

디지털 무선중계 장치의 아날로그 기울기 등화기 구현 및 시스템 성능에 대한 연구

A Study of Implementation of Analog Slope Equalizer and Its System Performance for Digital Radio Relay System

서 경 환

Kyoung-Whoan Suh

요 약

본 논문에서는 64-QAM 디지털 무선중계 장치에 적용할 목적으로 주파수 선택적 페이딩 대책 중의 하나인 아날로그 기울기 등화기의 이론적 모델, 구현 및 성능을 제시하였다. 또한 주파수 선택적 페이딩에 대해 기저대역의 채널 모델링을 통해 I 및 Q 채널의 상호간섭을 분석하였고, 이를 근거로 IF 대역에서 아날로그 기울기 등화기 구현을 위한 방법을 유도하였다. 페이딩을 받은 채널에 대해 기울기 등화기의 적용 유무에 따라 시간 및 주파수 영역에서 각각 신호의 영향을 살펴보았다. 그리고 무선중계 장치의 성능을 나타내는 시그니처(signature)를 통해 비트 오류율 10^{-3} 기준으로 신호 대역폭의 가장자리에서 약 6.2 dB 개선됨을 보였다.

Abstract

In this paper, as one of countermeasure techniques for a frequency selective fading, an adaptive analog slope equalizer(ASE) applicable to 64-QAM digital radio relay system is presented in terms of principle, implementation, and its performance. Also interference of cross-talk between I- and Q-channel caused by a frequency selective fading has been analyzed by doing channel model in the baseband, which make it possible to derive the solution for implementing ASE in IF-band. The effects of signal for the faded channel are investigated in the time and the frequency domains, respectively, with/without ASE. As system performance, it is shown that the signature is improved up to 6.2 dB at the edge of signal bandwidth for a given BER 10^{-3} .

Key words : Digital Radio Relay System, Slope Equalizer, Signature, Frequency Selective Fading, Constellation

I. 서 론

동기식 디지털 계위의 무선중계 장치에서는 다중 레벨(multi-level) QAM 및 다중 캐리어(multi-carrier) 기술의 개발로 대용량의 데이터 전송이 가능하게 되었으며, 특히 주파수 효율 향상을 위하여 64-/256-QAM 변조방식이 채택된다^[1]. 하지만 전파경로가 멀어질 경우에는 다중경로에 의한 주파수 선택적 페이딩(fading)으로 인해 장치의 성능 저하가 우려된다^{[2]-[4]}.

일반적으로 디지털 변조된 신호의 IF 대역 스펙트럼은 대역 내에 균일한 정보량을 갖게 되므로 스펙트럼의 분포가 균일하게 된다. 이러한 대역 내외에 다중 경로에 의한 페이딩이 발생하면 변조된 채널의 스펙트럼이 균일하지 않고 기울어지게 된다. 이러한 스펙트럼의 왜곡은 디지털 통신 시스템에서는 치명적인 비트 오류를 발생시켜 통신 품질을 저하시키는 주원인이 된다^{[5],[6]}. 이러한 현상을 방지하기 위해 일반적으로 장거리 무선중계 장치에서는 수신부의 중

강남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Kangnam University)

· 논문 번호 : 20040721-095

· 수정완료일자 : 2004년 10월 1일

간주파수(Intermediate Frequency: IF) 대역에서 공간 다이버시티를 적용한 결합기(combiner), 아날로그 기울기 등화기(Analog Slope Equalizer: ASE), 기저대역에서는 적응 시간영역 등화기(Adaptive Time Domain Equalizer: ATDE) 등이 주로 적용된다^{[7]~[9]}.

주파수 선택적 페이딩이 신호 대역 내에 발생할 경우에는 주로 공간 다이버시티를 이용한 결합기와 적응 시간영역 등화기로 보상하며, 신호 대역 밖에 발생할 경우에는 결합기 및 적응 시간영역 등화기와 연동한 적응 기울기 등화기로 보상하게 된다. 주파수 선택적 페이딩이 신호 대역에 생길 때 신호의 왜곡이 가장 심하게 되는데, 이러한 경우에도 신호 대역에 기울기가 발생하게 된다. 페이딩이 신호 대역의 중심주파수 부근에서 발생하는 경우는 ATDE에 의해 주로 보상이 되지만, 그 외의 경우에는 적응 기울기 등화기에 의해 미리 보상되어야 한다. 적응 기울기 등화기는 ATDE와 연동하여 장치의 성능을 나타내는 시그니처(signature) 또는 M-curve 측면에서 보면 통과대역의 가장자리 영역에서 수 dB 개선을 주어 가용도 개선에 큰 역할을 하고 있다^{[10],[11]}.

본 논문에서는 STM-1급 신호를 전송하는 디지털 무선중계 장치에 적용할 목적으로 페이딩 채널에 대한 기울기 등화기의 디지털 신호를 분석한다. 이를 근거로 적응 아날로그 기울기 등화기의 회로 설계 및 구현에 대해 살펴보고, 구현된 기울기 등화기의 시간 및 주파수 영역에서의 특성과 시스템 성능측면에서 얻은 결과를 제시 및 분석한다.

