

전력선 통신망 네트워크상의 가전제품 통신 신뢰도 측정 및 분석에 관한 연구

Evaluation of the home power line channel's communication reliability
in Internet operation of home appliances

안남호, 최원섭, 장태규 · 중앙대학교 전자전기공학부
김 훈 · 삼성전자(주)

Nam-Ho Ahn, Won-Sup Choi, and Tae-Gyu Chang
· School of Electronics and Electrical Engineering, Chung-Ang University/NTPC
Hoon Kim · Samsung Electronics Co. Ltd.

요약

본 논문에서는 인터넷 가전제어를 위한 전력선 통신망 채널 특성 추정 기법을 제시하였고 실 거주 댁내 전력선 통신망의 채널 특성을 실측하여 통신 신뢰도를 평가하였다. 전력선 통신 기능을 내장한 동일 모델의 네트워크 가전제품 4종(에어컨, 냉장고, 세탁기, 전자렌지)을 실 거주 가정 100가구에 설치하여 전력선 통신망의 통신 신뢰도를 평가하였다. 통신 신뢰도의 평가 결과 통신 신뢰도가 90%이상이 나타나는 것을 확인하였다. 이것은 PLC 모델이 장착된 가전제품의 활용과 고밀도 아파트 주거 지역에서 인터넷 가전제어를 위한 서비스가 상업적으로 이용할 수 있는 근거를 뒷받침한다고 할 수 있다.

I. 서론

댁내 전력선망은 인터넷 가전제어를 위한 유용한 통신망중의 하나로 많은 관심이 고조되고 있다 [1][2]. 하지만, 댁내 전력선에 접속하고 있는 다수의 가정용 부하들로 인한 다양하고 불안정한 채널 특성이 가전제어망으로써의 상업적인 활용에 제약

이 되고 있는 주요한 요인중의 하나이다.[1][2][3].

저 비트율 통신 환경에서 전력선 채널의 다양한 문제들을 해결하기 위하여 통상적으로 양대역 반송파(dual band carrier)를 이용하는 방법과 주파수 스위핑(swept-frequency chirping)기반의 확산 스펙트럼을 이용하는 방법으로 분류된다 [2][4][5][6]. 저 비트율 전력선 모델의 응용 타당성에 대한 다양한 연구결과들이 제시되었다.[3][7][8]. 그러나, 전력선 모델의 타당성과 통신 신뢰도에 대한 확신 할 수 있는 단계의 연구 결과 제시가 이루어지지 않았으며 PLC(Power Line Communication) 모델이 장착된 가전제품의 활용과 전력선 통신망 서비스는 아직 상업적으로 실현되지 않았다.

이 논문의 목적은 통신 신뢰도의 관점에서 PLC 모델이 장착된 가전제품의 활용과 전력선 통신망 서비스의 실현 가능성을 알아보기 위한 것이다. 전력선 채널의 특성을 상세하고 적절히 평가하기 위해 두 가지 형태의 신뢰도를 각각 분리해서 분석하였다. 첫 번째는 통신 신호 수준에서 물리층의 신뢰도를 나타내는 피어-투-피어(peer-to-peer) 통신 신뢰도이고, 두 번째는 총체적인 네트워크 운영측면에서의 통신 신뢰도이다. 피어-투-피어 통신 신뢰도를 평가하기 위해 채널 탐침 기

법을 제시한다. 고정된 비트 오류율을 기준으로 다양한 콘센트를 선택함에 따라, E_b/N_0 의 마진을 유도하고 3가지 성능 열화 요소 즉, 잡음, 감쇠, 그리고 왜곡등을 고려함으로써 통계적으로 로그노멀(lognormal) 분포 함수로 모델링할 수 있다.

경기도 용인에 위치한 아파트내 실 거주 가정 100가구에 테스트 베드를 설치하여 4달 동안 동작시켜 얻은 데이터를 바탕으로 평균 패킷 오류율을 측정함으로써 네트워크 측면에서의 운영 신뢰도를 측정하였다. 전력선 통신 기능을 내장한 동일 모델의 네트워크 가전제품 4종(냉장고, 세탁기, 에어컨, 전자렌지)을 실거주 가정 100가구에 설치하여 홈게이트웨이와 LAN(Local Area Network)을 통하여 단지 서버에 연결시켰다.

