

논문-99-4-2-08

디지털 변조 기술을 사용하는 위성방송 신호의 위성 채널 특성에 대한 영향 분석

김영완*, 오덕길*

The Effect of Satellite Channel Impairments in DBS System Using Digital Modulation Technique

Young-Wan Kim* and Deock-Gil Oh*

요 약

본 논문에서는 QPSK 디지털 전송 기술을 사용하는 위성방송 전송 시스템에 대한 위성 채널 특성과 전송 신호 특성에 대한 영향을 분석하여 전송 시스템의 설계 기준점을 결정할 수 있도록 하였다. 전송 채널 특성에 의한 열화도는 약 2.0dB, 전송 신호 스펙트럼 특성에 의한 열화는 0.4dB, 그리고 수신기 특성에 대해 약 0.2dB의 열화 특성을 갖는 위성 및 전송 시스템에 대한 가용 설계 파라미터 값들을 제안하였다. 열화 특성을 만족하는 설계 파라미터 값들은 $\pm 0.5\text{dB}$ 이내의 진폭 응답 특성 그리고 $0.1\text{insec}/\text{MHz}$, $0.2\text{nsec}/\text{MHz}^2$ 이내의 전파 지연 특성을 나타내었다. 또한, 최대 서비스 가용도를 갖는 위성 전송 시스템의 TWTA 동작점은 0dB OBO가 적당하며, 위상 잡음 영향을 최소화하기 위해서는 0.707 damping 계수 및 40kHz 대역폭을 갖는 PLL 회로가 최적의 동작 특성을 나타내었다. 본 논문의 시스템 성능 분석 및 설계 파라미터 값들은 위성을 통한 고속 데이터 전송 시스템에 대한 설계 기준점으로 활용될 수 있다.

Abstract

Based on the performance analyses for transmission channel and signal characteristics in digital satellite broadcasting system, the optimal design parameter values for system using QPSK modulation technique were proposed in this paper. The proper performance degradation were of 2.0dB for channel characteristics, 0.4dB for transmission signal characteristics and 0.2dB for receiver characteristics, respectively. In this case, the design objectives for system parameters were within $\pm 0.5\text{dB}$ for gain flatness in 27MHz bandwidth, and $0.1\text{insec}/\text{MHz}$ and $0.2\text{nsec}/\text{MHz}^2$ for linear and parabolic group delay, respectively. Also, the optimal parameter values that provide the maximum availability were of 0dB OBO for satellite transponder TWTA, and the optimal bandwidth for PLL circuit was of 40kHz with 0.707 damping factor. These analyses and design values can be available for high data rate transmission system via satellite.

I. 서 론

방송 분야에서 디지털 전송 방식은 위성체 전송 능력을 최대한 활용할 뿐만 아니라, 디지털 TV로부터 ISDB 서비

* 전자통신연구원 무선방송기술연구소
Radio & Broadcasting Technology Lab. ETRI.

스 영역까지 광범위한 방송 통신 환경을 제공한다. 영상 압축 기술 및 디지털 변복조 기술 그리고 VLSI 반도체 제조 기술 발달에 따라 디지털 전송 방식은 아날로그 방식에 비해 다채널을 통한 다양한 TV 프로그램을 전송할 수 있다. 고화질의 영상과 음성을 서비스할 수 있는 디지털 위성방송 신호는 전송 채널의 특성 및 수신기 특성에

따라 성능이 열화되며, 수신 임계값 이하에서는 아날로그 방식에 비해 수신 품질이 급격하게 열화되어 디지털 전송 신호의 수신에 어려운 단면이 있다^[1]. 이러한 수신 성능을 열화시키는 요소로는 위성체의 비 선형성 및 대역 제한 특성, 전송 채널의 진폭 및 전파 지연(group delay) 특성, 그리고 수신기 특성 등이 있다^{[2][3]}. 디지털 위성방송 신호의 성능 열화를 분석하기 위하여 위성 트랜스폰더의 비 선형성, 대역 제한 특성에 따른 영향 그리고 디지털 모뎀에 대한 영향 등에 대한 연구가 이루어지고 있다^{[4][5]}. 그러나, 정상적인 전송 채널 열화 요인 분석과 시스템 성능에 대한 종합적인 영향 분석이 필요하다. 즉, 위성을 통한 광대역 디지털 위성 전송 시스템 개발에서는 서비스의 품질과 동작 특성에 영향을 미치는 열화 요인들에 대한 정확한 접근 분석을 통하여 최적의 시스템 설계 파라미터 값을 설정하고 최대의 서비스 가용도를 갖는 전송 시스템을 개발하여야 한다.

본 논문에서는 QPSK 변복조 기술을 사용하는 디지털 위성방송 전송 시스템에 대한 위성 채널 특성의 영향을 분석하고, 최적의 시스템 가용 설계 파라미터를 고찰한다. 위성 채널은 무궁화 위성을 고려하며, 지구국 고풍력 증폭기(HPA)와 위성체 트랜스폰더 TWTA의 비 선형성 특성은 개별적 동작 모드와 상호 직렬의 연동 모드로 모사 분석한 후, HPA 및 TWTA의 최적 동작점을 설정한다. 지상 전송 시스템에 대한 열화 요소들은 독립적으로 고려하여 전송 시스템의 채널 특성을 분석한다. 또한 전송 신호 스펙트럼 특성과 수신기 복조 특성을 분석하여 전송 시스템의 가용 설계 파라미터 값들을 결정하며, 전송 채널의 진폭 응답 특성과 전파 지연 특성에 따른 영향을 분석하여 시스템 설계의 기준점을 제시한다. 본 논문의 무궁화 위성을 통한 디지털 위성방송 시스템의 전송 열화 특성은 고선명 TV 전송 시스템의 채널 특성 분석 및 시스템 설계에 활용될 수 있다.

II. 위성 전송 채널 분석 및 모델링

본 연구에서 분석한 위성 트랜스폰더 특성은 무궁화 위성을 대상으로 한 것이며, 무궁화 위성 채널 특성과 지상 전송 채널 특성을 통하여 시스템 파라미터 영향을 분석한다.

그림 1은 디지털 위성 전송 시스템의 해석을 위한 개념도를 보여주며^{[1][6]}, 기저 대역 신호의 데이터 처리부에 의한 영향은 고려하지 않는다.

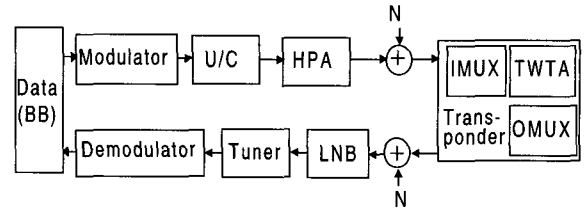


그림 1. 디지털 위성방송 시스템 분석을 위한 개념도.
Fig. 1. Block diagram for analysis of digital DBS system.

