

Semi-analytic 시뮬레이션을 이용한 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 디지털가입자라인의 BER 성능에 관한 연구

채운식^{*} · 강영흥^{*} · 이정식^{*} · 김용환^{**} · 조평동^{**}

^{*}군산대학교 정보통신공학과 · ^{**}ETRI 표준연구센터

A Study on the Performance of Digital Subscriber Line in Gaussian and Far-end Crosstalk Noises Environment Using Semi-analytic Simulation

Yun-sik Chae^{*} · Young-heung Kang^{*} · Jung-sik Lee^{*} · Yong-hwan Kim^{**} · Pyung-dong Cho^{**}

^{*}Dept. of Telecommunication, Kunsan National University · ^{**}Protocol Engineering Center, ETRI

E-mail : yschae@k2.kunsan.ac.kr, yhkang · leejs @ks.kunsan.ac.kr

요 약

본 논문에서는 twisted-pair 채널특성을 이용하여 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 디지털가입자라인의 BER 성능평가를 Semi-analytic 시뮬레이션 방법에 의해 수행하였다.

그 결과로서 감쇄가 없는 경우의 시뮬레이션 결과는 이론치보다 E_b/N_0 면에서 0.5dB 이내의 열화를 보여 시뮬레이션의 타당성을 보인다. 전송거리가 5000m로 길어지면 $BER=10^{-7}$ 에서 E_b/N_0 는 약 4 dB, 일정거리에서 나이퀴스트 주파수가 512kb/s로 높아지면 약 2dB 정도 열화한다. 또한 원단누화 잡음에 의한 영향은 전송거리면에 있어서는 원단누화 잡음 감쇄정수 $k=10^{-10}$ 이상일 때, 나이퀴스트 주파수면에서는 $k=10^{-14}$ 이상일 때 크게 나타난다.

본 해석의 결과는 향후 국내의 디지털가입자라인의 표준화 제정에 기본적인 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this paper, we have evaluated BER performance of digital subscriber line(DSL) using the twisted-pair channel model by means of Semi-analytic simulation technique.

As a result, it was known that the Semi-analytic simulation was proved to be a good technique because of the attenuation of 0.5dB. To keep the $BER=10^{-7}$, 4dB of E_b/N_0 is needed more when the DSL length extends to 5000m, while 2dB increase of E_b/N_0 is required when Nyquist frequency goes to 512kb/s with the keeping same distance. In addition, the effect by FEXT noise is serious, when the FEXT noise damping constant, k is over 10^{-10} in DSL length and 10^{-14} in the aspect of Nyquist frequency.

As the basic data, results of this analysis can be used in setting the internal and external standardization of DSL system in the future.

1. 서 론

오늘날 소규모 사업 및 홈(home) 가입자들은 고속 인터넷 액세스 및 비디오 회의(video conferencing)와 같은 양방향 광대역 서비스를 원하고 있으며, VOD(Video On Demand) 또는 디지털 TV와 같은 단방향 서비스도 동시에 제공되기를 희망하고 있다. 문제는 홈까지 적어도 수 km까지 채널을 제공해야 하며, 채널에 접속하는 가입자의 수가 상당히 많다는 점이다. 이러한 문제점을 해결하는 데는 여러 가지 방법이 있지만, 그 중에서도 최근 가입자라인의 다운스트림(downstream)에 수 Mb/s의 고속전송이 가능한

ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line), 그리고 300m 범위에서 약 52Mb/s의 고속 데이터 전송이 가능한 VDSL(very-high-rate DSL)과 같은 디지털가입자라인의 도입이다^[1].

디지털가입자라인의 기술과 관련하여 국내외적으로 많은 표준들이 이루어지고 있으며, 특히 미국의 ANSI가 대표적인 표준기관이다. 여기서 이루어진 표준들 중에는 최근 ADSL 표준문서 T1E1.4 issue2^[2]에 수록되어 있으며, issue1과 비교하여 STM(Synchronous Transfer Mode) 및 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 전송 집중레이어(convergence layer), 저감 오버헤드 모드(reduced overhead mode), 전송 PSD(Power

Spectrum Density) 및 루프 타이밍 등에 대한 표준들이 추가되었다^[3].

