

적응적인 대역폭을 이용한 DMT에서의 비트 할당 알고리즘

최현우, 신봉식, 정정화
 한양대학교 전자공학과

전화 02-2290-0558 / 팩스 02-2299-2129

A Bit Allocation Algorithm Using Adaptive Bandwidth for DMT

Hyun Woo Choi, Bong Sik Sihn, Jong Wha Chong
 Dept. of Electronic Eng. Hanyang Univ.

hwchoi@shira.hanyang.ac.kr

Abstract

This paper proposes a bit allocation algorithm using adaptive bandwidth for ADSL that uses the DMT technology. In certain cases for high attenuation loops the conventional algorithms are unable to assign data bits to the higher frequency tones, due to the power spectrum mask limitation recommended by ANSI Standard, even if the total power budget is not expended. In the proposed bit allocation algorithm, adjacent empty tones that would not be used merge into single tone, then additional bits is assigned to the merged empty tones. Because additional bits is allocated, most of the available power is used. The proposed algorithm show that total bit increase in about 2~9% bits more than about conventional "water-filling" and "bit removal" algorithms and that is able to use about 93% of the available budget power.

1. 서론

ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)은 기존의 전화선을 통해 고속의 부호화 된 디지털 데이터를 가입자에게 전송하는 기술로 송·수신단 간의 전송 데이터율이 다른 비대칭 전송 방식으로 최대 다운로드 6Mbps, 업로드 640Kbps까지 데이터 전송이 가능하다. ADSL에서 사용하고 있는 전송 방식은 CAP(Carrierless Amplitude Phase)와 DMT(Discrete MultiTone)가 있다. CAP는 초기의 ADSL에서 사용되었던 변조 방식으로 2개의 기저대역 신호를 In-phase 와 Quadrature-phase 필터를 이용하여 Passband

spectral shaping하여 전송하는 방식이다[1]. DMT는 Amati사에서 제안한 방식으로 전 주파수 대역을 여러 개의 tone으로 나누어 데이터를 전송함으로써 감쇄가 심한 전화선(Twisted pair cable)에서 전 대역의 주파수를 이용하는 것보다 전력 주파수 대역(power spectrum Density)을 최적화 하는데 유용하다[2]. 각 tone이 갖는 노이즈 감쇄 비율에 따라 비트 할당을 결정하는데 본 논문에서는 DMT 전송 방식에서 비트 할당 방법을 제안하고 ANSI에서 제시한 전화선 환경과 전력 제한 조건을 이용하여 비트 할당 알고리즘을 시뮬레이션 하였다[5].

2. DMT 시스템

DMT(Discrete Multitone)는 전화망을 이용한 표준의 고속 전송의 Line Code 방식이다. 전 대역의 주파수를 여러 개의 tone으로 나누어 서로 직교하는 부반송파를 각 tone에 할당 변조하는 방식으로 QAM 방식에 의해 신호 x_n 은 부반송파 p_n 이 곱해진 신호가 된다.

변조는 Inverse Discrete Fourier transform에서 수행한다. 만약 DMT 신호가 N개의 반송파를 갖는다면 이산 신호는 2N-point가 되어 식(1)과 같이 신호 \tilde{x}_k 를 얻게된다.

$$\tilde{x}_k = \sum_{k=0}^{2N-1} x_k e^{j(21kn)/2N} \quad (1)$$

cyclic prefix는 각 채널간의 여유 주기로 정의되며, 기본 데이터 마지막에 v 신호를 추가한 $\hat{x}_k + v$ 가 된다. 각 샘플은 DAC (Digital-to-Analog Converter)를 거쳐 채널을 통하여 보내진다.

수신된 신호는 cyclic prefix가 덧붙여진 연속적인 신

호 $y_k = \tilde{x}_k + v$ 로 샘플링하게 된다. 샘플링 신호는 병렬 신호로 변환한 후 FFT를 거친 후 각 tone에 덧붙여진 cyclic prefix 신호를 제거한 후 원래의 신호로 복원하는 과정을 거친다. 그림 1은 DMT 시스템 구조를 보인 것이다[2],[3].

