

고속 전력선통신 시스템의 터보 부호화

Turbo Coded OFDM Scheme for a High-Speed Power Line Communication

이 재 선*, 김 요 철*, 김 정 휘**, 김 진 영*

Jae Sun Lee*, Yo-Cheol Kim*, Jung Hui Kim**, Jin-Young Kim*

Abstract

In this paper, performance of a turbo-coded OFDM system is analyzed and simulated in a power line communication channel. Since the power line communication system typically operates in a hostile environment, turbo code has been employed to enhance reliability of transmitted data. The performance is evaluated in terms of bit error probability. As turbo decoding algorithms, MAP (maximum a posteriori), Max-Log-MAP, and SOVA (soft decision Viterbi output) algorithms are chosen and their performances are compared. From simulation results, it is demonstrated that Max-Log-MAP algorithm is promising in terms of performance and complexity. It is shown that performance is substantially improved by increasing the number of iterations and interleaver length of a turbo encoder. The results in this paper can be applied to OFDM-based high-speed power line communication systems.

Keywords : Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Power Line Communication(PLC), Turbo Coding.

1. 서 론

전력선은 원래 데이터가 아닌 전력을 전송하기 위해 설계되었다. 최근, 전력선 캐리어(PLC) 채널에서 데이터 전송에 대한 관심이 증가하고 있다. 의심할 여지없이, PLC는 원격 검침, 분배 자동화, 수요 관리, 그리고 홈 네트워킹을 통한 인터넷 액세스와 같은 많은 응용 분야에서 상당한 잠재성을 가지고 있다. PLC의 가장 큰 매력은 각지에 널리 분포된 전기선의 존재와 표준화된 콘센트를 통한 액세스의 용이함이다. 하지만 전력선은 다양한 소스들로부터의 간섭과 전송하는 동안 예측할 수 없는 변화를 나타내는 감쇄에 크게 영향을 받는다.

다른 통신 방법들과 비교해 볼 때, 전력선 통신 시스템은 다음과 같은 장점들을 갖는다. 1) 넓은 커버리지, 2) 현대성, 3) 비용 효율성, 4) 소비자에 의한 쉬운 채택, 5) 편재함, 그리고 6) 전 세계적인 유용성. 데이터 전송을 위해 사용되는 다른 미디어, 즉 대역폭, 임피던스 특성, 그리고 잠재적인 노이즈에 대한 특성이 잘 정의된 미디어와 달리, PLC는 매우 막연하다. 이러한 장점들을 참작하더라도, 현재 PLC는 국가 전체 산업, 상업, 그리고 거주 빌딩에서의 통신 수단으로서 많은 관심을 끌고 있다.

전력선에서 통신 신호는 다양한 전자기 방사에 의해 변질될 수 있는데, 이는 전형적으로 통신 품질 저하를 야기한다. PLC 채널에서 전송된 신호는 크고 예측할 수 없는 임피던스 레벨, 시간과 네트워크 링크에 대해 변하는 노이즈와 감쇄에 영향 받기 쉽다. PLC 채널에서 신뢰할 만한

통신을 보장하기 위해 순방향 오류 정정의 몇몇 방식들이 필수적이다. 지금까지 통신 품질을 향상시키기 위해 Reed-Solomon (RS) 코드, 컨벌루션 코드, 그리고 그것들을 연결시킨 코드와 같은 많은 채널 코딩 기법들이 정보 전송의 신뢰성을 높이기 위해 많은 종류의 통신기술에서 제안되었다.

십 년 전부터, '터보 코드'라 불리는 새로운 에러 정정 코드가 채널 코딩 위원회에서 많은 관심을 끌어들였다. 터보라는 용어는 복호기가 처리된 출력을 그 다음 반복에서 이전 입력으로 사용하는 메커니즘에서 이름을 따왔다. 터보 코드는 두 개로 이루어진 컨벌루션 코드와 하나의 인터리버를 활용함으로써 현저한 코딩 이득을 제공할 수 있다. AWGN 채널에서 터보 코드가 새턴 한계에 거의 도달했음이 확인되어왔다. 따라서 전력선 통신 채널에서 터보 코딩이 상당한 코딩 이득을 야기한다는 것이 매우 기대된다.

초고속 데이터 전송을 위한 유망한 기술 중의 하나는 멀티캐리어 변조 기법의 한 종류인 OFDM이다. OFDM 기술은 초고속 데이터 전송을 위한 다음과 같은 매력적인 특징들을 갖는다. 1) 높은 대역 효율성, 2) 다중경로 페이딩 환경에서의 견고함, 3) 적은 훈련 오버헤드, 그리고 4) 이퀄라이저와 비교했을 때 낮은 복잡도 등이 있다. 게다가 OFDM 기법은 비트 레이트와 대역폭의 확장성을 갖는다. 다시 말해서, 충분한 서브캐리어 대역폭은 채널의 도플러 스프레드에 대한 견고함을 증가시킨다. OFDM 기법에서 주파수 상으로는 겹치지만 시간상에서는 서로 직교하는 서브채널들에 대해 데이터 심볼 블록들을 다중 송신하는데 DFT가 사용된다. OFDM은 DAB (digital audio broadcasting), WLAN, 그리고 ADSL에 대한 표준으로 채택되어왔다.

