

택내 전화 선로의 적응형 등화기 구현

학생회원 이성현*, 정회원 은창수**, 김홍석***

Implementation of an Adaptive Equalizer for the Home Phone Lines

Sungyoum Lee* *Student Member*

Changsoo Eun**, Hongseog Kim*** *Regular Members*

요약

본 논문에서는, 건물 내에 이미 포설되어 있는 2선식 전화선을 이용하여 데이터 망을 구축하기 위하여 임의의 구조를 갖는 택내 전화 선로의 전달 특성을 분석한 후, 고속의 데이터를 송수신할 수 있도록 신호의 왜곡을 보상해 주는 적응형 등화기를 모의 실험을 통하여 구현하였다. 임의의 구조를 갖는 택내 전화 선로에 대하여 ABCD 행렬을 이용하여 전달 특성을 파악하였다. 그 결과, 각 지선에 의한 임피던스 부정합으로 인하여 주파수 전달 특성상 널(null)이 생기며, 이 영향은 시간축 상에서 지연된 펄스 형태의 임펄스 응답으로 나타남을 알 수 있었다. 이는 심볼 간의 간섭을 유발하여 신호의 올바른 검출을 어렵게 한다. 이러한 간섭을 제거하기 위하여, 망 구조의 임의의 변화에 대한 적응형 등화기를 설계하여 모의 실험을 실시하였다. 그 결과에 따르면 1 Msps 전송 시 1.5 msec 내에 등화기가 수렴하고, 신호 대 잡음 비가 15 dB 이상에서 동작함을 알 수 있었다. 또한 E_b/N_0 와 비트 오류 확률의 관계를 살펴 본 결과, 데이터 통신이 가능한 10^{-5} 이하의 비트 오류 확률을 얻기 위해서는 19 dB 이상의 E_b/N_0 값이 요구됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we present a modeling scheme for the already-installed two-wire home phone lines with arbitrary topologies and show that the inter-symbol interference due to the topology can be removed using an adaptive equalizer. The transmission characteristics of the arbitrary-configured two-wire home phone lines can be analyzed through the ABCD matrices. The simulation result shows that the impedance mismatch due to the branch lines renders nulls in the frequency response or delayed pulses in the impulse response. These nulls or delayed pulses cause inter-symbol interference that inhibits correct signal detection. An adaptive equalizer is shown to be effective in eliminating the interference. Also, the simulation result shows that the equalizer converges in 1.5 ms at a data rate of 1 Msps at signal-to-noise ratios greater than 15 dB. In addition, from the result of relation between E_b/N_0 and BER(Bit Error Rate), we can see that E_b/N_0 more than 19 dB is required for the data communication with a BER less than 10^{-5} .

I. 서론

최근에 멀티미디어 통신 사업의 발달로 인하여 고속의 액세스 망과 가정 내의 통신망 구축에 대한 요구가 끊임없이 증대되어 왔다. 택 외의 액세스

(Access) 망의 전송 및 신호 특성 등에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나^{[1][2]}, 택내 데이터 통신 망에 대한 연구는 많이 발표되지 않은 실정이다. 현재 택내 데이터 통신망으로 단말기S-인터페이스(144kbps)나 ADSL 또는 케이블 모뎀의 이더넷 포

* 삼성전자 무선사업부(syyi@samsung.co.kr),

** 충남대학교 정보통신공학과(eun@iecc.org)

*** 배재대학교 정보통신공학부(khsau@mail.paichai.ac.kr)

논문번호 : 010190-0720, 접수일자 : 2001년 7월 20일

트에 LAN (10 Mbps) 등을 사용하고 있다. 위 두 경우 모두 4선의 택내 전송 선로가 필요하며, 가정 내에 그러한 전송 선로 설비가 잘 갖추어져 있지 않으므로 필요한 경우 새로이 가설하는 것이 보통이다. 그러나 가정 내에서 새로운 망을 일일이 가설한다는 것은 택내 통신망의 조기 도입에 걸림돌이 될 수 있다. 홈 네트워크 추진 그룹인 HomePNA (Home Phoneline Network Alliance)가 여러 가지 방안 중 기존의 전화선을 그대로 사용하기로 결정한 것도 이 때문이다^[3].