한편, 실제 멀티페어(multi-pair) 케이블의 디지털가입자라인을 구축하는 데는 내부 및 외부케이블 환경에 따른 여러 잡음원들에 의해 그 성능열화가 필연적이라 할 수 있다. 예를 들어 내부잡음에는 열잡음, 에코 및 반사, 감쇄 및 누화(crosstalk) 뿐만 아니라, 케이블 구조에 따른 서지(surge) 보호기, 무선주파수 간섭 필터, 브리지드 탭(bridged tap) 및 부하코일 등에 의한 구조적 감쇄가 발생하게 된다. 외부잡음원으로는 불꽃 방전, 전기펜스(electric fences), 전력선 및 스위치 등에 의한 임펄스성 잡음 등을 들 수 있다^[4]. 이러한 잡음들 중에 누화는 디지털가입자라인의 용량(capacity)에 가장 크게 영향을 미치는 잡음원의 하나로서 근단누화(near-end crosstalk; NEXT)와 원단누화(far-end crosstalk; FEXT)로 구분된다.

근단누화 잡음은 동일대역에서 동시에 전송하지 않는 한 무시되므로 원단누화 잡음에 의한 디지털가입자라인의 성능평가가 중요시되고 있어 이에 대한 평가 및 측정이 이루어지고 있지만^[4],^[5] 그 이론적 평가 및 시뮬레이션 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 디지털가입자라인의 해석을 위한 twisted-pair 라인특성^[5]을 모델로 가우스 및 원단누화 잡음환경에서의 디지털가입자라인의 성능 파라메타로서 BER(Bit Error Rate)에 대한 시뮬레이션 평가를 수행한다. 특히 시뮬레이션 방법은 Semi-analytic 방법^[6]을 이용함으로써 Monte Carlo 기법에서 불가능한 10⁷이하의 에러율 평가가 가능하도록 한다. 이를 위해 II장에서는 디지털가입자라인을 해석하기 위한 채널특성 및 III장에서는 누화잡음으로서 근단누화 및 원단누화에 대해 설명한다. IV장에서는 II장에 주어진 채널특성을 이용하여 가우스(Gaussian) 잡음만의 경우와 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 경우의 BER에 대한 평가를 행한 후 V장에서 결론을 내린다.

II. 본 론

Twisted-pair 전화루프 전송채널 모델링은 디지털가입자라인 시스템 기술에 중요한 역할을 하며, 이전부터 twisted-pair 케이블의 주요 및 보조 파라메타들에 대한 정의가 이루어져 왔다. 즉, twisted-pair 케이블의 전송특성은 전송라인의 분산등가회로에서 정의된 주요 파라메타에 의해 정확히 규정될 수 있으며, 보조 파라메타는 이상전송라인의 성능 해석을 위해 사용된다. 그러나 twisted-pair 케이블의 주요 및 보조 파라메타들은 모두 주파수 함수이다.

만일 루프가 특성임피던스로 완전히 종단되었다고 하면, 길이 d 의 종단루프에서 그 전달특성은

다음과 같이 주어진다^[5].

$$H_T(d, s) = e^{-d\gamma(s)} = e^{-da(f)} e^{-j\beta(f)} \quad (1)$$

식(1)은 단순케이블 모델에 있어 다음과 같다^[5].

$$H_T(d, f) = e^{-d(k_1\sqrt{f+k_2f})} e^{-j\beta(f)} \quad (2)$$

여기서 d 의 단위는 mile이고, f 는 Hertz이다. 상수 k_1 , k_2 및 k_3 는 다음 표와 같이 주어진다^[5].

(표 1) 단순케이블 모델에 관련된 상수값

Gauge	k_1 (10 ⁻³)	k_2 (10 ⁻⁸)	k_3 (10 ⁻³)
22	3.0	0.035	4.865
24	3.8	-0.541	4.883
26	4.8	-1.709	4.907

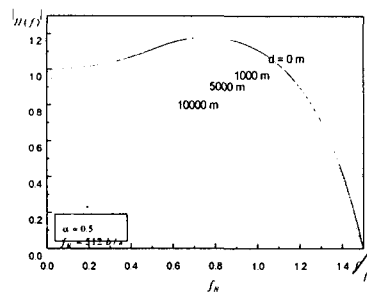
한편, 나이퀴스트(Nyquist) 이론에서 대역폭 $\beta = f_n = f_s/2$ 를 갖는 채널은 f_s 의 독립 심볼을 전송할 수 있어야 하는데 롤오프(roll-off) 상수, α 에 따른 나이퀴스트 필터링은 다음과 같다^[7].