1. 위성 채널 특성

위성 트랜스폰더의 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)는 비 선형성 특성을 갖고 있다. 즉, AM/AM 특성과 AM/PM 특성을 갖는다. AM/AM 비 선형성 특성은 입력 신호의 크기에 대한 비 선형성 출력 신호의 크기로 나타나며, AM/PM 특성은 입력 신호의 크기에 대한 위상 변화로 표현된다. 무궁화 위성 트랜스폰더 TWTA의 AM/AM, AM/PM 특성은 그림 2에 나타나 있다^[1]. 비 선형성 영향은 그림 3과 같은 quadrature 모델을 사용하여 분석한다^[7].

입력 신호를 식 1)과 같이 표현하면,

$$x(t) = B(t) \cos[\omega_c t + \theta(t)] \tag{1}$$

트랜스폰더의 출력 신호 $y(t)$ 는

$$y(t) = Z_p(B) \cos(\omega_c t + \theta) - Z_q(B) \sin(\omega_c t + \theta) \tag{2}$$

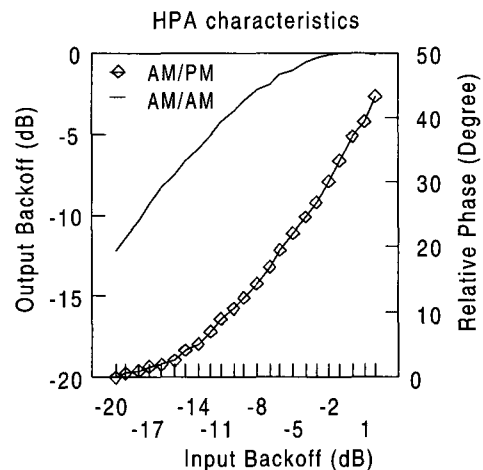


그림 2. TWTA 비 선형 특성.
Fig. 2. Nonlinear characteristic of TWTA.

이다. 여기서 Z 함수는 다음 식 3)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_p(B) &= C_1 e^{-C_2 B^2} I_0(C_2 B^2) \\ Z_q(B) &= S_1 e^{-S_2 B^2} I_1(S_2 B^2) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, I_0 와 I_1 은 modified Bessel 함수이며, C_1, C_2, S_1 그리고 S_2 는 그림 2의 트랜스폰더 TWTA 특성으로부터 결정되는 상수이다.

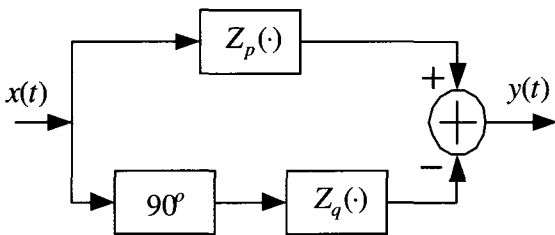
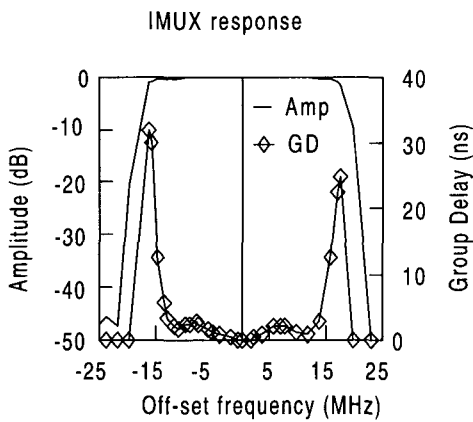
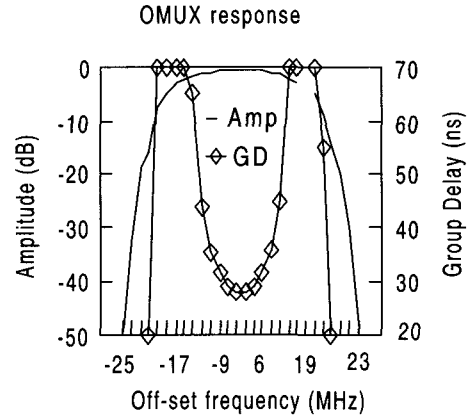


그림 3. 비 선형 증폭기의 분석 모델.
Fig. 3. Model of a nonlinear amplifier.

QPSK 변조 신호가 비 선형성 채널을 통과할 경우, 송신기의 raised cosine 필터에 의해 억압된 QPSK 변조 신호의 부엽 신호(sidelobe) 성분이 복원되어 인접 채널에 간섭 신호로 작용할 수 있다. 따라서, 전송 채널 대역폭으로 신호를 제한하는 트랜스폰더의 송신 채널 필터(OMUX)가 필요하다. 또한, 다른 지구국 및 간섭원으로부터 입력되는 불필요한 신호를 제거하는 입력 채널 필터(IMUX)가 필요하다. 그림 4는 무궁화 위성의 트랜스폰더에 사용하는 IMUX/OMUX 대역 특성을 나타낸다^[1].



(a) IMUX



(b) OMUX

그림 4. IMUX/OMUX 특성 (a) IMUX, (b) OMUX.
Fig. 4. Characteristics of IMUX/OMUX (a) IMUX, (b) OMUX.

대역 통과 주파수 대역에서 IMUX의 진폭 및 전파 지연의 변화는 무시할 수 있을 정도이나, 전파 지연의 리플(ripple) 특성은 다소의 변화를 갖는다. OMUX의 전파 특성은 등화되지 않은 특성을 보여주고 있다. 그러나 IMUX와 OMUX의 상호 동작에 의해 전파 지연의 리플이 완화되는 지연 특성을 갖는다. 위성 트랜스폰더의 IMUX/OMUX 3dB 대역폭은 각각 36MHz와 35MHz이며, IMUX는 6차 elliptic 필터로 구성되어 있으며 OMUX는 5차 elliptic 필터로 구성되어 있다. 위성 트랜스폰더의 대역 제한 특성과 지연 특성을 동시에 모델링하여 성능을 분석한다.