가정에는 일반적으로 2선의 전화 선로가 포설되어 있으며, 이를 데이터 통신 망으로 사용할 경우, 연결되는 단말기의 대수 및 위치 등에 따라 채널 특성이 수시로 변화하게 된다. 그러나 변화하는 전화 선로의 채널 특성을 적절히 보상하면, 가정 내에서도 고속의 통신망을 확보할 수 있을 것이다. 따라서 HomePNA 등을 통하여 가정 내 전화 선로를 통한 택내망 구축이 새로운 기술로 대두되고 있으며, 가정 내 전화 선로 특성을 파악하고 보상할 수 있는 방법을 연구하는 것이 필요하다.

채널의 특성을 파악하기 위하여 R, L, G, C 로 표현되는 전송 선로 모델과 ABCD 행렬을 이용하여 전화 선로상의 임의의 두 점 사이에서 주파수 전달 특성을 구하였다. 여기서 구한 주파수 전달 함수를 역 푸리에 변환하여 채널의 임펄스 응답을 얻었으며, 인접 심볼 간섭 특성을 파악하였다. 이와 같은 채널의 특성에 의한 심볼 간 간섭을 제거하기 위하여 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용하는 적응형 등화기를 구현하였다.

이 논문의 구성은, II 절에서 채널 특성 분석 방법과 적응형 등화기에 대해 설명하였고, III 절에서는 모의 실험을 통하여 전화 선로에 대한 채널 특성(주파수 응답과 임펄스 응답)을 구하고 적응형 등화기를 적용하여 채널 특성이 보상된 결과를 살펴본다. 그리고 IV 절에서는 결론과 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

II. 택내 전화 선로의 특성 분석 방법과 적응형 등화기

2.1 전화 선로 모델링

택내망에서 사용되는 전화 선로로는 플랫 페어(flat pair)와 트위스트 페어(twisted pair)가 있는데, 본 논문에서는 심경 1.14 mm의 플랫 페어에 대해 살펴본다.

전화 선로의 특성은 단위 분포 회로 정수 R (저항), L (인덕턴스), G (어드미턴스), C (커패시턴스)에 의해 특징지어진다. 1차 분포 회로 정수 G 는 주파수에 비례하고, R 은 주파수 제곱근에 비례하며, L 과 C 는 고주파에서 약 180 Ω의 값으로 수렴하며, 각각 약 0.91 mH/km, 0.028 F/km의 값을 갖는다^{[2][4][5]}. 전화 선로의 특성 임피던스는 아래 식과 같이 1차 분포 회로 정수에 의해 결정된다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

주파수 전달 특성은 R, L, G, C 로 표현되는 전파 상수의 함수인 ABCD 행렬에 의해 구할 수 있다. 그림 1에서는 2 포트 망과 그 망의 정상 상태에서의 ABCD 행렬을 사용하여 입출력 관계를 나타낸다^{[2][5]}.

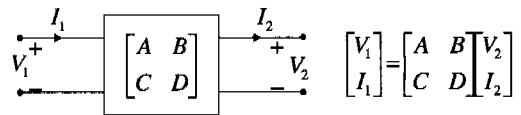


그림 1. 2 포트 네트워크의 정상 상태에서의 ABCD 행렬

V_1 과 I_1 은 입력 단자의 전압과 전류이고, V_2 와 I_2 는 출력 단자의 전압과 전류를 나타내며, 2 포트 망의 입 출력 관계는 다음과 같은 식들로 주어진다.

$$V_1 = AV_2 + BI_2 \quad (2)$$

$$I_1 = CV_2 + DI_2 \quad (3)$$

포트 2의 부하 저항을 Z_L 이라 놓으면, $I_2 = V_2/Z_L$ 이므로 식(2)에 대입하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_1 = AV_2 + \frac{BV_2}{Z_L} \quad (3)$$

따라서 주파수 응답 함수는 다음 식과 같이 표시할 수 있으며, 이와 같이 구한 주파수 응답 특성은 역 푸리에 변환을 통해서 임펄스 응답 특성을 구할 수 있다.

$$H(f) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{A + \frac{B}{Z_L}} \quad (5)$$

전송 선로에 임피던스가 연결될 경우 ABCD 행

렬을 사용하여 간단하게 표현할 수 있다. 그림 2에서는 임피던스가 직렬 또는 병렬로 연결된 경우의 ABCD행렬을 보여준다. 전송 선로에서 임피던스가 직렬로 연결된 경우 임피던스가 행렬의 원소가 되지만, 병렬로 연결된 경우에는 어드미턴스가 행렬의 원소로 나타난다.

