

DMT기반 VDSL 시스템을 위한 새로운 비트 할당 알고리즘 설계

정희원 정인택*, 송상섭*

A New Bit Allocation Algorithm for DMT based VDSL System

In-Taek Jeong*, Sang-Seob Song* *Regular Members*

요 약

DMT기반 VDSL 시스템에서 채널의 주파수 특성에 따라 각 부채널에 각기 다른 비트를 할당하는 “Bit allocation algorithm”은 DMT기반 시스템의 초기화 과정에 필수적으로 사용되며, 초기화 시간을 단축하기 위해 이 알고리즘의 고속화가 필요하다. 기존의 알고리즘인 Chow^[6], Campello^[7]가 제시한 알고리즘들은 ADSL과 같이 부채널 수가 적은 응용분야에서는 적용 가능했으나, 부채널 수가 ADSL의 16배에 이르는 VDSL과 같은 경우에는 계산량이 과다하기 때문에 실시간 적용이 어렵다.

본 논문에서는 수신단에서 계산된 SNR을 미리 계산된 기준 SNR 값과 비교하는 방법을 이용하여 계산량을 줄인 새로운 비트 할당 알고리즘을 제시한다. 제안된 알고리즘은 기존 알고리즘에서 $N \cdot \log_2 N$ 의 연산이 필요한 SNR을 내림차순으로 분류하는 과정을 없앴고, \log_2 연산, 덧셈 및 나눗셈의 연산을 단순한 비교 연산으로 대체함으로써, 보다 고속으로 각 부채널에 할당할 비트 수를 계산할 수 있다. 그리고, 제안된 고속 알고리즘을 VDSL 시스템에 적용한 결과 기존의 알고리즘인 Chow 알고리즘과 동일한 성능을 보임을 확인하였다.

I. 서 론

최근 인터넷과 멀티미디어 서비스가 활발하게 성장함에 따라 고속의 데이터 전송이 무엇보다 요구되고 있다. 이에 대해 세계 유수 기업에서는 기존의 선로를 최대한 활용할 수 있는 가입자망 전송기술인 DSL(Digital Subscriber Line) 개발에 박차를 가하고 있다. 이에 대한 예로, HDSL(High-bit-rate DSL), ADSL(Asymmetric DSL) 그리고 VDSL(Very-high-bit-rate DSL)을 들 수 있으며, 그 중 HDSL, ADSL은 현재 상용화되어 있으며, VDSL의 경우 계속적인 연구가 이루어지고 있다. ANSI 등에서는 VDSL 시스템의 선로부호 방식으로서 QAM 기반 SCM(Single Carrier Modulation)방식과 DMT(Discrete Multi-Tone)기반 MCM(Multi-Carrier Modulation)방식을 선택하여 사용토록 하고 있다^[3].

VDSL 시스템에 사용되는 전송선로인 UTP(Unshielded Twisted Pair)선로는 주파수가 증가함에 따라 전송손실이 증가한다. 그리고 RF(Radio Frequency) 잡음과 인접선로에 의한 FEXT(Far-End Crosstalk)나 NEXT(Near-End Crosstalk)는 채널의 주파수 특성에 다양한 형태로 나쁜 영향을 준다. 이와 같은 채널환경에 따라 MCM방식 VDSL 시스템에서는 전송채널을 여러 개의 부채널(sub-channel)로 나뉘어 각 부채널마다 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 고려하여 전송할 비트 수를 결정하는데, 이것을 비트 할당 알고리즘(bit allocation algorithm) 또는 “bit loading algorithm”이라 한다^[5]. 이들의 실시간 구현방법이 VDSL 시스템의 핵심사항이다.

이 알고리즘의 성능은 제한된 power budget과 power spectrum mask의 조건하에서 채널의 전달함수에 따라 주어진 에너지를 각 부채널에 어떻게 할당