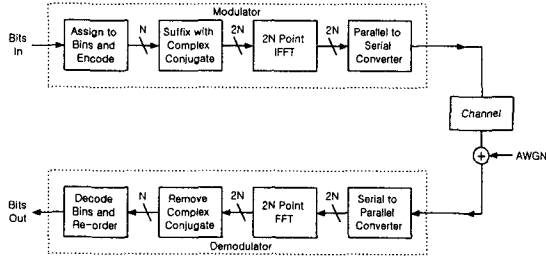


그림 1 DMT 시스템 구조

3. 채널 모델링

그림 2는 전화선에 대한 등가 회로를 보인 것이다.

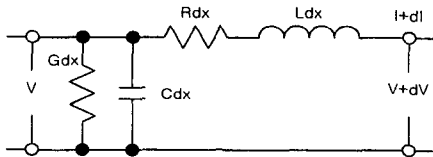


그림 2 전화선 등가 회로

등가 회로에서의 전파 상수는 다음과 같다.

$$\gamma(s) = \sqrt{(G(f) + sC(f))(R(f) + sL(f))} \quad (2)$$

거리가 d인 전체 전달 함수는

$$H(d,s) = e^{-d\gamma(s)} = e^{-d\alpha(f)} e^{-d\beta(f)} \quad (3)$$

$s = j2\pi f$ 이다. $\gamma(s)$ 는 주파수 f 의 복소 함수이고 $\alpha(f)$, $\beta(f)$ 는 주파수 f 의 실수 함수이다. 주파수에 대한 전체 전달 함수는

$$H(d,f) = e^{-d(K_1\sqrt{f} + k_2f)} e^{-jd k_3f} \quad (4)$$

각각의 파라미터 K_1 , K_2 , K_3 는 표 1에 나타내었다.

Gauge	$K_1(\times 10^{-3})$	$K_2(\times 10^{-6})$	$K_3(\times 10^{-5})$
22	3.0	0.035	4.865
24	3.8	-0.541	4.883
26	4.8	-1.709	4.907

표 1. 전달 함수의 파라미터

전화선에서의 노이즈는 AWGN외에 Crosstalk Noise가 존재하며 NEXT(Near End Crosstalk)와 FEXT(Far End Crosstalk)로 분류할 수 있다[1].

3.1 NEXT(Near End Crosstalk) Noise

NEXT는 동일한 전화선 Cable 내에서 서로 다른 전화선의 동일한 끝 부분에서 수신되는 데이터와 전송되

는 데이터 사이에서 생성되는 혼선으로 정의된다.

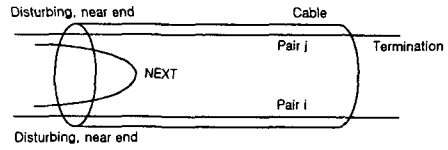


그림 3 NEXT 노이즈

이에 대한 전달 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} N_N(f) &= P(f)NEXT(f) \\ &= P(f) \frac{1}{1.134 \times 10^{13}} f^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 FEXT(Far End Crosstalk) Noise

FEXT는 동일한 전화선 Cable내에서 서로 다른 전화선의 다른 끝 부분에서 수신되는 데이터와 전송되는 데이터 사이에서 생성되는 혼선으로 정의된다.

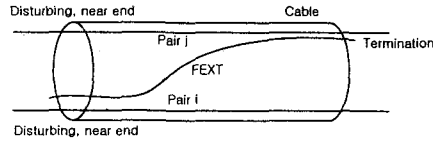


그림 4 FEXT 노이즈

이에 대한 전달 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} N_F(f) &= P(f)FEXT(f) \\ &= P(f) |H(f)|^2 k d f^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$|H(f)|^2$ 는 채널의 전달 함수, $k = 8 \times 10^{-20}$ 인 상수, d 는 전화선의 거리를 나타낸다.