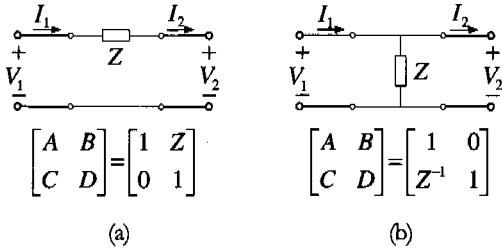


그림 2. 임피던스의 연결에 따른 ABCD 행렬의 표현
(a) 직렬 연결. (b) 병렬 연결

전화 선로상에서 임의의 두 점 사이의 선로는 소스, 선로 망, 그리고 부하로 구성되어 있다. 그림 3에서는 소스 임피던스 Z_S 와 부하 임피던스 Z_L 을 갖는 선로 구성을 보여준다. 입 출력 사이에서의 전체 전송 선로의 ABCD 행렬은 아래와 같이 행렬들의 곱으로 표현할 수 있다.

$$M_T = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_S \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M_{d1} M_{br} M_{d2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_L & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 M_{d1} , M_{d2} 는 전송 선로 각 구간의 ABCD 행렬이며 M_{br} 는 브리지 탭의 ABCD 행렬이다. 이 행렬은 이 논문에서 임의의 구조를 갖는 대내 전화 선로를 모델링 할 때 사용될 것이다.

2.2 적응형 등화기 구현

적응형 등화기는 전송 채널의 상태에 따라 등화

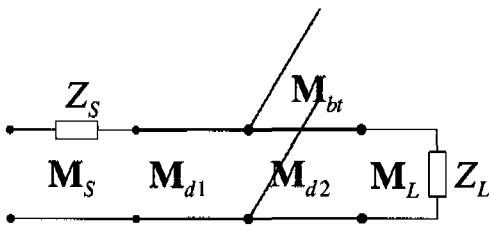


그림 3. 소스 임피던스 Z_S 와 부하 임피던스 Z_L 을 갖는 선로 망

기의 계수가 적응적으로 변화 하면서 심볼 간 간섭을 없애 주어 올바른 심볼을 검출해 낼 수 있도록 하는 장치이다.

그림 4는 일반적인 등화기의 구조를 보여 주고 있는데, 구조에 따라 선형 등화기(linear equalizer)와 결정 계환 등화기(decision feedback equalizer)로 구분하며, 후미 등화기(postcursor equalizer)가 없는 경우($D(z) = 0$)를 선형 등화기라 한다^{[6][7][8]}.

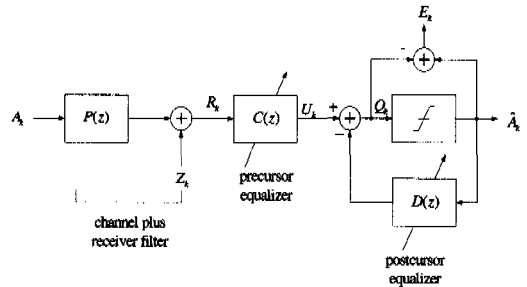


그림 4. 등화기의 일반적인 구조

그림 5는 적응형 등화기의 출력 값과 원하는 출력 값 사이의 오차 값에 의해 계수가 갱신되는 과정을 보여주는 구조이다. 이 논문에서는 LMS 알고리즘을 이용한 선형 등화기를 사용한다. LMS 알고리즘은 입 출력 데이터를 이용하여 오류 신호 평면에서 오류 신호를 줄일 수 있는 방향 벡터를 찾아 계수를 갱신하는 방법이다^[9]. 등화기 계수는 벡터 c 로 표시 할 수 있다.

$$c' = [C_{-L}, C_{-L+1}, \dots, C_j, \dots, C_{L-1}, C_L] \quad (7)$$

여기서 (')은 행렬의 전위(transpose)를, L 은 현재 값 전 후의 샘플에 대한 필터 계수의 개수를 각각 나타낸다. 샘플된 입력 신호의 수열은 다음의 벡터 r_k 로 표시할 수 있다.

