

BPSK 변조방식을 적용한 전력선 통신 모델의 FPGA 구현

이원태* · 임자용** · 이영철***
 *한국전기연구원 · ** (주)플레넷 · ***경남대학교

FPGA Design of BPSK Powerline Communication Modem

Won-Tae Lee* · Ja-Yong Lim** · Young-Chul Lee***
 *KERI · **PLANET System Co. Ltd. · ***Kyung-Nam Univ.

Abstract - 전력선 통신(Power Line Communication)은 전력선과 연결되어 있는 디바이스들을 간단히 제어하기 위한 기술로 제안되었으며, 홈오트메이션, 원격 검침(AMR) 분야에서 많이 사용되고 있다. 그리고 최근에는 스마트 홈, 유비쿼터스와 관련해 다양한 홈 네트워크 시스템들이 제안되면서 이들 시스템을 효과적으로 구현할 수 있는 방안으로 많은 각광을 받고 있다. 그러나 전력선 통신은 많은 유용성에도 불구하고 전력선 채널에 대한 정확한 채널 모델링과 전력선 모델에 관해서는 많은 문제점을 나타내고 있다. 본 논문에서는 전력선 통신을 위한 전송선로의 주파수에 대한 잡음과 임피던스 특성 및 전력선 채널에 데이터 신호를 BPSK 변조기법으로 전송하였을 때의 시뮬레이션 결과와 설계된 FPGA 보드를 비교 분석하였다. 채널 모델은 배정잡음과 전송 선로의 감쇄 특성을 고려하여 모델링 하였으며, 전력선 채널 상에서의 BPSK 변조 기법을 적용한 전력선 모델의 성능을 분석하였다.

를 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 고려해야 할 다른 중요한 성분은 전달 상수로, 식(2)와 같이 표현된다.[2]

$$y = a + j\beta \tag{2}$$

여기서 a 는 감쇄 상수이고 β 는 위상 상수이다. 감쇄 상수는 전송 선로의 신호감쇄 특성을 나타내고, 위상 상수는 전송 선로의 길이를 통과하는 동안 신호에 발생하는 위상 변화의 양을 의미한다. 전달 상수는 간단한 항으로 식(3)과 같이 나타낸다.[3]

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

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

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

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

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

2.2 전력선 통신에서의 BPSK

BPSK 방식은 Binary 데이터를 위상을 변화시키면서 변조하는 방식으로, PSK 신호로 나타내면 식(7)과 같다.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_0 t + \phi_i(t)] \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, \dots, M \tag{7}$$

여기서 $\phi_i(t)$ 는 위상 항으로서 $\phi_i(t) = 2\pi i/M$ ($i = 1, \dots, M$)과 같은 값을 가진다. 그리고 E 는 심플당 에너지, T 는 심플 시간 구간이다. 여기에서 $M=2$ 인 경우가 BPSK에 해당된다. 위의 PSK 신호를 다시 정리하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} s_i(t) &= \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_0 t + \frac{2\pi i}{M}] \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, \dots, M \\ &= \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t) \cos(\frac{2\pi i}{M}) - \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin(\omega_0 t) \sin(\frac{2\pi i}{M}) \end{aligned} \tag{8}$$

위의 식에서 $\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\omega_0 t)$, $\psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\omega_0 t)$ 라고 가정하면 송신 신호 $s_i(t)$ 는 식(9)와 같다.

$$s_i(t) = \sqrt{E} \cos(\frac{2\pi i}{M}) \psi_1(t) - \sqrt{E} \sin(\frac{2\pi i}{M}) \psi_2(t) \tag{9}$$

이 때 $M=2$ 인 경우는 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \sqrt{E} \cos(\pi) \psi_1(t) - \sqrt{E} \sin(\pi) \psi_2(t) = -\sqrt{E} \psi_1(t) \\ s_2(t) &= \sqrt{E} \cos(2\pi) \psi_1(t) - \sqrt{E} \sin(2\pi) \psi_2(t) = \sqrt{E} \psi_1(t) \end{aligned} \tag{10}$$

따라서 BPSK 신호는 $s_1(t) = -s_2(t)$ 의 관계를 가진다. 두 신호는 π 의 위상차를 가진다. BPSK에 대한 신호 파형은 그림 2와 같다.

1. 서 론

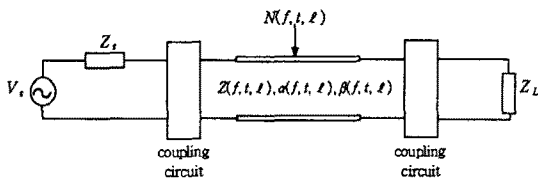
통신 서비스의 발달로 인하여, 초고속 정보통신망의 보급에 따라, 홈 네트워킹 기술과 연동된 정보 활용 서비스에 대한 소비자의 욕구가 급속히 팽창하게 되었다. 전력선(Power line)을 매체로 한 디지털 가전기기의 네트워크는 Plug in 만으로 작동이 가능한 설치 및 사용의 용이성, 추가 기기의 설치가 Plug in 만으로 가능한 디지털 가전 네트워크의 확장성 그리고 추가 배선의 불필요로 인한 가격 경쟁력 확보 등의 경쟁력을 바탕으로 홈 네트워크에 있어 최상의 솔루션으로 평가받고 있다. 차세대 기술의 집합체인 스마트 홈이나 유비쿼터스와 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 가정 내 백색 가전을 제어할 수 있는 가장 적합한 방안으로 평가된다.