4. 비트 할당 알고리즘

비트 할당 알고리즘은 DMT 변조에서 최적의 비트 할당을 결정하는데 필요한 알고리즘이다. 각 tone에 할당되는 비트의 수와 비트 수만큼 전송하는데 필요한 전력과의 관계는 다음과 같다.

$$b_n = \log_2 \left(\frac{3 P_n H_n}{K N_n} + 1 \right) \quad (7)$$

b_n : n번째 tone에서의 비트 수

P_n : n번째 tone에서 b 비트 전송하는데 필요한 전력

$\frac{H_n}{N_n}$: n번째 tone에서 노이즈 전력의 감쇄비

$$K = \left[Q^{-1} \left(\frac{P_e}{N_e} \right) \right]^2, \text{ where } N_e = 4 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}^{b_n}} \right]$$

P_e 는 비트 Error Rate, N_e 는 가장 인접해 있는 point의 수, $Q(x)$ 는 평균 분산 함수의 부분 정수로

정의된다. N_e 는 constellation의 함수로 $2 \leq N_e \leq 4$ (for $b_n \geq 2$)범위로 정의되며 논문에선 $N_e = 3$ 이라고 정했다[4].

비트 b_n 을 전송하는데 필요한 전력에 대한 식으로 식(7)을 풀어쓰면 다음과 같다.

$$P_n[b_n \text{ bits}] = (2^{b_n} - 1) \cdot \frac{K N_n}{3 H_n} \quad (8)$$

$$= (2^{b_n} - 1) \cdot a_n$$

비트 할당 알고리즘은 비트 추가 알고리즘(Bit-Filling)과 비트 제거 알고리즘(Bit Removal)으로 나눌 수가 있다.

4.1 비트 추가 알고리즘(Bit-Filling Algorithm)

비트 추가 알고리즘은 각 tone에 1개의 비트를 추가 하는데 필요한 전력을 식 (9)을 이용하여 계산한다.

$$\Delta P_n^A = P[b_n + 1 \text{ bits}] - P[b_n \text{ bits}]$$

$$= [(2^{b_n+1} - 1) - (2^{b_n} - 1)] a_n \quad (9)$$

$$= a_n \cdot 2^{b_n}$$

가장 낮은 전력으로 한 비트를 추가하는 tone에 비트를 추가하고 이러한 과정을 제한 전력(budget power)을 넘지 않을 때까지 반복 수행하여 비트를 채워간다.

4.2 비트 제거 알고리즘(Bit Removal Algorithm)

먼저 각 tone이 채울 수 있는 비트 수만큼 모두 채운다. 그리고 1 비트를 제거하는데 필요한 전력을 계산한다.

$$\Delta P_n^R = P[b_n \text{ bits}] - P[b_n - 1 \text{ bits}]$$

$$= [(2^{b_n} - 1) - (2^{b_n-1} - 1)] a_n \quad (10)$$

$$= a_n \cdot 2^{b_n-1}$$

가장 많은 전력으로 한 비트를 제거하는 tone에서 비트를 제거하고 이러한 과정을 제한 전력(budget power)을 넘지 않을 때까지 또는 각 tone이 갖는 전력 마스크(power mask)를 넘지 않을 때까지 반복 수행하여 비트를 제거한다.