$$r_k' = [R_{k+L}, \dots, R_k, \dots, R_{k-L}] \quad (8)$$

여기서 k 는 현재 순간을 나타내는 값이며, R_{k+j} 는 현재 값으로부터 j 번째 후에 샘플된 입력 값이다. 이 등화기의 출력 Q_k 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_k = c' r_k \quad (9)$$

등화기의 계수를 갱신하기 위해서는 LMS 알고리즘을 사용한다. 등화기에서 나오는 출력 값 E_k 와 원하는 출력 값 A_k 사이의 오차 E_k 는 다음과 같이 주어

진다.

$$E_k = A_k - c' r_k \tag{10}$$

동화기 갱신 과정 식은 아래와 같다^[9].

$$C_j^{l+1} = C_j^l - \frac{\beta}{2} \nabla_{C_j} [|E_k|^2] \tag{11}$$

여기서 l 은 갱신 과정을 나타내는 지수이며, β 는 계수를 갱신하는 정도를 나타낸다. 최종적인 갱신 식은 다음과 같이 얻을 수 있다

$$C_j^{l+1} = C_j^l + \beta E_k R_{k-j}^* \tag{12}$$

여기서 *은 공액 복소수를 나타낸다.

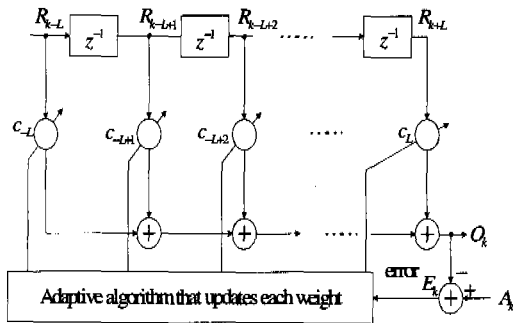


그림 5. 적응적으로 계수를 갱신하는 적응형 동화기의 구조

III. 모의 실험 결과

3.1 전화 선로의 주파수 응답과 임펄스 응답 특성

그림 6은 모의 실험에 사용된 버스 구조와 트리 구조를 갖는 전화 선로를 보여주고 있다. 그림 6(a)의 버스 구조에서는 간(幹) 선로와 몇 개의 지(枝) 선로로 구성되며, 각각의 지 선로로부터는 더 이상의 지 선로를 갖지 않는다. 반면 그림 6(b)의 트리 구조는 각각의 지 선로가 또 다른 지 선로를 갖는 구조이다.

그림 7은 두 종류 선로에 대한 주파수 응답(그림 7(a)와 7(c))과 임펄스 응답(그림 7(b)와 7(d))을 각각 차례대로 나타낸다. 그림 7(a)는 두 개의 브리지 탭이 접속된 버스 구조의 주파수 응답으로, 이 브리지 탭들에 의한 신호의 반사로 말미암아 특정 주파수에서 생성된 골짜기들을 보여 준다. 이는 역 푸리에 변환으로 구한 임펄스 응답(그림 7(b))에서는 여러 번의 반사로 지연된 임펄스들로 관찰 된다. 그림

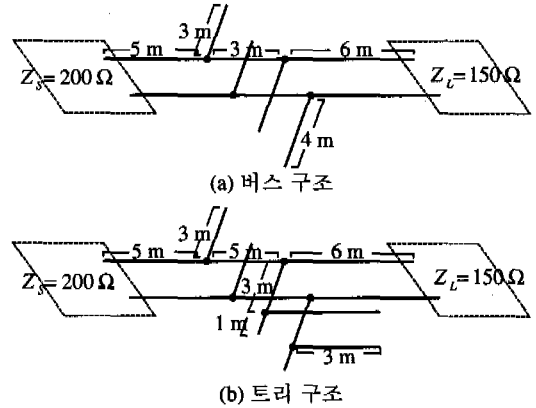


그림 6. 가정 내 전화 선로의 구조 모델. (a) 현재의 전화 선로 구조인 버스 구조 (b) 데이터 망으로 사용하기 위한 임의의 탭을 갖는 트리 구조

7(c)는, 트리 구조에서 출력 쪽 탭에 또 다른 브리지 탭이 추가됨으로 인하여 버스 구조(그림 7(a))의 경우 보다 좀 더 많은 골짜기를 포함한 주파수 응답을 보여준다. 그림 7(d)의 임펄스 응답을 살펴 보면 추가된 브리지 탭에 의해 전송 경로가 증가 되어, 출력 단자로 반사 되어 나오는 지연 신호의 크기는 줄어 들었으나 지연 시간은 더 오래 지속됨을 알 수 있다.