II. 채널의 디지털 신호 모델링

2-1 페이딩 채널 모델링

그림 1에서 나타난 무선중계 장치는 채널대역 30 또는 40 MHz에 각각 128- 또는 64-QAM 변조방식을 적용하여 STM-1 신호를 송수신할 수 있다. 대개 수신 측의 안테나는 주(main) 및 다이버시티(diversity)로 구성되며, 각각의 수신기에 들어온 신호는 IF 단의 결합기(combiner)에 의해 신호가 더해진다. 주파수 선택적 페이딩에 의해 왜곡된 스펙트럼이 대역 내에서 평탄치 않고 기울기를 가질 때, 아날로그 기울기 등화기에 의해 1차적으로 보정된다. 또한 군지연 등화기(Group Delay Equalizer: GDE)에서는 송수

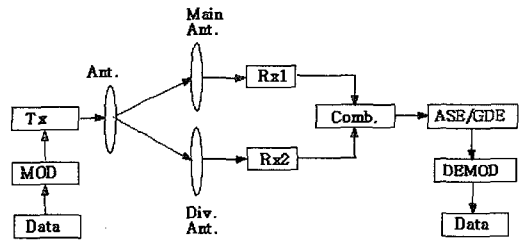


그림 1. 다이버시티 구조의 무선중계 시스템
Fig. 1. Digital radio relay system with diversity.

신기의 도파관 필터에 의해 발생된 군지연 왜곡을 보상하며, 이것의 출력은 복조부의 입력신호가 된다^{[11],[11]}.

무선중계 장치의 수신 안테나에 도달하는 신호는 직접파와 간접파로 구성된다. 이들 신호의 상대적 크기 및 도래 시간에 따라 채널에서 발생하는 페이딩은 최소위상(Minimum Phase: MP) 페이딩과 비최소위상(Non-Minimum Phase: NMP) 페이딩으로 나눈다. 주파수 선택적 페이딩 채널은 Rummler의 2-경로 모델로 주파수 영역에서 다음과 같이 표현된다^{[2],[3]}.

$$H_c(f) = a[1 - be^{-j2\pi(f-f_n)\tau}] \quad (1)$$

여기서 a 는 직접파 신호의 감쇠계수, b 는 복소수로서 두 번째 경로의 위상지연과 감쇠 계수를 나타내며, f_n 은 노치(notch) 주파수를 의미한다. 또한 τ 는 직접파와 간접파 사이의 시간지연을 나타낸다. 주파수 영역에서의 노치 깊이 N_d 는 다음과 같이 정의한다.

$$N_d = -20 \log_{10}(1 - b), \quad 0 < b < 1, \tau > 0: \text{ for MP} \quad (2)$$

$$N_d = -20 \log_{10}\left(1 - \frac{1}{b}\right), \quad b > 1, \tau > 0: \text{ for NMP} \quad (3)$$

일반적으로 페이딩의 영향을 받은 QAM으로 변조된 신호는 복조부에서 송신단과 수신단의 반송파 위상 차이 및 표본화 타이밍의 오차를 무시하면 동위상과 직교위상의 신호는 각각 다음과 같이 복조된다^[12].

$$I_r(t) = a[I(t) - bI(t-\tau)\cos(2\pi f_n\tau)] + abQ(t-\tau)\sin(2\pi f_n\tau) \quad (4)$$

$$Q_r(t) = a[Q(t) - bQ(t-\tau)\cos(2\pi f_n\tau)] + abI(t-\tau)\sin(2\pi f_n\tau) \quad (5)$$

여기서 a 는 균일 페이딩이며, I 및 Q 는 I 및 Q 채

널의 나이퀴스트 펄스 정형(shaping)된 신호를 나타낸다. 식 (4)의 I_r 에 포함되어 있는 $Q(t-\tau)$ 는 ATDE 성능을 저하시키는 원인이 되며, 식 (5)의 Q_r 이 포함된 $I(t-\tau)$ 도 마찬가지이다. 이것에 의한 영향을 주파수 영역에서 살펴보면 통과대역 내의 신호 스펙트럼이 기울어진 형태로 나타난다. 따라서 신호 스펙트럼의 기울어짐을 보상한다면, 식 (4) 및 (5)에서 나타난 상호 간섭을 줄일 수 있어 ATDE의 성능을 향상시킬 수 있게 된다^[11].

2.2 페이딩 채널의 기저대역 신호분석

아날로그 기울기 등화기의 회로 구성을 위해 먼저 채널에 주파수 선택적 페이딩이 발생하였을 때, 디지털 신호 형태로 표현된 기울기 등화기를 살펴보자. 복조부에 수신된 I 및 Q 채널의 신호가 디지털 기울기 등화기(Digital Slope Equalizer: DSE)로 정정되어 출력된 신호를 각각 다음과 같이 표현된다^[12].

$$I_r = x_s I_t + x_c Q_t \tag{6}$$

$$Q_r = x_s Q_t - x_c I_t \tag{7}$$

여기서 x_s 및 x_c 는 식 (4) 및 (5)로부터 각각 다음과 같다.