Loop Length	Loop 1 3000R 24#	Loop 2 6000R 24#	Loop 3 9000R 24#	Loop 4 12000R 24#	Loop 5 15000R 24#	Loop 6 18000R 24#	Loop 7 ANSI 6	Loop 8 18000R 28#
Bit-Filling	2286	2286	2286	2115	1422	878	487	302
Bit-Removal	254	245	254	276	350	289	254	254
Power Used mW	0.058	0.42	8.9	99.7	99.9	99.2	62.2	1.6

표 2. Time-Complexity와 전력의 비교

표 2는 비트 추가 알고리즘과 비트 제거 알고리즘에 대한 Time-complexity와 전력이용에 관한 비교를 한 것이다. 비트 제거 알고리즘을 이용하는 것이 비트 추가 알고리즘을 이용하는 방식보다 Time-complexity가

대략 8배 빠른 수행 능력을 가짐을 알 수 있다[4].

4.3 제안된 알고리즘(Proposed Algorithm)

표 2에서 보듯이 전송 거리가 짧은 Loop는 각 tone이 갖는 전달 특성이 좋아 적은 전력으로도 비트를 할당할 수 있고, 긴 Loop는 고주파 tone이 갖는 전달 특성이 좋지 않아 tone이 갖는 power mask를 모두 이용하여도 비트를 할당할 수 없어 제한된 전력(budget power)을 다 사용하지 못하였다. 본 논문에서는 전달 특성이 좋지 못한 긴 Loop에 대해서 여분의 budget power를 이용하여 비트가 할당되지 않았던 고주파 empty tone에 비트를 추가로 할당하는 알고리즘을 제안한다. 그림 5는 여분의 제한 전력을 이용한 비트 추가 할당 알고리즘을 Flowchart로 보인 것이다. 비트 제거 알고리즘으로 비트 할당 후 empty tone을 찾아 인접한 empty tone과 합하여 power mask의 크기를 키워줌으로써 비트가 할당될 수 있는 전력을 갖게 하여 empty tone에 추가로 비트를 할당할 수 있게 된다. 이렇게 합쳐진 empty tone에 최소한 2 비트가 할당되고 전체 전송률로서는 각 empty tone에 2 비트씩 할당되어 전송되어지는 효과를 얻게된다.

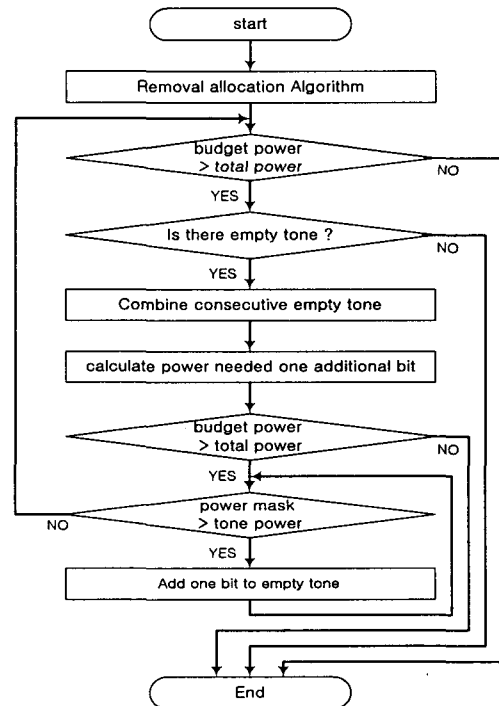


그림 5 제안된 알고리즘

5. 모의 실험 및 결과

모의 실험은 다음 ANSI 표준에서 제정한 제한에 의해서 실시하였다.

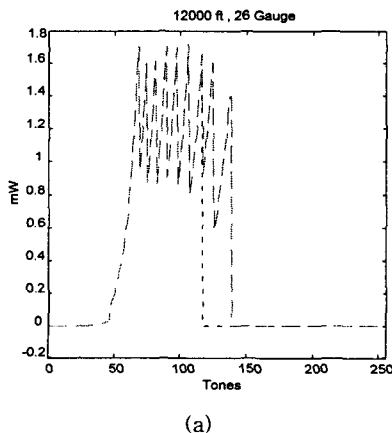
- 전체 전력 : 100 mW이내
 - 주파수 200 KHz 이내는 -40 dBm/Hz
 - 주파수 200 KHz 이상은 -34 dBm/Hz
- 노이즈 환경은 AWGN과 NEXT 노이즈를 고려하였다.
- 한 tone에 할당되는 최대 비트 수는 8 비트, 최소 비트 수는 2비트로 한다.
- tone의 개수는 256개
- Loop
 - 12000 ft (24 Gauge)
 - 12000 ft (26 Gauge)
 - 13500 ft (24 Gauge)
 - 13500 ft (26 Gauge)
 - 18000 ft (24 Gauge)