접수일자 : 2009년 8월 7일
최종완료 : 2009년 8월 7일
*광운대학교 전파공학과
교신저자, E-mail : abalani@naver.com
**KT 중앙연구소

본 논문에서, 터보 부호화된 OFDM 시스템의 성능을 분석하였고 전력선 통신 채널에서 시뮬레이션을 하였다. 변조 방법으로써 64-QAM을 사용하였는데, 그 이유는 OFDM/64-QAM이 초고속 대역 효율적인 전력선 통신 시스템에 대하여 매우 강력한 후보이기 때문이다. 성능은 비트 에러 확률에 의해 평가되었다. 그리고 터보 코드의 개념과 원리가 소개되었으며, 독자들이 터보 부호/복호 처리 과정의 이해를 도모하기 위해 복호 알고리즘이 설명되었다.

비트 에러 확률 실험 결과는 다음과 같이 변하는 파라미터들을 고려하여 나타내었다. 1) 복호 과정에서 사용된 반복 횟수, 2) 터보 부호기에서 사용된 인터리버의 길이, 그리고 3) PLC 채널의 채널 손상 요소들. 마지막으로 터보 복호 과정에서 사용된 최선과 차선의 접근법에 대한 상대적인 결과들을 보여주었다. 터보 복호 알고리즘에 대해, 최선의 MAP, 차선의 Max-Log-MAP과 SOVA 알고리즘들이 고려되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 섹션 II에서 OFDM/QAM 시스템, PLC 채널 모델과 터보 코딩이 설명되었다. 섹션 III에서는 터보 코딩을 적용한 OFDM/64-QAM 시스템에 대한 비트 에러 확률을 유도하였으며, 섹션 IV에서 최선과 차선의 터보 복호 알고리즘들이 설명되었다. 시뮬레이션 결과들은 섹션 V, 그리고 섹션 VI에서 결론을 내었다.

II. 시스템 모델

1. OFDM 시스템 모델

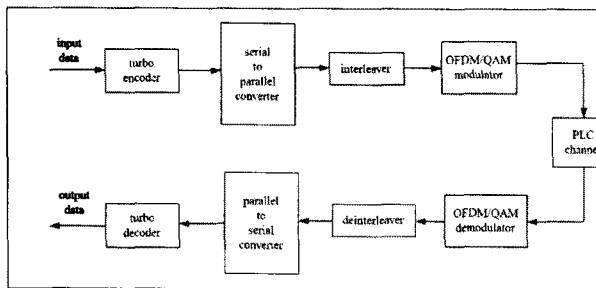


그림 1. 터보 부호화된 OFDM/QAM 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of a turbo-coded OFDM/QAM system

그림 1에서 보이는 바와 같이 터보 코딩을 적용한 OFDM 시스템에서 입력 데이터 시퀀스는 먼저 터보 부호기에 의해서 부호화되고 그다음 OFDM/QAM 부호기에 의해서 부호화된다.

OFDM/QAM 기법에서, 데이터 시퀀스를 서브캐리어의 위상과 진폭으로 부호화하는데 전형적으로 2m-QAM이 사용된다. 여기서 m은 서브캐리어에 할당된 비트 수이다. m-비트 그룹화된 데이터는 2m-QAM 성상도에서 정의하는 점들에 복소 값으로 부호화된다. 그 다음, 터보 부호기의 출력은 직렬에서 병렬로 변환된다. OFDM 기법은 직교 특성을 사용하여 인접한 서브캐리어들의 주파수 대역 상의 겹침을 허용하는데, 이는 높은 대역 효율성을 가져온다. 서브캐리어 주파수들은 심볼 레이트에서 일정 간격 두도록 선택된다. OFDM 변복조는 FFT와 IFFT 알고리즘을 사용하여 효과적으로 수행된다. IFFT 출력은 D/A

(digital-to-analog) 변환기를 통해 아날로그 변조 파형으로 변환된 다음 전송된다.

수신단에서 복원된 베이스밴드 신호는 표본화 되고 디지털 형태로 변환된다. FFT는 각 서브캐리어의 위상과 진폭을 결정하기 위해 이행된다. 각 서브캐리어에 대해서, 전송된 데이터는 수신된 서브캐리어에 상응하는 점과 가까운 신호점으로 추정된다.

병렬-직렬 변환기의 출력은 전송된 m-비트 데이터 시퀀스를 추정하기 위해 터보 복호기에서 복호화 된다.

2. PLC 채널 모델

전력선 통신은 합리적으로 벽 소켓 플러그 형태의 간단하고 표준 인터페이스를 갖는 보편화된 채널들을 제공한다. 하지만 PLC는 제한된 대역폭, 높은 노이즈 레벨, 다양한 임피던스 레벨, 감쇄, 그리고 노이즈 등과 같은 단점들을 가지고 있다. 전형적으로, 전력선에 연결된 수많은 종류의 부하들이 노이즈 소스로 작용할 수도 있다. 전력선에서 높고 수시로 변하는 노이즈 레벨과 수시로 변하는 임피던스와 전송 손실은 상당한 문제를 일으킬 수 있다. 전력선은 전력 배전 회로에서 조정하기 때문에, 전송 손실은 불가피하다.

PLC 채널에 대한 많은 종류의 채널 모델이 있다[1]. 하지만 PLC 채널에는 다양한 종류의 채널 손상 요소들이 연관되어 있기 때문에 그 어느 모델도 PLC 채널을 완벽하게 특징화 시킬 수 없다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 PLC 채널은 반사파 기반 감쇄 모델로 만들 수 있다.