2. 전송 채널 특성

(1) 전파 지연 및 진폭 응답 특성

위성 트랜스폰더의 지연 왜곡 특성 이외에, 전송 시스템의 전파 지연(group delay) 왜곡 및 진폭 응답 특성이 지구국 전송 시스템의 필터부에서 발생한다. 전파 지연은 주파수에 대한 위상의 변화율로 정의되며,

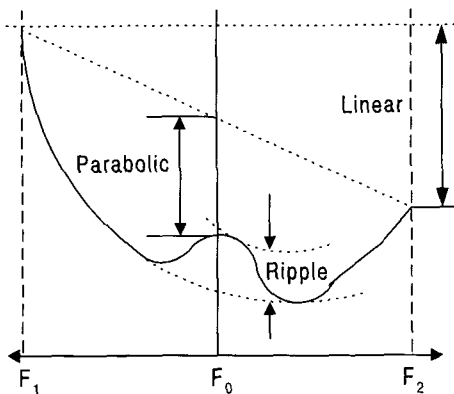
$$Group\ delay \equiv \frac{\delta\theta}{\delta f} \quad (4)$$

전송 시스템 필터의 가장 자리에서 전파 지연이 가장 크게 나타난다. 전파 지연 특성 및 진폭 응답 특성은 송신기의 변조부에서부터 수신기의 복조부까지 고려하며, 전파 지연 특성은 식 5)와 같이 선형 지연 왜곡(linear delay distortion), 파라볼릭 지연 왜곡(parabolic delay distortion)

그리고 리플(ripple) 성분으로 표현할 수 있다^[1].

$$Group\ delay = A_0 + A_1 df + A_2 df^2 \quad (5)$$

여기서, A_0 는 상수 지연(constant delay) 값이며, A_1, A_2 는 선형 지연 및 파라볼릭 지연 상수이며, 단위는 각각 $nsec/MHz, nsec/MHz^2$ 이다. df 는 전송 채널 주파수로서, 채널 대역폭은 27MHz이다.



F_1, F_2 : 채널 대역 주파수

그림 5. 전파 지연 특성 모델.
Fig. 5. Model for group delay characteristics.

선형 지연, 파라볼릭 지연 그리고 리플 지연 특성은 해당 주파수 대역에서 가장 특성이 열화되는 값으로 모델링한다. 또한, 진폭 변화에 대한 왜곡은 전송 채널 대역폭에서의 이득 특성을 나타내며, 진폭 응답 특성을 27MHz 주파수 대역에 대한 dB/MHz 단위로 고려한다.

(2) 위상 잡음 및 스펙트럼 impurity 특성

디지털 위성방송 시스템의 성능을 열화시키는 위상 잡음 및 스펙트럼 impurity는 전송 시스템의 국부 발진기 및 혼합기 등에 의해 발생된다^[8].

위상 잡음 및 스펙트럼 impurity 성분을 갖는 수신기 입력 신호로 식 6)과 같이 표현하면^[9],

$$S(t) = A(1 + \epsilon(t)) \cos(2\pi f_c t + \phi(t)) \quad (6)$$

여기서, $\phi(t)$ 는 랜덤 위상 잡음과 스푸리어스 성분이며, $\phi(t) = \delta\phi \sin 2\pi f_m t + \sum a_i \sin 2\pi f_i t$ 이다. 또한, $\epsilon(t)$ 는 순시적인 진폭 변조 성분을 나타낸다.

랜덤 위상 잡음에 의한 신호 파형을 다음과 같이 정의

$$S_p(t) = A(t) \sin[2\pi f_c t + \delta\phi \sin 2\pi f_m t] \quad (7)$$

하고 식 7)을 전개하면

$$S_p(t) = A(t) [\sin \omega_o t \cos(\delta\phi \sin \omega_m t) + \cos \omega_o t \sin(\delta\phi \sin \omega_m t)] \quad (8)$$

이며, 여기서, $\omega_o = 2\pi f_c t$ 이며, $\omega_m = 2\pi f_m t$ 이다.

위상 변이량 $\delta\phi$ 가 적다면, 식 8)은 다음 식과 같이 전개할 수 있다.

$$S_p(t) = A(t) [\sin \omega_o t + \frac{\delta\phi}{2} \sin(\omega_o + \omega_m)t - \frac{\delta\phi}{2} \sin(\omega_o - \omega_m)t] \quad (9)$$

식 9)는 반송파 신호 전력과 위상 잡음에 의한 측파대 신호 전력으로 구분된다. 위상 잡음을 스펙트럼 밀도와 같은 간접적인 표현식으로 식 10)과 같이 정의하면,

$$L_\phi(fm) = \frac{P_{SSB}}{P_C} \quad (dBc) \quad (10)$$

여기서, P_C 는 반송파 신호 전력이며, P_{SSB} 는 측파대 신호의 위상 잡음 전력을 나타낸다.

식 10)과 위상 변동의 평균 제곱 전력($\Delta\phi^2(f_m)$)과의 관계에 의해 위상 잡음의 표준 편차(standard deviation)는 식 11)에 의해 구할 수 있다.

$$\sigma_{rmspn} = \sqrt{2} \times 10^{\left(\frac{L_\phi(dBc)}{20}\right)} \quad (rad) \quad (11)$$

QPSK 복조부에서 위상 잡음의 크기 또는 위상 잡음의 variance는 반송파 복원회로의 PLL(Phase Locked-Loop) 대역폭에 의해 결정된다.

즉, 식 12)와 같이 주파수 영역에 대한 위상 에러의 variance는 요구 주파수 영역을 적분하여 구할 수 있다.

$$\sigma_\epsilon^2 = \sigma_\phi^2 + \sigma_n^2 = 2 \int_0^\infty L_\phi(\omega) |1 - H(j\omega)|^2 df + \frac{B_n}{vM(C/N)_i} \quad (12)$$

여기서, ν 는 반송과 복원회로의 remodulation 또는 주파수 체배에 의한 C/N 값의 손실이며, M은 입력 필터에 의한 C/N 값의 손실이다.

또한, 능동 2차 루프의 함수

$$H(s=j\omega) = \frac{AK(s+s_1)}{s^2+AKs+AKs_1} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

이며, 단측과대의 폐회로 잡음 대역폭

$$B_n = \int_0^\infty \frac{1+(2\xi\omega/\omega_n)^2}{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2+[2\xi(\omega/\omega_n)]^2} df \quad \text{이다}^{[10]}.$$

식 12)로부터 PLL 대역폭이 증가하면 위상 잡음에 의한 영향은 작아지나 백색 가우시안 잡음에 의한 영향은 증가함을 알 수 있다. 따라서, 위상 잡음 및 수신 잡음 크기에 따라 최적의 잡음 대역폭 설정이 필요하다. 식 12)로부터 위상 잡음 및 백색 가우시안 잡음에 의한 열화는 식 13)에 의해 구할 수 있다^[11].

$$P_{QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}), \quad r = \frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{R} \quad (13)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_p^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_i^{-1}, \quad \left(\frac{C}{N}\right)_p = \frac{1}{2\sigma_\epsilon^2}$$

여기서, B 는 나이퀴스트 대역폭이며, E_b/N_0 는 데이터 비트당 에너지대 잡음 스펙트럼 밀도(density)이다. 또한, R 은 전송 데이터율이며, $(C/N)_i$ 은 입력 신호 전력 대 잡음 전력의 비이다.

