

인터넷 가전 제어를 위한 전력선 통신망 채널 특성 추정 기법에 관한 연구

안 남 호, 장 태 규, 김 훈*
 중앙대학교 전자전기공학부, 삼성전자*

A systematic method of probing channel characteristics of home power line communication network applied to the Internet accessed control of home appliances

N. H. Ahn, T. G. Chang, and H. Kim*
 School of Electrical Engineering, Chung-Ang University and Samsung Electronics Co.

Abstract - This paper presents a systematic method of probing channel characteristics and communication reliabilities of home PLC (power line communication) network applied to the Internet accessed control of home appliances. The effects of the three performance deteriorating factors, i.e., additive noise, channel attenuation, and intersymbol interference, can be systematically measured by applying the channel probing waveform in the frequency range from 100kHz to 450kHz. The agreement between the derived probability of bit error and the measured probability of bit error supports the validity of the proposed approach of probing home power line channel characteristics. The experimental results performed with the constructed test-bed applying the proposed channel probing method also support the feasibility of commercially deploying the PLC modem installed home appliances and their services for the Internet accessed home automation.

왜곡에 의한 intersymbol interference(ISI)가 주된 통신 성능 변수이다[4]. 이러한 변수에 따른 통신 성능을 얻기 위해 수신 decision statics를 다음 식 (1)과 같이 채널 펄스 응답신호($p_m(t)$)에 대한 정합필터링을 통한 채널상관신호($R_{p_m}(t)$)의 샘플값으로 나타내었다.

$$Z_i = \frac{A_m}{\|p_m\|} b_i R_{p_m}(0) + \frac{A_m}{\|p_m\|} \sum_{k,k+i} b_k R_{p_m}((k-i)T_b) + \eta_i \quad (1)$$

$$= I_i + \xi_i + \eta_i$$

식 (1)에서 b_i 는 송신 비트열, A_m 은 송신 펄스의 크기이고, decision statics로써 I_i 는 원하는 신호성분이고, ξ_i 는 ISI 성분, η_i 는 부가 잡음 성분이 된다. 비트 전송구간에서 부하변동에 의한 페이딩 현상이 없다고 가정하면 원하는 신호성분은 채널에 따른 일정한 신호 감쇠를 포함하는 수신 비트 펄스 에너지형태로 ($I_i = A_m \|p_m\|$) 얻어지고, 신호 감쇠는 다음 식 (2)와 같이 채널 펄스 응답신호와 송신 펄스신호의 전력스펙트럼의 비를 통해 등가로 얻을 수 있다.

$$Atten. = \frac{\|p_m\|^2}{\|g\|^2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |P_m(jf)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |G(jf)|^2 df} \quad (2)$$

1. 서 론

대내 전력선망은 홈 네트워크 시스템에서 가전제어를 위한 유용한 통신망중의 하나로 많은 관심이 고조되고 있다[1]. 하지만 대내 전력선에 접속하고 있는 다수의 가정용 부하들로 인해 채널 특성이 적용 시간, 적용 장소에 따라 급격히 변화하기 때문에 높은 통신 신뢰도를 요구하는 가전제어망으로써의 활용에 큰 제약이 되고 있다[1][2]. 이러한 열악한 채널 특성을 극복하고 신뢰성있는 전력선 통신망 활용을 위해 다양한 채널 특성 측정[3][4] 및 통신 성능 개선 방안[1]들에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 하지만 대내 전력선 채널은 대내에 산재한 다양한 가정용부하와 옥내 전력선로망으로 인해 통신 채널 모델링이 어렵고 채널 특성 측정에 한계가 있으며 통신 시스템으로의 체계적인 통신 성능 분석 및 접근이 어렵다. 따라서 대내 전력선 채널에 대한 주요 통신 성능 변수들의 통계적인 특성에 기초하여 적절한 통신 성능을 분석하는 방식이 보다 효과적인 방식이라 할 수 있다 하겠다.

이에 본 논문에서는 대내 전력선 통신망 환경에서 주요 통신 성능 열화요소로서 신호감쇠, 신호왜곡, 채널 잡음을 추정하는 기법을 제시하고, 실측을 통한 통신 성능 및 통신 신뢰도에 대해 기술하였다. 또한 제시한 채널 특성 추정기법을 적용하여 얻은 실측 결과의 통계적 특성에 기초하여 상용의 전력선 통신 시스템을 적용한 인터넷 가전 제어의 활용 타당성을 검토하였다.