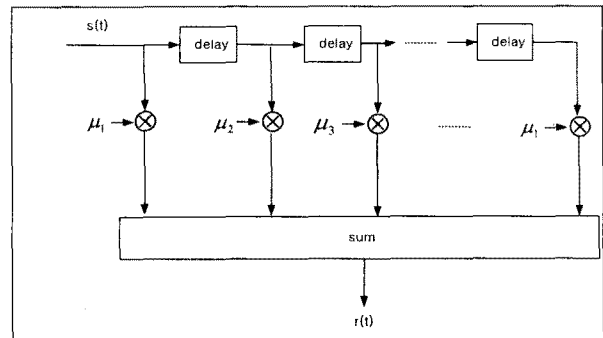


그림 2. PLC 채널 모델
Fig. 2. PLC channel model

이 반사파 모델은 이미 여러 종류의 실제 세계 환경에서 확인되어왔다. 이 모델의 임펄스 응답은 다음과 같이 주어진다.

$$h(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i \delta(t - \tau_i), \quad (1)$$

여기서, M은 채널에서의 반사파 수이고, τ_i 와 μ_i 는 각각 i th 반사파 지연과 감쇄를 나타낸다. 주파수 도메인에서 전송 함수는 아래와 같다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^M \mu_i \exp(-j2\pi f \tau_i). \quad (2)$$

감쇄 계수가 케이블 길이와 주파수 함수이기 때문에, i th 원소는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_i(f, l_i) = \rho_i \exp(-l_i \xi(f)), \quad (3)$$

여기서, l_i 는 케이블 길이, ρ_i 는 네트워크 토폴로지에 따른 비례 요소이다. $\xi(f)$ 는 표피 효과와 절연 물질의 유전 손실과 연관되며 길이 당 저항, 길이 당 측면 전도율, 그리고 특성 임피던스의 함수이다. 단순화한 $\xi(f)$ 의 근사값은 수많은 측정 결과들로부터 확인되었으며, 아래와 같이 주어진다.

$$\xi(f) = c_0 + c_1 f^\epsilon, \quad (4)$$

여기서, 계수 c_0, c_1 , 그리고 ϵ 는 특정 케이블 종류에 대한 상수이다.

3. 터보 코드

정보 비트의 신뢰성을 높이기 위해서, 블록 코드와 컨벌루션 코드와 같은 많은 채널 코딩 기법들이 제안되어왔다 [10]. 더 높은 코딩 이득을 얻기 위해서, 위 기법들을 연결시킨 코딩 기법이 제안되었다[10]. 연결 코딩 기법에서 복호 복잡도는 대수적으로 증가하는 반면 에러 확률은 지수적으로 감소한다. 우주 공간 통신과 같은 높은 코딩 이득을 필요로 하는 응용 분야에서, 연결 코드는 강력한 코딩 기법으로써 많은 관심을 끌고 있다. 터보 코드는 두 개 또는 그 이상으로 이루어진 코드들을 포함하는 연결 코드의 한 종류이다. 대체로 두 개의 순환조직형 컨벌루션 코드가 구성 성분 코드로 사용된다.

일반적으로, 터보 코드는 두 개 또는 그 이상으로 이루어지는 코드와 한 개의 인터리버로 구성된다. 첫 복호기는 외부 정보(사후 확률 알고리즘에 의해 제공되는 소프트 출력의 한 부분)를 다음 복호 단계로 통과시킨다. 모든 반복 과정에 대하여, 한 번의 복호는 관찰값 뿐만 아니라 이전에 동작한 다른 복호기에 의해서 전달된 신뢰 정보를 사용하여 수행된다. MAP(maximum a posteriori) 복호 알고리즘은 터보 코드 복호 과정에 대한 최적의 알고리즘으로 알려져 있다. 그 다음으로는 덜 복잡한 SOVA(soft output Viterbi algorithm) 또는 Max-Log-MAP들이 있다.

그림 3. (a)에 보이는 터보 부호기는 평행하게 두 개로 이루어진 코드들의 연결 후, 인터리버에 의한 두 코드로 나누어지면서 형성된다. 순환조직형 컨벌루션 코드는 종종 구성 성분 코드로 사용된다. 정보 비트는 첫 순환조직형 컨벌루션 코드에 의해 부호화되고, 그 뒤 인터리버를 통과한 후에 두 번째 순환조직형 컨벌루션 부호기에 의해 부호화된다. 코드 시퀀스는 정보 비트에 의해서 형성되고, 부호기 둘 모두에 의해서 발생된 패리티 검사 비트가 그 다음으로 붙는다. 그림 3. (a)에서, 부호기는 입력 시퀀스로서 데이터 시퀀스 d_k 를 받고 세 가지 요소들을 내보낸다. 1) d_k , 정보 비트, 2) $x_{p1,k}$, 첫 번째 부호기의 패리티 검사 비트, 그리고 3) $x_{p2,k}$, 두 번째 부호기의 패리티 검사 비트.

터보 코드에 대한 가장 기본적인 개념은 구성 성분 부호기들의 분리를 통해 에러 성능을 현저하게 향상시킬 수 있는 인터리버 이득이다. 따라서 인터리버 길이를 증가시킴으로써 복호기 복잡도의 뚜렷한 증가는 에러 성능의 충분한 향상을 가져온다. 종래의 채널 코딩 기법과는 달리,

터보 코드는 부호어들 사이의 증가된 유클리드 거리에 대한 부호율 또는 부호 복잡도의 트레이드-오프를 필요로 하지 않는다.

그림 3. (b)에 보이는 터보 복호기에서, 먼저 해야 할 일은 거리를 계산하는 것이다. 그 다음, 복호기 1과 복호기 2에서 그 거리를 사용한다. 구성 성분 부호기들과 매치되어 분리된 두 복호기는 반복적인 방식에서 soft 신뢰 정보를 공유한다. soft 신뢰 정보(또는 외인성 정보)는 다음 복호 단계에서 사전 정보로 사용된다. 그러면, 이 반복 복호기의 성능은 훨씬 적은 복잡도를 갖는 ML(최대 우도비) 복호기의 성능과 매우 근접하게 된다. soft 출력은 수정된 Viterbi 복호기로부터 얻어지지만, 최적의 soft 출력 복호기는 그 출력이 복호된 비트들의 사후 확률인 심볼 단위 사후 확률 복호기이다.