스푸리어스 신호에 의한 열화는 스푸리어스 신호를 부가 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise)이라 하면 스푸리어스 신호에 의한 열화도 $(N_0+N_{0sp})_{dB} - (N_0)_{dB}$ 는 식 14)에 의하여 구할 수 있다.

$$Deg_{sp} = 10 \log \left[1 + \frac{N_{0sp}}{N_0} \right] = 10 \log \left[1 + \frac{E_b/N_0}{2C/N_{sp}} \right] \quad (14)$$

여기서, N_{0sp} 는 스푸리어스 잡음 밀도이며, N_{sp} 는 스푸리어스 잡음 전력으로 $2RN_{0sp}$ 이다.

또한, 순시적인 진폭 변조에 의한 영향을 평균값이 영(零)인 백색 가우시안 잡음으로 고려하고, 부수적인 진폭

변조가 신호 전송의 1/2 동안 발생한다면, 진폭 변조에 의한 손실은

$$Deg_{am} = 10 \log \left[1 - \frac{\epsilon_{AM}}{2} \right] \quad (15)$$

이다. 여기서, ϵ_{AM} 은 시스템 규격에 정의된 신호 전력의 백분율(%)로 나타난다.

(3) 수신 I/Q 채널 특성

입력 변조 신호는 그림 6의 수신 복조부에 의해 I/Q 채널로 분리되어 복조된다. 복조부에 입력되는 QPSK 변조 신호를 I/Q 채널 신호로 표현하면^[12],

$$S(t) = A[d_1(t) \cos \omega_c t + d_2(t) \sin \omega_c t] \quad (16)$$

여기서, $d_1(t)$, $d_2(t)$ 는 I/Q 채널의 데이터이며, ± 1 의 값을 갖는다.

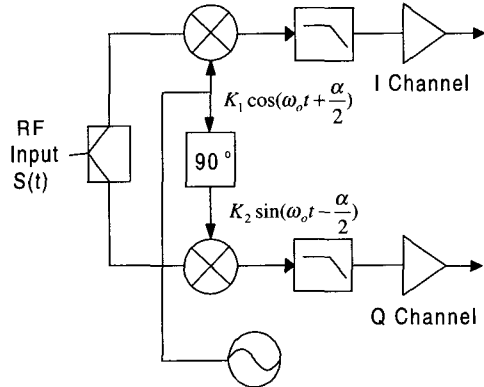


그림 6. QPSK 복조부.
Fig. 6. Block diagram of QPSK demod.

I/Q 채널의 이득 및 위상차를 표현하기 위하여, I/Q 채널에 입력되는 국부 발진 주파수 신호의 이득 및 위상차를 그림 6)과 같이 하여 I/Q 채널 신호로 분리하면 다음과 같다.

$$I \text{ channel} : S(t) \times 2K_1 \cos(\omega_c t + \frac{\alpha}{2}) = AK_1 [d_1(t) (\cos(\frac{\alpha}{2}) + \text{harmonic}) + d_2(t) (-\sin(\frac{\alpha}{2}) + \text{harmonic})] \quad (17a)$$

$$\begin{aligned}
 Q \text{ channel} &: S(t) \times 2K_2 \sin(\omega_b t - \frac{\alpha}{2}) \\
 &= AK_2 [d_1(t) (\sin(\frac{\alpha}{2}) + \text{harmonic}) \\
 &\quad + d_2(t) (\cos(\frac{\alpha}{2}) + \text{harmonic})] \quad (17b)
 \end{aligned}$$

여기서, K_1, K_2 는 각각 I/Q 채널의 이득을 나타내며, α 는 I/Q 채널의 위상차를 나타낸다.

I/Q 채널부의 저역 통과 필터를 통과하면 I/Q 채널의 기저 대역 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I \text{ channel} &: AK_1 [d_1(t) \cos \frac{\alpha}{2} - d_2(t) \sin \frac{\alpha}{2}] \\
 Q \text{ channel} &: AK_2 [-d_1(t) \sin \frac{\alpha}{2} + d_2(t) \cos \frac{\alpha}{2}] \quad (18)
 \end{aligned}$$

식 18)에 의하면 이득 및 위상차에 의해 I/Q 채널신호는 직교성 관계를 벗어나 채널 상호간 간섭 현상(ISI)이 발생한다. 따라서, I/Q 채널간의 이득 및 위상차로 발생하는 간섭 현상에 의한 데이터 오류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{G,P} &= \frac{1}{2} Q \left[\sqrt{\frac{2E_b'}{N_0}} (\cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2}) \right] \\
 &\quad + \frac{1}{2} Q \left[\sqrt{\frac{2E_b''}{N_0}} (\cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2}) \right] \quad (19) \\
 Q(y) &\equiv \int_y^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz
 \end{aligned}$$

여기서, E_b', E_b'' 는 I/Q 채널 데이터의 비트당 에너지이다.

또한, 위성 채널을 사용하는 수신기는 고 안정의 주파수 특성을 갖는 국부 발진기를 사용하고 있으나, RF 입력 신호의 반송파 신호 주파수와 국부 발진 신호 주파수간의 주파수 편차가 발생할 수 있다. 주파수 편차에 의한 I/Q 채널의 신호는 입력 신호 16)과 식 18)로부터 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I \text{ channel} &: AK_1 [d_1(t) \cos \delta\omega(t) - d_2(t) \sin \delta\omega(t)] \\
 Q \text{ channel} &: AK_2 [-d_1(t) \sin \delta\omega(t) + d_2(t) \cos \delta\omega(t)] \quad (20)
 \end{aligned}$$

여기서, $\delta\omega(t)$ 는 주파수 편차이다.

주파수 편차에 의한 오류 특성은 식 19)로부터 구할 수 있으며, I/Q 채널의 위상차보다 수신기의 성능을 더 열화시킨다.

또한, 타이밍 복원회로 또는 DSP(Digital Signal Processor)부에 구현한 알고리즘은 주파수 편차에 의한 영향을 상당히 많이 받으며, 등화기(equalizer)를 사용하는 수신기는 수십 Hz의 주파수 편차에도 큰 영향을 받는다.

III. 성능 분석

디지틀 위성방송 시스템의 성능을 분석하기 위한 시스템 파라미터 및 특성은 표 1과 같다.

표 1. 디지틀 위성방송 시스템의 채널 특성.
Table 1. Channel characteristics of digital broadcasting system.