* 전북대학교 전자정보공학부
 논문번호 : 00171-0512, 접수일자 : 2000년 5월 12일

하는가에 달려 있다. 이를 최적으로 할당하는 알고리즘으로 “water-filling algorithm”이 널리 알려져 있다¹⁰⁾. 그러나 이 알고리즘의 경우 계산량이 많아 실시간 구현이 어렵다. 이 water-filling 알고리즘을 보다 적은 계산량으로 구현할 수 있는 알고리즘들이 Chow⁶⁾와 Campello^{7,8)}에 의해 개발되어 ADSL 등에 사용되고 있다. 그러나 이들 알고리즘 또한 ADSL과 같이 부채널 수($N_{ADSL} = 256$)가 적은 환경에서는 적용가능하나, VDSL과 같이 부채널 수($N_{VDSL} = 256 \times 16$)가 많은 경우에는 실시간 적용이 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 계산량과 복잡도를 줄여 실시간 VDSL 시스템에 적용할 수 있는 새로운 비트 할당 알고리즘을 제시한다. 본 알고리즘은 전송 속도에 따른 참조 비트분포와 각 비트 수에 해당하는 기준 SNR 값을 미리 계산하여 표로 저장한 후, 수신된 신호의 SNR를 기준 SNR 값과 비교하여 각 부채널당 비트 수를 할당한 후, 참조 비트분포와 비교함으로써 요구된 비트 수, 즉, 필요한 전송속도를 지원하도록 하였다.

본 논문의 구성은 제 2 장에서 DMT 기반 비트 할당 알고리즘들과 제안된 알고리즘을 소개하고, 제 3 장에서는 제안된 알고리즘을 VDSL 시스템에 적용한 시뮬레이션 결과를 제시하고 제 4 장에서 결론을 정리하였다.

II. DMT기반 비트 할당 알고리즘

본 장에서는 QAM 시스템을 통하여 DMT기반 MCM 시스템의 파라미터를 결정하며, 이들을 이용한 water-filling 개념을 소개하고, 이 개념에 의한 비트 할당 알고리즘의 문제점을 살펴본 후, 이 문제점을 개선한 새로운 알고리즘을 제시한다.

2.1 QAM 시스템 분석 및 water-filling 알고리즘

QAM 시스템의 정상도에서 평균에너지(E)와 수신부에서 SNR은 식(1), 식(2)와 같이 얻어진다⁴⁾.

$$E = \frac{(L-1)d^2}{6} \tag{1}$$

$$SNR = \frac{E|H|^2}{2\sigma^2} \tag{2}$$

여기서, 식(1)의 L 과 d 는 각각 정상도에서 신호 점의 수와 송신측에서 신호 점간의 최소거리를 나

타내고 있으며, 식(2)의 $|H|$ 는 채널의 전달함수를, σ^2 은 FEXT, 배경잡음(background noise) 등 채널에서 발생하는 각 잡음에 대한 분산값을 나타낸다.

수신단에서 신호 점간의 최소거리인 $d_{min}^2 = |H|^2 \cdot d^2$ 을 식(1)과 식(2)에 적용하여 L 을 구하면, 식(3)과 같다. 식(3)에 $\Gamma \equiv d_{min}^2 / 12\sigma^2$ 을 정의한 후, L 개의 신호점을 이용하는 QAM 신호에 할당될 비트 수(b)를 계산하면 식(4)와 같이 표현된다.

$$L = 1 + \frac{SNR \cdot 12\sigma^2}{d_{min}^2} \tag{3}$$

$$b = \log_2 L = \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{\Gamma} \right) \tag{4}$$

$$\Gamma = \frac{d_{min}^2}{12\sigma^2}$$

여기서, Γ 를 SNR gap이라 하며, 그 값은 식(5)와 같은 QAM 시스템의 원하는 비트 오류율(BER : Bit Error Rate, P_e)로부터 계산할 수 있다.

$$P_e \leq 4Q\left[\frac{d_{min}}{2\sigma}\right] \tag{5}$$

식(5)를 Γ 에 대해 정리하면, $\Gamma = [Q^{-1}(P_e/4)]^2/3$ 이 된다. 한편 DSL 시스템에서는 추가적 잡음에 대한 noise margin(γ_m)과 채널부호에 의한 coding gain(γ_c)을 고려하여 SNR gap을 식(6)과 같이 조정한다. 그리고 식(7)은 식(6)을 데시벨(dB)로 표현한 것이다.

$$\Gamma = \frac{\gamma_m [Q^{-1}(P_e/4)]^2}{3\gamma_c} \tag{6}$$

$$\Gamma = [Q^{-1}(P_e/4)]^2 + \gamma_m - \gamma_c - 4.77 [dB] \tag{7}$$

DMT 기반 멀티캐리어 시스템은 전송채널을 N 개의 부채널로 나누며, 이들 각각의 부채널에 QAM 시스템을 적용한다. 이들 부채널들은 채널의 전달함수와 잡음전력만이 다를 뿐, 나머지 파라미터는 동일하다. 이로 인해, 각 부채널의 SNR만을 달리 계산한다면, 멀티캐리어 시스템에서도 위의 식(1)~(7)을 이용하여 각 부채널에 할당될 비트 수를 계산할 수 있다.