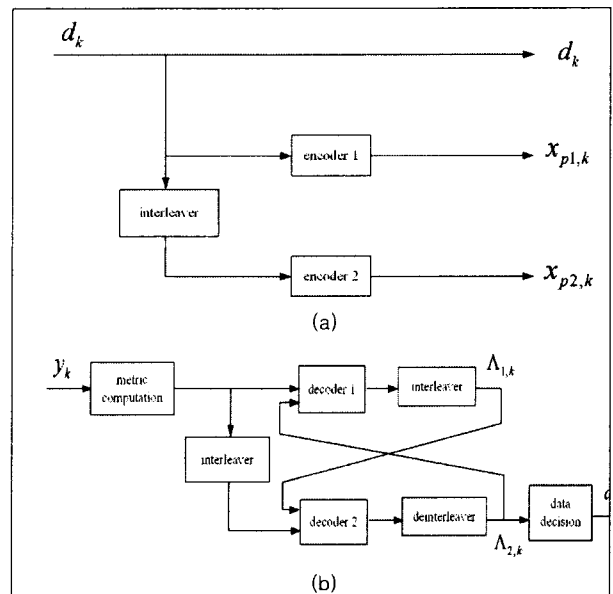


그림 3. 터보 부호기와 복호기 블록 다이어그램
(a) 터보 부호기. (b) 터보 복호기

Fig. 3. Block diagram of turbo encoder and decoder
(a) Turbo encoder. (b) Turbo decoder.

III. 성능 분석

OFDM 시스템은 K 서브캐리어를 사용하여 동시에 K 심볼 전송을 위한 주파수 다중 방법으로 이해할 수 있다. 심볼 시퀀스는 K 심볼 블록들로 나누어진다. 그러면, 전송된 신호는 아래와 같이 주어진다.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} x_k \exp(-j2k\pi f_k t - j2\pi f_c t), \quad (5)$$

$$kT \leq t \leq (k+1)T,$$

여기서, f_c 는 캐리어 주파수, f_k 는 k 번째 서브캐리어의 주파수이다. $T = T_s + T_g$ 는 심볼 지속기간(T_s)과 심볼 지속기간(T_g)의 합이며, K 는 서브캐리어 수이다. 수신기 앞단에서 수신된 신호는

$$r(t) = \sum_{k=0}^{K-1} h_k x_k \exp(-j2k\pi f_k t - j2\pi f_c t), \quad (6)$$

$$kT \leq t \leq (k+1)T,$$

으로 주어진다. 여기서, h_k 는 주파수 $f_c + kf_k$ 에서 PLC 채널의 주파수 응답이다. 샘플링하고 FFT를 취한 후, FFT 알고리즘의 출력 신호는 아래와 같다.

$$z_k = h_k x_k + n_k, \quad (7)$$

여기서, n_k 는 표본화된 노이즈의 IFFT 출력이다. AWGN 채널에서 그레이 매핑을 사용한 64-QAM의 비트 에러 확률은 [18]에서 제시되었다.

$$P_b = \frac{7}{24} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r_b}{7}}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r_b}{7}}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(5\sqrt{\frac{r_b}{7}}\right) + \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(9\sqrt{\frac{r_b}{7}}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(13\sqrt{\frac{r_b}{7}}\right), \quad (8)$$

여기서, $r_b = E_b/N_0$ 이고

$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2) du$ 는 보충 에러 함수이다.

터보 부호화된 부호어에 대해, 부호어 에러 확률은 다음 식에 의해 상위 경계된다.

$$P_w \leq \sum_{d=1}^N A(d) P(d), \quad (9)$$

여기서, N 은 터보 부호어의 블록 길이이고, $A(d)$ 는 해밍 거리 d 를 갖는 부호어 수이며, $P(d)$ 는 가중치 d 를 갖는 부호어의 복호 에러 확률이다. $A(d)$ 를 얻기 위해서 고정된 인터리버를 사용한 터보 코드에 철저한 조사가 수행해야 한다. 그러므로 모든 가능한 인터리버들에 대하여 평균을 취함으로써, 아래 식으로 평균 가중치 분배를 얻는다.

$$A_u(d) = \sum_{i=1}^Q \binom{Q}{i} p(d|i), \quad (10)$$

여기서, $p(d|i)$ 는 해밍 가중치 i 를 갖는 입력 부호어가 해밍 가중치 d 를 갖는 부호어를 생성하는 확률이다. 워드 에러 확률과 비트 에러 확률에 대한 평균 상위 경계는 각각 다음과 같다.

$$P_{w,a} \leq \sum_{d=d_{\min}}^N A_a(d) P(d), \quad (11)$$

$$P_{b,a} \leq \sum_{d=d_{\min}}^N \sum_{i=1}^Q \frac{i}{Q} \binom{Q}{i} p(d|i) P(d), \quad (12)$$

여기서, d_{\min} 는 부호어 간 최소 거리이다. PLC 채널에 적용하기 위해, 터보 복호기는 PLC 채널 특성을 포함하기 위해 수정되어야 한다. 터보 부호화된 경우에 대하여, 비트 에러 확률은 (12)를 사용한 시뮬레이션을 통해 평가된다.