이에 본 논문에서는 맥내 전력선 통신망 환경에서 주요 통신 성능 열화요소로서 신호감쇠, 신호왜곡, 채널 잡음 특성을 채널 탐침 기법을 이용하여 추정하는 기법을 제시하고 실 거주 맥내 전력선 통신망 채널 특성 실측을 통한 통신 신뢰도에 대해 기술하였다. 또한 제시한 채널 특성 추정기법을 적용하여 얻은 실측 결과의 통계적 특성에 기초하여 상용의 전력선 통신 시스템을 적용한 인터넷 가전제어의 활용 타당성을 검토하였다. 피어-투-피어 통신 신뢰도와 네트워크 운영 측면에서의 통신 신뢰도 모두 90% 이상의 신뢰도를 가지고 있는 실험 결과로 나타났고, 따라서 PLC 모뎀이 장착된 가전제품의 활용과 고밀도 아파트 주거 지역에서 인터넷 가전제어를 위한 서비스가 상업적으로 이용할 수 있는 근거를 뒷받침한다고 할 수 있다.

II. 피어-투-피어 통신 신뢰도 평가 및 분석

피어-투-피어 통신 신뢰도를 간접적으로 유도

하기 위해 전력선 채널의 끝단에 임펄스 모양의 탐침 신호를 인가하여 다른 끝단에서 수신 신호를 측정함으로써 전력선 채널의 전달 특성을 측정할 수 있다. 피어-투-피어 통신 신뢰도를 통상 10^{-3} 의 비트 오류율까지 허용 가능한 고정값 E_b/N_0 의 측면에서 맥내 임의의 두 지점 사이의 E_b/N_0 의 양의 마진을 얻는 평균 확률로서 정의한다.

잡음과 간섭은 서로 무관하다고 가정하면 식 (1)에서 주어진 3가지 통신 성능 열화 요소들 즉, 부가 잡음 (σ_n^2), 채널 감쇠 (I^2), 그리고 신호 왜곡 (D_{ms})을 고려함으로써 E_b/N_0 를 근사화할 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{2(D_{ms} + \sigma_n^2/I^2)}$$

안티포달(anti-podal) 디지털 신호에 대한 최적 정합필터의 수신 BER(Bit Error Rate) 방정식인 식 (2)에 E_b/N_0 의 값을 반영함으로써 E_b/N_0 의 마진을 구할 수 있다.

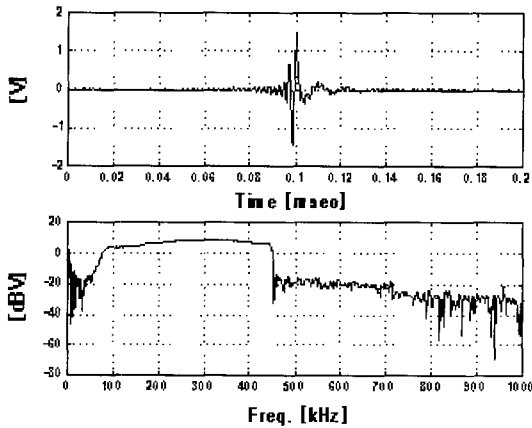
$$P_{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

통신 신뢰도의 통계를 적절히 반영하기 위하여 충분한 수의 콘센트를 선택하여 E_b/N_0 의 마진을 측정해야 한다. E_b/N_0 의 값을 로그노멀 분포 함수에 대입하여 양의 마진의 면적을 구하여 통신 신뢰도를 평가할 수 있다. 채널 탐침 기법과 통신 신뢰도 평가 방법에 대한 상세한 절차는 각각 2.1절과 2.2절에서 기술하기로 한다.

1. 전력선 통신 채널 탐침 기법

전력선 채널의 끝단에 임펄스 모양의 탐침 펄스를 인가하여 다른 끝단에서 수신 파형을 측정

함으로써 채널 파라미터 즉, 부가 잡음(σ_{ξ}^2), 채널 감쇠(I^2), 그리고 신호 왜곡(D_{ms})을 얻을 수 있다. 채널 탐침 신호의 주파수 대역폭은 저비트를 PLC 모뎀에 사용되는 주파수 대역폭보다 충분히 넓다. 임펄스 모양의 채널 탐침 신호는 그림 1에서 나타낸 것처럼 100kHz에서 450kHz까지의 주파수 대역을 가진다.