2. 대내 전력선 채널 특성 추정 기법

2.1 대내 전력선 통신 계통 모델링

대내 전력선 통신은 가정용부하 및 전력선로망에 따른 신호감쇠와 채널 잡음으로 인한 수신 SNR 열화와 신호

신호 왜곡 ξ_i 은 일반적인 분포형태가 아닌 특수한 형태의 분포(cantor type 등)로 나타나지만 특정 범위내에서 중심극한정리(central limit theorem)에 의해 가우스 분포 형태로 근사화가 가능하다[5]. 따라서 본 논문에서는 ISI 성분의 평균과 분산을 얻고 이를 가우스 분포형태로 근사화하여 통신 성능을 유추하였다. 통신 시스템이 BPSK($b_k = \pm 1$)방식이고, ISI 성분 상호간의 상관 값이 아주 작다고 가정하면, ISI 성분의 평균값은 '0' 이고, 분산은 다음 식 (3)와 같이 채널 상관신호의 총 에너지에서 원하는 신호 에너지만큼을 제외한 형태로 근사화해서 구할 수 있다.

$$var[\xi^2] = E[\xi^2] = E\left[\left(\frac{A_m}{\|p_m\|} \cdot \sum_{k,k+i} b_k R_{p_m}((k-i)T_b)\right)^2\right] \quad (3)$$

$$\approx \left(\frac{A_m}{\|p_m\|}\right)^2 \sum_{k,k+i} |R_{p_m}((k-i)T_b)|^2$$

식 (3)와 같은 채널 상관함수를 통한 신호 왜곡량의 추정치는 고 잡음이 발생되는 채널에 대해서는 적절한 채널 상관함수를 얻는데 한계가 있다. 따라서, 본 논문에서는 Parseval's theorem을 이용해서 채널 상관함수를 전력 스펙트럼으로 변환하여 신호 왜곡량의 기대치를 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 채널 탐침 기법을 적용시에 실측 장비에 의한 미세 조정과정을 생략할 수 있도록 신호 왜곡량을 원하는 신호성분 전력으로 정규화하여 다음 식 (4)와 같이 채널 상관함수의 겹쳐진 스펙트럼(folded specturm)의 에너지 비율로 나타낼 수 있다.

$$D_{nms} = \frac{\sigma_s^2}{f^2} = \frac{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} |\sum_k S_R(j\frac{2\pi}{T_b}(f-k))|^2 df}{(\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \sum_k S_R(j\frac{2\pi}{T_b}(f-k)) df)^2} - 1 \quad (4)$$

식 (4) 에서 f 은 비트 주기 (T_b) 로 정규화된 주파수 성분이고 $S_R(jf)$ 은 채널 상관함수의 전력스펙트럼 성분이다. 이산화된 채널 상관 함수의 전력스펙트럼이 일정한 값을 가지는 경우, 정규화된 왜곡 전력이 '0' 이 되며 ISI 가 없는 경우의 Nyquist 조건[5] 을 만족하여 이 값을 이용하여 다음 식 (5) 과 같이 근사적으로 비트 오류를 구할 수 있다.

$$P_{BER} = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{2 \cdot (D_{nms} + \frac{\sigma_s^2}{f^2})}}\right) \quad (5)$$

2.2 측정 설비 및 채널 탐침 신호의 구성

대내 전력선 채널 특성을 효과적으로 추정하기 위해서 특정한 채널 탐침 신호를 채널에 인가하고 채널 응답신호를 분석하여 채널 특성을 추정하는 채널 탐침 기법 (4) 을 전력선 채널에 적용하였다. 이를 위한 전력선 채널 측정 설비를 다음 그림 1 에 나타내었다.