$$H_s(j\omega) = \begin{cases} \frac{-(\omega T_s/2) - \sin(\omega T_s/2)}{\sin(\omega T_s/2)} \cos\left\{ \frac{T_s}{4\alpha} \left[\omega - \frac{\pi(1-\alpha)}{T_s} \right] \right\}, & \begin{cases} 0 \leq \omega \leq \frac{\pi}{T_s}(1-\alpha) \\ \frac{\pi}{T_s}(1-\alpha) \leq \omega \leq \frac{\pi}{T_s}(1+\alpha) \end{cases} \\ 0, & \omega > \frac{\pi}{T_s}(1+\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

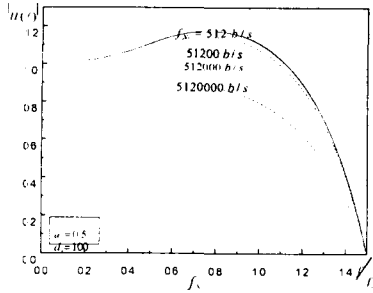
따라서 twisted-pair 케이블의 전체특성은 식(2)와 (3)으로부터 식(4)와 같이 표현되며, $\alpha=0.5$ 일 때 거리 d 에 따른 채널진폭특성을 (그림 1)의 (a), 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 채널진폭특성을 (그림 1)의 (b)에 보인다.

$$|H(f)| = |H_T(f) H_F(f)| \quad (4)$$

(그림 1)로부터 알 수 있듯이 전송거리가 클수록 또한 나이퀴스트 주파수가 클수록 채널의 진폭특성은 점점 감쇄하는 특성을 보이고 있다.



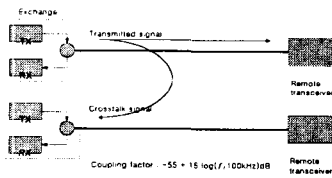
(a) 거리 d 에 따른 진폭특성



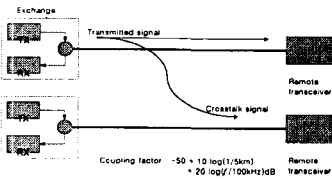
(b) 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 진폭특성
(그림 1) 필터를 도입한 Twisted-pair 케이블의 채널특성

III. 근단누화와 원단누화

누화(crosstalk)는 디지털가입자라인의 전송용량 제한에 가장 크게 영향을 미치는 잡음으로서, 멀티페어(multi-pair) 역세스케이블 내에 크게 다른 두 가지 형태의 누화, 즉 (그림 2)의 (a) 및 (b)에 각각 보이는 근단누화(NEXT)와 원단누화(FEXT)가 있다^[4].



(a) NEXT



(b) FEXT

(그림 2) 누화의 형태

근단누화는 간섭원으로서 케이블의 다른 페어(pair)의 동일단(same end)에 발생하는 간섭이며 그 크기는 전송거리와는 무관하다. 이와는 달리 원단누화는 간섭원으로서 케이블의 다른 페어의 원단 또는 반대편단(opposite end)에 발생하는 간섭이며, 그 크기는 거리에 따라 감소하는 특징을 갖는다.

근단누화는 한번에 동일 방향으로 전송하는 시스템에 영향을 미치며, 원단누화보다 그 영향이 크게 나타나지만, 동일대역에서 동시에 동일방향

으로 전송하지 않는 한 그 영향은 무시할 수 있다^[4].

따라서 본 연구에서는 근단누화에 의한 영향을 무시하고 가우스 잡음 및 원단누화 잡음환경에 대한 디지털가입자라인의 성능평가를 행하기 위해 원단누화 잡음특성에 대해서만 설명한다.

