄이기 위한 방안으로 반송파 간섭(CI: Carrier Interferometry) OFDM 방식을 적용하여 성능 개선 정도를 제시하였다. 아울러 채널 부호화에 의한 성능 개선 정도를 알아보기 위하여 1/2 길쌈 부호화(convolutional coding) 방식을 적용하였다.

Ⅱ장에서는 적용한 OFDM 시스템에 대한 개요와 특성 그리고 시스템 구현상의 적용 기술에 대하여 기술하였다. Ⅲ장에서는 성능 분석 관점에서 위성 중계기의 구성과 요소별 특성에 대하여 기술하였다. Ⅳ장에서는 시스템의 성능에 주요한 영향을 미치는 변수들의 변화에 따른 시스템 성능을 모의실험한 과정과 결과를 기술하였다. Ⅴ장에서는 시스템 성능 분석 및 개선에 대한 결론을 제시하였다.

Ⅱ. 적용된 OFDM 시스템 특성

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)가 상대적으로 크다는 단점을 가지고 있다.

그림 1은 OFDM 신호 발생 관점에서 일반적인 OFDM 송신기를 나타낸다. QAM 변조된 심볼들은 병렬화 및 IFFT 기능을 거쳐 식 (1)과 같은 신호를 발생시킨다.

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

식 (1)에서 d_k는 QAM 변조된 심볼을 나타내고, Δf는 $1/T_s$로 심볼 구간의 역수를 나타낸다. 앞서 설명하였듯이 OFDM 신호는 다중 반송파 신호로 최대 전력 대 평균 전력의 비인 PAPR이 큰 단점을 가

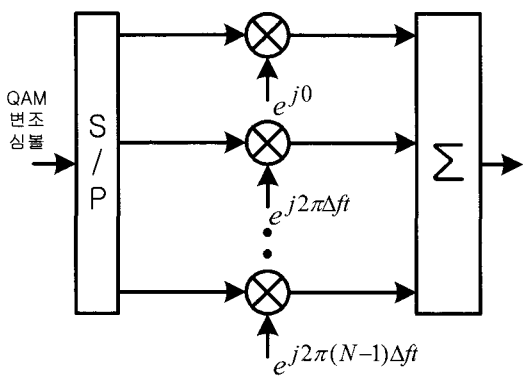

그림 1. 일반적인 OFDM 송신기
Fig. 1. general OFDM transmitter.

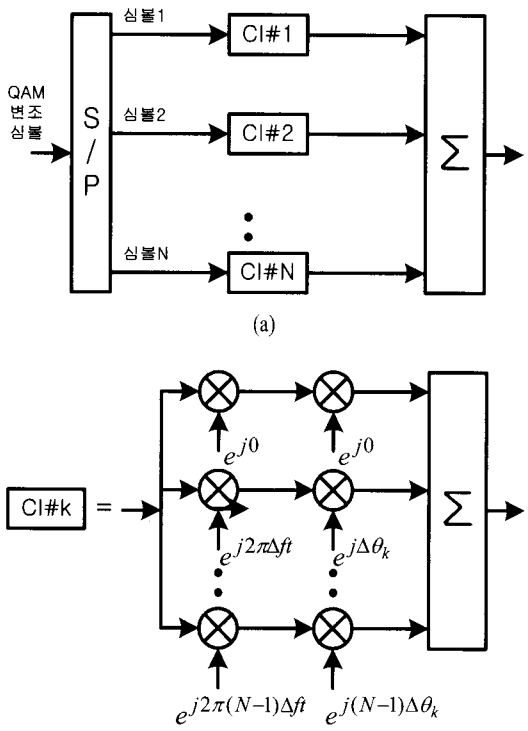

그림 2. 반송파 간섭 OFDM 송신기
Fig. 2. CI-OFDM transmitter.