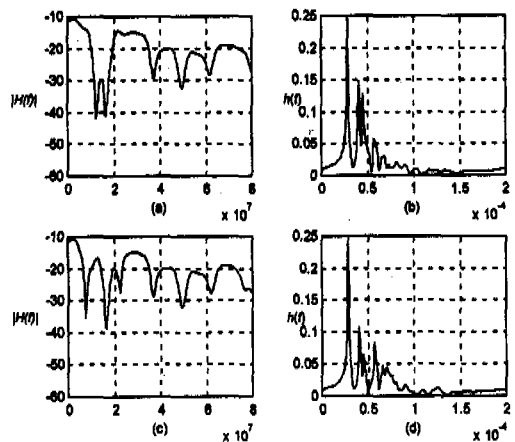


그림 7. 버스 구조와 트리 구조에 채널 특성. 버스 구조의 (a) 주파수 응답 특성 (b) 임펄스 응답 특성. 트리 구조의 (c) 주파수 응답 특성 (d) 임펄스 응답 특성

위 두 구조에서, 지연된 임펄스 응답들은 심플 간 간섭을 일으키며 수신할 신호 왜곡을 왜곡 시키어 수신 오류를 발생시킬 수 있다. 이러한 수신 오류를 줄이기 위해서는 채널 특성을 보상할 수 있는 동화

가 요구 된다.

3.2 등화기 구현

기존의 전화 선로에서 브리지 탭이 추가 되거나 제거될 경우, 변화하는 채널 특성을 적응적으로 보상할 수 있는 등화기를 구현했다. 등화기 계수의 개수를 증가시키면 어느 정도까지 등화기의 성능이 개선된다. 1 세대 HomePNA에서 사용하는 1 Msps의 전송 속도에서 등화기 계수의 개수를 점차 증가시키면서 실험한 결과, 등화기 계수의 개수가 25개 이상에서는 성능이 더 이상 개선되지 않았다. 따라서 이 모의 실험에서는 25개의 등화기 계수의 개수가 사용되었으며, 또한 5,500개의 샘플된 심볼을 사용하였다.

등화기 성능을 비교 평가하기 위하여 NMSE (Normalized Mean Square Error)를 다음과 같이 정의한다.

$$NMSE = \frac{\sum Q_k - A_k|^2}{\sum A_k|^2} \quad (13)$$

그림 8은 데이터 망으로 사용할 수 있는 트리 구조에서, 적응형 선형 등화기 출력의 NMSE 수렴 특성을 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio)에 따라 나타낸 것이다. x-축은 심볼 순서이고, y-축은 NMSE이다. 그림 8(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 신호 대 잡음 비가 16 dB 보다 작을 경우에는 잡음의 영향으로 등화기가 수렴하지 않음을 알 수 있다.

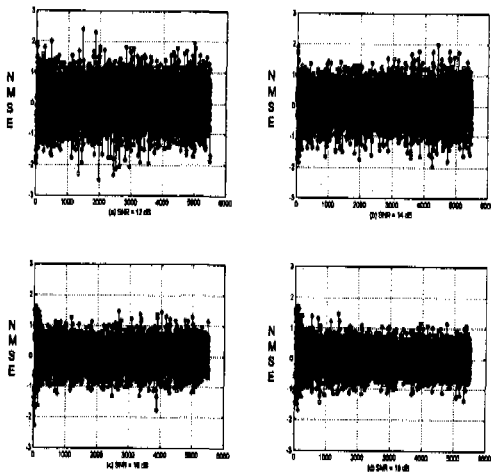


그림 8. 트리 구조에서의 신호 대 잡음 비에 대한 수렴 과정. (a) SNR = 12 dB, (b) SNR = 14 dB, (c) SNR = 16 dB, (d) SNR = 18 dB

그림 9에서는 신호 대 잡음 비가 30 dB인 경우 버스 구조와 트리 구조에 대한 NMSE의 수렴 과정을 각각 보여 주고 있다. 수렴된 NMSE는 버스 구조에서는 7.0×10^{-3} , 트리 구조에서는 4.5×10^{-3} 으로 거의 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 구현된 등화기의 성능이 전송 선로 구조에 크게 영향을 받지 않음을 나타낸다. 여기서 구현 등화기의 성능을 비교 평가하기 위하여 E_b/N_0 (bit energy per noise spectral power density)와 비트 오류 확률의 관계를 살펴 볼 필요가 있다.