IV. 터보 복호화 알고리즘

터보 복호화 알고리즘은 복호기에서 채널 상태에 관하여 이용 가능한 정보에 좌우된다. 최적의 복호화 알고리즘은

MAP 확률을 기반으로 한다. MAP 알고리즘은 높은 복잡도를 가지면서도 성능이 조금밖에 나아지지 않았기 때문에 Viterbi 알고리즘보다 인기가 많지 않았다[19]. 최근 연결 코딩 기법의 복호 알고리즘으로써, 터보 코드의 관심이 증가와 동시에 주목을 받고 있다. 보통의 연결 코드에서 소프트 정보의 몇몇 종류가 구성 성분 코드들 사이에서 교환된다.

Forney가 제안한 연결 코드에서 안쪽 복호기의 최적 출력은 APP distribution 형태가 된다[10]. 요구되는 APP에 다가가기 위해, 많은 차선의 알고리즘들이 고려되었다. 그들 중 하나가 수정된 Viterbi 알고리즘의 한 종류인 SOVA 알고리즘이다. 더욱 쉽게 구현하기 위해 Max-Log-MAP 알고리즘 또한 제안되었다. 최적의 MAP 복호화 알고리즘이 매우 복잡하기 때문에, 복잡도가 덜한 차선 알고리즘들이 제안되었다. 본 논문에서는 차선 접근법으로 Max-Log-MAP 과 SOVA 알고리즘을 고려하였다.

1. MAP 알고리즘

MAP 알고리즘에서는 최적으로 정보 데이터의 신뢰성을 결정하기 위해 trellis에서 가능한 모든 경로들이 고려된다. MAP 알고리즘은 수정된 BCJR 알고리즘을 통해 계산된다. 실험에 의한 증거들은 이 복호화 알고리즘이 두드러진 성능을 보이고 최적의 복호화 해결책으로 집중됨을 암시한다.

로그 우도비가 각 정보 비트, $d_k = 1$ 과 $d_k = 0$ 의 APP 비이기 때문에 터보 복호화 과정이 반복적인 APP의 향상으로 여겨질 수 있다는 것을 알아차릴 수 있다. 터보 복호기는 사전 정보로서 이전 MAP 복호기에 의해 발생된 APP(soft information)를 충분히 활용한다. APP는 다음과 같이 주어진다.

$$A(d_k) = \ln \frac{\sum_{S_{k-1}} \sum_{S_k} \gamma_1(y_k, S_{k-1}, S_k) \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \cdot \beta_k(S_k)}{\sum_{S_{k-1}} \sum_{S_k} \gamma_0(y_k, S_{k-1}, S_k) \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \cdot \beta_k(S_k)}, \quad (13)$$

여기서, S_k 는 시간 k 에서 첫 번째 복호기의 상태이고, $\alpha_k(\cdot)$ 와 $\beta_k(\cdot)$ 는 각각 순/역방향 순환 파라미터들이다.

MAP의 순/역방향 순환 관계는 각각 아래와 같다.

$$\alpha_k(S_k) = \frac{\sum_{S_{k-1}} \sum_{i=0}^1 \gamma_i(y_k, S_{k-1}, S_k) \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1})}{\sum_{S_{k-1}} \sum_{i=0}^1 \sum_{S_k} \gamma_i(y_k, S_{k-1}, S_k) \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1})}, \quad (14)$$

$$\beta_k(S_k) = \frac{\sum_{S_{k+1}} \sum_{i=0}^1 \gamma_i(y_{k+1}, S_k, S_{k+1}) \cdot \beta_{k+1}(S_{k+1})}{\sum_{S_{k+1}} \sum_{i=0}^1 \sum_{S_k} \gamma_i(y_{k+1}, S_k, S_{k+1}) \cdot \alpha_k(S_k)}, \quad (15)$$

초기 조건은 $S_0 = 0$ 에 대해 $\alpha_0(S_0) = 0$ 이고 $S_N = 0$ 에 대해 $\beta_N(S_N) = 0$ 이다. MAP의 분기 전이 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i(y_k^S, y_k^P, S_{k-1}, S_k) = q(d_k = i | S_k, S_{k-1}) \cdot p(y_k^S | d_k = i) \cdot p(y_k^P | d_k = i, S_k, S_{k-1}) \cdot p(S_k | d_k = i), \quad (16)$$

여기서, Z^S 와 Z^P 는 조직형이고 각각 Z 의 패리티 정

보이다. y_k^S 와 y_k^P 는 각각 d_k 와 $x_{p1,k}$ 에 대한 채널 출력이다. 식 (16)에서, 값 $q(d_k = i | S_k, S_{k-1})$ 는 S_k 부터 S_{k-1} 까지의 천이에 대해서는 1 이고, 다른 경우들에 대해서는 0 이다. 두 개의 출력, y_k^S 와 y_k^P 는 사후 확률의 로그 우도비를 계산하는데 사용된다. 이 우도비는 오히려 다음 MAP 복호기에서 사전 확률을 생성하는데 사용된다. 이 처리 절차는 비트 에러 확률이 어떤 작은 값에 수렴할 때까지 여러 번 반복된다.

