

채널 길이와 전송 전력을 고려한 시변 환경 옥내 단일 사용자 전력선 통신의 outage 확률 분석

논 문
59-2-10

Outage Probability Analysis under Time-varying characteristic of Indoor Single User PLC Considering Channel Length and Transmit Power

신 재 영* · 정 지 채†
(Jae-Young Shin · Ji-Chai Jeong)

Abstract - We investigate the outage probability in terms of QoS (quality of service) in indoor PLC network. We consider various kinds of appliances for realistic indoor PLC network. For estimation of the outage probability, we calculate the time-varying channel responses considering the loading conditions based on regular human activities and include the additive noise. We calculate the outage probability for each terminal and investigate relationship between the outage probability and the channel length, and transmit powers. Our results suggest that the outage probability is increased when the channel length becomes longer because more appliances affect the amount of reduced channel capacity and is not improved distinctly for very high and low outage threshold by increasing the transmit power. However, we can see outage probability improvement for 30% outage threshold case by increasing the transmit power.

Key Words : Channel capacity, Outage probability, Power line communications, Quality of service

1. 서 론

최근 전력선 통신 (PLC)은 스마트 그리드 (smart grid) 프로젝트에서 근거리 통신망 (local area network, LAN)을 구축하는데 유력한 기술이다 [1]. 기본적으로 전력망은 전력을 전송하기 위하여 설치되어 있기 때문에 전력망을 이용한 데이터 전송은 적합하지 않다. 데이터 전송에 불리한 환경에서 안정적인 데이터 전송을 하기 위해서는 안정성과 충분한 통신 서비스 품질 (quality of service, QoS)을 확보해야 한다. 전력선 통신 하에서 안정적인 통신을 위한 기존의 연구에서는 통신 서비스 품질의 측면에서 outage 확률 분석이 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 통신 서비스 품질의 측면에서 outage 확률을 분석하였다. outage 확률을 계산하기 위하여 옥내 배전망을 선택하여 전력선에 존재하는 부가 잡음과 시간에 따라 변화하는 부하 조건을 고려하였다. 부하 조건은 사람들의 일상적인 생활 패턴을 고려하였다. 다양한 조건 하에서 outage 확률을 계산하기 위해서 4인 가족부터 6인 가족까지의 다양한 생활 패턴을 고려하여 outage 확률을 계산하였다. 또한 통신 서비스 품질의 보장 범위에 따른 outage 확률 분석을 위하여 다양한 outage threshold를 고려하고, outage 확률에 채널 길이와 전송 전력이 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 채널 길이와 전송 전력을 변

화시켜 outage 확률을 계산하였다. 2장에서는 기본적으로 옥내 전력선 통신망의 채널 응답과 전력선 통신망에 존재하는 부가 잡음에 대하여 소개하였다. 3장에서는 옥내 전력선 망에서의 outage 확률을 계산하기 위하여 outage 확률을 정의하고, 이를 바탕으로 outage 확률을 계산하기 위한 과정을 소개하였다. 4장에서는 일상적인 생활 패턴을 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 outage 확률을 계산하였다. 5장에서는 본 논문의 결론을 나타내었다.

2. 옥내 전력선 통신망의 채널 응답 특성

전력선 통신망에는 다양한 가전제품 부하의 영향으로 임피던스 부정합이 발생한다 [2]. 따라서 임피던스 부정합에 의한 멀티 패스 신호 전송을 고려한 옥내 전력선 통신망의 채널 응답은 (1)과 같이 표현된다 [3].

$$\begin{cases} H(f) = D(A_1 + 1)(A_2 + 1) \\ A_1 = LOS_{adL1} + OBS_{adL1} \left(\prod_{k=1}^{K_{L_1}} (S_{adL1k} + 1) - 1 \right) \\ A_2 = LOS_{adR1} + OBS_{adR1} \left(\prod_{k=1}^{K_{R_1}} (S_{adR1k} + 1) - 1 \right) \end{cases} \quad (1)$$

