

OFDM 방식을 이용한 전력선 통신 모델 FPGA 구현

이원태* · 임자용**· 이영철***

*한국전기연구원 · **플레넷(주)· ***경남대

Design of FPGA OFDM Modem for PowerLine Communications

Won-Tae Lee* · Ja-Yong Lim**· Young-Chul Lee***

*KERI · **PLANET System Co., Ltd.· ***Kyungnam Univ.

Abstract - 전력선 통신(Power Line Communication)은 홈오토테이션, 원격 검침(AMR) 분야에서 많이 사용되어진다. 전력선 통신은 많은 유용성에도 불구하고 전력선 채널에 대한 정확한 채널 모델링과 전력선 모델에 관해서는 많은 문제점을 나타내고 있다. 본 논문에서는 고속 전력선 통신을 위한 전송선로의 주파수에 대한 잡음과 임피던스 특성 및 전력선 채널에 OFDM 신호를 QPSK 변조기법으로 전송하였을 때의 시뮬레이션 결과와 설계된 FPGA 보드를 비교 분석 하였다. 채널 모델은 잡음과 감쇠 특성만을 고려하여 모델링 하였으며, 전력선 채널 상에서의 OFDM 기법을 적용한 모델의 성능을 분석하였다.

L, 컨덕턴스 G, 커패시터 C로 이루어지며 그림1과 같이 표시된다.

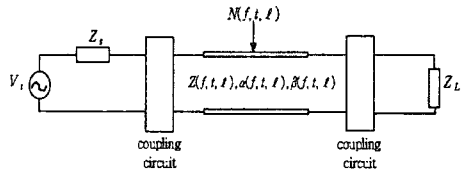


그림1. 전력선의 채널 파라미터

1. 서 론

통신 서비스의 발달로 인하여, 초고속 정보통신망의 보급에 따라, 홈 네트워크 기술과 연동된 정보 활용 서비스에 대한 소비자의 욕구가 급속히 팽창하게 되었다. 전력선(power line)을 매체로 한 디지털 가전기기의 네트워크는 plug in 만으로 작동이 가능한 설치 및 사용의 용이성, 추가 기기의 설치가 plug in 만으로 가능한 디지털 가전 네트워크의 확장성 그리고 추가 배선의 불필요로 인한 가격 경쟁력 확보 등의 경쟁력을 바탕으로 홈 네트워크에 있어 최상의 솔루션으로 평가받고 있다. 차세대 기술의 집합체인 스마트 홈이나 유비쿼터스와 같은 시스템을 구현하기 위해서는 현존하는 통신 기술들을 적절히 융합해야 한다. 전력선은 광범위한 네트워크를 구성하고 있기 때문에, 유비쿼터스에 가장 근접한 개념을 선로 자체만으로도 지니고 있고, 이를 이용한 전력선 통신은 이들 시스템에서 가장 내 백색 가전을 제어할 수 있는 가장 적합한 방안으로 평가된다.

전력선 통신은 데이터 전송을 목적으로 만들어진 전송 선로가 아니므로 데이터 손실, 회선과의 간섭, 잡음, 임피던스 부정합 등으로 인한 많은 변화가 생긴다^[1]. 전력선은 선로의 다양한 부하에 따라서 채널이 임피던스 값이 변하게 되어 전력선을 통해 고속정보 전송을 위한 신호의 손실이 발생한다. 전력선 통신에서는 주파수의 선택적 페이딩 현상이 채널에서 많이 나타나며, 이러한 현상을 극복하기 위해 다양한 기법들이 적용되고 있고, 그 중에서도 OFDM을 이용한 기법이 가장 많이 적용되고 있고 있다. 본 논문에서는 전력선 통신에서 전송선로의 채널상에 나타나는 여러 가지 현상을 분석하고, FPGA를 이용하여 OFDM 기법을 적용한 모델을 설계하고 성능을 분석하였다.

II. 전력선의 채널 및 특성

전력선은 전송 선로에 대한 가장 일반적인 형태로 모델링이 가능하다. 전송 선로의 특성은 저항 R, 인덕턴스

이와 같은 전송선로의 특성 임피던스는 식(1)과 같다.^{[2][3]}

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{1}$$

특성 임피던스는 전력 발생과 시스템 분포에 대한 전송 선로의 임피던스를 의미한다. 특성 임피던스는 전력 시스템 설계자에게 시스템 임피던스 레벨의 추정을 가능하게 한다. 전력 시스템 임피던스 레벨은 효율적인 전압 배분을 위해서 매우 중요하다. 부하 쪽에서 소스 쪽으로 보면 소스 임피던스는 매우 작다.