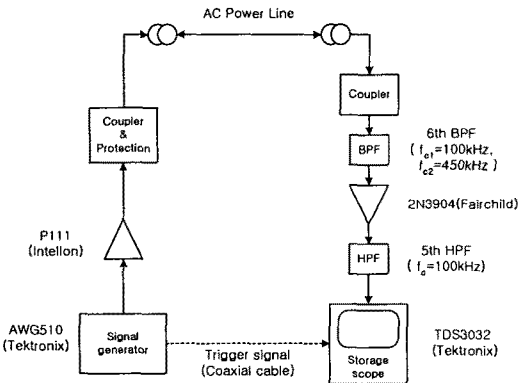


그림 1. 전력선 채널 특성 측정 설비.

송수단에서는 신호발생기에서 탐침 신호로써 450kHz 로 대역제한된 Nyquist 펄스를 0.2msec 마다 주기적으로 발생시키고, 전력 증폭기와 서지 전압 보호 회로 및 PLC 커플러를 통해서 고주파의 탐침신호를 전력선에 인가하게 된다. 수신단에서는 PLC 커플러를 통해서 수신된 채널 응답 신호를 2단계에 거친 필터링과 증폭기를 통해서 잡음이 제거된 채널 응답신호를 수신도록 구성하였다. Scope에서는 동축 케이블을 통해 동기신호를 획득하여 512개의 샘플 파형들의 평균을 취해 채널 잡음이 제거된 10000 point의 이산 채널 응답신호를 저장토록 하였다. 측정 설비의 총 이득은 신호 발생기의 이득 26[dB]와 송수단 필터에 의한 이득 27[dB] 그리고 scope 에서의 이득 80[dB] 을 포함하여 총 133[dB]로써 전력선채널의 100[dB]이상의 큰 감쇠특성을 측정 가능토록 하였다. 다음 그림 2 에서 신호 크기를 0.1[V_{pp}]로 적용하여 송수신 PLC 커플러를 직접 연결한 경우의 채널 탐침신호의 특성을 나타내었다.

그림 2와 같이 측정설비에 의한 응답신호는 100-450kHz 대역에서 거의 평탄한 스펙트럼을 가지며 측정 설비에 의한 이득이 대략 27[dB] 임을 확인하였다. 이와 같은 측정설비에 의한 응답신호를 채널 탐침신호로 전력선 통신망 채널에 인가하여 얻은 스펙트럼 데이터를

측정 설비 자체 이득만큼 보정하여 식 (2) 와 식 (4) 에 각각 적용하여 주파수축에서 신호 감쇠 및 신호 왜곡을 구하였다. 전력선 채널 잡음은 그림 1 에서 탐침 신호를 전력선로에 인가하지 않은 상황에서 PLC 커플러 및 6차 고주파 필터링이 적용된 채널 잡음을 스펙트럼 분석기로 측정하여 잡음 전력 스펙트럼을 얻고 잡음 전력을 산출하여 통신 성능에 반영하도록 하였다.

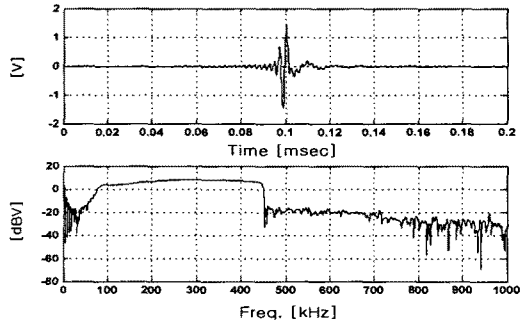


그림 2. 송수신단 PLC 커플러를 직접연결한 경우의 측정설비에 의한 응답 신호특성. ($A_m=0.1V_{pp}$)

3. 전력선 채널 특성 추정 기법의 적용 및 실측결과

3.1 전력선 채널 특성 추정 기법의 적용 및 통신 성능 실측

전력선 특성 추정 기법을 실 거주 대내 전력선 채널에 적용하기 위하여 용인시 수지 지구 44평형 단위세대 아파트 대내에 2.2 절에서 기술한 측정 설비를 구축하여 전력선 채널 특성을 실측하였다. 시범 아파트는 4개의 침실과 거실, 주방을 포함한 일반적인 대내 구조로 구성되어 있으며, 측정 가용한 32 개의 outlet에 tag를 붙이고, 임의의 두 개의 outlet 사이의 전력선 채널 특성을 측정하였다. 채널 특성 추정시에 전열부하 15종과 전등부하 4종을 대부분 운전상태로 적용하여 부하율이 높은 채널의 경우를 기준으로 측정하였다.