* 정 회 원 : 고려대 정보통신대 컴퓨터·전파통신공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 고려대 정보통신대 컴퓨터·전파통신공학과 정교수 · 공박

E-mail : jcyj@korea.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 12일

최종완료 : 2010년 1월 4일

전력선 통신망에 존재하는 부가 잡음 (noise)은 컬러 배경 잡음(colored background noise)과 임펄스 잡음으로 나눌 수 있다 [4]. 임펄스 잡음은 지속 시간이 매우 짧으므로 outage 확률 분석에서 무시할 수 있다. 컬러 배경 잡음은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$S_n(f) = a + b \cdot |f|^c \quad (2)$$

f 는 주파수를 나타내고 a , b , c 는 특정 조건에서의 노이즈 특성을 결정하는 파라미터이다. 일상에서 사용되는 가전 제품 중에서 큰 잡음을 발생시키는 잡음원 (noise source)이 존재할 경우, $a=-145$, $b=53.23$, $c=-0.337$, 그렇지 않을 경우에는 $a=-140$, $b=38.75$, $c=-0.720$ 를 이용하였다 [5]. 이를 이용한 전력선의 부가 잡음은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

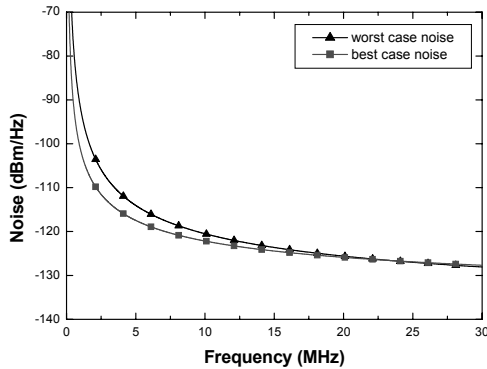


그림 1 잡음원을 고려한 주파수에 따른 전력선 통신망의 부가 잡음

Fig. 1 Additional noise on the PLC network considering the kind of noise source

3. outage 확률의 정의와 계산

Outage는 부가 잡음과 가전제품의 부하 조건의 변화로 인한 채널 응답의 변화로 발생하는 특정 채널의 채널 용량의 변화로 인하여 채널 용량이 특정 수준 이하로 떨어져 원하는 통신 서비스 품질을 만족시키지 못하는 경우에 발생한다. 이러한 outage가 측정 시간 동안 통계적으로 일어나는 확률을 outage 확률로 정의하고 (3)처럼 총 측정 시간 동안 outage가 발생하는 시간의 합의 비율로 나타낸다 [6].

$$\text{outage 확률} = \frac{\sum \text{outage 발생 시간}}{\text{총 측정 시간}} \quad (3)$$

$$C = \int_f \log_2 \left(1 + H^2(f) \frac{PSD}{N(f)} \right) df \quad (4)$$

Outage를 판별하기 위해서는 기준점이 필요하다. 이러한 기준점은 (4)에 나타난 것처럼 채널 응답($H(f)$), 부가 잡음의 크기($N(f)$), 전송 전력(PSD)을 고려하여 계산된 채널 용량(C)을 이용하여 특정 채널의 최대 전송 용량(C_{max})을 계산한 후, 이 최대 채널 용량을 기준으로 일정한 비율만큼 채널 용량이 채널 응답과 부가 잡음의 변화로 인하여 감소한 경우, 감소한 채널 용량을 outage threshold로 지정한다. 예를 들

면, 최대 채널 용량으로부터 10% 채널 용량이 감소한 경우를, outage 판별 기준점으로 지정할 경우, 이것을 10% outage threshold로 지정한다. outage threshold는 요구하는 통신 서비스 품질에 따라서 다양한 값으로 정할 수 있다. outage 확률의 정의와 다양한 outage threshold를 이용하여 outage 확률을 다음의 과정을 따라서 계산한다 [7].

- 전송 전력, 채널 응답, 부가 잡음을 고려하여 최대 채널 용량을 계산한다.
- 최대 채널 용량을 바탕으로 x% 감소한 채널 용량을 계산한다. (x% outage threshold)
- 하루 중 x% outage threshold 이하로 채널 용량이 감소하는 시간을 측정한다.
- (3)을 이용하여 x% outage threshold 경우 outage 확률을 계산한다.