〈그림 1〉 채널 탐침 신호와 스펙트럼

기저대역의 전력선 통신 계통에서 수신단을 고려해보자. 수신단에서의 부가 잡음을 zero-mean 백색 가우스잡음(분산: σ_{ξ}^2)으로 가정하면, 수신단에서 잘못 판단하는 경우의 비트 오류 확률은 다음 식 (3)과 같이 ISI (Intersymbol Interference) 성분의 누적분포(cumulative distribution: $F_{\xi}(|I_i|z)$)를 포함하는 형태로 구할 수 있다.

$$P_{BER} = P(I_i + \xi_i + \eta_i > 0 | b_i = -1) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\xi}(|I_i|z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi(\frac{\sigma_{\eta}}{|I|})^2}} \exp\left(-\frac{(z+1)^2}{2(\frac{\sigma_{\eta}}{|I|})^2}\right) dz$$

여기서 I_i 는 원하는 신호성분이고, ξ_i 는 ISI 성분, η_i 는 부가 잡음 성분이다. 임의의 전력선 채널에 대한 ISI 성분의 해석적인 분포를 얻기 어렵지만 특정 범위내에서 중심극한정리(central limit theorem)에 의해 가우스 분포 형태로 근사화가 가능하다[11]. 통신 시스템이 BPSK방식이고, ISI 성분 상호간의 상관 값이 아주 작다고 가정하면, ISI 성분의 평균값은 '0' 이고, 신호대 간섭 비율 D_{ms} 는

$$D_{ms} = \frac{\sum_{k, k \neq i} |R((k-i)T_b)|^2}{R(0)^2}$$

로 근사화 될 수 있고, 여기서 R은 수신 파형의 자기 상관으로 표현된 정합 필터의 출력이고 T_b 는 비트 구간을 나타낸다.

식 (4)의 신호대 간섭 비율 D_{ms} 는 주파수 도메인에서 Parseval 정리를 사용하여

$$D_{ms} = \frac{\xi^2}{I^2} = \frac{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \left| \sum_k S_R(j\frac{2\pi}{T_b}(f-k)) \right|^2 df}{\left(\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \sum_k S_R(j\frac{2\pi}{T_b}(f-k)) df \right)^2} - 1$$

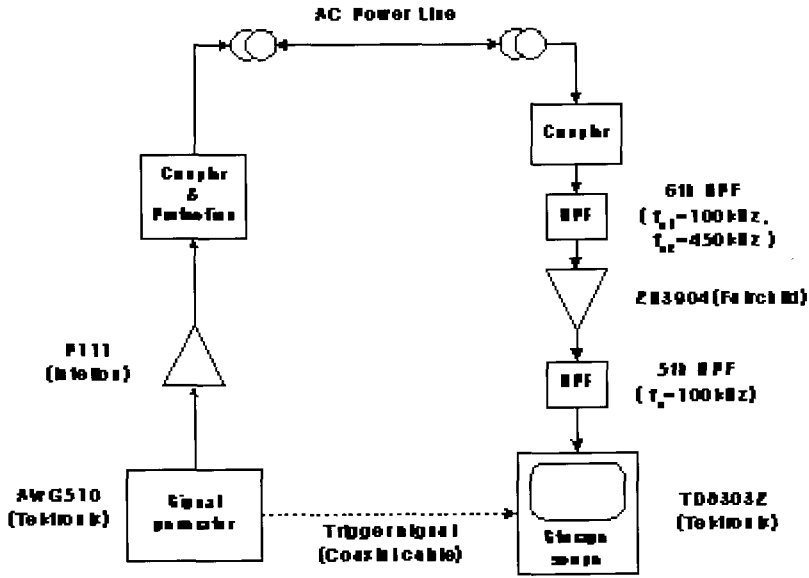
로 나타낼 수 있고, 여기서 S_R 은 수신 파형의 전력 스펙트럼을 나타낸다.