3.3 E_b/N_0 와 비트 오류 확률의 관계

비트 오류 확률은 디지털 통신 시스템 성능을 비교할 수 있는 중요한 기준이며, 음성 신호 전달이나, 데이터 통신 또는 동영상 신호의 전송을 위해서는 각각 10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-7} 이하 값이 요구된다.

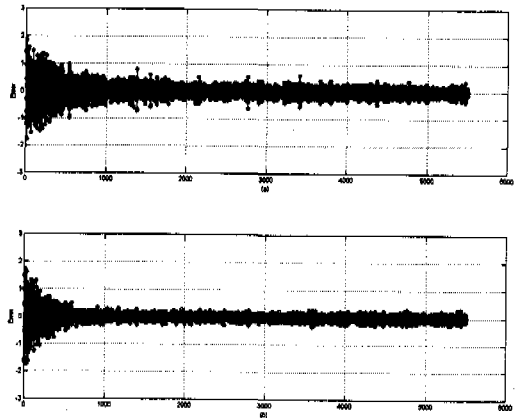


그림 9. 버스 및 트리 구조에서의 적응형 선형 등화기에 의한 오류 정정 과정. (a) 버스 구조: SNR = 30 dB, NMSE = 7.0×10^{-3} , (b) 트리 구조: SNR = 30 dB, NMSE = 4.5×10^{-3} .

이 논문에서는 데이터 통신의 기준인 10^{-5} 까지를 살펴 보았다. 참고로 등화기를 사용하지 않을 경우, 외부로부터의 잡음이 전혀 없을 때에도 비트 오류 확률은 10^{-1} 이나 되어 통신이 불가능함을 확인할 수 있었다. 10^{-5} 보다 작은 비트 오류 확률 값에 대해서는 계산 양이 너무 많아져서 모의 실험이 거의 불가능하다.

그림 10에서는 트리 구조에 등화기를 연결하여 신호를 수신한 결과를 보였다. 가로축은 E_b/N_0 값을 나타내고, 세로축은 비트 오류 확률을 나타낸다. 그림 10을 살펴 보면, E_b/N_0 가 증가할수록 비트 오류 확률이 떨어지는 전형적인 곡선의 형태를 보인다.

E_b/N_0 가 17 dB 이하일 경우는 비트 오류 확률이 10^{-3} 보다 더 커지므로, 오류 정정 부호를 사용하지 않을 경우 음성 통신에도 사용하기가 힘들다는 것을 알 수 있다. 데이터 통신이 가능한 10^{-5} 이하를 만족하기 위해서는 E_b/N_0 가 19 dB 이상이어야 함을 알 수 있다. 19 dB 이상에서는 오류의 발생 확률이 너무 낮아 모의 실험 상으로는 오류의 발생을 확인하기가 매우 어렵다. 그리고 비트 오류 정정 부호를 사용할 경우, 신호 대 잡음 비 19 dB에서 동영상 전송을 위한 10^{-7} 정도의 비트 오류 확률도 가능할 것이며, 송 수신 시에 다차 변조 방식을 사용하면 더 높은 전송 속도를 확보할 수 있을 것이다.