다음 그림 3 에서 채널 탐침 기법을 거실과 식당 사이의 채널에 적용하여 얻은 채널 응답신호의 예제 파형을 나타내었다.

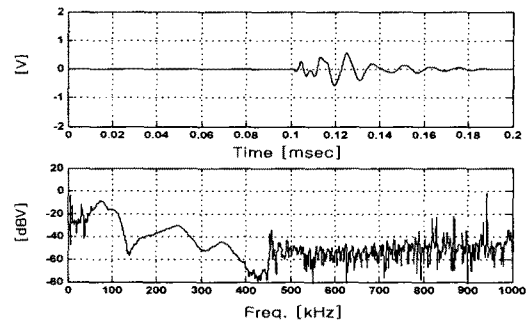


그림 3. 대내 전력선 채널에 대한 채널 탐침 응답신호 예.

대내 전력선 채널은 그림 3 와 같이 전력선로 임피던스 및 부하 임피던스의 영향으로 주파수 선택적인 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이러한 주파수 선택적인 특성으로 인해 특정한 협대역을 사용하는 전력선 통신 시스템의 경우 통신이 두절될 수 있으며, 고속의 전력선 통신 시스템에서는 ISI 의 영향으로 인해 통신 성능 열화가 심하게 나타날 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 육내 전력선 채널 특성 추정기법

의 타당성을 검증하기 위하여 5kHz 대역폭을 갖는 통신 시스템을 대상으로 88개의 독립된 경로에서 채널 특성을 획득하여 비트오율을 유도하였다. 또한 상용의 전력선 채널 분석기를 이용하여 같은 통신 경로에서의 비트오율을 직접 측정하여 얻고 유도한 비트오율과 비교하여 다음 그림 4 에 나타내었다.

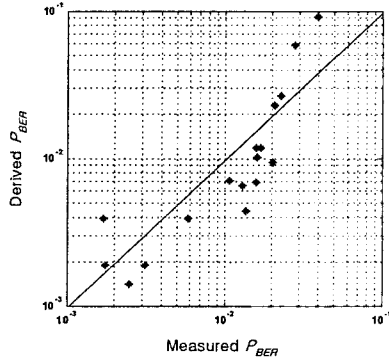


그림 4. 채널 추정 기법을 통해 유도한 비트오율과 직접 측정된 비트오율 비교 제시.

그림 4 에서 비트오율이 10^{-3} 이상으로 크게 나타나는 경우 실측을 통해 직접적으로 얻은 비트오율 특성과 채널의 SINR을 통해 유도한 비트오율 특성의 일치함을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 제시한 채널 특성 추정 기법에 의한 전력선 통신 성능 해석의 유용성을 보이고 있으며, 전력선 통신 시스템에서 통신 성능 변수로써 채널의 각 신호감쇠, 신호왜곡, 잡음특성을 추정하여 통신 성능을 분석하는 방식의 타당성을 나타낸다 하겠다. 비트오율이 10^{-3} 미만으로 나타나는 경우에는 수신 SINR이 상대적으로 큰 채널에 해당하여 비트오율이 급격히 감소하기 때문에 직접적으로 구한 비트오율과 상호 비교가 어렵고 통신 margin의 통계적 특성에 기초한 전력선 통신 성능 분석이 보다 용이하다 할 수 있겠다.