표 3은 비트 제거 알고리즘과 제안된 알고리즘과의 전체 비트와 비트 할당에 필요한 전력을 비교한 것이다. 전체 비트의 개수가 약 2~9% 늘어났고, 전체 전송률도 향상됨을 알 수 있다.

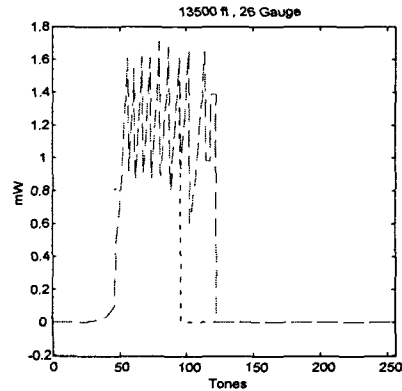
	Bit Removal	Used Power mW	Proposed Method	Used power mW
12000 ft 24 Gauge	1081	91.3	1105	99.9
12000 ft 26 Gauge	756	73.8	807	97.3
13500 ft 24 Gauge	906	95.4	943	99.0
13500 ft 26 Gauge	624	57.6	682	88.6
18000 ft 24 Gauge	570	51.0	623	81.0

표 3 전체 비트와 전력 비교

그림 6은 전체 tone에 대해서 사용하고 있는 전력 분포를 12000 ft(26 Gauge), 13500 ft(26 Gauge)의 Loop에 대해 비트 제거 알고리즘과 비교한 것을 보이고 있다. 비트 제거 알고리즘에서 사용하지 못했던 고주파 tone이 제안한 알고리즘을 통하여 비트가 할당되었고, 할당된 비트 수만큼 전력을 사용하고 있음을 보여주고 있다.



(a)



(b)

..... Removal Algorithm
 - - - - - Proposed Algorithm

그림 6 사용된 전력 비교

6. 결론

본 논문에서 제안한 비트 할당 알고리즘은 비트 제거 알고리즘에서 노이즈에 의해 감쇄가 심하여 비트가 할당되지 못했던 고주파 tone에 여분의 budget power를 이용하여 비트를 추가로 할당하여 약 2~9%의 전체 비트 증가를 보였고, budget power도 약 93%를 사용하였음을 알 수 있었다.

앞으로 적응적인 tone을 이용할 수 있는 하드웨어 구조를 제안하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Dr. Wlter and Y. Chen, "DSL Simulation Techniques and Standards Development for Digital Subscriber Line Systems," Macmillan Technical Publishing, 1998.
- [2] Dr. Dennis and J. Rauschmayer, "ADSL/VDSL Principles : A Practical and Precise Study of Aymmetic Digital Subscriber Line and Very High speed Digital Subscriber Line," Macmillan Technical Publishing, 1999.
- [3] T. Pollet and M. Peeters, "Synchronization with DMT Modulation," *IEEE Communcation Magazine*, pp. 80-86, April 1999.
- [4] R. V. Sonalkar and R. R. Shively "An Efficient Bit-Loading Algorithm for DMT Applications," *IEEE Proceeding of the Globecom'98*, vol. 5, pp. 2683-2688, 1998.
- [5] Thomas Starr, John M. Cioffi, Peter J. Silverman, "Understanding digital Subscriber Line Technology," Prentice-Hall Inc., 1999.