$$x_s = a - ab \cos(2\pi f_n \tau) \tag{8}$$

$$x_c = ab \sin(2\pi f_n \tau) \tag{9}$$

여기서 다시 x_s 에 대해 정규화하면 수신된 신호 I_r 및 Q_r 은 다음과 같이 송신 신호로 나타낼 수 있다.

$$I_r = I_t + x Q_t \tag{10}$$

$$Q_r = Q_t - x I_t \tag{11}$$

$$x = \frac{b \sin(2\pi f_n \tau)}{1 - b \cos(2\pi f_n \tau)} \tag{12}$$

이며, I_r 및 Q_r 은 수신신호, I_t 및 Q_t 는 송신신호를 나타낸다. 또한 x 는 I 및 Q 상호간의 간섭을 나타내는 임의의 변수이다. 이와 같은 선택적 페이딩 조건 하에서는 xQ_t 나 xI_t 의 값이 I_t 나 Q_t 에 비해 큰 값을 가질 경우, ATDE가 최적의 성능을 갖지 못한다. 따라서 기울기 등화기를 ATDE 앞에 두어 xQ_t 및 xI_t 의 값을 줄일 필요가 있다. 기울기 등화기의 전달함수 특성을

$$I_{out} = I_{input} + x_e Q_{input} \tag{13}$$

$$Q_{out} = Q_{input} - x_e I_{input} \tag{14}$$

으로 만든다면, 기울기 등화기에 의해서 정정된 신호 I_c 및 Q_c 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_c &= I_r + x_e Q_r \\ &= I_t(1 - xx_e) + (x + x_e)Q_t \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} Q_c &= Q_r - x_e I_r \\ &= Q_t(1 - xx_e) - (x + x_e)I_t \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 x_e 는 기울기 등화기의 전달함수 특성을 나타낸다. 식 (15) 및 (16)에서는 $x_e = -x$ 가 되는 경우에 I_c 및 Q_c 에 각각 포함되어 있는 Q_t 및 I_t 에 의한 간섭신호가 상쇄된다. 그러나 실제로 $x_e = -x$ 를 만족하는 x_e 를 찾기가 일반적으로 쉽지 않다. 따라서 x_e 를 통과 대역 내에서 기울기를 구현하고, 이를 제어 가능한 함수로 모델링할 수밖에 없다. 설명 찾았다 하더라도 xx_e 를 포함하는 항은 남게 되어, 비록 그 양이 상대적으로 주 신호에 비해 적기는 하지만 완벽하게 정정되지 못하고 잔류하게 된다.

주파수 영역에서 살펴보면 디지털 기울기 등화기의 전달함수는 IF 단의 중심 주파수 f_{IF} 를 중심으로 sin 함수의 형태이므로, 기저대역에서 구현할 경우 x_e 는 sin 함수이면 된다^{[7],[12]}. 따라서 x_e 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_e = 2a \sin(\omega\tau), \quad (-0.5 \leq a \leq +0.5, \tau \leq \frac{T}{2}) \tag{17}$$

$$1 + 2a \sin(\omega\tau) = e^{j\omega\tau} [e^{-j\omega\tau} - ja(1 - e^{-j2\omega\tau})] \tag{18}$$

여기서 a 는 제어계수를 나타내며, τ 가 $T/2$ 보다 같거나 작아야 하는 이유는 디지털 기울기 등화기의 통과대역이 sin 함수의 반주기 내에 있어야 하기 때

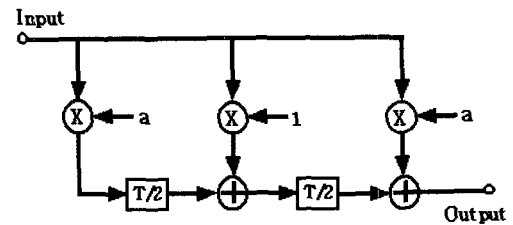


그림 2. 3-tap 선형 위상 트랜스버설 여파기
Fig. 2. 3-tap linear phase transversal filter.

문이다. 따라서 그림 2와 같이 등화기 부분은 $T/2$ -간격의 3-탭(tap) 트랜스버설(transversal) 여파기로 구현할 수 있다^[12].

III. 아날로그 기율기 등화기의 모델링 및 구현

그림 3은 아날로그 기율기 등화기의 동작 원리를 IF 대역에서 개념적으로 설명하기 위해 나타내었다. 기율기 등화기의 입력 신호 $S(f)$ 가 그림에서 3(a)와 같이 기율어진 스펙트럼을 갖는 경우를 생각하자. 그림 3(b)와 같은 적응 기율기 등화기의 전달 함수가 $S(f)$ 의 기율기를 보상하도록 제어 회로를 동작함으로써 최종 출력 신호는 그림 3(c)처럼 평탄한 스펙트럼으로 보정된다.