전송 파라미터		특성
변조 방식		QPSK
데이터율		42.6Mbps
채널 대역폭		27MHz
롤오프 계수		0.35
요구	C/N	10.3 dB
	BER	10 ⁻³
위상 잡음	100Hz	-17dBc
	1kHz	-46dBc
	10kHz	-71dBc
	100kHz	-90dBc
	1MHz	-102dBc
	10MHz	-108dBc

1. 위성 채널 특성 분석

위성 트랜스폰더의 비 선형성 특성에 대한 성능은 그림 7에 나타나 있다.

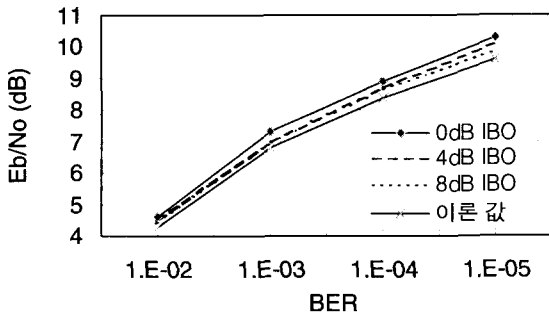
비 선형 증폭기의 백오프(back-off)에 대한 영향은 입력 백오프를 설정하여 분석하였다. 그림 4에서와 같이 위성 트랜스폰더의 IMUX /OMUX는 나이퀴스트 대역폭보다 넓은 대역 특성을 갖고 있으므로, 증폭기의 비 선형성에 의해 발생하는 변조 신호의 복원 스펙트럼을 제한하는 OMUX의 대역 제한 특성에 의한 영향은 무시할 수 있다. 그러나, 채널 대역폭내에서 OMUX가 갖는 파라볼릭 지연에 의해 열화 특성이 지배적으로 나타나며, 약 1.0dB의 열화가 IMUX/ OMUX 전파 지연 특성에 의해 나타난다.

일정한 진폭 크기 특성을 갖는 QPSK 신호는 대역 제한 및 비 선형성에 의해 I/Q 채널 신호의 왜곡과 AM 성분이 발생하여 채널간 간섭 현상이 발생한다. 즉, 출력 신호가 일정한 진폭 크기 신호를 유지하기 위해서는 I 또는

Q 기저 신호의 레벨 천이(transition) 지점에서 다른 채널의 신호에 영향을 가져와 신호의 천이 지점에서 심한 crosstalk 현상이 발생한다. 그러나, QPSK 신호의 신호 검파(sampling point)는 crosstalk가 최소가 되는 지점 즉, I/Q 채널의 신호 천이가 일어나는 지점이 아니므로 I/Q

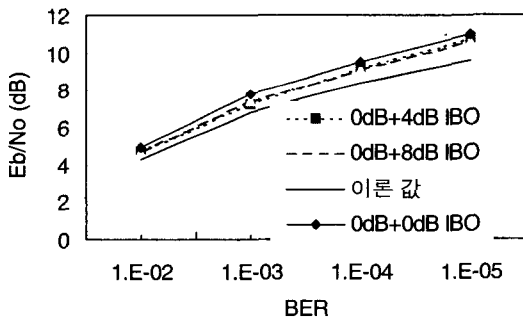
비의 HPA를 TWTA 모델로 분석할 경우 즉, 같은 모델의 TWTA와 HPA가 연동하는 경우 TWTA와 HPA의 복합 작용에 의해 I/Q 성상도가 더욱더 왜곡되어 열화가 증가하며, 이러한 복합 작용에 의한 열화도 특성을 그림 7b)에 나타내었다. 포화 영역에서 동작하는 경우 복합 작용에 의해 10^{-3} BER 값에서 1.0dB의 열화가 발생한다. 그러나, 지구국 HPA 장비는 충분한 백오프 상태에서 동작하므로 지구국 HPA 장비에 의한 비선형성 열화는 무시할 수 있다.

TWTA 비 선형성에 의한 열화도



(a) Single operation

TWTA+HPA 비 선형성에 의한 열화도



(b) Tandem operation

그림 7. 고출력 증폭기의 비 선형 특성에 의한 열화 특성 (a) single, (b) tandem operation.

Fig. 7. Degradation characteristics due to nonlinear characteristics of HPA (a) single, (b) tandem operation.

채널 신호의 레벨 천이가 일어나는 지점에서 Q/I 채널 신호 검파를 하는 OQPSK 변조 방식에 비해 대역 제한과 비 선형성에 의한 영향이 매우 적다. 그림 7a)에 의하면, TWTA를 포화 영역 (0dB OBO)에서 동작시킬 경우, 열화도는 10^{-3} BER 값에서 0.5dB 정도가 나타난다. 따라서, QPSK 신호 전송시에는 위성의 용량을 최대한 활용하기 위하여 포화영역을 사용할 수 있다. 또한 지구국 전송 장

2. 전송 채널 특성 분석

전송 시스템의 진폭과 전파 지연 왜곡에 의한 열화도는 표 2에 나타나 있다.

표 2. 진폭 응답 및 전파 지연 특성에 의한 열화도.

Table 2. Degradation effects for amplitude response and group delay characteristics.

(a) 진폭 응답에 의한 열화도.

dB/MHz	0.02	0.06	0.1	0.15	0.2	0.25
열화(dB)	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	1.4

(b) 선형 지연 왜곡에 의한 열화도

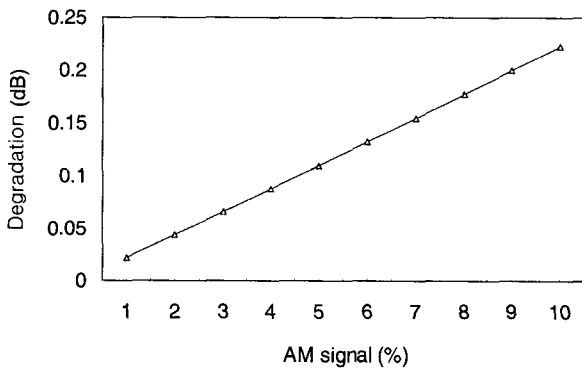
nsec/MHz	0.2	0.4	0.6	1.0	1.2	1.5
열화(dB)	0.2	0.5	0.6	1.1	1.3	1.6