식 (5)를 비트 오류 확률을 구하는 식 (3)에 반영하면

$$P_{BER} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{2 \cdot (D_{nms} + \frac{\sigma_{\eta}^2}{I^2})}} \right)$$

으로 비트 오류 확률을 근사화 할 수 있다.

주파수 도메인에서 수신된 탐침 파형의 스펙트럼으로부터 나이퀴스트 대역의 면적을 측정함으

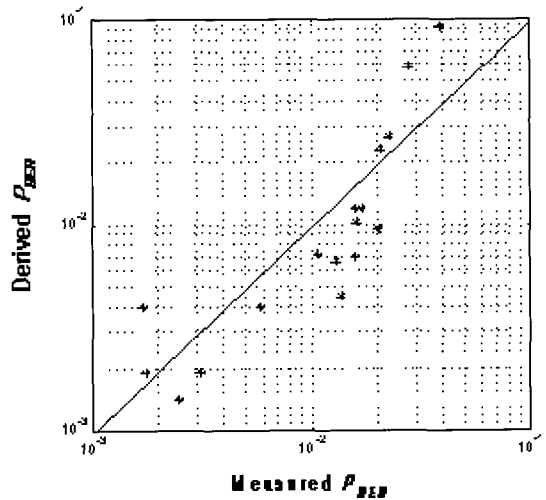


〈그림 2〉 전력선 채널 측정 설비

로써 신호 감쇠 I^2 을 유도할 수 있다.

신호 왜곡 D_{ms} 와 감쇠 I^2 을 측정하기 위하여 동기화된 트리거 메카니즘을 사용하여 채널당 512개의 수신 파형에 대한 평균을 취하는 작업이 수행된다. 다른 한편으로, 임펄스 신호를 인가하지 않았을 때 수신 신호로부터 잡음 전력 σ_n^2 을 직접 구할 수 있다.

측정 설비를 그림 2에 나타내었다. 측정 설비의 총 페루프 이득은 133[dB]로써 높은 주파수 선택적인 채널의 큰 감쇠특성을 측정 가능도록 하였다. 최저 수준의 통신 신뢰도의 통계를 반영하기 위하여 대부분의 가전제품들을 동작시킨 상태에서 4개의 침실을 가진 아파트의 88쌍의 콘센트들을 대상으로 측정하였다. 실험에 사용된 기준 비트율은 5 kbps이고 나이키스트 채널 대역에서 채널 탐침을 수행하였다. 식 (5)에서 주어진 대로 주파수 도메인에서 탐침된 채널 파라미터인 신호 감쇠와 신호대 간섭 비율을 가지고 식 (6)을 이용하여 비트 오류 확률을 구하였다.



〈그림 3〉 유도한 비트오류율과 직접 측정된 비트오류율 비교 제시

그림 3에서는 식 (6)에서 유도한 비트 오류 확률과 상업적으로 이용가능한 측정 설비[5]를 사용하여 직접적으로 얻은 비트 오류 확률을 비교하여 나타내었다.

그림 3에서 나타낸 것처럼, 유도한 비트 오류

〈표 1〉 실 거주 대내 전력선 채널망에서 측정된 통신 신뢰도 요약 ($P_{BER} = 10^{-3}$ 기준)

Paths	Margin at 132kHz [dB]		Margin at 115kHz [dB]		Reliability(%)	Remarks
	mean	std.	mean	std.		
Paths with air - conditioner	5.9	8.5	12.3	7.0	99.9	14paths
Paths with refrigerator	3.7	8.8	10.0	9.0	99.3	14paths
Paths with washing - machine	-2.1	12.2	2.7	7.6	93.8	14paths
Paths with microwave - oven	-2.5	12.4	5.1	7.3	96.5	14paths
Other paired electric outlet	8.7	13.6	17.3	16.6	98.6	32paths
Total	5.4	12.7	12.8	13.9	97.9	88paths

울과 직접 측정한 비트 오류율이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있고, 이것은 대내 전력선 채널의 특성을 추정하는 기법에 대한 타당성을 나타낸다 하겠다.