양호한 IF 기율기 등화기는 진폭 왜곡을 야기하는 주파수 선택적 페이딩의 형태에 무관하게 동작해야 하며, 또한 균지연 왜곡도 없어야 한다. 앞에서 살펴 보았듯이 무선중계 통신에 존재하는 2가지 페이딩 형태에 대응하는 전달 특성은 2개의 트랜스버설 필터로 구성이 가능한데, 하나는 MP 페이딩이며, 나머지는 NMP 페이딩에 해당한다^{[7],[9]}. 기율기 등화기의 구현을 위해 MP 페이딩 및 NMP 페이딩 특성을 갖는 채널은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$H_m(w) = 1 + \rho e^{-jw\tau} \quad (19)$$

$$H_{nm}(w) = \rho + e^{-jw\tau} \quad (20)$$

여기서 ρ 는 반사 계수에 해당하는 것으로 -1에서 +1 사이의 값을 갖는 실수이며, w 와 τ 는 각각 신호 대역의 각주파수와 지연 시간을 의미한다. 전체 응답특성은 두 식을 곱하여 다음과 같은 식을 얻을 수

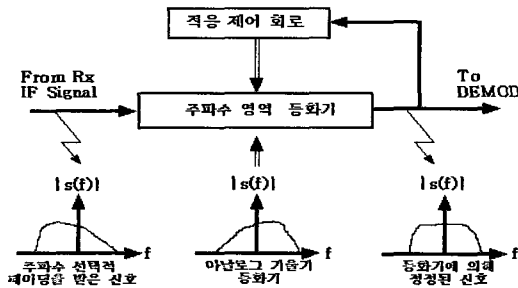


그림 3. 적응 기율기 등화기의 기본 개념
Fig. 3. Basic concept of adaptive slope equalizer.

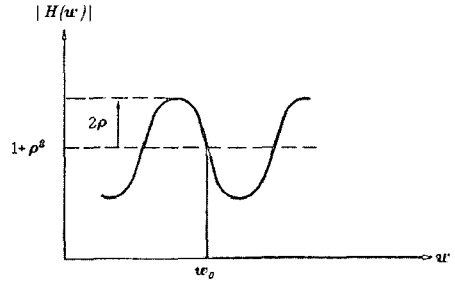


그림 4. 전달함수의 응답특성 ($-1 \leq \rho \leq +1$)
Fig. 4. Characteristics of transfer function ($-1 \leq \rho \leq +1$).

있다.

$$H(w) = H_m H_{nm} = e^{-jw\tau}(1 + \rho^2 + 2\rho \cos w\tau) \quad (21)$$

여기서 $e^{-jw\tau}$ 는 위상 지연에 해당하는 양이다. 신호의 기율기를 변화시키는 것은 식 (21)의 괄호안의 양이며, 이것은 제 II장의 디지털 기율기 등화기의 전달특성인 식 (17)과 매우 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 그림 4에서는 반사 계수 ρ 에 따른 식 (21)의 전달함수 크기를 나타낸 것으로 신호의 기율기를 조정할 수 있음을 보여준다. 즉, $w\tau$ 가 $\pi/2$ 일 때 최대의 기율기 변화폭을 주며, τ 는 $\cos w_0\tau = 0$ 가 되도록 선정되며 다음과 같다.

$$\tau = \frac{2k+1}{4f_0} \quad (22)$$

여기서 f_0 는 채널의 중심 주파수이다.

그림 5는 식 (21)의 전달 함수에 대해 회로 구현이 가능한 간단한 방법의 하나를 제시한다. 식 (21)에서 $e^{-jw\tau}$ 와 가변 반사계수 ρ 에 대한 구현은 각각 그림 5의 전송선과 PIN 다이오드에 의해 실현된다. 특성 임피던스 Z_0 와 $\tau/2$ 를 갖는 지연선을 통하여 바라다본 단일 PIN 다이오드의 반사계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \quad (23)$$

여기서 R 은 다이오드의 동적인 저항 값이며, Z_0 는 시스템의 특성 임피던스이다. R 이 0에서 무한대까지 변화하므로 반사계수 Γ 는 -1과 +1 사이에 존재한다. 그림 5는 이러한 성질이 트랜스버설 필터 구현을 위해 단지 하나의 PIN 다이오드와 지연선을 이용하여 어떻게 적용되는지를 보여준다. 180도 커플러

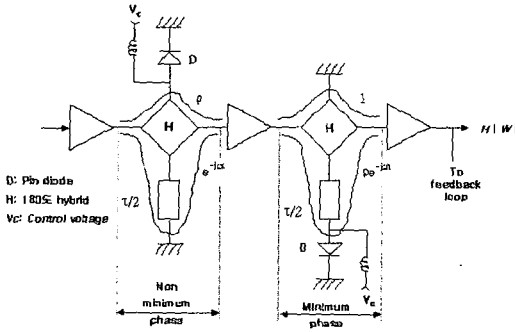


그림 5. 적응 기울기 등화기의 회로
Fig. 5. Circuit of adaptive slope equalizer.

(트랜스포머)는 간단한 능동회로로 대체될 수 있다. 두개의 상호 보완적인 구조가 직렬로 연결되었을 때, PIN 다이오드들이 동일하다는 가정 하에 동일한 제어 신호가 사용될 수 있다. 따라서 전체 응답특성은 다음과 같이 표현된다.

$$H(w) = \left[\frac{R-Z_0}{R+Z_0} + e^{-jw\tau} \right] \left[1 + \frac{R-Z_0}{R+Z_0} e^{-jw\tau} \right] \quad (24)$$

동일한 지연선들이 선정이 되면 시간지연 왜곡에 대한 영향은 거의 없이 가변 기울기 기능을 생성할 수 있게 된다.

