

915MHz ZigBee 비동기 기반 수신기 구조 개선에 관한 연구

강성민, 이성용, 정차근
호서대학교 시스템 제어공학과

A study on improvement of the architecture design based on the non-coherent detection for 915MHz ZigBee receiver

Sung-Min Kang, Sung-Young Lee, Cha-Keon Cheong
Dept. of System Control Eng., Hoseo University

Abstract - 본 논문에서는 ZigBee (IEEE 802.15.4b Low-Rate Wireless Personal Area Network; LR-WPAN) 915MHz 대역 수신기에 주파수 옵셋에 따른 성능을 알아보고 수신기 Correlator에 Multiple delay differential filter를 적용하여 주파수 옵셋의 영향을 최소화하는 방법을 제시한다. AWGN 환경에서 주파수 옵셋의 영향이 최대와 최소(ZigBee frequency tolerance ±80ppm, 0°73200Hz)일 때의 환경에서 시뮬레이션을 통해 제안한 수신기의 성능을 검증한다.

1. 서 론

홈오트메이션은 인간이 생활하는 주거 환경에서 전자기기 등이 추가 되는 가사의 관리를 자동화하는 시스템이다. 홈오트메이션을 구현하는 센서 네트워크에서 사용되는 센서와 이를 구동시키는 센서 노드는 사람이 직접 설치하여 이를 제어할 수도 있으나, 사람의 제어가 되기 전에 주변의 환경에 맞게 최적의 설비가 제공 되어야 하며, 또한 사람이 접근하기 힘든 환경에 제공이 되어 직접적인 제어가 불가능할 수도 있다. 또한 다량의 센서 노드를 도처에 배치하여 네트워크를 구성해야 할 경우 그 센서 노드의 크기는 작고, 자가 이여야 하며, 저 전력으로 구동되어 배터리의 교체 없이 수년 동안 사용이 가능하여야 한다는 제약이 있다[1]. 이러한 요구를 충족시키기 위해 2003년 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 표준화가 제정되었다. 간단한 구조와 저 전력으로 구동되며, 사용와서 저가로 공급이 가능한 특성을 갖는다. ZigBee의 시스템의 특성상 규격에서 권고하는 915MHz frequency tolerance ±80ppm (송수신 각각 ±40ppm)의 주파수 옵셋 환경에서 신뢰성 있는 동작이 가능해야 한다[2]. 본 논문에서는 ZigBee 915MHz대역 수신기의 비동기 방식을 기반으로 사용하는 DSSS OQPSK 변조 방식에서 주파수 옵셋에 따른 성능 비교와 주파수 옵셋의 영향을 최소화 할 수 있는 방법에 대해 제안한다.

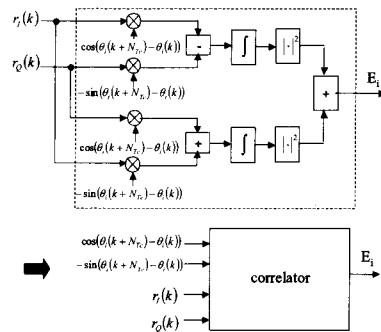
2. 비동기 수신을 위한 correlator

OQPSK 변조 신호는 BPSK, QPSK 변조처럼, 절대적인 phase에 정보를 보내는 방식이다. 예를 들어서, (I,Q) data 가 각각 (1,1)일 경우에는 modulated carrier signal의 phase는 45도이며, (1,0)일 경우에는 modulated carrier signal의 phase는 -45도 등이다. 즉, symbol과 symbol사이의 phase difference나 phase의 변화율은 어떠한 정보도 전송되지 않는다. DSSS orthogonal modulation을 이용해서 4bit가 16chip sequence로 변환된다. 각 symbol에 mapping되는 16chip data는 미리 정해져 있으며, 미리 정해진 chip sequence에 OQPSK변조를 통해 송신이 된다. DSSS OQPSK 변조에서 symbol과 symbol사이의 random data에 의해서 un-correlated 특성을 가진다. 이것은 각 chip data의 정보가 modulated carrier의 phase에 정보를 전달할 뿐만 아니라, chip data사이의 phase difference에도 정보가 전달되는 것이다[1]. 즉, DSSS orthogonal modulation based OQPSK 변조에서는 differential detection을 이용하여 chip data 사이의 phase difference를 검출하여 비동기 수신할 수 있다[3]. <그림 1>과 <그림 2>는 DSSS OQPSK 신호의 비동기 수신을 위한 구조도들을 보여준다.

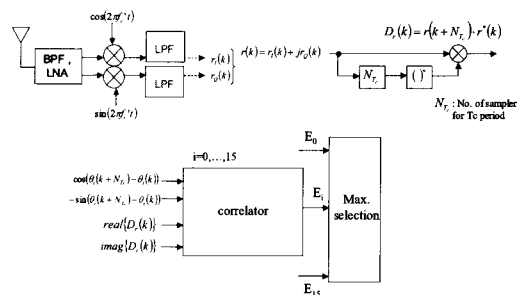
noncoherent 방식은 수신신호와 16개의 PN 신호와의 상관을 위한 16개의 상관기 (I/Q-channel), 전력계산부 그리고 비교기로 구성된다. 0.5Tc단위로 입력되는 수신샘플 신호와 미리 저장되어 있던 16개의 PN신호와 상관 전력을 비교기에서 비교하여 가장 큰 값을 가지는 것을 송신된 심볼로 결정하고 demodulation을 수행하게 된다. noncoherent 방식의 correlator 출력은 식 (1)로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 Z &= \left| \sum_{k=0}^{N_c} [r(k)p^*(k)] \right| \\
 &= \left[\sum_{k=0}^{N_c} \cos(2\pi\Delta f k T_c) \right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{N_c} \sin(2\pi\Delta f k T_c) \right]^2 \\
 &= \left[\frac{\sin(\pi N_c \Delta f T_c)}{\sin(\pi \Delta f T_c)} \right]^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$