진다. 이를 줄이기 위하여 블록 코딩이나 PTS(Partial Transmit Sequence)나 SM(Selective Mapping) 혹은 절단 등의 방법을 사용한다[1]. 이러한 경우에 PAPR을 줄일 수는 있으나 시스템 복잡도가 상당히 증가한다. 반송파 간섭 OFDM의 경우에는 시스템의 복잡도의 증가를 최소화 하면서 PAPR을 줄일 수 있는 방식 중의 하나로 알려져 있다. 또한, 그림 2의 반송파 간섭 OFDM 송신기에서 볼 수 있듯이 각 심볼을 사용하는 모든 반송파와 결합하여 전송함으로써 주파수 다이버시티 효과를 개선시킬 수 있다[2]. 식 (2)는 한 개의 심볼에 대한 CI-OFDM 신호를 나타낸다.

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

식 (2)에서 d_k는 QAM 변조된 k번째 심볼을 나타내고, $1/\sqrt{N}$은 정규화를 위한 값이다. Δf는 $1/T_s$로 심볼 구간의 역수를 나타내고, $\Delta\theta_k$는 k번째 심볼과 나머지 $(N-1)$개의 심볼을 구분하기 위한 위상 offset으로 $2\pi k/N$으로 나타낼 수 있다. N개의 심볼 전체의 반송파 간섭 OFDM 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{CI-OFDM}(t)=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=0}^{N-1}d_k\sum_{n=0}^{N-1}e^{j(2\pi n\Delta ft+n\Delta\theta_k)} \quad (3)$$

반송파 간섭 OFDM의 경우에는 각각의 심볼이 직교성을 가지기 위해 각 심볼에 적용된 특정한 위상 offset이 모든 반송파와 결합되어 전송된다. 식 (3)으로 표현된 반송파 간섭 OFDM 신호의 피크 전력은 다른 심볼의 반송파들이 일관되게 더해지지 않으므로 식 (1)로 표현된 OFDM 신호에 비해 작아 PAPR이 낮아진다[3]. 반송파 간섭 OFDM 신호는 중계기내의 비선형 특성을 나타내는 TWTA와 같은 고출력 증폭기를 거쳐 채널을 통해 ● 곡과 감쇠와 지연을 겪게 된다. 수신 신호 $r(t)$는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t)=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=0}^{N-1}d_k\sum_{n=0}^{N-1}\gamma_n e^{j(2\pi n\Delta ft+n\Delta\theta_k+\phi_n)}+n(t) \quad (4)$$

식 (4)에서 γ_n과 ϕ_n은 n번째 반송파의 고출력 증폭기의 왜곡을 포함한 채널의 감쇠와 위상 특성을 각각 나타낸다. $n(t)$은 부가 백색 가우시안 잡음을 나타낸다.

그림 3은 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

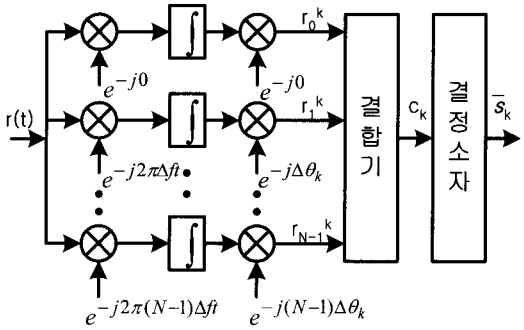

그림 3. 반송파 간섭 OFDM 수신기
Fig. 3. CI-OFDM receiver.

(5)와 같고, 각각의 입력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r^k = (r_0^k,\ r_1^k,\ \cdots, r_{N-1}^k) \tag{5}$$

$$r_i^k = \frac{1}{\sqrt{N}}\gamma_i d_k + \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=0, n\neq k}^{N-1}\gamma_n d_k e^{j(i(\Delta\theta_k - \Delta\theta_n))} + n_i \tag{6}$$

Ⅲ. 적용된 위성 중계기 특성

통신용 위성 중계기는 그림 4에 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.

중계기에 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 왜 곡 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 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있어 출력 신호 $y(t)$는 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다[4].