따라서 이러한 트랜스버설 형태의 필터는 간단히 동일한 2개의 PIN 다이오드, 2개의 지연선(동축케이블 또는 지연선), 2개의 하이브리드 트랜스포머, 3개의 버퍼(buffer) 단이 사용된다. 구현된 IF 기울기 등화기의 전기적 특성은 표 1과 같다.

표 1. IF 적응 기울기 등화기의 전기적 특성
Table 1. Electrical characteristics of IF adaptive slope equalizer.

항 목	규 격
입출력 주파수 대역	50 MHz~90 MHz (채널대역폭 = 40 MHz)
허용 입력신호 레벨	-10 dBm +/- 1 dB
중간 주파수	70 MHz
허용 신호기울기	<0.5 dB
출력신호 레벨	-10 dBm +/- 1 dB
혼(상호)변조 왜곡특성(IMD)	>50 dBc
출력신호 평탄도	<0.2 dB
입출력 특성 임피던스	50 Ω
입출력 반사손실	<-15 dB

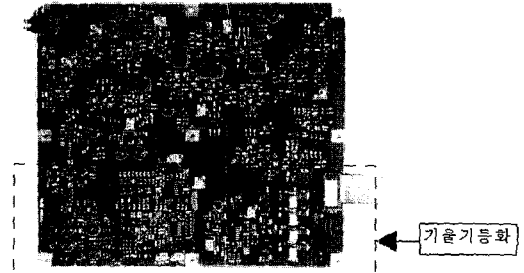


그림 6. 구현된 아날로그 기울기 등화기의 사진
Fig. 6. Photograph of implemented ASE.

그림 6은 실제 64-QAM 무선중계 장치용으로 구현된 적응 아날로그 기울기 등화기의 사진을 보여준다. 이 보드는 기울기 등화기뿐만 아니라 균지연 왜곡을 보정하는 균지연 등화기와 함께 구현된 것이다. 그림에서 기울기 등화기의 영역을 별도로 점선으로 표기하였다.

회로 내의 기울기 검출부는 출력 증폭부에서 오는 신호의 기울기 특성을 검출하여 중간 주파수 등화부의 출력 신호가 기울기 왜곡을 갖지 않도록 하는 자동 기울기 등화부의 제어 전압을 생성하는 기능을 한다. 출력 증폭부에서 전달된 신호를 70 MHz 대역을 중심하여 대칭적으로 구성된 대역 통과 여파기로 필터링한다. 기울기 등화기를 제어하는 방법 중의 하나는 채널의 중심 주파수로부터 균일하게 떨어져 있는 2개의 협대역 통과 여파기를 통하여 평균 전력을 측정하는 것이다. 그림 7(a) 및 (b)에서는 잘 알려진 FM 복조부로서 IF 기울기 등화기에 대한 제어 신호를 발생하는 일반적인 방법을 보여준다. PIN 다이오드에 인가되는 제어 전압은 신호 대역의 중심 주파수를 중심으로 대칭 형태를 갖는 2개의 대역통과 여파기로 검파, 정류하여 얻은 전압 차이로부터 얻는다. 이 제어 전압에 의해 수신된 신호 스펙트럼의 기울기와 반대 기울기를 갖도록 즉, 그림 3(b)의 전달 함수를 자동적으로 생성하게 함으로써 기울기 등화기를 통과한 신호의 스펙트럼은 그림 3(c)와 같이 신호 대역 내에서 평탄하게 된다.

IV. 측정결과 및 성능분석

먼저 기울기 등화기의 특성에 대해 살펴보자. 그림 8에서는 제어 전압의 극한 값에 대응하는 측정된 진폭특성을 제시한 것으로 기울기가 각각 양(+), 영

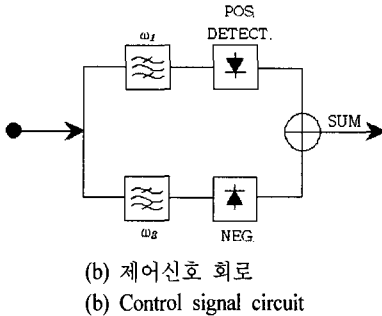
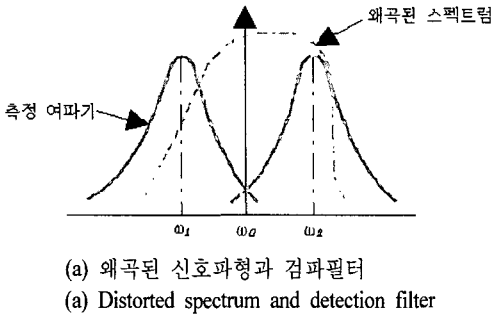


그림 7. 제어신호를 위한 검파 필터와 회로 구성
Fig. 7. Detection filter and its circuit for control signal.