예를 들어, 그림 2의 경우 위의 프로세스를 이용하여 x% outage 확률을 계산하면 outage가 발생한 시간($T_{out1} + T_{out2} + T_{out3}$)과 총 시간(T_{total})비율로 나타낼 수 있다.

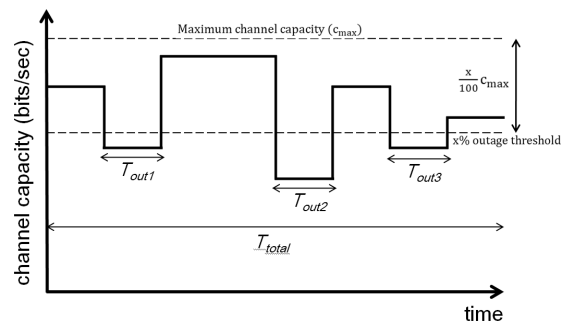


그림 2 outage 발생 시간과 총 측정 시간

Fig. 2 outage duration and total measured time

outage 확률을 통신 서비스 품질 면에서 고려하였을 경우, 만약 어떤 통신 시스템에서 outage 확률을 계산할 때 낮은 outage threshold가 필요하다면 그 시스템은 멀티미디어 전송에 사용되는 high speed 통신 시스템처럼 높은 수준의 통신 서비스 품질을 요구하는 시스템으로 간주할 수 있다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 outage 확률 계산 결과

4.1 시뮬레이션을 위한 옥내 전력선 통신망과 단일 사용자 전력선 통신 환경

그림 2는 시뮬레이션에 이용된 옥내 배전망을 나타낸다. 옥내 벽에 있는 전기 소켓과 전기 케이블의 접점은 각각 전력선 통신 네트워크의 터미널과 내부 junction을 나타낸다. 이 배전망은 23개의 터미널과 15개의 내부 접점으로 구성되어 있다 [8]. outage 확률은 23개의 터미널 중에서 2개의 터

미널을 선택하여 전력선 채널을 구성한 후, 채널 응답과 부가 잡음을 고려하여 채널 용량을 계산한 후, 253($=23C_2$)개의 모든 채널을 고려하여 계산하였다. 단일 사용자 전력선 통신 환경을 고려하였기 때문에 광대역 전력선 통신(Broadband PLC) 주파수 대역을 한 명의 사용자가 모두 사용하는 상황을 가정하였다. 따라서 outage 확률을 계산할 때 사용자가 사용할 수 있는 최대 데이터 전송 용량은 그 통신 채널의 최대 채널 용량과 같다고 가정한다 [7].