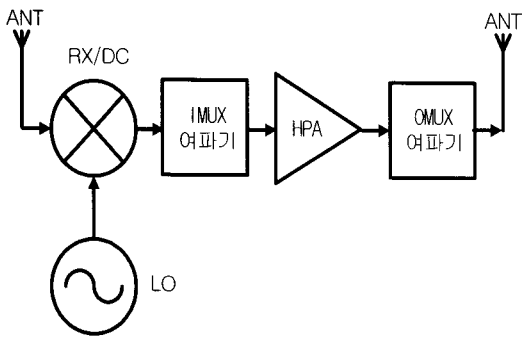

그림 4. 위성 중계기의 기능적인 채널 구성도
Fig. 4. Functional block diagram of satellite transponder.

$$M[A(t)] = \frac{\alpha_A A(t)}{1+\beta_A A^2(t)} \tag{7}$$

$$\Phi[A(t)] = \Phi_0 \frac{\alpha_\phi A^2(t)}{1+\beta_\phi A^2(t)} \tag{8}$$

$$y(t) = M[A(t)]e^{j(\phi(t)+\Phi[A(t)])} \tag{9}$$

여기서 α와 β와 Φ_0는 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.

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 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_g = -\frac{1}{2\pi}\frac{d\theta}{df} = A_0 + A_1 df + A_2 df^2 + \cdots \tag{10}$$

여기서 A_0는 일정한 지연 성분을 나타내고, A_1와 A_2 등은 선형이나 포물선형 등과 같은 여러 가지 군 지연 성분을 나타낸다[5]. 실제로 군 지연 특성을 신호의 위상 형태로 식 (11)과 같이 모의실험에 적용할 수 있다.

$$\theta((k+1)df) = \theta(kdf) + 2\pi t_g(kdf) \tag{11}$$

Ⅳ. 모의실험과 결과

모의실험에 적용한 데이터는 36 MHz 중계기 대역폭에 120 Mbps의 정보를 16 QAM을 적용하여 30 Msps의 심볼을 64개의 부반송파를 이용하여 전송하는 것으로 설정하였다. 순환적인 보호 구간은 초기 심볼 구간의 1/4을 적용하였으며, 여파기 특성을 적용하기 위하여 심볼 당 8개의 표본으로 확장하였다. 채널 부호화를 위하여 1/2 길쌈부호화 방식을 적용하였다. 그림 5는 적용한 HPA의 AM-AM 및 AM-PM

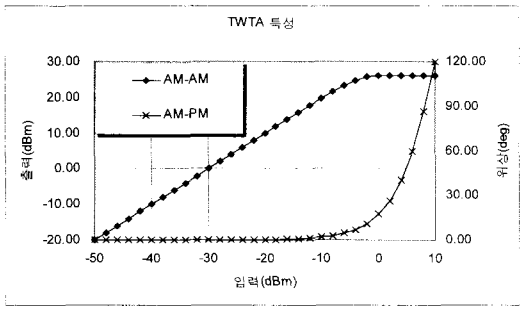

그림 5. 고출력 증폭기 특성
Fig. 5. Characteristic of HPA.

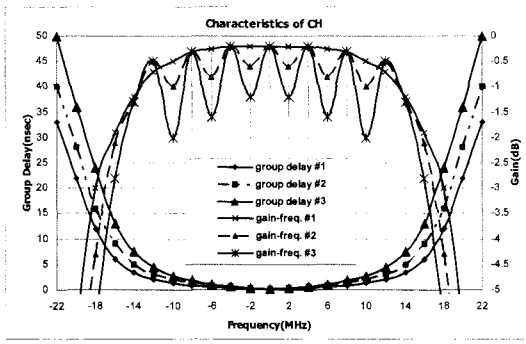

그림 6. 대역내 군 지연 및 주파수 이득 특성
Fig. 6. Characteristics of group delay and gain-frequency in band.