예로서 i 번째 부채널을 살펴보면, i 번째 부채널의 SNR을 $SNR(i)$ 라 할 때 i 번째 부채널에 할당될 비트 수($b(i)$)와 QAM 정상도의 신호점 수(L_i)

는 식(4)를 이용하여 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$b(i) = \log_2 L_i = \log_2 \left(1 + \frac{SNR(i)}{\Gamma} \right) \quad (8)$$

여기서, N 개의 부채널을 갖는 멀티캐리어 시스템에서 총 비트 수(b)와 총 에너지(E)는 식(9)와 같이 각 부채널의 것을 합한 것과 같다.

$$b = \sum_{i=1}^N b(i), \quad E = \sum_{i=1}^N E(i) \quad (9)$$

식(9)와 같은 크기로 제한된 에너지를 갖는 전송 채널에서 전송 가능한 최대 비트 수는 식(10)으로 표현된 water-filling solution을 통하여 계산할 수 있다^[10].

$$E(i) + \frac{\Gamma \cdot \sigma_i^2}{|H_i|^2} = \lambda \quad (10)$$

여기서, σ_i^2 와 H_i 는 각각 i 번째 부채널에 대한 잡음의 분산과 전달함수를 나타낸다. 그리고 λ 는 Lagrange multiplier로 모든 채널에 동일한 값으로 주어진다. 식(10)은 채널특성 함수를 갖는 $(\Gamma \cdot \sigma_i^2)/|H_i|^2$ 과 그 채널에 할당될 수 있는 에너지 $E(i)$ 의 합은 모든 채널에서 일정해야 한다는 소위 water-filling 개념을 표시한다.

그러나 위와 같은 water-filling 개념에 근거한 water-filling 알고리즘^[10]이나 이 알고리즘을 기본 개념으로 하는 Chow^[6], Campello^[7] 알고리즘의 경우 각 부채널에서 SNR을 내림차순으로 정렬하는 과정이 필요하다. 이 정렬과정은 일반적으로 $N \cdot \log_2 N$ 의 연산을 필요로 한다^[10]. 또한 Chow 알고리즘^[5]은 식(8)에서 직접 부채널 당 비트 수를 N 회 반복하여 계산하기 때문에 부채널 수가 ADSL의 경우보다 최대 16배에 이르는 VDSL에서 실시간 구현이 어렵다.

위와 같은 과정을 통해서 계산된 총 비트 수(b)는 데이터 전송률(R)과 DMT 심벌의 주기(T)를 고려한 심벌 당 비트 수(δ)보다 커야 하며, 비트 할당 알고리즘은 최종적으로 심벌에 할당되는 비트 수가 δ 이 되도록 각 부채널에 할당될 비트 수를 조정하는 단계를 수행한다.

2.2 제안된 알고리즘

위에서 설명한 water-filling 알고리즘에서 발생된 문제점을 개선하기 위하여, 본 논문에서는 각 비트

에 대한 기준 SNR 값을 표로 정리한 후, 수신단에서 계산된 SNR을 기준 SNR 값과 비교함으로써 비트 수를 계산하는 방법을 제시한다.

식(8)에서 SNR을 Γ 와 $b(i)$ 의 함수로 표현하면 식(11)과 같다.

$$SNR_K = \Gamma(2^K - 1) \quad (11)$$

여기서, SNR_K 는 K 비트를 할당하는데 필요한 SNR을 의미한다.