(c) 파라볼릭 지연 왜곡에 의한 열화도

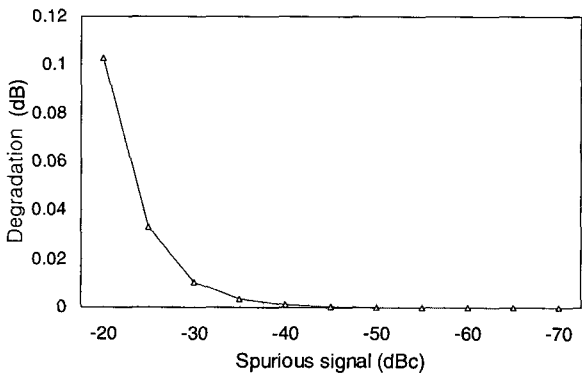
nsec/MHz ²	0.1	0.15	0.2	0.4	0.5
열화(dB)	0.2	0.5	0.6	1.1	1.3

27MHz 채널 대역폭에서 42.6Mbps의 전송율을 갖는 QPSK 신호의 전파 지연 특성을 선형 지연과 파라볼릭 지연 특성으로 모델링하여 각각 독립적으로 영향을 분석하였으며, 진폭 응답 특성은 27MHz 대역내의 이득 평탄도를 기준으로 분석하였다. 전송 데이터율이 증가할수록 전파 지연에 의한 영향은 증가하며, 디지털 데이터는 선형 및 파라볼릭 전파 지연으로 인하여 전송 데이터 및 I/Q 채널의 직교성 관계가 왜곡되어 열화가 지배적으로 발생된다.

진폭 응답 특성에 대한 영향은 표 2와 같이 27MHz 채널 대역폭내의 진폭 응답 특성이 $\pm 0.5\text{dB}$ 일때 약 0.1dB의 열화가 나타나지만, 전파 지연에 의한 왜곡보다는 상대적으로 영향이 작다. 여기서, 시스템 가용 설계 목표로 선형 및 파라볼릭 왜곡에 의한 열화도를 각각 0.2dB, 진폭 응답에 대한 열화를 0.1dB로 할 경우, 각각 0.2nsec/MHz, 0.1nsec/MHz² 이하의 전파 지연 특성과 $\pm 0.5\text{dB}/27\text{MHz}$ 이내의 이득 특성을 만족하도록 전송 시스템의 전달 특성을 설계하여야 한다.



(a)



(b)

그림 8. 전송 신호의 스펙트럼 특성에 의한 열화도 (a) 진폭 변조 신호 영향, (b) 스퓨리어스 신호 영향
Fig. 8. Degradation characteristics due to spectrum impurity (a) effect due to AM signal, (b) effect due to spurious signal

그림 8은 전송 신호의 스펙트럼 특성에 대한 열화도를 보여준다. 스퓨리어스 신호에 의한 영향은 위성 수신 신호가 임계값 근처일 경우 현저하게 나타나며, 열화를 최소화하기 위해서는 약 -50dBc 이하의 특성을 만족하여야 한다

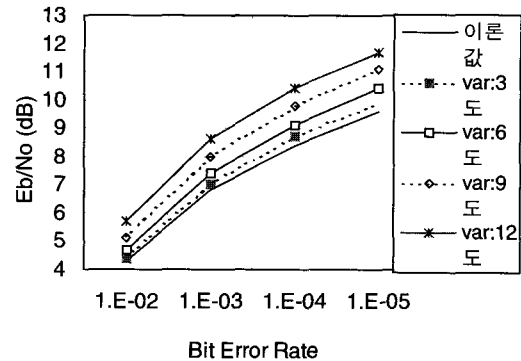


그림 9. 위상 에러 variance에 의한 열화도.
Fig. 9. Degradation characteristics due to phase error variance.

다. 또한, 진폭 변조 신호 성분에 의한 영향은 무시할 수 있으나, 진폭 변조 성분이 증가할수록 열화도가 증가함을 알 수 있다. 0.1dB 이하의 열화 특성을 갖기 위해서는 4.6% 이하의 진폭 변조 신호 성분으로 제한하여야 한다.

그림 9는 위상 잡음 및 백색 가우시안 잡음에 의한 영향을 보여주고 있다.

표 1과 같이 10.3dB의 입력 신호 C/N 값과 요구 위상 잡음을 고려하면 백색 가우시안 잡음에 의한 영향보다는 위상 잡음에 의한 영향이 지배적으로 작용한다. 따라서 식 12)에 따라 작은 반송파 복원회로 PLL 대역폭을 사용하여 위상 잡음에 의한 영향을 최소화하여야 한다. 여기서, 위상 잡음에 의한 열화가 0.3dB이면, 그림 8로부터 3° 이하의 위상 잡음의 variance를 갖는 반송파 복원회로의 PLL 대역폭을 결정할 수 있어야 한다. 그러나, 반송파 복원회로의 파라미터에 따라 위상 잡음의 영향이 다르게 나타난다.

그림 10은 표 1의 위상 잡음 특성을 이용한 디지털 위

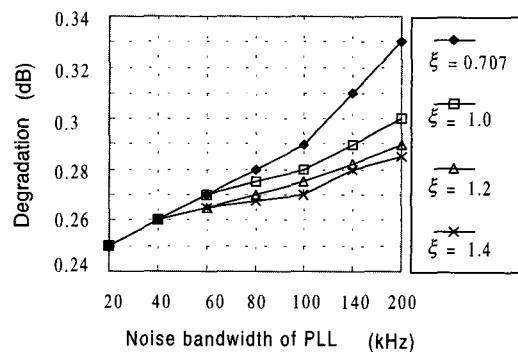


그림 10. PLL 대역폭에 따른 위상 잡음의 열화 특성.
Fig. 10. Degradation characteristics due to phase error for PLL bandwidth

성방송 시스템의 반송파 복원회로 파라미터에 대한 위상 잡음의 영향을 보여준다. 동일한 PLL 대역폭에 대해 루프의 damping 계수가 증가할수록 열화도가 감소하는 것을 알 수 있다.

또한, 위상 잡음 및 반송파 복원회로 파라미터의 영향은 반송파 신호 획득 시간 및 cycle slipping time에 영향을 가져오며, 다음 식 21)과 관련된다^[9].

$$\delta T = \frac{2\delta\omega}{d}, \quad d \leq \frac{\omega_n^2}{2} [1 - 2(CNR_L)^{-0.5}] \quad (21)$$

$$T_{ats} = \frac{1}{B_n} \exp^{-\pi(CNR_L)}$$

여기서, δT 는 반송파 신호 획득 시간이며, $\delta\omega$ 는 주파수 sweep 범위이다. 또한 T_{ats} 는 cycle slip이 발생하는 시점까지의 시간이며, CNR_L 은 반송파 복원회로내의 반송파 신호 전력대 잡음 전력비이다.