그리고 전송 선로를 설계할 때 고려하여야 할 다른 중요한 성분은 전달 상수로, 식(2)와 같이 표현된다.

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{2}$$

여기서 α 는 감쇠 상수이고 β 는 위상 상수이다. 감쇠 상수는 전송 선로의 신호 감쇠 특성을 나타내고, 위상 상수는 전송 신호의 길이를 통과하는 동안 신호에 발생하는 위상 변화의 양을 의미한다. 전달 상수는 간단한 항으로 식(3)과 같이 나타낸다^[4].

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{3}$$

위의 방정식들을 이용하여 위상 상수와 감쇠 상수를 얻을 수 있다. 감쇠 상수와 위상 상수는 식(4)의 관계를 고려하여 다음과 같이 식(5)와 식(6)과 같이 간략화 된다.^[5]

$$\sqrt{1+x} = 1 + x/2, \quad x \ll 1 \tag{4}$$

$$\alpha \approx \frac{R}{2Z_L} + \frac{GZ_L}{2} \tag{5}$$

$$\beta \approx \omega \sqrt{LC} \tag{6}$$

III. 전력선의 채널 모델

전력선 채널 모델은 장거리 전송 케이블과 단거리 주 거 전력 시스템 선로로 구분된다. 장거리 전송 라인의 전력선로 채널은 전송선로가 주 거 전력 선로에 비해서 채널 상에 잡음이 훨씬 적으므로 부가 백색 가우시안 잡 음으로서 쉽게 구현할 수 있다. AWGN 특성과는 다르 게, 신호 감쇄는 전송선로 채널 모델링 중 가장 중요한 요인이다.

반면에 주 거 선로는 데이터 전송을 위해서 별로 좋은 특성을 제공하지 않는다. 주 거 전력선로의 채널은 신호 감쇄, 배경 잡음, 부가 임펄스 잡음, 페이딩과 다중 경로 와 같은 기능을 포함하여 모델링 하여야 한다. 신호 감쇄 는 송신기와 수신기 사이의 물리적 거리와 동작 주파 수에 달려 있다. 배경 잡음은 선로 자체에 존재하는 잡 음이다. 임펄스와 비-임펄스 성격의 잡음은 매우 중요한 성분이다. 이것은 주 거 전력선 채널 모델링의 성분에 포 함되어야 한다. 채널 모델은 대역 확산 통신과 직교 주 파수 분할 다중 접속과 같은 통신기술을 해석하는데 매 우 유용한 형태이다. 따라서 전력선 채널의 임펄스 응답 은 식(7)과 같이 나타낸다. 여기에서 d 는 송신기와 수신 기 사이의 거리, f_0 는 동작 주파수, c 는 가중치 벡터, 그리고 N_p 는 다중 경로의 수를 의미한다.^[6]

$$h(t) = A(d, f_0) \sum_{i=1}^{N_p} c_i \delta(t - \tau_i) \quad (7)$$

채널 성질에 의해서 협대역 신호는 평균 20dB 감쇄되 고, 페이딩 채널에 의해서 매우 심하게 왜곡된다. 이것은 전송하는 데이터의 복구를 어렵게 만든다. 이런 채널을 극복하기 위해서는 매우 강한 송신 신호가 필요하다. 이 것은 주파수 선택적 페이딩 채널과 감쇄를 극복할 수 있 으며, 대역 확산 기술에 매우 유용하다. 왜냐하면 확산 신호는 근본적으로 광대역 성질을 가지기 때문이다. 또 한 OFDM과 같은 기술을 사용하면 주파수 선택적 페이 딩과 다중 경로 성분에 의한 간섭 효과를 줄일 수 있다.

IV. 전력선 통신에서의 OFDM

OFDM을 사용하는 중요한 이유는 주파수 선택적 페 이딩이나 협대역 간섭에 대한 강건함이 증가하기 때문이 다. 단일 반송파 시스템에서는 하나의 페이딩이나 간섭 에 의해 전체 링크가 실패할 수 있지만 다수 반송파 시 스템에서는 일부 반송파만이 영향을 받게 된다. 상대 적으로 느린 시변 채널에서 특정 반송파에서의 신호대 잡음비(SNR)에 따라 각 반송파에 대한 데이터 전송률 을 적응적으로 조절하여 전송 용량을 크게 향상시킬 수 있다.