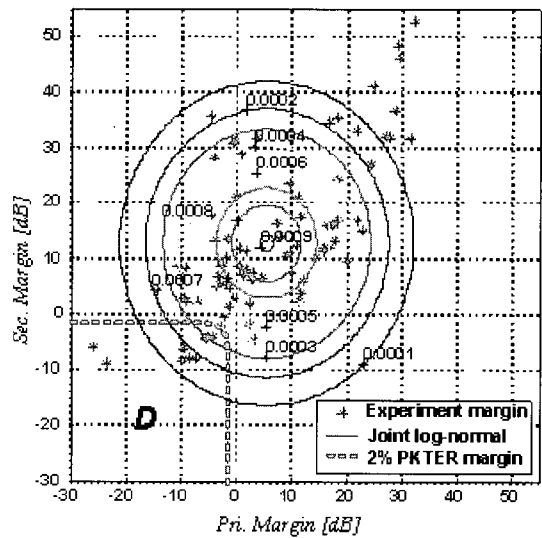
2. PLC 채널의 통신 신뢰도 분석

식 (7)에서 나타낸 것처럼 PLC 채널의 피어-투-피어 통신 신뢰도를 대내 임의의 두 지점 사이에서 E_b/N_0 의 양의 마진을 얻는 평균확률로 정의한다. 실제 전력선 모델은 채널의 변화에 대응하기 위하여 더 넓은 범위의 대역폭을 이용하거나, 다수의 나이키스트 대역과 다수 송신 시도를 이용한다. 실제 상황을 가장 잘 반영하기 위하여 신뢰도를 분석하는 데 있어서 다수 송신이 4번까지 되는 양대역(dual band)의 이용을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 \text{Reliability} &\triangleq 1 - P(BER > 10^{-3}) \\
 &= 1 - \int_D \int f_{M_1, M_2}(m_1, m_2) dm_1 dm_2
 \end{aligned}$$

where, f_{m_1, m_2} : joint log-normal distribution

D : region of $\{BER > 10^{-3}\}$



〈그림 4〉 실측에 의한 E_b/N_0 마진의 분포

공동 확률 밀도 함수 f_{M_1, M_2} 는 E_b/N_0 의 마진을 로그노멀 함수에 대입하여 얻을 수 있다. 2.1 절에서 얻어진 3개의 채널 탐침 파라미터를 식 (1)과 결합하여 88쌍의 PLC 채널 경로들에 대한 E_b/N_0 의 마진을 계산할 수 있다. 저 비트율 PLC 모델을 상업적으로 적용하기 위하여 보통 허용할 수 있는 BER은 10^{-3} 정도를 목표로 한다 [4][5][6].

그림 4 는 5kHz의 대역폭을 가진 채널

132kHz와 115kHz에서의 두 주파수 대역에 대해 얻어진 E_b/N_0 의 측정된 마진의 결과를 보여준다. 두 대역을 사용하는 통신이 비트 오류 확률이 기준 레벨 10^{-3} 보다 큰 범위 D로 떨어지는 확률을 측정함으로써 신뢰도 요소들을 유도할 수 있다.

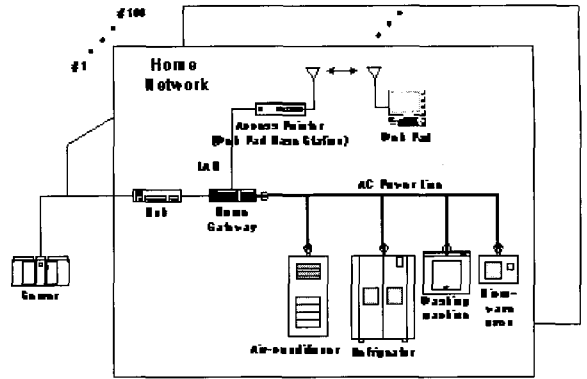
홈전력선네트워크의 통신 신뢰도를 평가하고 그 실험 결과를 표 1에 요약하였다. 표 1과 같이 통신 채널의 종단에 4가지 형태의 가전제품이 있는 통신 경로에 대해 평균 통신 신뢰도는 93.8%에서 99.9%까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 대내 전체 콘센트에서의 평균 통신 신뢰도는 97.9%로써 이러한 통계적 수치는 전력선 통신 시스템을 적용한 가전제어의 상업적인 활용 및 타당성 측면에서 충분히 높은 수준이라 할 수 있겠다.