(0), 음(-)일 때를 보여준다. 기율기가 영(0)인 경우에는 신호대역에 페이딩의 영향이 없는 경우를 의미한다. 관심 대역폭인 심볼율(=전송율/변조효율, 전송율=155.520 Mbps + 순방향오류정정추가비트)은 약 27 MHz(=161.5 Mbps/6 bps) 내에서 기율기 특성이 근사적으로 선형성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 9에서는 그림 8의 각 경우에 해당하는 군지연 응답 특성을 나타내었다. 3가지 모든 경우에 대해 기율기 등화기 자체의 군지연 시간은 모두 약 +/- 0.2 nsec

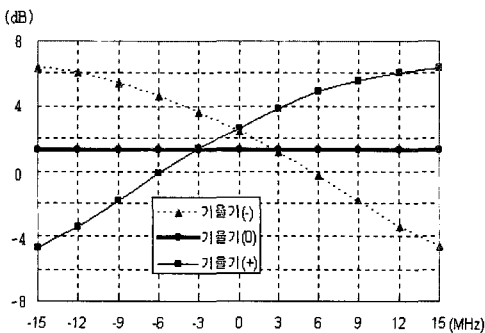


그림 8. 아날로그 기율기 등화기의 진폭응답
Fig. 8. Amplitude response for ASE.

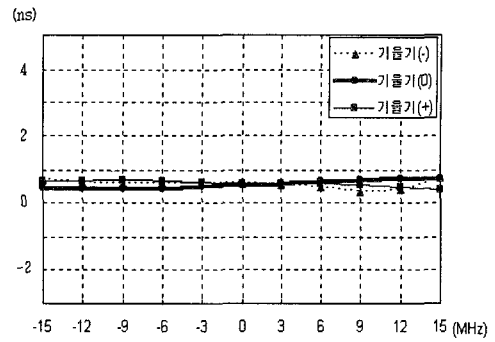
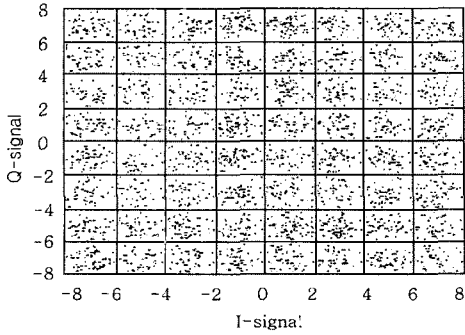


그림 9. 아날로그 기율기 등화기의 군지연 응답
Fig. 9. Group delay response for ASE.

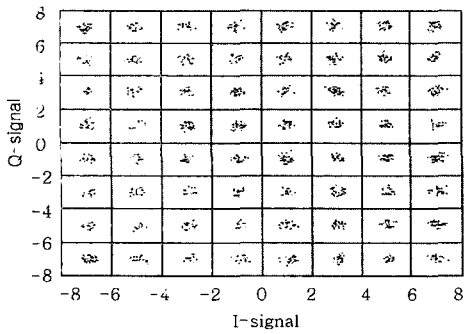
이내의 편차로 무시할 만큼 적은 양이다. 일반적으로 군지연 왜곡의 편차는 STM-1을 입력으로 하는 64-QAM 변조의 시스템에서는 대개 +/- 2 nsec 이내로 규정한다. 이러한 값은 일반적으로 변조방식에 따라 차이가 있으며, 변조레벨이 높을수록 허용치는 더욱 작아진다.

다음은 시간영역에서 기율기 등화기의 영향을 살펴보기 위해 그림 10에서는 64-QAM으로 복조되어 ATDE를 통과한 신호의 성좌(constellation)를 제시하였다. 신호의 심볼율은 27 MHz, roll-off 인자는 0.3, 노치의 위치는 채널의 중심에서 왼쪽으로 11.5 MHz(=58.5 MHz), 페이딩 깊이는 22 dB인 경우에 대해 기율기 등화기의 동작 유무에 대한 특성이다. 그림 10(a)에서는 성좌들이 수렴된 형태의 64개의 군 또는 점 형태가 아닌 임의의 형태로 퍼져 있다. 그러나 그림 10(b)에서는 그림 10(a)에서 임의로 퍼져 있는 신호의 성좌들이 구별 가능한 64개의 클러스터(cluster) 형태로 집중되어 있음을 보여준다. 따라서 상대적으로 비트 오류가 확연히 줄게 됨을 성좌의 배치 형태로 보아도 알 수 있다. 이상적인 경우의 성좌는 64개의 점 형태로 배치되므로 클러스터간의 간격이 최대한 멀어지므로 그 만큼 오류 확률이 감소함을 의미한다.

한편 주파수 영역에서 기율기 등화기의 동작을 보기 위해 그림 11에서는 그림 10과 동일한 조건 하에 수신부의 복조부 전단에서 주파수 응답을 나타내었다. 페이딩이 발생하여 채널의 스펙트럼이 왜곡된 형태와 이를 보정하기 위하여 기율기 등화기를 통과한 스펙트럼의 결과를 보여준다. 왜곡된 스펙트럼은



(a) 동작하지 않은 경우
(a) Off ASE



(b) 동작한 경우
(b) On ASE

그림 10. 아날로그 기율기 등화기 동작 유무에 따른 성좌 배치도
Fig. 10. Constellation with/without ASE.