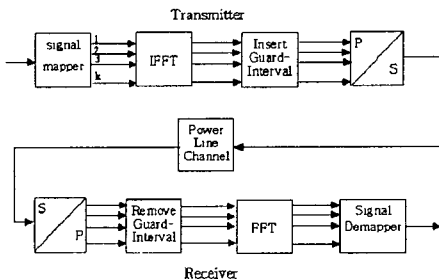


그림2. OFDM 시스템의 블록도

그림2는 일반적인 채널 대신 전력선 채널을 사용하였

을 경우의 OFDM 시스템을 보여주고 있다.^[7]

일반적으로 지역 통과 등가 OFDM 신호를 식(8)과 같 은 변조된 반반송파의 병렬 전송 신호로 볼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \Psi_{n,k}(t) \quad (8)$$

여기에서 $s(t)$ 는 지역 통과 등가 OFDM 신호를 나타 내며, $C_{n,k}$ 는 n 번째 심볼(1-FFT 신호구간)에서 k 번 째 반반송파에 실려지는 실제 정보신호이고, $\Psi_{n,k}$ 는 기 본 신호의 요소이며 식(9)와 같다.

$$\Psi_{n,k}(t) = g_k(t - nT_s) \quad (9)$$

이때 $g_k(t)$ 는 식(10)과 같다.

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t} & 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$\{f_k\}$ 는 식(11)을 만족하는 반반송파의 주파수 집합이 다.

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

V. 모의실험 및 실험분석

본 논문에서는 모뎀을 구성하는 각 블록들을 ModelSim 시뮬레이터를 사용하여 VHDL로 회로를 설계 하고 기능 시뮬레이션을 하였다. 기능 시뮬레이션 후 Synplify를 이용하여 Altera사의 Stratix EP1S25F672C7 FPGA 칩으로 synthesis 하였다. ModelSim 시뮬레이 터를 사용하여 실제 FPGA가 가지고 있는 게이트 지연을 적용시켜 타이밍 시뮬레이션을 하고 검증하였다. 그리고 타이밍 시뮬레이션 후 테스트 보드를 제작하여 실제 모 뎀 부분의 FPGA를 테스트 하였다. 보드 테스트 타이밍 시뮬레이션과 같은 방식으로 정보 데이터를 이진화 하여 FPGA의 입력으로 사용하였고, 송신 데이터와 수신 데이 터는 Agilent사의 Mixed Signal Oscilloscope를 사용하여 아날로그 부분을 측정하였고, 디지털 부분은 Quartus 에서 제공하는 Embedded Logic Analyzer인 Signaltap을 사용하여 측정하였다.

그림3은 구현한 회로에 대한 타이밍 시뮬레이션을 위 한 블록도이고, 그림4와 그림5는 송·수신부 전체 시뮬레 이션 결과를 보이고 있다.

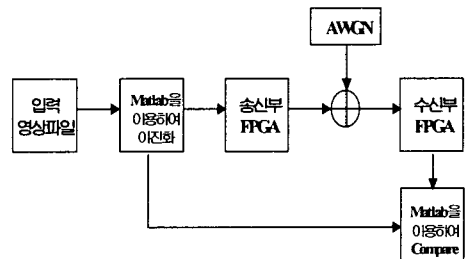


그림3. 송·수신부 전체 시뮬레이션 블록도

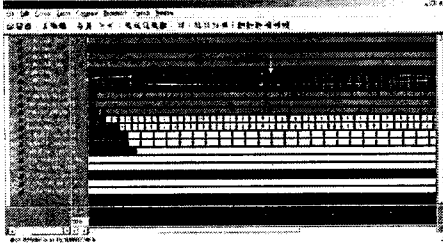


그림4. 송신부 전체 타이밍 시뮬레이션 결과

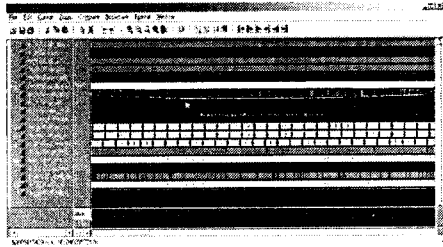


그림5. 수신부 전체 타이밍 시뮬레이션 결과

타이밍 시뮬레이션 후 그림6과 같은 블록도의 구성으로 실제 테스트 보드를 제작하여 모뎀 부분의 FPGA를 테스트 하였다.