그리고 식(8)에서 $SNR(i)$ 을 이용하여 $b(i)$ 를 계산할 경우, $b(i)$ 는 일반적으로 정수로 되지 않는다. 그러나 실제 환경에서의 $b(i)$ 는 비트 수이므로 정수가 되어야 한다. 이와 같은 문제는 식(11)의 SNR_K 을 기준 값으로 하여 수신단에서 계산된 SNR을 평가하는 경우에서도 마찬가지이다. 이를 효율적으로 처리하기 위해 Chow 알고리즘의 경우 $b(i)$ 에 $\text{round}(b(i))$ 를 취한다^[4]. 본 논문에서 제안한 알고리즘에서는 이와 같은 효과를 갖도록 하기 위해, i 번째 부채널의 SNR, 즉, $SNR(i)$ 가 식(12)의 조건을 만족하는 K 를 찾은 후 i 번째 부채널에 K 비트를 할당하도록 하였다.

$$SNR_{K-1/2} < SNR(i) \leq SNR_{K+1/2} \quad (12)$$

즉, $K-1/2$ 비트에 대한 $SNR_{K-1/2}$ 과 $K+1/2$ 비트에 대한 $SNR_{K+1/2}$ 사이에 존재하는 $SNR(i)$ 에 대해 K 비트를 할당한다.

한편, 식(12)에서 i 번째 부채널에 할당한 K 비트 전송에 필요한 SNR_K 과 수신된 $SNR(i)$ 사이의 차이인 식(13)의 $SNR_{\Delta,K}$ 에 해당하는 남은 에너지를 계산한 후, 역방향 채널을 통하여 송신 에너지를 증·감시킴으로써 한다.

$$SNR_{\Delta,K} = SNR(i) - SNR_K \quad (13)$$

전술한 내용을 토대로 제안된 새로운 알고리즘은 다음과 같은 6단계를 거쳐 각 부채널에 할당할 비트 수를 계산한다.

1. 초기값으로 각 부채널에 비트 할당을 위한 데이터 전송률에 따른 참조 비트 할당표와 각 비트에 대한 기준 SNR 값을 표로 만든다. 그리고 SNR gap(Γ), 각 부채널 당 배정할 수 있는 최대 에너지($E_{\max}(i)$), 사용 가능한 최대 부채널 수(N)를 초기화시킨다.

2. 수신된 신호로부터 각 부채널의 $SNR(i)$ 를 계산한다.

3. $SNR(i)$ 을 이용하여 각 부채널 당 전송 가능한 최대 비트 수를 계산한다.

$b_{total} = 0 // N$ 개의 채널에 할당될 비트 수의 합계
for $i=1$ to N

if $SNR(i) > SNR_{0+1/2} //$ 최소한 1 비트라

도 보낼 수 있다면

if $SNR_{K-1/2} < SNR(i) \leq SNR_{K+1/2} //$

K 를 구함:

$$b(i) = K$$

$$b_{total} = b_{total} + b(i)$$

여기서, $SNR_{0+1/2}$ 은 0 비트 할당을 위한 기준 값이며, $SNR_{K+1/2}$ 은 K 비트를 위한 기준 SNR 값을 뜻한다.

4. 심벌 주기를 T [sec]라 하면 전송속도(R)는 b_{total}/T 로 결정되며, 결정된 전송속도에 대해 초기화 과정에서 표로 저장된 각 부채널별 참조 비트 할당표 즉, 각 전송속도에 대한 부채널별 참조 비트 수를 갖는 표를 선택한다.

5. 각 부채널에서 $SNR(i)$ 로부터 계산된 비트 수와 참조 비트 할당표의 비트 수의 차이를 계산한다.

- $SNR(i)$ 에 의한 비트 수($b(i)$)가 참조 비트 할당표의 비트 수($b_{ref}(i)$)보다 적거나 같을 경우 해당 부채널의 비트 수로 $b(i)$ 를 선택하고, 클 경우 $b_{ref}(i)$ 를 선택하도록 한다.

- $b(i)$ 가 $b_{ref}(i)$ 보다 작은 부채널에서 $\sum_i [b_{ref}(i) - b(i)]$ 를 계산하여 $b(i)$ 가 $b_{ref}(i)$ 보다 큰 부채널에 $[b(i) - b_{ref}(i)]$ 에 비례하도록 이들 비트 수를 분배한다.

6. 각 부채널에서 $S_{d,K}$ 만큼의 SNR 증·감을 위해 요구되는 에너지를 식(13)과 같이 계산한다.

위와 같은 비교연산만을 통하여 비트 할당을 할 경우, 식(5)을 이용하는 기존방법의 복잡한 계산과정을 피할 수 있으며, 또한 SNR의 내림차순 정렬

과정이 불필요하므로 비트 할당에 소요되는 계산량을 줄일 수 있다. 위의 과정 3의 경우에 대해 Chow의 알고리즘과 제시된 알고리즘의 계산량의 비교는 다음과 같다.