단순화된 49 disturber 원단누화 손실모델은 다음과 같다^[5].

$$FEXT_{49} = kdf^2 |H(f)|^2 \quad (5)$$

여기서, $k=8 \times 10^{-20}$

d : 루프길이[feet]

f : 주파수[Hz]

$H(f)$: 루프의 전달함수

또한, 디지털가입자라인의 수신기 전단에서 원단누화 전력밀도는 다음과 같이 표현된다^[5].

$$\begin{aligned} PSD_{FEXT}(f) &= G_s(f) FEXT_N(f) \\ &= G_s(f) \times \left(\frac{N}{49}\right)^{0.6} kdf^2 |H(f)|^2 \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 $G_s(f)$ 는 송신신호의 전력밀도이다.

식(5) 및 (6)을 이용하여 IV장에서 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 환경에서 디지털가입자라인의 BER을 평가한다.

IV. BER 성능평가

1. 가우스 잡음환경

디지털 통신시스템에서 복조오율, P_e 는 전형적인 시스템 성능평가 기준으로서 이의 시뮬레이션 방법인 Monte Carlo(MC) 기법이 가장 널리 알려져 왔다. 그러나, MC기법은 복잡한 통신시스템에 있어 아주 낮은 오율 얻기 위해서는 많은 양의 데이터 발생 및 이의 처리에 따른 컴퓨터 수행시간이 상당히 길다는 단점이 있다. 특히 디지털가입자라인의 성능은 $P_e=10^{-7}$ 이하일 것이 요구되므로^[5] MC기법으로 오율을 평가하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 빠른 수행시간에 아주 낮은 오율까지도 평가할 수 있는 Semi-analytic(SA) 시뮬레이션 기법을 이용하여 디지털가입자라인의 복조오율 성능을 평가한다. 다른 대부분의 시뮬레이션 기법과는 달리 SA기법은 시스템의 BER을 평가하는 대신에 오율식에 의해 계산하는 것으로 컴퓨터 자원의 효율적인 이용을 가져와 일단 시뮬레이션을 수행하면 평균 및 분산데이터를 저장하여 어느 SNR에서도 BER을 계산할 수 있도록 한다.

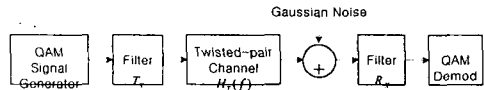
SA 시뮬레이션에 있어 BER은 다음과 같다^[6].

$$P_c = \frac{1}{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} Q \left[\frac{|E[X_i] - T|}{\sigma_X} \right] \quad (7)$$

여기서, i 의 각 값은 2^n 가능 데이터 패턴 중의 하나이며, $E[X_i]$ 는 i 번째 데이터 패턴의 평균값, σ_X 는 가우스 잡음의 분산값, T 는 스트레스홀드(threshold) 값이다. 그리고 $Q(X)$ 는 다음에 주어지는 함수이다.

$$Q(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^X \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} \right] d\alpha \quad (8)$$

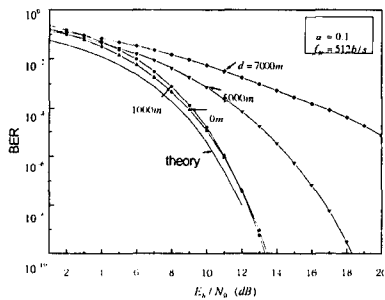
(그림 3)에 가우스 잡음환경에서 디지털가입자라인의 BER 성능평가를 위한 SA 시뮬레이션 블록도를 나타낸다. 여기서 입력 디지털신호는 QAM(또는 QPSK) 신호라 가정하고, 송수신필터 특성은 raised-cosine 필터, 디지털가입자라인의 채널특성은 식(2)로 주어지는 twisted-pair 채널로 가정한다.



(그림 3) DSL성능평가를 위한 시뮬레이션 블록도

$\alpha=0.1$ 일 때 가장 양호한 특성을 보이므로 이하의 시뮬레이션에서는 $\alpha=0.1$ 을 가정한다.

(그림 5)는 $f_N=512b/s$ 일 때 디지털가입자라인의 전송거리에 따른 BER 특성을 비교한 것이고, (그림 6)은 디지털가입자라인의 전송거리 $d=100m$ 라 할 때 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 BER 특성을 비교한 것이다.