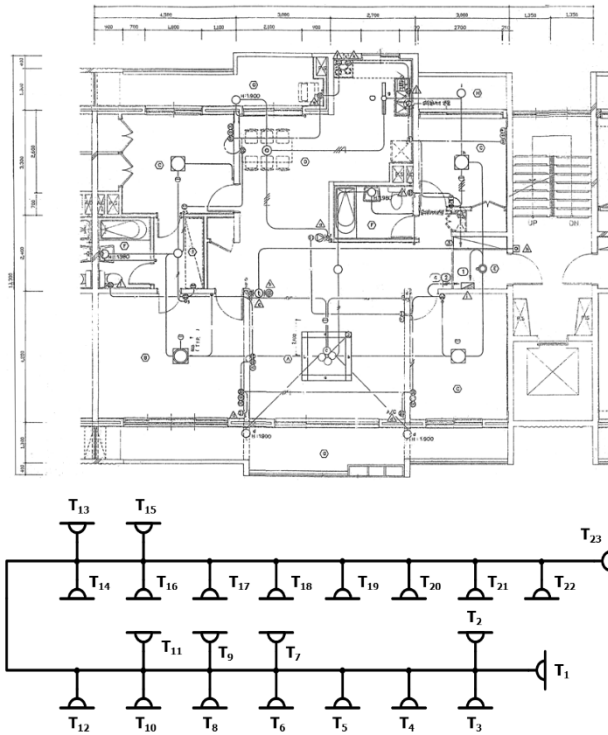


그림 3 옥내 전력선 통신망과 간단하게 나타낸 도식도
Fig. 3 An indoor PLC network and simple diagram

4.2. 시변 부하 시나리오를 이용한 전력선 통신의 시변 특성

Outage 확률 계산을 하기 위하여 4인 가족부터 6인 가족까지의 생활 패턴을 고려하여 시변 부하 시나리오를 작성하였다. 또한 대표적인 가전제품을 선정하여 각 상황에 맞도록 사용하였다. 가전제품의 임피던스는 용량성 부하(capacitive load)와 저항성 부하(resistive load)로 분류하여 사용하였다 [9]. 또한 고 잡음원과 저잡음원을 구분하여 시변 부하 시나리오에 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 가전제품은 표 1에 나타내었다. 그림 4(a)는 1번 시나리오를 이용하여 계산한 채널 응답이다. 일상생활 패턴에 따라서 부하 조건이 변화함에 따라서 채널 응답이 변화함을 볼 수 있다. 이러한 채널 응답의 변화는 그림 4(b)처럼 채널 용량의 변화를 일으킨다. 따라서 채널 용량이 감소하는 경우는 outage threshold 아래로 채널 용량이 감소하여 outage를 발생시킨다.

표 1 시변 부하 시나리오

Table 1 Time-varying loading scenario

시나리오	구성원	사용된 가전제품
1	4	에어컨, TV, 청소기, 전기 다리미, 선풍기, 헤어 드라이어, 냉장고, 전기 밥솥, 컴퓨터, 세탁기
2	5	에어컨, TV, 청소기, 전기 다리미, 선풍기, 백열 램프, 냉장고, 전기 밥솥, 세탁기, 헤어 드라이어
3	6	TV, 청소기, 전기 다리미, 백열 램프, 냉장고, 전기 밥솥, 세탁기, 헤어 드라이어, 컴퓨터
4	6	에어컨, TV, 청소기, 전기 다리미, 선풍기, 헤어 드라이어, 백열 램프, 냉장고, 전기 밥솥, 세탁기, 믹서, 전자레인지

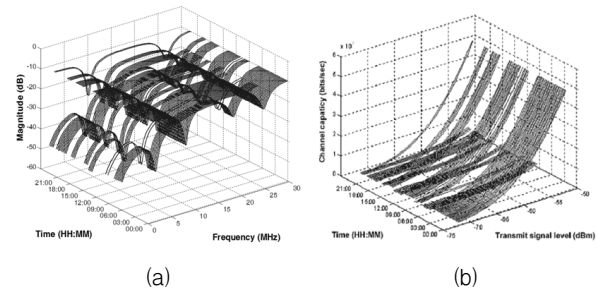


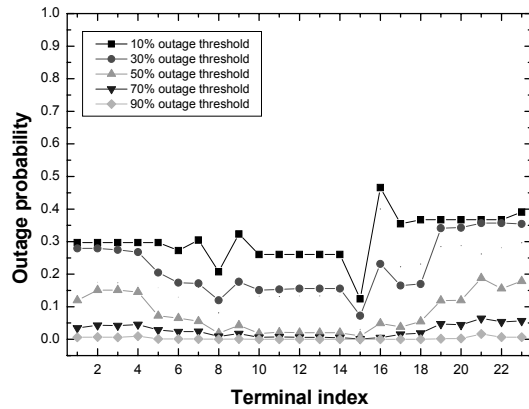
그림 4 5번 터미널과 12번 터미널로 이루어진 채널의 (a) 시변 채널 응답과 (b) 시변 채널 용량

Fig. 4 (a) Time-varying channel response and (b) time-varying channel capacity of the channel between T5 and T12