2. Max-Log-MAP 알고리즘

Max-Log-MAP 알고리즘에서 데이터 결정과 soft 출력들은 다른 거리를 갖는 가장 좋은 두 경로에 좌우된다. Max-Log-MAP 알고리즘은 최적의 MAP 알고리즘의 로그 도메인 버전으로 설명될 수 있다. $\gamma_i(\cdot, \cdot, \cdot)$, $\alpha(\cdot)$, 그리고 $\beta(\cdot)$ 에 대한 복잡한 연산을 피하기 위해, Max-Log-MAP 알고리즘에서 이 값들에 로그를 취한다. 그러면 로그 분기 천이 확률은 아래와 같이 수정된다.

$$\ln \gamma_i((y_k^S, y_k^P), S_{k-1}, S_k) = \frac{2y_k^S x_k^P(i)}{N_0} + \frac{2y_k^P x_k^S(i)}{N_0} + \ln p(S_k | S_{k-1}), \tag{17}$$

3. SOVA 알고리즘

SOVA 알고리즘에서는 두 개의 경로가 고려되는데, 경쟁 경로가 가장 좋은 경쟁 경로가 아닐 수도 있다. 대개, 경쟁 경로는 soft 정보의 신뢰성을 결정하고 ML(최대 우도비) 경로와 결합하기 위해 살아남는다. 종래의 Viterbi 알고리즘에서 가장 큰 거리를 갖는 경로가 모든 가능한 경로들에 대해 아래에 주어진 값을 최대화함으로써 생존자로 선택된다.

$$\sum_{k=1}^N [-\frac{1}{N_0}(y_k^S - x_k^S)^2 - \frac{1}{N_0}(y_k^P - x_k^P)^2 + \ln p(S_k | S_{k-1})], \tag{18}$$

hard decision에서 Max-Log-MAP 과 SOVA 알고리즘은 동일한 거리로 동작한다. 하지만, soft decision에서는 두 알고리즘은 서로 다르게 동작한다. SOVA 알고리즘은 매 복호화 단계에서 오직 하나의 경쟁 경로를 계산한다. 각 정보 비트에 대하여, 오직 하나의 Viterbi 알고리즘 생존자만을 고려한다.

V. 실험 결과

본 장에서는 실험 결과들을 보여준다. 실험에 대하여, 서브캐리어 수 $K = 1024$, 전송 대역폭은 8MHz, 직렬-병렬 변환기 다음의 인터리버 길이는 512×6 symbols, 보호 구간 $T_g = 16\mu s$, FFT 크기는 1024 로 가정한다. 터보 기법으로 1/3 터보 코드 레이트가 사용된다. 그리고 구성 성분 코드로 8진법의 polynomials $(21,37)_8$ 코드 발생기와 함께 순환조직형 컨벌루션 코드가 사용된다.

PLC 시스템은 일반적으로 해가 되는 노이즈 환경에서 동작한다. 채널 손상은 임펄스와 고조파 노이즈와 같은 background 와 non-Gaussian 노이즈들을 포함한다.

background 노이즈는 양쪽에 걸친 전력 스펙트럼 밀도

(psd) $N_0/2$ 를 갖는 AWGN으로 모델화 한다.

고조파 노이즈는 실전압의 배수 외에 주파수를 발생시키는 주기적인 노이즈 펄스이다. 고조파 노이즈는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_h(t) = \sum_{k=1}^{N_h} A_k \cos(2\pi k f_0 t + k\theta_0), \tag{19}$$

여기서, A_k 는 k 번째 고조파 노이즈 성분의 크기, f_0 는 PLC의 기본 주파수, N_h 는 고조파 성분들 수, 그리고 θ_0 는 $(0, 2\pi)$ 에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 위상이다. 고조파 노이즈는 background 노이즈의 psd 보다 22 dB 큰 평균으로 가정하고, 분산과 기본 주파수는 각각 6 dB 와 60Hz 이다. 실험에서 고조파 성분 개수 $N_h = 3598$ 로 가정하고, 가장 큰 고조파 주파수는 $60\text{Hz} \times 3598 = 215.88\text{kHz}$ 로 계산한다.

랜덤 임펄스 노이즈는 번개와 네트워크에서의 넓은 주파수 대역에 영향을 끼치는 모든 임펄스를 갖는 부하 스위칭(자동 온도 조절 장치, 냉장고, 에어컨 등)에 의해 발생할 수 있다. 건물 내 전형적인 PLC 채널의 임펄스들은 대략 8.3msec의 구간과 함께 대략 40usec 또는 80usec의 거의 동일한 임펄스 지속 시간을 갖는다. 임펄스들의 크기는 background 노이즈의 제곱 평균 값보다 5배 또는 10배 큰 값으로 가정하고 이들의 발생 확률은 어림잡아 동일하다.

부호화되지 않은 경우와 터보 부호화된 경우에 대해 PLC 채널에서 비트 에러 확률은 근사 형태를 가지지 않는다. 따라서 수치 해석 방법인 Gauss-quadrature rule(GQR)이 사용된다. 이 보충 에러 함수는 아래 식에 의해 관련된다.

$$\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x), \tag{20}$$

여기서, $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$ 는 표준 가우시안 밀도의 tail integral 이다. $\text{erfc}(x)$ 의 계산을 위하여, Q-함수(Gaussian tail integral)가 아래에 주어진 형태로 사용된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-\frac{x^2}{2\sin^2\phi}) d\phi, \tag{21}$$

그림 4에서 최적의 MAP 복호화 알고리즘에 대해 비트 에러 확률 대 SNR를 다른 반복횟수에 따라 비교하였다.