따라서, 위상 잡음에 대한 열화 특성 이외에 위성방송 서비스 특성을 만족하는 반송파 복원회로의 PLL 대역폭 선정이 필요하다. 식 21)에 의하면 PLL회로의 damping 계수가 증가할수록 cycle slip 시간이 증가하지만 많은 반송파 신호 획득 시간이 소요된다는 것을 알 수 있다^[9]. 표 3은 반송파 복원회로의 파라미터에 대한 반송파 획득 시간과 cycle slip 시간의 연관성을 보여준다.

표 3. PLL대역폭에 대한 시스템 파라미터의 영향

Table 3. The effects of system parameters due to PLL bandwidth

PLL 잡음 대역폭	damping 계수	반송파 신호 획득 시간	cycle slip 시간(hour)
40kHz	0.707	34msec	3.88x106
	1.0	47msec	4.77x106
	1.2	59msec	5.27x106
50kHz	0.707	22msec	9.54x105
	1.0	31msec	1.28x106
	1.2	39msec	1.48x106

그림 10과 표 3으로부터, 반송파 복원회로는 일정한 열화 특성과 cycle slip 시간을 나타내면서 반송파 획득 시간이 작은 0.707 damping 계수 및 40kHz 대역폭을 사용하여 설계될 수 있다.

수신기 I/Q 채널의 이득 및 위상차에 의한 열화도는 그

림 11과 12에 나타나 있다. I/Q 채널의 이득 및 위상차가 증가할수록 채널간 간섭 현상이 증가하여 데이터의 아이 다이어그램(eye diagram)의 개구율이 낮아져 열화가 증가하며, 정상도가 회전하는 특성을 갖는다.

10^{-3} BER 기준점에서 0.5dB의 열화 특성을 갖는 이득 및 위상차는 각각 1dB 및 7° 근처의 값을 나타내고 있으며, 0.1dB의 열화 특성을 갖기 위해서는 1dB의 이득차와 3° 이내의 위상차를 갖도록 I/Q 채널 특성을 설계하여야 한다.

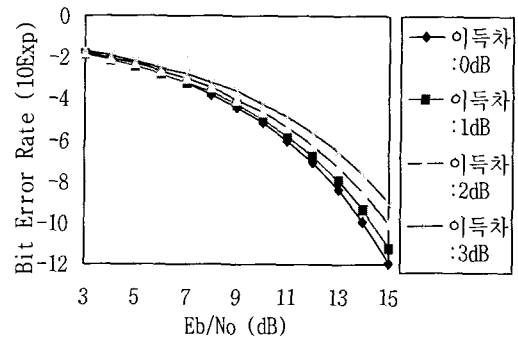


그림 11. I/Q 채널의 이득차에 의한 BER 성능.

Fig. 11. BER characteristics due to gain difference of I/Q channel.

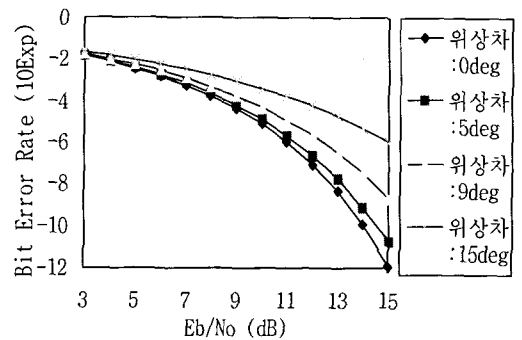


그림 12. I/Q 채널의 위상차에 의한 BER 성능.

Fig. 12. BER characteristics due to phase difference of I/Q channel.

그림 13은 입력 신호와 국부 발진 신호의 주파수 편차에 의한 열화 특성을 보여준다. 주파수 편차에 의한 수신 성능은 I/Q 채널의 이득 및 위상차에 의한 수신 성능보다 더 민감하게 열화하는 특성을 보여주며, 전송 데이터율이 증가할수록 주파수 편차에 의한 영향은 감소한다.

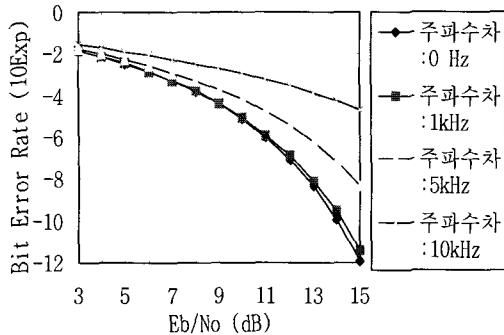


그림 13. 입력 반송파 신호와 국부 발진 신호의 주파수 편차에 의한 BER 성능.

Fig. 13. BER characteristics due to frequency difference between input carrier signal and local oscillator signal

5kHz의 주파수 편차에 대하여 10^{-3} BER 값에서 약 1dB의 열화도를 나타내고 있으며, 주파수 편차는 위상의 시간 변화율이므로 성장도가 회전하는 특성을 나타낸다.

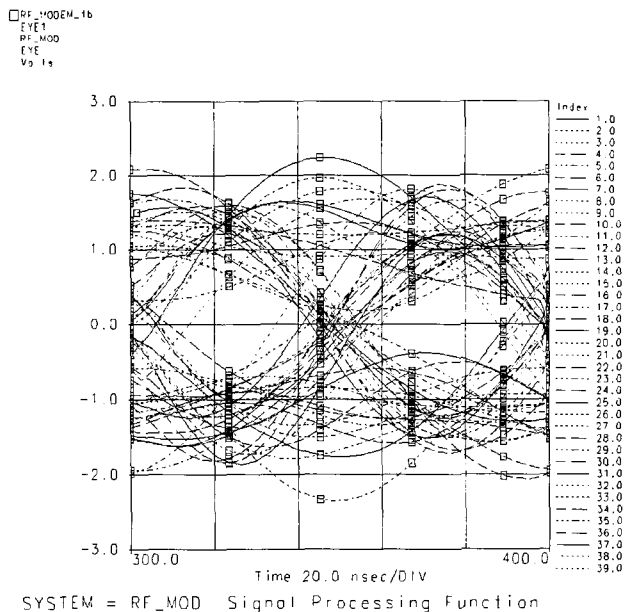


그림 14. 입력 반송파 신호와 국부 발진 신호의 주파수 편차 (10kHz)에 의한 아이 다이어그램

Fig. 14. Eye diagram due to frequency difference(10kHz) between input carrier signal and local oscillator signal

그림 14는 주파수 편차가 10kHz로 증가할 경우, 아이 다이어그램의 개구율이 40% 이하로 낮아져 10^{-3} BER 값에서 약 4.4dB 이상의 열화가 발생함을 보여주고 있다.