전력선은 데이터 전송을 목적으로 만들어진 전송선로가 아니므로 데이터 손실, 회선과의 간섭, 잡음, 임피던스 부정합 등으로 인한 많은 변화가 발생한다.[1] 전력선은 선로의 다양한 부하에 따라서 채널의 임피던스 값이 변하게 되며 전력선을 통해 정보 전송을 위한 신호의 손실이 발생하게 된다. 전력선 통신에서는 주파수의 선택적 페이딩 현상과 랜덤하게 발생하는 임펄스 잡음, 60Hz 동기잡음 등이 존재한다. 이러한 현상을 극복하기 위한 방안으로 OFDM 변조방식과, Spread Spectrum 방식, BPSK 변조방식이 적용되어 지고 있다. 본 논문에서는 전력선 통신에서 전송선로의 채널 상에 나타나는 여러 가지 특성을 분석하고, FPGA를 이용하여 BPSK 변조방식을 적용한 전력선 통신 모델을 FPGA로 구현하고 성능을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 전력선의 채널 특성

전력선은 전송 선로에 대한 가장 일반적인 형태로 모델링이 가능하다. 전송 선로의 특성은 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 G, 커패시터 C로 이루어지며, 그림 1과 같이 표시된다.

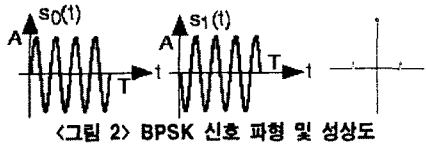


〈그림 1〉 전력선의 채널 파라미터

이와 같은 전송선로의 특성 임피던스는 식(1)과 같다.

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

특성 임피던스는 전력 발생과 시스템 분포에 대한 전송 선로의 임피던스

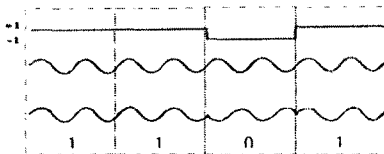


<그림 2> BPSK 신호 파형 및 성상도

수신된 신호로부터 신호를 검출하기 위해서 두 개의 단계로 구성되어 있다. 첫 번째는 수신된 신호를 단일 랜덤 변수 $z(T)$ 를 변환하는 것으로, 상관기의 출력은 식(11)과 같다.

$$z(T) = \int_0^T r(t)s_1(t)dt \quad (11)$$

두 번째 단계는 $z(T)$ 가 기준과 비교하여 신호를 결정하는 영역이며, 이 때 비교기는 $z(T)$ 가 최대값을 가질 때 $s_1(t)$ 를 선택한다. 위의 두 번째 단계에서 $z(T)$ 의 현재 위상과 이전 위상차를 이용하여, 그 차이의 변화가 없으면 1로 판별하고 변화가 있으면 0으로 판별하는 알고리즘을 사용하면 그림 3과 같다.



<그림 3> "1101" 송신 신호

수신된 신호 $r(t)$ 를 복소수 신호라고 가정하면, 검출기 BPSK 검출기 구조가 아니라 다중 PSK 검출기의 구조를 지닌다. 검출기는 두 개의 상관기를 가지고 있으며, 위쪽의 상관기는 $\psi_1(t)$ 에 관한 것이고, 아래쪽 상관기는 $\psi_2(t)$ 의 성분을 관여하는 구조이며, 식(12)와 같다.

$$z_I(t) = \int_0^T r(t)\psi_1(t)dt \quad (12)$$

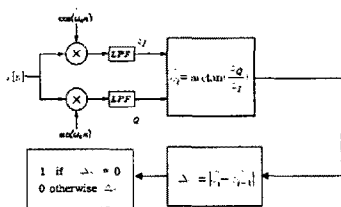
$$z_Q(t) = \int_0^T r(t)\psi_2(t)dt$$

출력 신호는 $z_I(T) = z_I(T) + jz_Q(T)$ 로 나타낸다. 즉, 상관기의 출력으로부터 검출 신호를 얻기 위해서는 다음과 같은 판별 블록을 지나야 한다. 그리고 두 신호에 대한 위상각을 구한 후에 이전 값과의 변화율을 계산하면 식(13)과 같다.

$$\hat{\phi}_i = \arctan\left(\frac{z_Q(T)}{z_I(T)}\right) \quad (13)$$

$$\Delta\phi = |\hat{\phi}_i - \hat{\phi}_{i-1}|$$

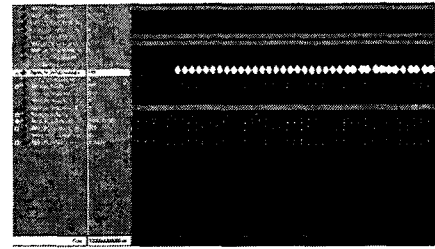
$\Delta\phi$ 의 값이 0이면 1로 판별하고, 0보다 크면 0으로 판별한다. 이것을 나타내면 그림 4와 같다.