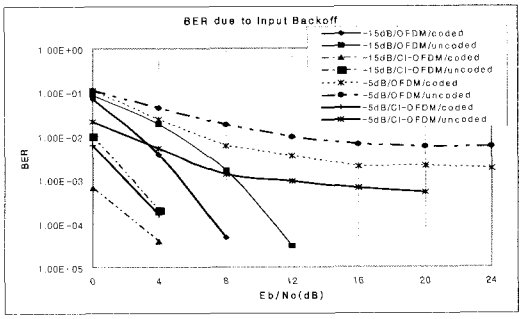

그림 7. 입력 backoff에 따른 비트 오율 특성
Fig. 7. BER due to input backoff.

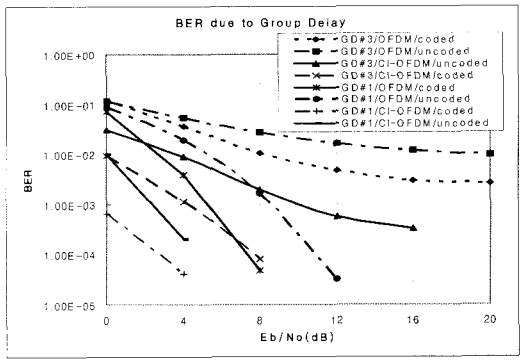

그림 8. 군 지연 특성에 따른 비트 오율 특성
Fig. 8. BER due to characteristics of group delay.

특성을 나타내고, 그림 6은 중계기의 군 지연 및 이득 변동 특성을 나타낸다.

그림 7은 −5 및 −15 dB backoff에서의 성능을 나타낸다. Backoff에 의한 성능 열화가 10^{-2} BER을 기준으로 E_b/N_0가 uncoded OFDM의 경우에 7 dB, coded OFDM의 경우에 4 dB, uncoded CI-OFDM의 경우에 2 dB임을 알 수 있다. CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 −5 dB backoff에서 10^{-2} BER을 기준으로 uncoded의 경우가 10 dB이며, coded의 경우가 7.5 dB 정도이다. −15 dB backoff에서는 10^{-3} BER을 기준으로 uncoded의 경우가 6.2 dB이며, coded의 경우가 6 dB임을 알 수 있다.

그림 8은 중계기의 군 지연 특성에 의한 성능의 변화를 나타낸다. 대역 끝에서 군 지연이 12 nsec에서 24 nsec로 변화함에 따라 성능 열화가 10^{-2} BER을 기준으로 E_b/N_0가 uncoded OFDM의 경우에 14.5 dB, coded OFDM의 경우에 5.3 dB, uncoded CI-OFDM의 경우에 3.5 dB임을 알 수 있다. GD#3의 경우에 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 10^{-2} BER을 기준으로 uncoded의 경우가 16.2 dB이며, coded의 경우가 8 dB이다. 채널 부호화에 의한 성능 개선은 OFDM의 경우는 12 dB이며, CI-OFDM의 경우는 3.8 dB이다. GD#1의 경우에 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 10^{-2} BER을 기준으로 uncoded의 경우에 5.2 dB 정도임을 알 수 있다.

그림 9는 중계기의 이득 변동 특성에 의한 성능의 변화를 나타낸다. 평탄한 이득에서 2 dB의 변동으로 변화함에 따라 성능 열화가 10^{-2} BER을 기준으로 E_b/N_0가 uncoded OFDM의 경우에 0.8 dB, coded OFDM의 경우에 0.6 dB, uncoded CI-OFDM의 경우에 0.4 dB임을 알 수 있다. GF#3의 경우에 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 10^{-3} BER을 기준으로 uncoded의 경우가 7 dB 정도이며, coded의 경우가 6 dB 정도이다. 채널 부호화에 의한 성능 개선은

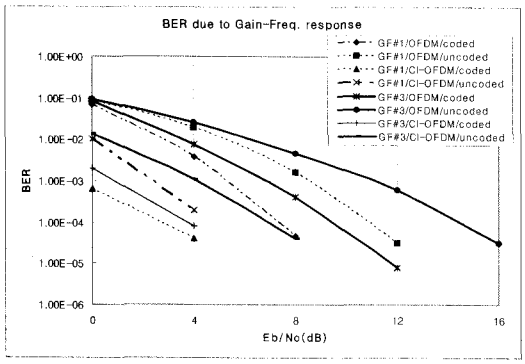

그림 9. 대역내 주파수 이득 특성 따른 비트 오율 특성

Fig. 9. BER due to characteristic of gain-frequency in band.