- Chow 알고리즘: [Sorting+2N 덧셈+N 나눗셈]
- 제안된 알고리즘 : [최대 10N 비교연산] (\therefore 부채널 당 가능한 최대 비트 수: 11)

한편, 제안된 알고리즘을 look-up table로 구현할 경우, 기준 SNR 값에 따른 비트 수를 look-up table에 저장한 후, 각 부채널의 SNR들을 적절한 형태로 변환하여 look-up table의 주소로 사용하면, 위와 같은 비교연산들은 생략될 수 있다.

III. DMT기반 VDSL에 대한 알고리즘의 시뮬레이션

본 논문에서는 시뮬레이션 대상으로서 차세대 초고속 가입자망으로 유력시되고 있는 DMT기반 VDSL 시스템을 선택하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음과 같다^[1].

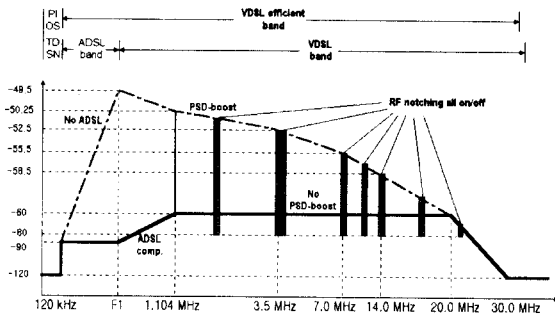
- 대상선로 : 3000 ft. UTP
- 전송속도(R) : 25.92 Mbps
- 대역폭 : 17,664 MHz
- 최대 부채널 수(N) : 4,096
- 부채널 대역폭 : 4.3125 kHz
- Coding gain(γ_c) : 6 dB
- Noise margin(γ_m) : 6 dB
- Bit error rate(P_e) : 10^{-7}

채널잡음은 ANSI에서 제안된 배경잡음과 20개의 VDSL FEXT를 고려하였다^{[1][2]}. 그리고 상향과 하향에 배정된 채널은 4,096개의 부채널 중 (1~64)번과 (521~640)번 부채널을 상향으로 배정하고 나머지 부채널을 하향으로 배정하였다.

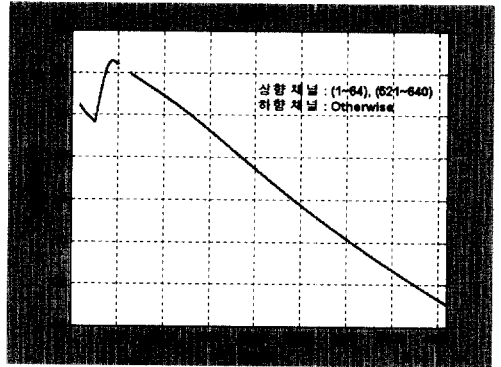
위의 조건들로부터 식(6)의 Γ 를 계산하면 9.5499이다. 그리고 계산된 Γ 와 식(11)을 통하여 기준 SNR 값을 계산하면 표 1과 같다.

표 1. 비트 수에 대한 기준 SNR

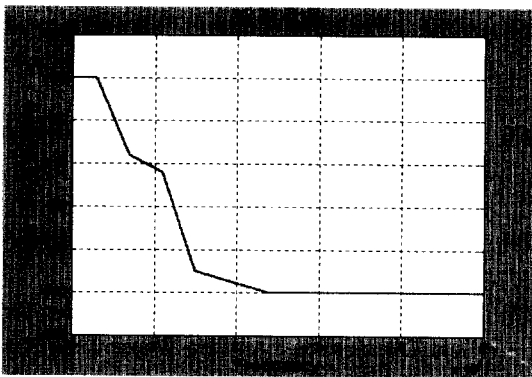
비트 수	기준 SNR	비트 수	기준 SNR	비트 수	기준 SNR
0.5	5.9722	4.5	23.1500	8.5	35.3755
1.5	12.4208	5.5	26.2596	9.5	38.3918
2.5	16.4809	6.5	29.3187	10.5	41.4051
3.5	19.9341	7.5	32.3532	11.5	44.4169