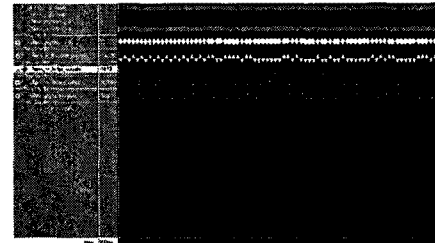
<그림 4> 각변조 검출기

2.3 모의실험 및 분석

본 논문에서는 모델을 구성하는 각 블록들을 ModelSim 시뮬레이터를 사용하여 VHDL로 회로를 설계하고 기능을 시뮬레이션을 하였다. 기능 시뮬레이션 후 Synplify를 이용하여 Altera사의 Stratix EP1S25F672C7 FPGA 칩으로 synthesis 하였다. ModelSim 시뮬레이터를 사용하여 실제 FPGA가 가지고 있는 게이트 지연을 적용시켜 타이밍 시뮬레이션을 하고 검증하였다. 그리고 타이밍 시뮬레이션 후 테스트 보드를 제작하여 실제 모델 부분의 FPGA를 테스트 하였다. 보드 테스트 타이밍 시뮬레이션과 같은 방법으로 정보 데이터를 이진화 하여 FPGA의 입력으로 사용하였고, 송신 데이터와 수신 데이터는 Agilent사의 Mixed Signal Oscilloscope를 사용하여 아날로그 부분을 측정하였고, 디지털 부분은 QUARTUS에서 제공하는 Embedded Logic Analyzer인 Signaltap을 사용하여 측정하였다. 그림 5와 그림 6은 송·수신부 전체 시뮬레이션 결과를 보이고 있다.

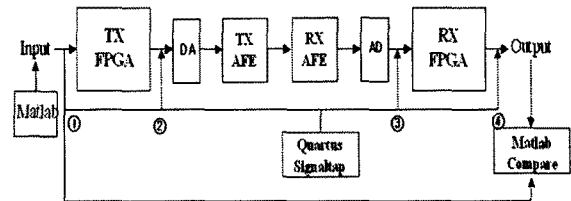


<그림 5> 송신부 전체 타이밍 시뮬레이션 결과



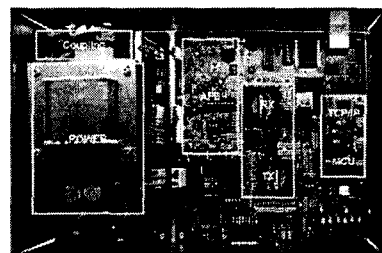
<그림 6> 수신부 전체 타이밍 시뮬레이션 결과

타이밍 시뮬레이션 후 그림 7과 같은 블록도의 구성으로 실제 테스트 보드를 제작하여 모델 부분의 FPGA를 테스트 하였다.



<그림 7> 테스트 보드 구성도

그림 8은 FPGA로 구현한 전력선 모델이다. 제작된 모델은 커플러부, 전원부, AFE부, RX부, TX부, MCU, TCP/IP 인터페이스로 구성되어 있다.



<그림 8> FPGA로 구현한 전력선 모델

3. 결 론

본 논문은 전력선 통신모델의 송·수신부 시뮬레이션을 위해 Binary 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 하였다. 측정 결과 송신 출력 파형의 전압 레벨은 1.5V를 가지며, 통신 채널의 배경 잡음과 감쇄 특성만을 고려하였을 경우 25dB까지 감쇄된 출력 신호를 수신단에서 정확히 수신하였으며, 전력선 통신 환경에서 통신이 가능함을 확인하였다. 향후 연구로는 좀 더 정확한 채널 모델링을 통해 다양한 변조방식에 대한 적절한 모의실험이 요구되며, 이를 통해 최적의 변조방식을 채택한 후, High-Level 언어를 이용한 검증이 진행되어야 한다.

[참고 문헌]

- [1] J. W. Lechleider, "Line analysis for digital subscriber lines", IEEE Co m., May, pp.25-32, Sept. 1898.
- [2] Manfred Wimmermann, Klaus Dostert, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range"(IS PLC 2000).
- [3] 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.
- [4] Cht. Hensen, "Data Transmission Application via Low Voltage Power Lines using OFDM Technique", (ISPLC '99).