전체적으로 양의 기율기를 갖고 기울어져 있음을 알 수 있다. 왜냐하면 채널의 중심에서 왼쪽에 페이딩의 노치 주파수가 발생하였기 때문이며, 채널의 대역폭은 40 MHz(± 20 MHz)이다. 한편 기율기 등화기를 통과한 스펙트럼은 근사적으로 좌우 대칭 형태를 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서 기율기 등화기는 통과 대역 내에 기울어진 신호를 받아 채널대역 중심에서 좌우 대칭 형태의 스펙트럼을 갖도록 보상하여 출력됨을 보여 준다. 페이딩의 발생 위치 및 깊이에 따라 스펙트럼의 왜곡 정도가 달라지며, 또한 기율기 등화기를 거쳐 정정된 스펙트럼도 변수에 따라 달라진다. 기율기 등화기에 의해 왜곡된 스펙트럼이 1차적으로 어느 정도 정정되었지만 아직도 왜곡이 존재한다. 이러한 잔류 성분의 왜곡은 2차적으로 복조부에서 동작하는 ATDE에 의해 거의 정정된다.

끝으로 시스템의 성능인 시그너처(signature)에 대

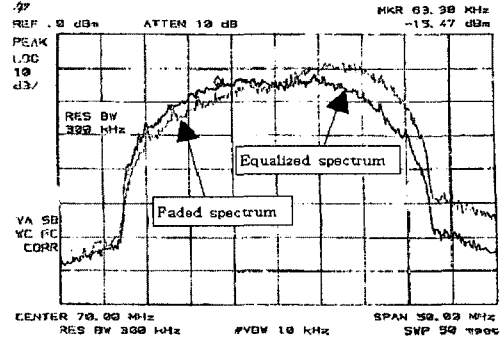


그림 11. 왜곡 스펙트럼에 대한 아날로그 기율기 등화기의 응답

Fig. 11. Output of ASE for faded spectrum.

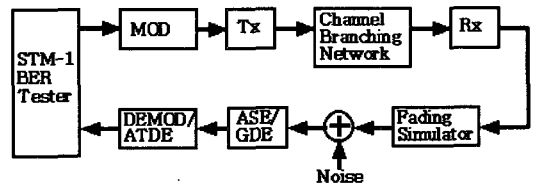


그림 12. 시그너처 측정을 위한 시험 구성도
Fig. 12. Test set-up for signature measurement.

해 살펴보자. 시그너처는 채널에 주파수 선택적 감쇠가 발생하였을 때, 기율기 등화기 및 ATDE로 보상하여 어떤 특정한 오류(일반적으로 10^{-3} BER)을 나타내는 감쇠의 깊이를 주파수 함수로 찾아 이은 곡선이다. 일반적으로 장치 제조사에서는 장치의 성능지표를 이러한 시그너처로 설명하기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다. 그림 12는 기율기 등화기 및 ATDE를 연동한 장치의 성능을 측정하기 위한 시험 구성을 나타낸다. STM-1 계측기의 출력 155.520 Mbps 신호는 64-QAM 변조부 및 송신기를 거쳐 감쇠기 및 RF 케이블을 통해 수신기로 입력된다. 수신된 신호는 페이딩 시뮬레이터를 통해 주파수 선택적 페이딩을 유발시키고, 또한 노이즈 발생기를 연결하여 강제로 잡음이 섞인 신호를 만든다. 왜곡된 신호는 자동 이득조절기 및 아날로그 기율기 등화기 및 균지연 등화기(GDE)를 거쳐 복조부로 입력된다. 복조부에서는 적응 시간영역 등화기(ATDE)를 거쳐 STM-1 계측기로 입력되어 신호의 오류를 분석하게 된다.

그림 13은 적응 기율기 등화기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 13-탭 ATDE와 연동한

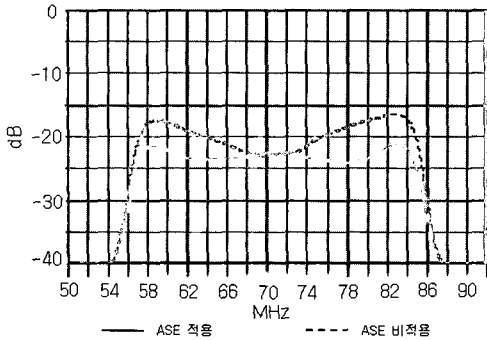


그림 13. 아날로그 기율기 등화기의 적용 유무에 따른 측정된 시그너처

Fig. 13. Measured signature with/without ASE.

시스템의 시그너처를 나타낸 것이다. IF 대역의 채널 대역폭 40 MHz(50~90 MHz) 주파수 영역에 대해 페이딩 시뮬레이터로 주파수 선택적 페이딩을 발생시켜 시스템의 비트 오류율이 10^{-3} 이 되는 때의 페이딩 깊이를 표시하여 얻은 결과이다. 점선은 기율기 등화기를 적용하지 않은 경우이며, 실선은 기율기 등화기를 적용한 경우의 결과이다. 기율기 등화기를 적용하는 경우가 신호 대역의 가장자리에서 최대 약 6.2 dB 개선됨을 보여준다.