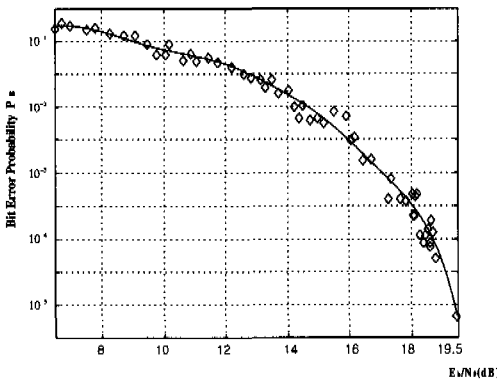


그림 10. E_b/N_0 와 비트 오류 확률의 관계 그래프

IV. 결론

가정 내 2선식 전화 선로를 대내 데이터망으로 사용하기 위해서는 전송 선로 모델과 ABCD행렬을 이용하여 채널 특성을 분석하고, 그 채널 특성을 보상하기 위해서 LMS알고리즘을 적용한 적응형 선형 등화기를 구현하였다. 채널 특성 분석 결과에 의하면 브리지 탭은 임피던스 부정합의 원인이 되어, 주파수 선택적인 페이딩(fading) 현상이 발생하고, 임펄스 응답에서는 반사로 인해 지연된 심볼들에 의하여 심볼 간 간섭이 생긴다. 또한 전화 선로의 브리지 탭이 많아질수록 그에 상응하는 부정합 접촉 점이 증가하여 주파수축에서 골짜기 수를 증가시키고, 시간축에서는 그에 따른 지연된 신호를 발생시켰다. 이러한 전화 선로의 수신 측에 25개의 계수를 갖는 적응형 등화기를 사용하여, 지연에 의한 간섭 성분을 제거하였다. 트리 구조에서 25개의 계수를 갖는 적응형 선형 등화기를 적용하여, 30 dB의

신호 대 잡음 비에서 4.5×10^{-3} 의 NMSE와 약 1 Msps의 대역폭을 확보할 수 있었다. 그리고 E_b/N_0 와 비트 오류 확률과의 관계를 살펴 본 결과, 데이터 통신이 가능한 10^{-5} 이하의 비트 오류 확률을 얻기 위해서는 19 dB이상의 E_b/N_0 가 필요함을 알 수 있었다. 비트 오류 정정 부호를 사용할 경우, 신호 대 잡음 비 19 dB에서 동영상 전송을 위한 10^{-7} 정도의 비트 오류 확률도 가능할 것이며, 송 수신 시에 다차 변조 방식을 사용하면 더 높은 전송 속도를 확보할 수 있을 것이다

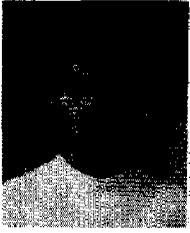
앞으로는 실제 전화 선로의 특성을 파악하여 이 모의 실험 결과와 비교하고, 이를 바탕으로 하드웨어로 등화기를 구현하여야 할 것이다. 이는 대내에서 2 선식 전화선을 사용한 홈 네트워크 구성에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Jean-Jacques Werner, The HDSL Environment, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No. 6, pp. 785-800, August 1991.
- [2] 백제인 외2인, ISDN 가입자 루프에 대한 전송 선로 모델의 설계, 한국통신학회논문지, Vol.19, No.2, pp. 293-305, 1994년 2월.
- [3] <http://www.homepna.com>.
- [4] Very High Speed Digital Subscriber Line System Requirements, TIE1.4/97-133, June 1997.
- [5] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electro-magnetic, Addison-Wesley, 1993.
- [6] Theodore S. Rappaport, Wireless communications, IEEE Press, 1996.
- [7] Edward A. Lee, David G. Messerschmitt, Digital Communication, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [8] Bernard Sklar, Digital Communications Fundamentals and Applications, Prentice Hall, 1988.
- [9] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, 2nd Ed., Prentice Hall, 1991.

이 성 현(Sungyoum Lee)

정회원

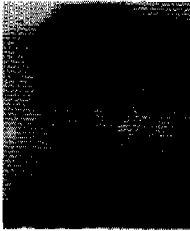


1999년 2월 : 충남대 정보통신
공학과 학사
2001년 2월 : 충남대 정보통신
공학과 석사
2001년 2월~현재 : 삼성전자
무선사업부 TDMA
개발팀

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학

은 창 수(Changso Eun)

정회원



1985년 : 서울대학교
전자공학과 졸업
1987년 : 서울대학교
전자공학과 석사
1995년 : 텍사스주립대 (오스틴)
공학박사

1987년~1997년 : (주)대우전자 중앙연구소 선임연구원

1997년~현재 : 충남대학교 정보통신학과 부교수

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학

김 흥 석(Hongseog Kim)

정회원



1985년 : 서울대학교
전자공학과 졸업
1989년 : 노스캐롤라이나
주립대 공학석사
1996년 : 노스캐롤라이나
주립대 공학박사

1996년~2000년 : 현대전자 책임 연구원

2000년~현재 : 배재대학교정보통신공학부 전임강사

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학