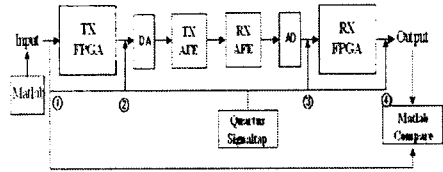


그림6. 테스트 보드 구성도

그림7, 그림8, 그림9, 그림10은 디지털 부분에 해당하는 것으로, 그림6의 1, 2, 3, 4 부분을 Quartus의 Signaltap으로 측정한 결과이다.



그림7. 1 부분에서 측정된 송신된 입력 데이터

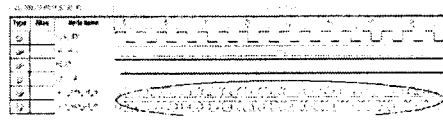


그림8. 2 부분에서 측정된 FPGA의 송신 데이터

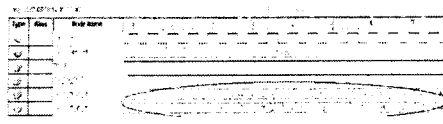


그림9. 3 부분에서 측정된 FPGA의 수신 데이터

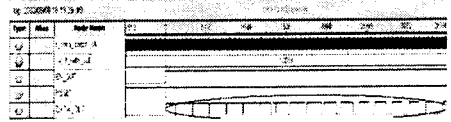


그림10. 4 부분에서 측정된 수신된 출력 데이터

그림11은 FPGA로 구현한 전력선 모뎀이다. 제작된 모뎀은 커플러부, 전원부, AFE부, RX부, TX부, MCU, TC P/IP 인터페이스로 구성되어 있다.

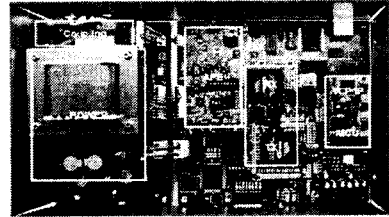


그림11. FPGA로 구현한 전력선 모뎀

VI. 결 론

본 논문은 전력선 통신모뎀의 송·수신부 시뮬레이션을 위해 이진화된 데이터를 송신부에 인가하여 송신 데이터를 추출하고, 여기서 추출된 송신 데이터를 Matlab을 이용하여 AWGN을 추가하여 수신부의 입력으로 시뮬레이션 하였다. FPGA 보드 테스트는 타이밍 시뮬레이션과 동일한 방식으로 하였으며 송신 데이터와 수신 데이터는 아날로그 부분과 디지털 부분으로 나누어 측정하였다. 측정 결과, 주파수 축에서 $f_c=250\text{kHz}$ 을 중심으로 200kHz 의 대역폭을 가지고 있어, 전력선에서의 허용 주파수에 있음을 확인할 수 있었다. 향후 연구로는 좀 더 정확한 채널 모델링을 통해 다양한 변조 방식에 대한 적절한 모의실험이 요구되며, 이를 통해 최적의 변조 방식을 채택한 후, High-level 언어를 이용한 검증이 진행되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. W. Lechleider, "Line analysis for digital subscriber lines" IEEE Com., May, pp.25-32, Sept. 1989.
- [2] Philipps, H., "Performance measurements of powerline channels at high frequencies", ISPLC '98, Tokyo, Japan, p.229-237 March, 1998
- [3] Holger Philipps, "Development of a statistical Model for Power-line Communication Channels"
- [4] Holger Philipps, "Development of a statistical Model for Power-line Communication Channels"
- [5] Manfred Zimmermann, Klaus Dostert, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range"(ISPLC 2000)
- [6] O.G.Hooijen, "A Channel Model for the Low Voltage Power-Line Channel : Measurement and Simulation Results," ISPLC '97, Essen, Germany, April 1997, pp.51-56
- [7] Chr. Hensen, "Data Transmission Application via Low Voltage Power Lines using OFDM Technique", International Symposium on Power-Line Communication and its Applications(ISPLC '99)