또한 페이딩 주파수가 채널대역 중심에서 가장자리로 이동함에 따라 성능이 좀더 열화가 되어 나타난다. 이것은 채널대역의 평탄한 스펙트럼이 점점 기울어짐이 심하게 되어, 시간영역에서 살펴보면 I- 및 Q-채널간에 간섭이 더욱 커지기 때문이다. 일반적으로 시그너처 성능은 변조방식 및 등화기의 탭수에 의존하며, 기율기 등화기와 연동하여 채널 대역내에 전반적으로 균일한 성능을 갖도록 한다. 장치의 시그너처 특성은 분산 페이드 마진(Dispersive Fade Margin: DFM)과 직접 관계가 있어 장치의 가용율(availability) 계산시에 변수로 적용된다. 따라서 시그너처 개선은 현장에서 장치 운용시에 양질의 전송 품질 확보 및 개선에 크게 기여하게 된다^[4].

V. 결 론

본 논문에서는 STM-1 신호를 전송하는 64-QAM 디지털 무선중계 장치의 페이딩 대응 기술의 일환으로 기저대역의 채널 모델링을 통한 아날로그 기율기

등화기의 원리, 구현 및 성능을 제시하였다. 또한 페이딩을 받은 채널의 신호에 대해 기율기 등화기의 사용 유무에 따른 시간 및 주파수 영역에서 영향을 살펴보았다. 장치에 기율기 등화기의 적용으로 시그너처 특성을 통과대역 가장자리에서 약 6.2 dB 개선됨을 측정을 통해 확인하였다. 시그너처 결과가 채널의 중앙에 비해 가장자리가 상대적으로 열화됨을 보였는데, 이는 디지털 채널 모델링에서 알 수 있었던 듯이 페이딩의 노치 주파수가 점차적으로 채널 가장자리로 이동함에 따라 I- 및 Q-채널 신호간의 간섭이 더욱 심해졌기 때문이다. 이러한 경우에는 1차적으로 필히 기율기 등화기를 적용하여 왜곡된 스펙트럼을 정정해야 함을 보였다. 끝으로 구현된 방식의 아날로그 기율기 등화기는 무선중계 장치의 다중레벨 QAM 변조방식에도 적용이 가능하며, 나아가 간단한 아날로그 기율기 등화기를 복조부의 ATDE와 연동함으로써 시스템의 성능개선 및 양질의 전송품질 확보에 크게 기여하게 될 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] W. Bourdon, W. Geidel, G. Lange and J. G. Neideck, "A new generation of SDH radio relay system for 1*155/ 2*155/ 4*155 Mb/sec", *Proc. 3rd European Conference on Radio Relay Systems: ECRR*, pp. 56-63, 1991.
- [2] A. A. R. Townsend, *Digital Line-of-Sight Radio Links*, 1988.
- [3] W. D. Rummler, "A new selective fading model: application to propagation data", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, no. 5, pp. 1037-1071, 1979.
- [4] C. W. Lundgren, W. D. Rummler, "Digital radio outage due to elective fading - observation vs. prediction from laboratory simulation", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, no. 5, pp. 1073-1100, 1979.
- [5] Carlos Salema, *Microwave Radio Links*, John Wiley, 2003.
- [6] L. J. Greenstein, M. Shafi, *Microwave Digital Radio*, IEEE Press, 1988.
- [7] G. Sebald, B. Lankl and J. A. Nossek, "Advanced time- and frequency-domain adaptive equalization in

multilevel QAM digital radio system", *IEEE JSAC*, vol. SAC-5, no. 3, pp. 448-456, 1987.

- [8] P. Marchand, "A simplified IF auto-adaptive slope equalizer", *Proc. of 3rd ECRR*, pp. 386-388, 1991.
- [9] I. K. Hwang, K. W. Suh, M. S. Rhee and D. Y. Lee, "Improvement on system performance based on the modified IF in-phase combiner for space diversity radio links", *Proc. APMC*, pp. 830-833, 1995.
- [10] K. W. Suh, C. Y. Park, D. Y. Lee and W. H. Kim,

"Implementation of a single multi-task chip: ATDE, XPIC and DF applicable to multi-level QAM digital radio system", *IEEE GLOBECOM Proc.*, pp. 1463-1467, Nov. 1995.

- [11] 서경환, "동기식 디지털 계위의 동일채널 무선 전송장치 구현 및 성능 분석", *대한전자공학회 논문지*, 35(11), pp. 1046-1058, 1998년.
- [12] 서경환, "디지털 무선전송 장치를 위한 기울기 등화기의 채널 모델링 및 디지털 구현에 관한 연구", *한국전자과학회 논문지*, 12(5), 2001년.

서 경 환



1983년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1991년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1983년 1월~1998년 10월: 삼성전자

정보통신총괄(수석연구원)

1999년 3월~현재: 강남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 무선통신시스템 설계 및 성능분석, 변복조 및 등화기 설계, 마이크로파 회로설계