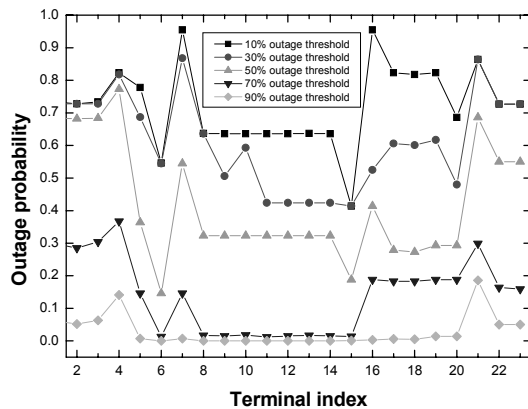
4.3 터미널에 따른 Outage 확률 계산 결과

그림 5(a)-(d)는 시나리오 1-4를 이용하고 다양한 outage threshold를 고려하여 계산한 outage 확률이다. 각 터미널에서의 outage 확률은 일상생활 패턴에 따라서 터미널마다 다양하게 나타난다. 같은 네트워크 안에서도 outage 확률이 터미널의 위치에 따라 변화의 정도가 매우 심하기 때문에 어떠한 위치에서 전력선 통신을 사용하는가가 통신 서비스 품질에 커다란 영향을 준다. 또한 채널 길이를 채널을 구성하는 두 터미널 사이의 최단거리로 정의하고, outage 확률에 채널 길이가 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 채널 길이를 변화시키며 outage 확률과 채널 길이의 관계를 연구하였다. 그림 6(a)-(d)는 시나리오 1-4를 이용하여 계산한 채널 길이에 따른 outage 확률이다. 채널을 구성하는 두 개의 터미널 중에서 1개는 1번 터미널에 고정시키고, 다른 한 쪽은 2부터 23까지 변화시켰다. 변화시킨 터미널 번호가 커질수록 채널의 길이가 더 증가함을 나타낸다. 따라서 계산에 이용된 22개의 채널 중에서 1번 터미널과 2번 터미널로 구성된 채널의 길이가 가장 짧고, 1번 터미널과 23번 터미널로 구성된 채널의 길이가 가장 길다. 시뮬레이션 결과는 일

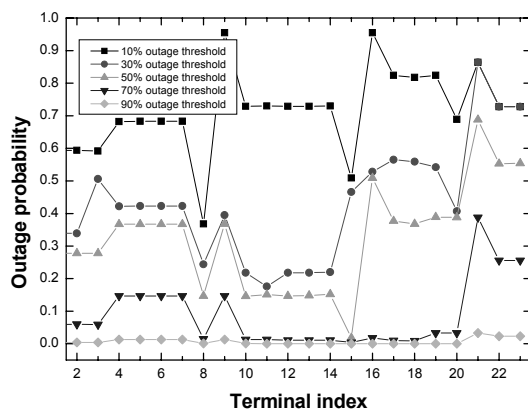
반적으로 outage threshold에 관계없이 채널 길이가 길수록 outage 확률이 커지고 있음을 나타내고 있다. 그 이유는 채널 길이가 길어질수록 더 많은 가전제품이 채널에 연결되어 감소되는 채널 용량이 더 많아지기 때문이다. 그림 6(a)-(d)에서 22번 터미널과 23번 터미널의 경우 outage 확률이 0인 이유는 1번 터미널과 22번 또는 23번 터미널로 구성되는 채널의 최대 채널 용량이 매우 작아서 채널 응답의 변화와 부가 잡음으로 인하여 일어나는 채널 용량의 변화가 매우 작기 때문에 outage가 발생하지 않는 것이다.