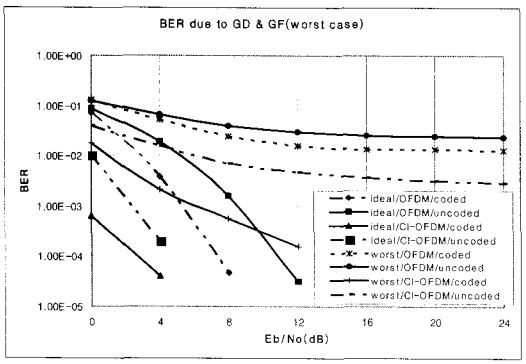

그림 10. 중계기 특성에 따른 비트 오율 특성

Fig. 10. BER due to characteristic of transponder.

OFDM의 경우와 CI-OFDM의 경우 모두가 3 dB 정도이다. GF#1의 경우에 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 10^{-3} BER을 기준으로 uncoded와 coded의 경우 모두 6.3 dB 정도임을 알 수 있다.

그림 10은 중계기의 군 지연 및 이득 변동에 의한 최악 경우와 이상적인 경우에 의한 성능의 변화를 나타낸다. 최악의 경우에 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선의 정도는 10^{-2} BER을 기준으로 coded의 경우에도 25 dB 이상을 나타냄을 알 수 있으며, 채널 부호화에 의한 성능 개선도 CI-OFDM의 경우에 5 dB 정도이다. 이상적인 경우에는 CI-OFDM 적용에 의한 성능 개선이 uncoded와 coded의 경우, 모두 10^{-3} BER을 기준으로 6 dB 정도임을 알 수 있다.

V. 결 론

위성 중계기의 비선형 특성을 포함한 채널 특성을 감안하여 OFDM 기반 위성 통신 시스템에 반송파 간섭 OFDM 및 채널 부호화를 적용하여 성능을 비교함으로써 개선 효과를 분석하였다. 고려된 중계기의 특성은 고출력 증폭기에 의한 비선형 특성과 더불어 여파기에 의한 대역 내의 군 지연 및 이득 변동 특성으로 중계기의 주요 특성을 적용하였다. 일반적인 OFDM을 적용하는 경우와 반송파 간섭 OFDM을 적용하는 경우를 부가 백색 가우시안 잡음 환경에서 중계기의 특성과 지정된 입력 backoff 상태에 따른 BER 성능을 채널 부호화를 적용하여 성능 개선 효과를 비교하였다. 모의실험 결과를 통하여 중계기 내의 성능 열화에 상대적으로 심각한 영향을 미치는 군 지연과 비선형 특성에 대한 반송파 간섭 OFDM과 채널 부호화에 의한 개선 정도가 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 최악의 조건으로 접근할수록 적용한 채널 부호화에 의한 개선보다 반송파 간섭 OFDM에 의한 개선 효과가 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] R. Nee, R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, p. 119, 2000.

[2] D. A. Wiegandt, Z. Wu, and 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, Jul. 2003.

[3] D. A. Wiegandt, C. R. Nassar, and Z Wu, "Overcoming peak-to-average power ratio issues in OFDM via carrier-interferometry codes", *VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, vol. 2, pp. 660-663, Jun. 2001.

[4] 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.

[5] Y. Kim, Y. Song, N. Kim, and D. Park, "Performance analysis of channel impairment in high data rate satellite communication services", *SBMO/IEEE MTT- S IMOC 2001 Proceedings*, vol. 1, pp. 47-50, Aug. 2001.

이 해 선

1984년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
1986년 1월~1991년 7월: 금성전기 (현 LG전자) 연구소
1991년 7월~1998년 2월: 한국통신기술연구소
1998년 2월~현재: 동양공업전문대학 전기전자통신공학부
[주 관심분야] 무선통신시스템, 초고주파공학