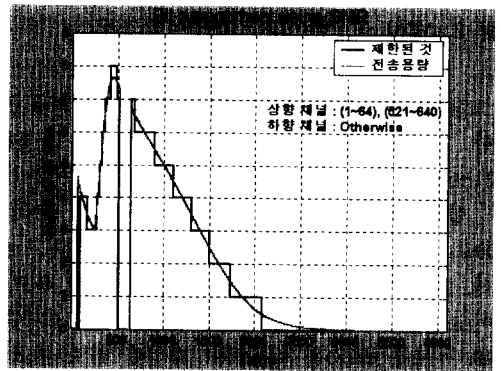
(a) VDSL 시스템의 PSD mask



(b) 각 부채널의 SNR 분포



(b) 배경잡음 모델

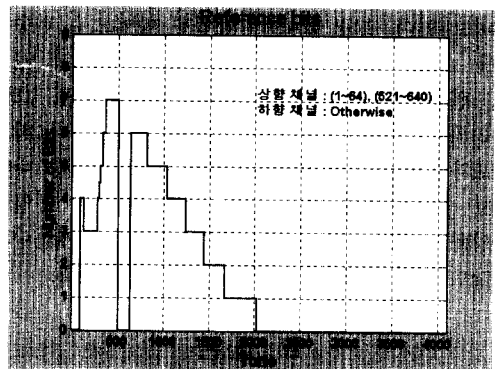


(c) 전송용량과 SNR에 의한 비트 분포

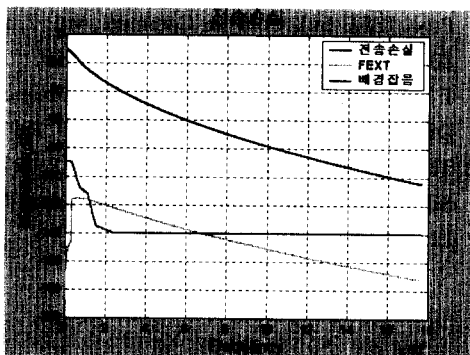
그림 1. VDSL 시스템의 PSD 및 잡음모델

그림 (1-a)는 VDSL 시스템의 PSD(Power Spectral Density) mask를 나타내고 있으며, 본 시뮬레이션에서는 모든 채널에 -60dBm/Hz 의 PSD를 갖도록 하였다.

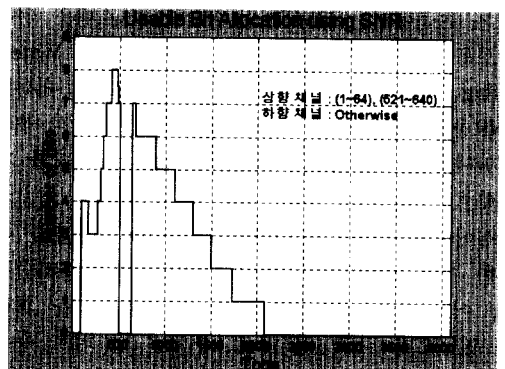
그리고 그림 (1-b)에 보인 배경잡음 모델에서 알 수 있는 바와 같이 배경잡음은 저주파 대역에서 성능에 보다 큰 영향을 줄 수 있다.