III. 네트워크 운영 측면에서의 가전제품 통신 신뢰도

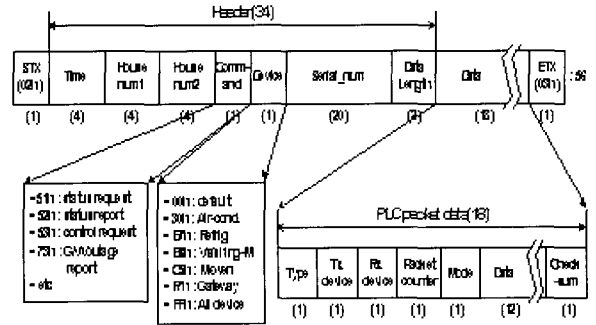
경기도 용인에 위치한 1000단위 아파트중 실 거주 가정 100가구에 테스트 베드를 설치해 네트워크 운영측면에서의 통신 신뢰도를 평가하였다.

전력선 통신 기능을 내장한 동일 모델의 네트워크 가전제품 4종(냉장고, 세탁기, 에어컨, 전자렌지)을 실 거주 가정 100가구에 설치하고 LAN 망과 연동하기 위한 세대별 홈 게이트웨이 및 허브와 단지 서버로 구성되는 홈 네트워크로 다음 그림 5에 나타내었다. 단지 서버는 인터넷 가전제어를 가능하게 하고 또한 데이터 저장과 시스템 모니터링의 기능을 수행한다.

PLC 패킷은 PLC를 적용한 가전제품의 주소와 발생된 패킷의 횟수 등의 부가정보와 제어, 상태 데이터로 총 18바이트로 구성된다. 홈 게이트웨이는 그림 6에서 나타낸 것처럼 PLC 패킷 데이터 정보와 더불어 네트워크 프레임 데이터를



〈그림 5〉 PLC를 적용한 홈 네트워크 시스템 구성

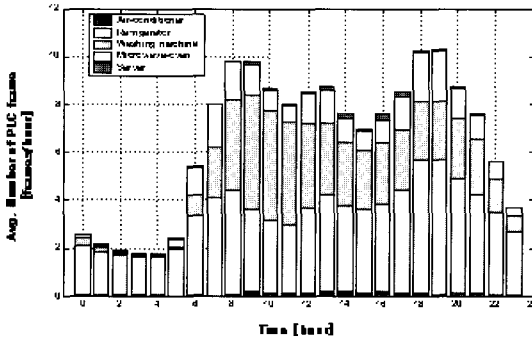


〈그림 6〉 홈 네트워크에서의 네트워크 데이터 프레임 구성

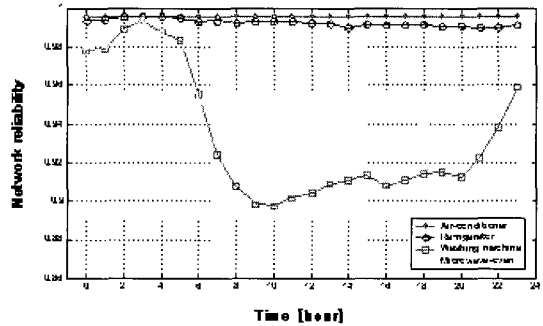
구성하는 아파트 동, 아파트 호 등의 부가정보 비트들을 포함한다. 가전제품에서 송신된 데이터들 중 놓친 패킷의 횟수를 확인함으로써 PCL 프레임 오류율을 구할 수 있다.

테스트 베드를 2001, 9 - 2001, 12 월 사이에 4달 동안 100가구에 동작시키면서 실제 운용 데이터를 토대로 통신 신뢰도를 평가하였다. 네트워크 트래픽 통계와 각 가전제품별로 분류하여 통신 신뢰도를 시간대 별로 평균을 내어 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

그림 8을 살펴보면 오전 10시 부근에서 세탁기가 동작중에 있을 때 네트워크 신뢰도가 90% 정도로 관측되는 경우를 볼 수 있다. 일일 시간대 별로 세탁기의 네트워크 트래픽이 가장 높게 나



〈그림 7〉 홈네트워크의 100가구 평균 PLC 데이터 프레임 발생 빈도



〈그림 8〉 시간대별 100가구 평균 네트워크 신뢰도

〈표 2〉 전력선 네트워크 가전제품별 통신 신뢰도 요약

에어콘	냉장고	세탁기	전자렌지	평균
99.6 %	99.3 %	93.5 %	95.7 %	96.0 %

타난다. 통신 신뢰도의 약 90%이상이 허용 가능한 수준으로 고려할 수 있다.