IV. 분석 평가

방송 시스템은 최대의 가용도를 위하여 위성 전송 채널과 전송 신호에 의한 열화를 최소화하여 충분한 전송 이득을 확보하여야 한다. 위성을 통한 디지털 방송의 성능은 위성 채널의 비 선형성과 대역 제한 특성에 의해 지배적으로 열화된다. 그러나, 전송 시스템의 특성과 전송 신호에 대한 열화도는 시스템 파라미터 값의 최적 설계로 최소화할 수 있다. 표 4는 열화 요소에 대한 성능 분석값과 요구되는 시스템 파라미터에 대한 기준 설계값을 보여준다.

표 4. 시스템 설계를 위한 요구 파라미터 값 및 열화 성능 값.
Table 4. Required values of system parameters and impairment values in system design.

구분	열화 요소	열화 (dB)	요구 성능
전송 채널	비 선형성	0.5	TWTA: 0dB OBO HPA: 8dB OBO
	I/O MUX지연	1.0	
	진폭 응답	0.1	$\pm 0.5\text{dB}@27\text{MHz}$ 이내
	선형 지연	0.2	0.2nsec/MHz 이내
	파라볼릭 지연	0.2	0.1nsec/MHz ² 이내
스펙트럼 특성	스푸리어스	0.0001	-50dBc 이하
	진폭 변조	0.065	3% 이내
	위상 잡음	0.3	3 σ 이내 PLL 대역폭: 40kHz damping계수: 0.707
수신 특성	I/Q 채널 이득	0.1	1dB 이득차 이내
	I/Q 채널 위상	0.1	3 σ 위상차 이내
	주파수 편차	0	0kHz

무궁화 위성과 유사한 특성을 갖는 위성 트랜스폰더의 비 선형성에 대한 열화도가 약 0.4dB, 그리고 대역 제한 필터(IMUX/OMUX)에 의한 영향이 약 0.9dB인 분석 결과^{[4][5]}와 거의 일치된 결과를 보이고 있다. 또한 수신기 특성에 대한 열화도를 약 0.8~1.5dB의 값으로 추정하고 있으나^[5], 이는 수신기의 총 하드웨어로 인한 손실값을 나타낸 것으로, 본 분석 결과와 기저 대역의 데이터 검출부의 손실을 고려하면 약 0.5dB의 열화를 고려할 수 있다. 이는, 수신기 특성에 의한 열화는 수신 회로의 IC화로 동일한 특성을 갖는 I/Q 채널을 구현하여 최소화될 수 있으

며, 입력 신호와 국부 발진 신호의 주파수 편차에 의한 열화는 고안정의 PLL 회로를 적용하므로 무시할 수 있다. 그리고, 국내 위성방송 시스템의 낮은 전파 지연 및 양호한 스펙트럼 특성으로 인한 열화 감소를 고려하면 2.2dB의 열화 특성을 갖는 무궁화 위성방송 전송 시스템의 링크 측정 결과와 분석 결과가 거의 일치하는 열화 특성을 보여주고 있다.

V. 결론

QPSK 디지털 변복조 기술을 사용하는 디지털 위성방송 전송 시스템에 대한 위성 전송 채널 특성과 전송 신호 특성에 대한 영향을 분석하고, 최적의 시스템 운용 및 가용 설계 파라미터 값을 제안하였다. 지구국 고출력 증폭기와 위성체 트랜스폰더 TWTA의 최적 동작점과 위상 잡음 영향을 최소화하는 반송파 신호 복원회로의 파라미터 값을 설정하였다. 또한 전파 지연 및 수신기 복조 특성을 분석하여 전송 시스템의 설계 기준점을 결정할 수 있도록 하였다. 즉, 전송 채널에 의한 열화도는 약 2.0dB, 전송 신호의 스펙트럼 특성에 의한 열화는 약 0.4dB 그리고 수신기 열화도는 0.2dB의 특성을 가질 수 있도록 위성 및 전송 시스템에 대한 설계 파라미터 값들을 결정하도록 하였다. 본 논문의 디지털 위성방송 시스템의 전송 열화 특성은 고선명 TV 전송 시스템의 채널 특성 분석 및 시스템 설계에 활용될 수 있다.

참고 문헌

- 1] Young-Wan Kim, et al., "The effect of satellite channel impairments in digital signal transmission," *ICT97*, vol. 2, pp. 1133-1137, Australia, 1997.
- 2] Tri T Ha, *Digital satellite communications*, McGraw-Hill, NY, 1986.
- 3] 김영완 외, "무궁화 위성을 이용한 디지털 위성방송 시스템의 링크 설계", *한국통신학회논문지*, 제 20권, 9호 pp. 2513-2523, Sep. 1995.
- 4] Hisakazu Katoh, et al., "A Study on Modulation Scheme for digital Satellite Broadcasting in the 12GHz band," *ITEJ Tech. Rep.*, vol. 16, no. 7, pp. 19-24, Jan. 1992.
- 5] R. De Gaudenzi, et al., "Digital Broadcasting Systems: A New frontier for Satellite Communications," *ESA Journal*, vol. 15, pp. 1-15, 1991.
- 6] K. Feher, *Digital Communications, Satellite/Earth Station Engineering*, Prentice-Hall, NJ, 1983.
- 7] Hetrakal. P., Taylor. D., "The effect of transponder nonlinearity on binary CPSK signal transmission," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-24, no. 8, pp. 546-553, May. 1976.
- 8] Smith A. Rhodes, "Effect of noisy phase reference on coherent detection of offset-QPSK signals," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-22, no. 8, pp. 1046-1055, Aug. 1974.
- 9] Young-Wan Kim, et al., "Circuit Design and Performance Analysis of Carrier Recovery Loop for Digital DBS System in the Presence of Phase Noise," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 45, no. 3, pp. 294-302, Sep. 1999.
- 10] Floyd M. Gardner, *Phaselock Techniques*, John Wiley & Son, 1979.
- 11] John G. Proakis, *Digital communications*, McGraw-Hill, NY, 1989.
- 12] 김영완, "QPSK 변조 신호용 Direct Conversion 수신기의 이득, 위상, 주파수 특성에 따른 성능 분석", *98하계종합학술대회*, vol. 1, pp. 56-59, Jul. 1998.
- 13] J. H. Jo, et al., "Link Analysis for the Koreasat digital DBS system," *International conf. Telecommun.*, vol. 2, pp. 933-938, Apr. 1997.

저 자 소 개

김 영 완

1983년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)

1985년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1997년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1992년 11월 ~ 현재 : 전자통신연구원 지상시스템부(선임연구원)

주관심분야 : 디지털 위성방송 시스템, 디지털 통신, 마이크로 웨이브 수동소자 및 시스템 설계

오 덕 길

1980년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)

1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1996년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1990년 ~ 현재 : 전자통신연구원 지상시스템부장(책임연구원)

주관심분야 : 디지털 위성방송시스템, 디지털 위성통신 등