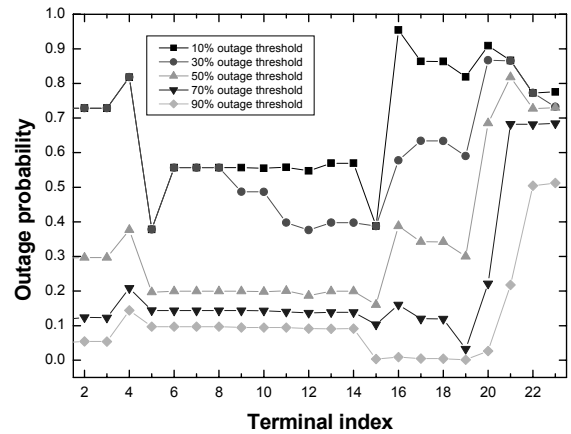
(a)



(b)



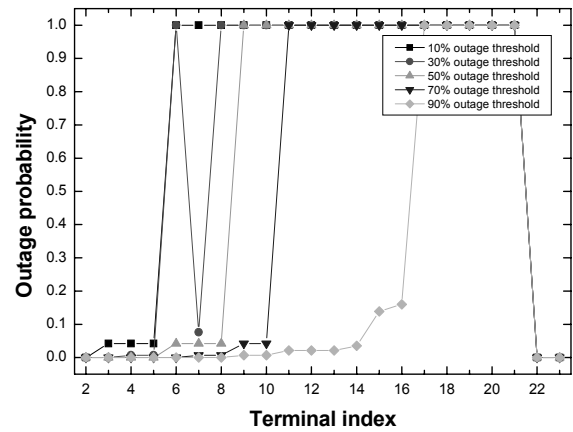
(c)



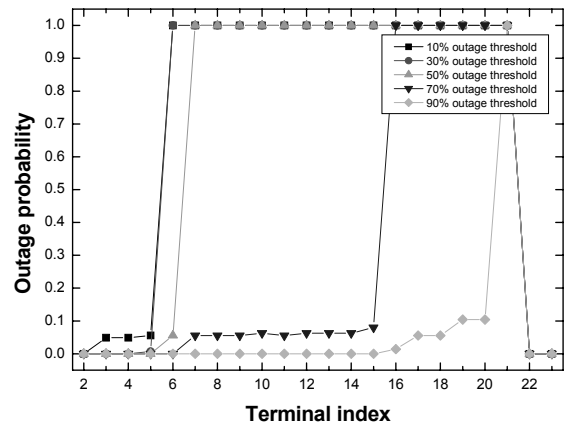
(d)

그림 5 (a) 시나리오 1 (b) 시나리오 2 (c) 시나리오 3 (d) 시나리오 4를 이용하여 계산한 터미널 위치에 따른 outage 확률 (전송 전력 = -60dBm)

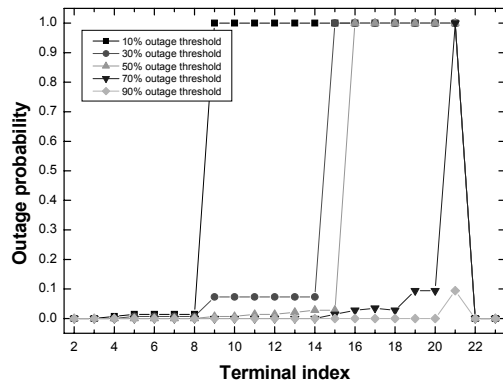
Fig. 5 Outage probability according to terminal's location using (a) scenario 1 (b) scenario 2 (c) scenario 3 and (d) scenario 4 (Transmit power = -60dBm)



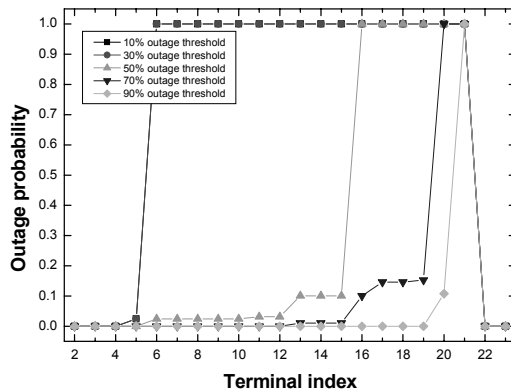
(a)



(b)



(c)