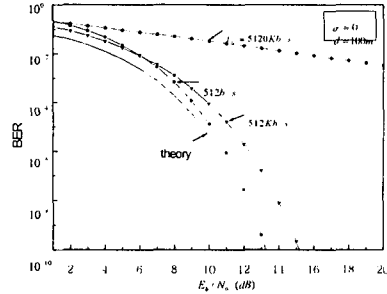


(그림 5) 나이퀴스트 주파수, $f_N=512b/s$ 일 때 DSL 전송거리에 따른 BER 특성

(그림 5)의 BER 특성에서 $d=0m$ 의 채널감쇄가 없는 경우 SA 시뮬레이션에 의한 BER 성능특성은 이론치보다 E_b/N_0 값이 0.5dB 이내의 열화를 보여 SA 시뮬레이션의 타당성을 보여 주고 있다.

한편, 전송길이 d 에 따라 BER 성능열화가 두드러짐을 알 수 있으며, 예를 들어 감쇄가 없는 $d=0m$ 의 경우 $BER=10^{-7}$ 을 얻기 위한 $E_b/N_0=11.3dB$

인 반면 $d=1000m, 5000m, 7000m$ 로 길어짐에 따라 E_b/N_0 값도 약 11.5dB, 15.7dB, 23.1dB로 열화한다.

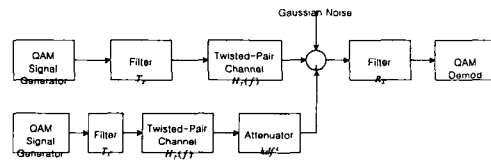


(그림 6) 디지털가입자라인 전송거리, $d=0m$ 일 때 나이퀴스트 주파수에 따른 DSL의 BER 특성

(그림 6)은 전송거리 $d=100m$ 로 고정하여 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 디지털가입자라인의 BER 성능특성을 보인 것으로 $f_N=512kb/s$ 까지는 BER 성능열화가 $BER=10^{-7}$ 기준으로 E_b/N_0 값이 1.5dB 정도밖에 안되나, $f_N=5120kb/s$ 로 높아지면 BER 성능은 상당히 크다는 점을 알 수 있다.

2. 가우스 및 원단누화 잡음환경

원단누화 잡음이 존재하는 경우의 디지털가입자라인의 BER 성능평가를 위해서는 원단누화 잡음을 발생시킬 수 있는 블록도를 추가해야 하며, 이는 식(6)으로 주어지는 원단누화 잡음특성으로부터 구성되어 (그림 3)에 추가된다. 따라서 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존할 때의 시뮬레이션 블록도는 (그림 7)과 같다.

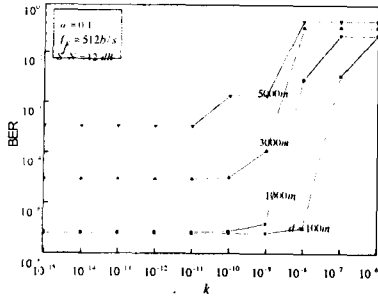


(그림 7) 가우스 잡음 및 원단누화 잡음이 공존하는 경우의 BER 성능평가를 위한 시뮬레이션 블록도

(그림 8)은 $f_N=512b/s$ 일 때 감쇄정수 k 및 전송거리 d 에 따른 원단누화 잡음에 의한 디지털가입자라인의 BER 성능특성을 나타낸다.

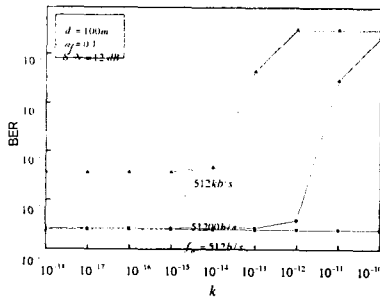
(그림 8)은 원단누화 잡음의 감쇄정수 k 에 따른 BER 성능특성으로 k 값이 작을 때는 BER 성능열화가 나타나지 않지만, k 값이 커지면 BER 성능열화가 현저하다는 점을 알 수 있다. 물론 전송거리가 클수록 k 값에 민감하여 $d=100m$ 일 때는 $k=10^{-6}$ 정도에서 $BER=2.5 \times 10^{-6}$ 에서 $BER=2.2 \times 10^{-2}$ 으로 BER 성능이 크게 열화하지만, $d=5000m$ 정도로

길어지면 $k=10^8$ 에서 $BER=3.4 \times 10^{-4}$ 에서 $BER=4.34 \times 10^{-2}$ 으로 BER 성능이 크게 열화한다. 따라서 전송길이가 길수록 원단누화 잡음에 의한 영향이 크게 나타나고 있다.