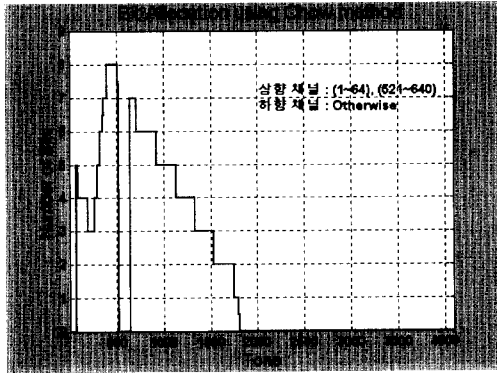
(d) 참조 비트 분포



(a) 채널의 전송손실 특성



(e) SNR에 의한 최대 비트 분포



(f) Chow 방법의 최대 비트 분포

그림 2. VDSL 시스템에 대한 시뮬레이션 결과

그림 (2)의 시뮬레이션 결과는 하향 채널만을 고려한 것이다. 이로 인해, 상향 채널인 (1~64), (521~640)번째 부채널에서 비트 할당은 모두 0비트가 할당되었다. (2-a)는 시뮬레이션에서 고려된 3,000 ft. UTP 선로의 전송손실특성을 나타내고 있으며, 그림 (2-b)는 각 부채널(Tone)의 SNR 분포를 보이고 있다. 그리고 그림 (2-c)는 그림 (2-b)의 SNR 분포를 식(8)을 이용하여 계산한 비트 분포와 제안된 방법에 의한 SNR을 이용한 비트 분포를 나타내고 있다. 그림 (2-d)는 제안된 방법으로 전송속도를 고려하여 계산된 비트 분포를 나타내고 있으며, 전송속도로는 25.92 Mbps를 고려하였다. 그림 (2-e)와 그림(2-f)는 제안된 방법에 의한 최대 비트 분포와 Chow 방법에 의한 최대 비트 분포를 나타내고 있으며, 그림에서 보듯이 성능에서는 동일한 특성을 갖고 있으나, 제안된 알고리즘이 계산량과 복잡도 면에서 훨씬 간단한 구조를 갖고 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 DMT기반 VDSL 시스템을 위한 새로운 비트 할당 알고리즘을 제안하였다. Water-filling 개념에 기반을 둔 기존의 알고리즘에서는 SNR을 내림차순으로 정렬해야 한다. 한편, 각 부채널마다 $b(i) = \log_2(1 + SNR(i)/T)$ 로 비트 수를 계산함으로써 부채널 수가 많은 시스템에서는 실시간 구현이 어렵다. 이에 대해, 본 논문에서는 표를 이용한 참조 비트분포와 기준 SNR 값을 이용하였으며, 이로 인해 SNR의 내림차순 정렬과정을 피할 수 있었으며 비교연산만으로 부채널 당 비트 수를 구할 수 있도록 하였다. 그리고 DMT기반 VDSL

시스템의 파라미터를 이용하여 제안된 알고리즘을 시뮬레이션한 결과 성능 면에서는 ADSL 시스템에서 사용하고 있는 Chow 알고리즘과 동일하였고, 계산량에서는 단순한 비교연산을 수행함으로써 기존의 알고리즘에 비해 훨씬 간단하게 부채널 당 비트 수를 계산할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 송상섭, "멀티캐리어 방식 모뎀의 선로 적응등화기 최적설계," 한국전자통신연구원, 연구보고서, 1999.
- [2] ANSI T1E1.4/98-043R8, "Very-high-speed Digital Subscriber Lines System Requirements," Nov. 1998.
- [3] ANSI T1E1.4/99-004, "Very-high-speed Digital Subscriber Line(VDSL) Technical Specification," Aug. 1999.
- [4] ANSI T1E1.4/91-157, "A Multicarrier Primer," pp. 1-18, Nov. 1991.
- [5] J. A. C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission : An Idea Whose Time Has Come," IEEE Communications Magazine, vol. 28, pp. 5-14, May 1990.
- [6] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels," IEEE trans. on Commun, vol. 43, pp. 773-775, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [7] J. Campello, "Optimal Discrete Bit Loading for Multicarrier Modulation System," ISIT, Aug. 1998.
- [8] J. Campello, "Practical Bit Loading for DMT," Proc. IEEE Intl. Conf on Commun., vol. 2, pp. 801-805, Vancouver, Canada, June 1999.
- [9] J. M. Cioffi, Lecture Notes for Advanced Digital Communications, Stanford, Fall 1997.
- [10] Thomas Starr, John M. Cioffi and Peter J. Silverman, Understanding Digital Subscriber Line Technology, Prentice Hall, 1999.

정 인 택(In-Taek Jeong)



1994년: 순천대학교 전자공학과
졸업(공학사)

1997년: 전북대학교 전자공학과
공학석사

1997~현재: 전북대학교
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 디지털통신, 부호이론, xDSL 모델설
계 등

송 상 섭(Sang-Seob Song)



1978년 2월: 전북대학교
전기공학과 졸업(공학사)

1980년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 공학석사

1986년 8월~1990년 8월:
Department of Electrical
and Computer
Engineering, University
of Manitoba

1981년 3월~현재: 전북대학교 전자정보 공학부 교수

1994년~1996년: 전북대학교 공과대학 부학장

<주관심 분야> xDSL 모델, Home Network, 채널
부호, Gigabit Ethernet