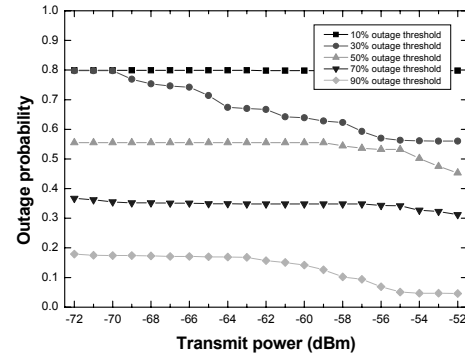


(d)

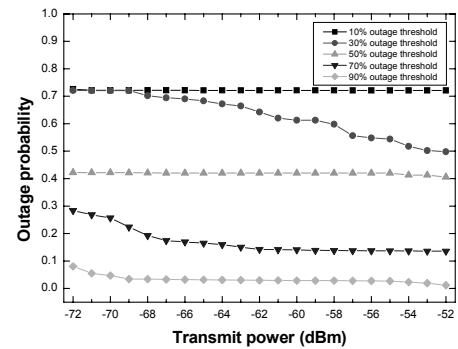
그림 6 (a) 시나리오 1 (b) 시나리오 2 (c) 시나리오 3 (d) 시나리오 4를 이용한 채널 길이에 따른 outage 확률 변화 (전송 전력 = -60dBm)

Fig. 6 Outage probability according to channel length using (a) scenario 1 (b) scenario 2 (c) scenario 3 and (d) scenario 4 (Transmit power = -60dBm)

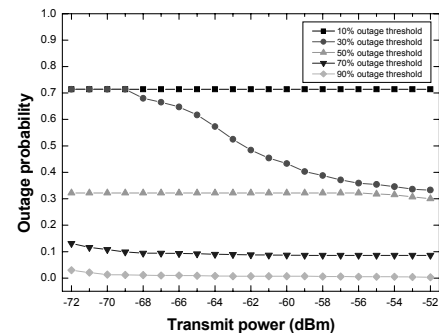
신호 전송을 할 경우 전송 전력이 커질수록 채널 용량이 늘어나게 된다. 따라서 채널 용량의 변화가 outage 확률의 변화에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 전송 전력의 변화가 outage 확률에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다. 그림 7(a)-(d)은 전송 전력을 -72dBm부터 -52dBm까지 변화시키면서 터미널 위치에 따라서 계산한 outage 확률이다. 전력선 통신의 경우, 전송 전력은 FCC 규정에 의하여 최소 -72dBm부터 최대 -52dBm까지로 제한된다. 시뮬레이션 결과 30% outage threshold의 경우 전송 전력이 증가할수록 outage 확률이 가장 많이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 10% outage threshold 값을 이용하여 outage 확률을 계산하는 높은 수준의 통신 서비스 품질을 필요로 하는 통신 시스템이나 70~90% outage threshold 값을 이용하여 outage 확률을 계산하는 낮은 수준의 통신 서비스 품질을 필요로 하는 통신 시스템은 전송 전력을 많이 사용하더라도 outage 확률에는 커다란 차이를 보이지 않으므로, outage 확률의 측면에서는 필요로 하는 통신 서비스 품질에 맞도록 전송 전력을 최소화하여 통신 환경을 구축하면 제한된 resource를 최적화하여 이용할 수 있다.



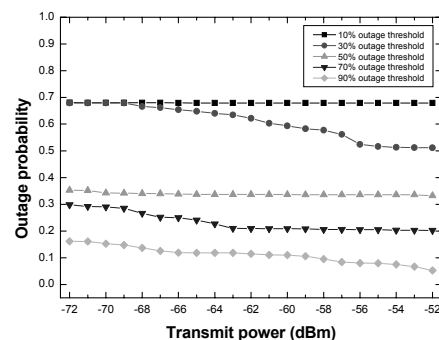
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7 (a) 시나리오 1 (b) 시나리오 2 (c) 시나리오 3 (d) 시나리오 4를 이용하여 계산한 전송 전력에 따른 outage 확률 변화

Fig. 7 Outage probability according to transmit power using (a) scenario 1 (b) scenario 2 (c) scenario 3 and (d) scenario 4