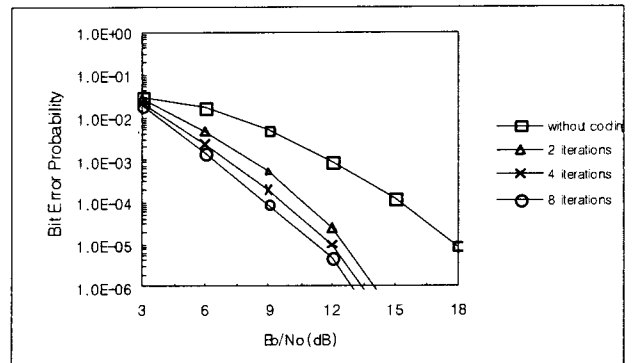


그림 4. 다른 반복횟수에 대한 비트 에러 확률 대 SNR
Fig. 4. Bit error probability vs SNR for a different number of iterations

실험은 임펄스 노이즈에 대하여 나타냈고 터보 부호기의 인터리버 길이는 1000으로 하였다. 터보 코딩은 부호화되지 않은 경우와 비교했을 때, SNR이 증가할수록 상당한 코딩 이득을 제공한다는 것을 알 수 있다. 터보 코딩이 PLC 채널에서 OFDM/QAM 시스템의 성능을 향상시키는데 매우 효과적이라는 것이 확인된다. 하지만, 반복횟수가 어느 정도(이 경우는 8)를 넘어가는 것에 유의해야 한다. soft 정보는 충분한 반복 후에 더 이상 이용할 수 없기 때문에 더 많은 반복은 오직 한계에 다다른 코딩 이득만을 제공한다.

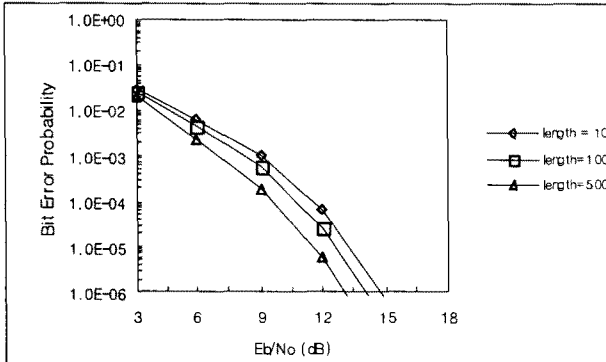


그림 5. 터보 부호기의 다른 인터리버 길이에 대한 비트 에러 확률 대 SNR
Fig. 5. Bit error probability vs SNR for a different interleaver length of turbo encoder.

그림 5에서는 최적의 MAP 복호화 알고리즘에 대해 비트 에러 확률 대 SNR를 터보 부호기의 다른 인터리버 길이에 따라 비교하였다. 실험은 임펄스 노이즈에 대하여 나타냈고 반복횟수는 2로 하였다. 성능은 터보 부호기의 인터리버의 길이가 증가할수록 현저하게 향상되었다. 하지만 인터리버 길이의 증가는 복잡도의 증가를 초래한다. 따라서 터보 부호기/복호기 설계시, 성능과 복잡도에 의한 트레이드-오프 관계를 고려해야 한다.

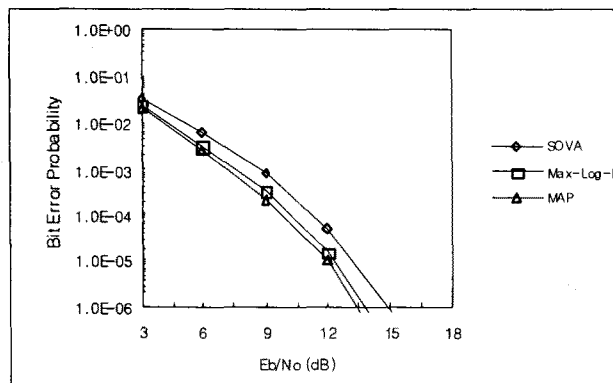


그림 6. 다른 복호화 알고리즘에 대한 비트 에러 확률 대 SNR
Fig. 6. Bit error probability vs SNR for a different decoding algorithm.

그림 6에서는 비트 에러 확률 대 SNR를 다른 복호화 알고리즘에 따라 비교하였다. 실험은 임펄스 노이즈에 대하여 나타냈고 반복횟수는 4, 터보 부호기의 인터리버 길이는 1000으로 하였다. 최적의 MAP 알고리즘은 Max-Log-MAP과 SOVA와 같은 차선 알고리즘과 비교하여 더 나은 성능을 얻었다. 하지만 MAP과 Max-Log-MAP 사이의 성능 차이는 단지 근소한 차이만

을 나타낸다. 따라서 복잡도와 성능 둘 모두에 의해서 MAP 알고리즘보다 Max-Log-MAP 알고리즘이 더 나은 선택임을 제시할 수 있다.

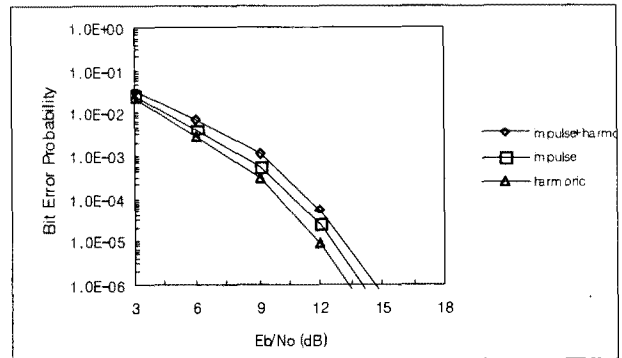


그림 7. 다양한 종류의 노이즈에 대한 비트 에러 확률 대 SNR
Fig. 7. Bit error probability vs SNR for various kinds of noise types.