(그림 8) 감쇄정수 k 및 전송거리 d에 따른 원단누화잡음영향

(그림 9)는 전송거리 $d=100m$ 일 때 감쇄정수 k 및 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 원단누화 잡음에 의한 디지털가입자라인의 BER 성능특성을 나타낸다.



(그림 9) 감쇄정수 k 및 Nyquist 주파수 f_N 에 따른 원단누화 잡음영향

(그림 9)는 $d=100m$ 로 고정할 때 나이퀴스트 주파수 f_N 에 따른 BER 성능특성으로 f_N 이 클수록 k 값에 민감하여 $f_N=512b/s$ 일 때는 $k=10^{10}$ 이어도 $BER=2.5 \times 10^{-6}$ 의 일정한 값을 유지하지만, $f_N=51200b/s$ 로 높아지면 $BER=2.67 \times 10^{-6}$ 에서 $k=10^{10}$ 일 때 $BER=2.22 \times 10^{-2}$ 로 크게 열화한다. 마찬가지로 $f_N=512kb/s$ 로 더욱 높아지면, $BER=3.61 \times 10^{-5}$ 에서 $k=10^{12}$ 일 때 $BER=3.18 \times 10^{-2}$ 로 크게 열화하고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 디지털가입자라인의 성능분석을 위해 twisted-pair 케이블의 특성을 고려하여 가우스 잡음환경만의 경우와 가우스 잡음 및 원단

누화 잡음이 공존하는 경우에 있어서 10^{-7} 이하의 오율계산을 위해 Semi-analytic 시뮬레이션 기법을 도입하여 BER 성능분석을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

BER 성능특성은 전송거리 및 나이퀴스트 주파수에 따라 그 성능이 열화하며 특히 전송거리 $d=100m$ 에서 $5000m$ 로 길어지면 $BER=10^{-7}$ 을 얻기 위한 E_b/N_0 면에서 약 4.5dB정도 열화한다. 한편, 나이퀴스트 주파수 $f_N=512kb/s$ 까지는 성능열화가 미미하지만 $f_N=5120kb/s$ 로 높아지면 그 성능열화는 상당히 크다. 또한, 원단누화 잡음이 BER 성능에 미치는 영향은 전송거리면에 있어서는 원단누화 잡음감쇄정수 $k=10^{10}$ 이상일 때, 나이퀴스트 주파수면에 있어서는 $k=10^{14}$ 이상일 때 크게 나타난다.

결론적으로 본 논문에서의 해석은 간단한 twisted-pair 케이블의 특성을 이용하였지만, 앞으로 4단자망과 같은 더욱 복잡한 채널특성을 이용하여 디지털가입자라인에 대한 성능평가를 행하고자 할 때에도 본 논문의 해석방법이 그대로 적용될 수 있으며, 또한 본 해석결과는 디지털가입자라인의 국내외 표준제정의 기본 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Z. Papir and A. Simmonds, Competing for throughput in the local loop, IEEE Commun. Mag., pp.61-66, May 1999.
- [2] ANSI T1.413-1997, Standards project for interfaces relating to carrier to customer connection of asymmetrical digital subscriber line (ADSL) equipment.
- [3] W. Y. Chen, The development and standardization of asymmetrical digital subscriber line, IEEE Commun. Mag., pp.68-72, May 1999.
- [4] J. W. Cook, R. H. Kirkby, M. G. Booth, K. T. Foster, D. E. A. Clarke, and G. Young, The noise and crosstalk environment for ADSL and VDSL systems, IEEE Commun. Mag., pp.73-78, May 1999.
- [5] W. Y. Chen, DSL: Simulation Techniques and Standard Development for Digital Subscriber Lines, Mac Millan, 1998.
- [6] W. H. Tranter and K. L. Kosbar, Simulation of communication system, IEEE Commun. Mag., pp.26-35, July 1994.
- [7] S. Haykin, Communication Systems, John Wiley & Sons, 1994.