5. 결 론

본 논문에서는 단일 사용자 전력선 통신 환경에서 outage 확률을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다. 이전의 연구들에서 통신 서비스 품질 측면에서 outage 확률에 관한 연구가 부족하기 때문에 이러한 측면을 고려하였다. 안정적인 통신 서비스 품질을 확보하기 위하여 outage 확률을 최소화시키기 위하여 outage 확률에 영향을 미치는 요소들에 대하여 연구하였다. outage 확률을 계산하기 위하여 다양한 일상생활 패턴을 고려하여 가전제품의 사용 유무에 관한 시변 시나리오를 작성하여 하루 중 전력선 통신 네트워크의 부하의 변화를 고려하였다. 시뮬레이션 결과, 같은 네트워크 안이라도 터미널의 위치에 따라서 outage 확률이 매우 다양하게 나타남을 확인하였다. 또한 채널의 길이가 길수록 전력선 네트워크에 연결되어 있는 가전제품의 숫자가 증가함에 따라서 outage 확률이 증가한다는 사실을 확인하였다. outage 확률을 감소시키기 위하여 전송 전력을 증가시켰을 때 30% outage threshold 경우를 제외하고 명확한 outage 확률의 감소가 나타나지 않았다. 따라서 통신 서비스 품질 측면에서 outage 확률을 고려할 경우, 전송 전력을 최적화하여 제한된 resource 사용을 최소화하여 효율적인 통신 시스템을 구축할 수 있다.

감사의 글

This research was supported in part by Brain Korea 21 project in 2009 and WCU (World Class University) program through the Korea Science and Engineering Foundation funded by the Ministry of Education, Science and Technology (R31-2008-000-10008-0).

참 고 문 헌

- [1] McGranaghan, M., Von Dollen, D., Myrda, P., Gunther, E.: Utility Experience with Developing a Smart Grid Roadmap. In: *IEEE PES General Meeting*, pp. 1 - 5. IEEE Press, New York (2008)
- [2] Manfred Zimmermann and Klaus Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553 - 559, Apr. 2002
- [3] Jaeyoung Shin, and Jichai Jeong, "Power Line Channel Model Considering Adjacent Nodes with Reduced Calculation complexity due to Multipath Signal Propagation and Network Size Using Infinite Geometric Series and Matrices," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 58, issue. 2, pp. 248-255, Feb. 2009
- [4] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 44, no. 1, pp. 249 - 258, Feb. 2002.
- [5] T. Esmalian, P. Gulak, F. R. Kschischang, "A discrete multitone power line communications system," *ICASSP*, Istanbul, 2000, pp.2953-2956.
- [6] Biglieri, E., J. Proakis, and S. Shamai, "Fading Channels: Information Theoretic and Communications Aspects," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 4, issue. 6, pp. 2619-2692, Oct. 1998.
- [7] Jaeyoung Shin, and Jichai Jeong, "Outage Probability Analysis for Single User System in Power Line Communications," *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, Jul. 2009.
- [8] Jaeyoung Shin, Jaehoon Lee, Jichai Jeong, "Time-Varying Channel Responses of Indoor Power-Line Network in a Typical Apartment for considering Various Impedances of Appliances and Transmission Distances," *Proc. 9th Int. Conf. Electronics, Information, and Communication (ICEIC 2008)*, Tashkent, Uzbekistan, Jun. 2008.
- [9] Y. S. Heo et al, "Measurement of Indoor Power Line Channel Characteristics considering Capacitive Loads," *Journal of IEEK*, Vol. 42, No. 6, pp. 53-60, Jun. 2005.

저 자 소 개



신 재 영 (申宰榮)

1983년 3월 4일생. 2007년 고려대학교 전파통신공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 컴퓨터·전파통신학과 석사과정
Tel : 010-3936-8334
E-mail : naraeshigo@korea.ac.kr



정 지 채 (鄭智采)

1953년 3월 14일생. 1980년 고려대 전자공학과 졸업. 1988년 CMU졸업(공학). 1993년~1995년 포항공과대학교 조교수. 1995년~현재 고려대학교 교수
E-mail : jcj@korea.ac.kr