3.2 전력선 통신 시스템의 통신 신뢰도

상용의 저 비트율 전력선 통신 시스템은 열악한 통신 채널 환경을 극복하기 위해 확산 스펙트럼 방식을 사용하거나 여러 개의 대역으로 전송하는 방식을 사용하며 통신 오류가 발생하는 경우 재전송을 통해 통신 신뢰도를 개선하는 방식등이 주류를 이루고 있다[1]. 본 논문에서는 5kHz 대역폭을 갖는 두 개의 반송파 주파수 대역으로 총 4 회까지 재 전송하는 전력선 통신 시스템을 대상으로 통신 신뢰도를 분석하였다. 이러한 전력선 통신 시스템에서의 통신 신뢰도는 대내 전력선 채널 특성 실측 결과를 토대로 두 개의 독립된 대역에서 동시에 10^{-3} 비트오율 이상으로 통신 성능의 열화가 발생하는 범위에 대한 확률 값으로 유도하였다. 이를 위해서 각 주파수 대역에서 측정된 수신 SINR 에서 10^{-3} 비트오율을 만족하는 수신 SINR 을 제외한 여분의 SINR 을 각 대역별 통신 margin 으로 간략화하여 log-normal 분포로 모델링하였다. 다음 표 1 에서는 용인 수치 지구 44평형 단위세대 아파트에서 채널 특성 추정기법을 적용하여 얻은 실측 결과에 기초한 통신 margin 의 분포와 통신 신뢰도를 특정한 outlet 을 포함하는 경로별로 정리하여 나타내었다.

표 1 에서와 같이 4가지 형태의 가정용 부하의 outlet을 통신 채널의 종단으로 하는 통신 경로에 대해 평균 통신 신뢰도는 93.8%에서 99.9% 까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 세탁기의 경우 주방선로의 최종단에 위치하여 대내 가정용부하 및 전력선로에 의한

비교적 열악한 채널 특성으로 인해 최저 93.6%의 통신 신뢰도를 나타내는 것을 확인하였다. 대내 전체 outlet에서의 평균 통신 신뢰도는 97.9%로써 이러한 통계적 수치는 전력선 통신 시스템을 적용한 가전제어의 활용 타당성 측면에서 충분히 높은 수준이라 할 수 있겠다.

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	14 paths
Paths with refrigerator	3.7	8.8	10.0	9.0	99.3	14 paths
Paths with washing-machine	-2.1	12.2	2.7	7.6	93.8	14 paths
Paths with microwave-oven	-2.5	12.4	5.1	7.3	96.5	14 paths
Other paired electric outlet	8.7	13.6	17.3	16.6	98.6	32 paths
Total	5.4	12.7	12.8	13.9	97.9	88 paths

4. 결 론

본 논문에서는 인터넷 가전 제어를 위한 전력선 통신망 채널 특성 추정 기법을 제시하였고 실 거주 대내 전력선 통신망의 채널 특성 실측 결과를 토대로 통신 성능 및 통신 신뢰도를 평가하였다. 제시한 전력선 채널 특성 추정 기법은 특정 형태의 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 단위의 통신 성능을 추정하는 방식으로 각 성능 열화에 대한 체계적인 통신 시스템 분석 및 시스템 설계의 기반기술을 제공한다 는 점에서 의의가 크다 할 수 있겠다.

상용의 전력선 통신 시스템을 적용한 가전제어의 활용 타당성을 검토하기 위하여 저속 전력선 통신망에서 주로 사용되는 통신 시스템을 대상으로 통신 margin 분포를 모델링하고 이를 토대로 평균적으로 97.9%의 통신 신뢰도가 나타나는 것을 확인하였다. 대내 전력선 통신 채널은 다양한 가정용 부하와 전력선로 임피던스 및 고 부하 잡음으로 인해 큰 폭의 수신 SINR 특성을 가지며, 주파수 선택적인 전달 특성으로 인해 특정 상황에 따라서는 통신이 두절되는 경우도 발생할 수 있으며 이에 대한 대책이 지속적으로 필요하다 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Radford, "Spread spectrum data leap through AC power wiring", *IEEE Spectrum*, vol.33, pp: 48-53, Nov., 1996.
- [2] H.C. Ferreira, H.M. Grove, O.G. Hooijen, and A.J. Han Vinck, "Power Line Communications: An Overview", *IEEE AFRICON 4th*, vol.2, pp: 558-563, 1996.
- [3] O.G. Hooijen, "A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium", *IEEE Trans., Electromagnetic Compatibility*, vol.40, pp: 331-336, Nov., 1998.
- [4] D. Liu, E. Flint, B. Gaucher, and Y. Kwark, "Wide band AC power line characterization", *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.45, pp: 1087-1097, Nov. 1999.
- [5] T. Starr, J.M. Cioffi, and P.J. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*, Upper Saddle River, N.J. Prentice-Hall, 1999.