각 가전제품별로 테스트 베드에서 나온 실험 결과를 가지고 네트워크 운영 측면에서의 평균 신뢰도를 표 2로 요약하였다.

네트워크 프레임 데이터를 분석하여 평균 96%이상의 네트워크 신뢰도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이것은 PLC 모뎀이 장착된 가전제품과 인터넷 가전제어를 위한 서비스가 고수준의 성능을 가지고 상업적으로 이용이 가능하다는 것을 뒷받침한다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 인터넷 가전 제어를 위한 전력선 통신망 채널 특성 추정 기법을 제시하였고 실 거주 대내 전력선 통신망의 채널 특성 실측 결과를 토대로 통신 신뢰도를 평가하였다. 본 논문에서 제시한 전력선 채널 특성 추정 기법은 특정 형

태의 채널 탐침 신호를 채널에 인가하고 수신되는 채널 응답 신호를 분석하여 신호 감쇠 및 신호 왜곡특성을 응답 신호의 스펙트럼을 통해 얻고, 전력선 잡음 스펙트럼을 분석하여 비트 오류 확률을 측정하였다. 채널 특성 추정 기법을 적용한 실측 결과를 토대로 통신 마진의 분포를 모델링하고 이를 토대로 평균적으로 97.9%의 통신 신뢰도가 나타나는 것을 확인하였으며, 이를 통해 전력선 통신 채널의 특성을 추정하는 기법이 타당하고 비트 오류 확률을 평가하는 방법이 유용하다는 것을 보였다.

저자 소개



안남호

1974년 10월 24일생
 2000년 중앙대학교 전 기전자제어공학부 졸업(공학사)
 2000~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정

관심 분야 : 전력선 통신, 이동 통신, 디지털 신호처리 등



최원섭

1975년 06월 10일생
 2001년 중앙대학교 전 기전자제어공학부 졸업(공학사)
 2002~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정

관심 분야 : 전력선 통신, 디지털신호처리 등



장태규

1955년 11월 13일생
 1979년 서울대학교 전 기공학과 (공학사)
 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)
 1981년~1982년 현대엔지니어링(주)

1982년~ 1984년 현대전자산업(주)
 1987년 Univ. of Florida 전기공학과 졸업(공학박사)
 1987년~1990년 Tennessee State University, Assistant Professor

1990년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
 관심 분야 : 통신, 신호처리, 디지털 오디오 등



김훈

1971년 9월 7일생
 1995년 서울산업대학교 전기공학과 졸업
 2000년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)

2002년 현재 삼성전자(주) DA Network총괄 리빙사업부
 선행연구그룹 선임연구원, 대한전기학회 정회원, 대한전자공학회 정회원, IEEE 회원

■ 참고문헌

- [1] C. Douligeris, "Intelligent home systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 31, pp. 52-61, Oct. 1993.
- [2] D. Radford, "Spread spectrum data leap through AC power wiring," *IEEE Spectrum*, vol.33, pp. 48-53, Nov. 1996.
- [3] H. C. Ferreira, H .M. Grove, O. G. Hooijen, and A. J. Han Vinck, "Power Line Communications: An Overview," *IEEE AFRICON*, vol.2, pp. 558-563, 1996.
- [4] Consumer Electronics Manufacturers Association, "The ANSI/EIA 709.1 Control Network Protocol Specification", 1999.
- [5] LONWORKS PLCA-22 Power Line Communication Analyzer Users Guide, ver. 1, 078-0176-01A, Echelon Corporation, 1999.
- [6] Draft EIA Home Automation System (CEBus), Electronic industries Association, Washington, D.C., 1992.
- [7] www.echlon.com
- [8] www.intellon.com
- [9] J.G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed., Int. ed. McGraw Hill, 1989.
- [10] D. Liu, E. Flint, B. Gaucher, and Y. Kwark, "Wide band AC power line characterization," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol.45, pp. 1087-1097, Nov. 1999.