그림 7에서는 최적의 MAP 복호화 알고리즘에 대해 비트 에러 확률 대 SNR를 다양한 종류의 노이즈에 따라 비교하였다. 실험은 반복횟수는 4, 터보 부호기의 인터리버 길이는 1000으로 하였다. BER 성능에서 임펄스 노이즈의 영향은 고조파 노이즈보다 더 치명적이다. 이 그림으로부터 대체로 많은 종류의 노이즈가 PLC 시스템의 성능에 영향을 미친다는 것을 발견할 수 있다.

VI. 결 론

PLC 채널에서의 터보 부호화된 OFDM/64-QAM 시스템의 성능을 분석하고 실험하였다. MAP, Max-Log-MAP, 그리고 SOVA 알고리즘이 복호화 과정에서 선택되고 비교되었다. 터보 코딩이 PLC 채널에서 OFDM/QAM 시스템에 대해 상당한 코딩 이득을 제공한다는 것 또한 확인하였다. 이 실험 결과로부터 Max-Log-MAP 알고리즘이 성능과 복잡도에 관하여 적절한 선택임을 입증하였다. 반복횟수와 터보 부호기의 인터리버 길이가 증가할수록 그 성능이 현저하게 향상되는 것을 확인하였다.

현재, 채널 코딩 학계에서 가장 힘든 이슈는 최적에 가까운 성능을 유지하면서 더욱 감소된 복잡도를 갖는 터보 코드의 실현이다. 게다가, PLC 채널에서 안정적으로 통신하기 위해서는 전력선이 기본적으로 높은 노이즈, 높은 감쇄, 왜곡 등을 수반하기 때문에 정교한 모델을 사용해야 한다. 고속 PLC 모델을 구현하려면, 다음 이슈들이 극복되어야 한다. 1) 부하들간의 임피던스 정합, 2) 가전기기로부터의 노이즈 감소, 3) 시변 PLC 채널, 4) 제한된 대역폭, 5) 광대역 신호 전송, 6) 전자기파 방사, 등.

터보 코드는 PLC 채널에서 동작하는 OFDM 시스템의 성능을 높이기 위한 매우 유망한 기술이라고 결론 지을 수 있다. 본 논문의 결과는 OFDM 기반 고속 PLC 시스템에 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-03, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술 개발]

[참고 문헌]

[1] K. Dostert, *Powerline Communications*, Prentice Hall, 2001.
 [2] M. L. Chan and R. W. Donaldson "Attenuation of communication signals on residential and commercial intrabuilding power-distribution circuits," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 28, no. 4, pp. 220-230, Nov. 1986.
 [3] M. L. Chan and R. W. Donaldson, "Amplitude, width, and interarrival distributions for noise impulse on intrabuilding power line communication networks," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 31, no.4, pp. 320-323, Aug. 1989.
 [4] O. Hooijen, "A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, pp. 331-336, 1998.
 [5] O. Hooijen, *Aspects of Residential Power Line Communications*, Shaker-Verlag, Archen, Germany, 1998.
 [6] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding: turbo codes," in *Proc. of IEEE ICC '93*, pp. 1064-1070, Geneva, Switzerland, June 1993.
 [7] S. Benedetto and G. Montorsi, "Unveiling turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 409-428, 1996.
 [8] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rates," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 20, pp. 284-287, Mar. 1974.
 [9] D. Divsalar, S. Dolinar, and F. Pollara, "Transfer function bounds on the performance of turbo codes," TDA Progress Report 42-123, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, U.S.A, Aug. 1995.
 [10] G. D. Forney, Jr., *Concatenated Codes*, MIT Press, 1966.
 [11] J. Y. Kim, "Outage performance of a CDMA-based mobile satellite communication system with turbo coding," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E84-B, no. 3, pp. 688-690, Mar. 2001.
 [12] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, Oct. 1971.
 [13] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
 [14] W. Choi and J. Y. Kim, "Performance of a multiuser detector with multicarrier transmission for a DS/CDMA

system," *Wireless Personal Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 71-87, July 2002.

[15] L. J. Cimini, Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 7, pp. 665-675, July 1985.
 [16] K. Dostert, "Power lines as high speed data transmission channels-modeling the physical limits," *Proc. of IEEE ISSSTA '98*, Sun City, South Africa, Sept. 1998, pp. 585-589.
 [17] H. Philipps, "Modeling of powerline communication channels," *Proc. of ISPLC '99*, Lancaster, UK, Mar. 1999, pp. 14-21.
 [18] M. K. Simon, S. M. Hinedi, and W. C. Lindsey, *Digital Communication Techniques*, Prentice-Hall, 1995.
 [19] J. Hagenauer and P. Hoeher, "A Viterbi algorithm with soft decision outputs and its applications," in *Proc. of IEEE GLOBECOM '89*, pp. 1680-1686, Dallas, TX, U.S.A, Nov. 1989.



이재선

2008년 광운대학교 전파과 졸업
 208년~현재 광운대학교 전파과 석사과정
 <관심분야> 채널코딩, 전력선 통신, OFDM
 <e-mail> abalani@naver.com



김요철

2009년 광운대학교 전자공학과 졸업
 2009년~현재 광운대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 전력선통신, 디지털통신, MAC
 채널 부호화,
 <e-mail> yocheolkim@kw.ac.kr



김정희

1996년 경북대학교 (공학석사)
 1996년~현재 KT 중앙연구소 무선기술담당차장
 <관심분야> 무선통신, 중계기
 <e-mail> kimjh@kt.com



김진영

1998년 서울대 전자공학과 (공학박사)
 2000년 미국 Princeton University, Research Associate.
 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원
 2001년~현재 광운대학교 전자공학과 부교수
 2009년 현재 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist
 <관심분야> 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화
 <e-mail> jinyoung@kw.ac.kr