단, 수신sample 신호의 전력 1, $r(k)$: k번째 수신sample 신호
 Δf : 주파수 오차 N_c : 1심볼의 sample 수, $p(k)$: PN sequence



<그림 1> differential detection 비동기 수신을 위한 correlator구조

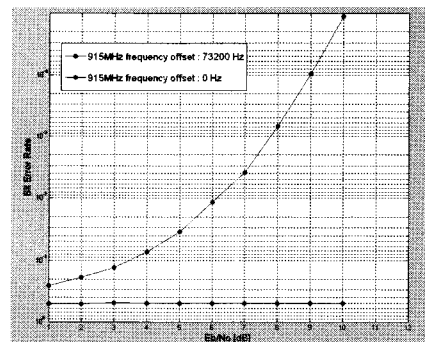


<그림 2> DSSS OQPSK 변조를 위한 differential detection 기반 비동기 수신기 구조도

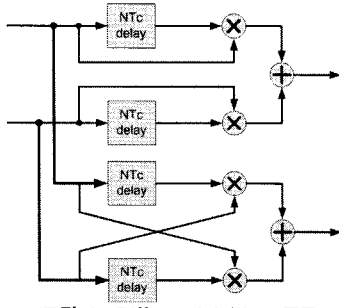
주파수 오차에 의해 correlator출력의 크기가 감소함을 확인할 수 있다. $N_c \Delta f T_c$ 가 작을 경우에는 correlator출력 크기의 감소가 크지 않지만, $N_c \Delta f T_c$ 가 커질수록 correlator출력의 감소가 심화되어 주파수 오차에 의해 큰 성능 열화를 유발하게 된다[4]. <그림 3>은 AWGN 채널 환경에서 주파수 옵셋에 따른 BER 성능이다. 주파수 옵셋이 없는 환경에서는 우수한 성능을 나타내지만, 주파수 옵셋을 고려한 환경에서는 큰 성능 차이를 보임을 알 수 있다.

3. differential filter를 적용한 noncoherent 방식

ZigBee 수신모뎀은 저가를 지향하는 시스템의 특성상 규격에서 권고하는 frequency tolerance ±80ppm(=73200Hz)의 주파수 옵셋 환경에서 신뢰성 있



<그림 3> AWGN 환경에서의 BER



〈그림 4〉 Differential filter 구조

는 동작이 가능해야 한다. 여기서 주파수 옵셋이란 carrier frequency가 송신 신호의 반송파 주파수로부터 얼마나 벗어나 있는가의 정도를 의미하며, 이러한 큰 주파수 옵셋 환경에서도 안정적인 수신 보장을 위해 differential filter의 적용이 필요하다.

주파수 옵셋과 AWGN 환경에서 k 번째 수신 샘플 $r(k)$ 는 식 (2)와 같은 differential filter의 출력신호는 식 (3)과 같다[5].

$$r(k) = s(k)e^{j2\pi\Delta f k(0.5T_c)} + n(k) \quad (2)$$

$s(k)$: 송신 신호, Δf : 주파수 옵셋, $n(k)$: AWGN

$$\begin{aligned} D_r(k) &= r(k)r^*(k-N) \\ &= s(k)s^*(k-N)e^{j2\pi\Delta f NT_c}e^{-j2\pi\Delta f(k-N)T_c} + N(k) \\ &= s(k)s^*(k-N)e^{j2\pi\Delta f NT_c} + N(k) \end{aligned} \quad (3)$$

$r(k)$: 수신 신호, $r(k-N)$: N sample 만큼 지연된 신호

$$D_s(k) = s(k)s^*(k-N) \quad (4)$$

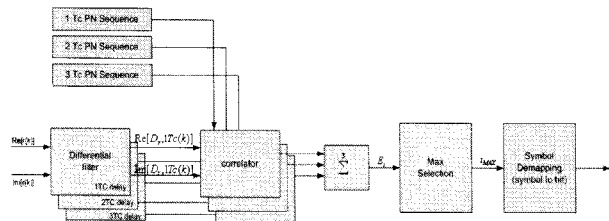
$$\begin{aligned} Z &= \left| \sum_{k=0}^N [D_r(k)D_s^*(k)] \right|^2 \\ &= \left| \sum_{k=0}^N [e^{j2\pi\Delta f NT_c} + N(k)][s(k)s^*(k-N)]^* \right|^2 \\ &= [N_c \cos(2\pi\Delta f NT_c) + \sum_{k=0}^N V_f(k)]^2 + [N_c \sin(2\pi\Delta f NT_c) + \sum_{k=0}^N V_Q(k)]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

differential filter의 출력신호와 상관 시 사용되는 differential PN 신호는 식 (4)와 같은 식 $N(k)$ 는 점음성분인 AWGN이다. differential filter를 적용한 noncoherent 기반의 correlator의 출력은 식 (5)으로 나타낼 수 있다. (단, 수신 sample signal의 전력을 1로 가정하고, N_c 와 $V(k)$ 는 각각 1 샘플의 sample 수와 AWGN을 나타낸다.)

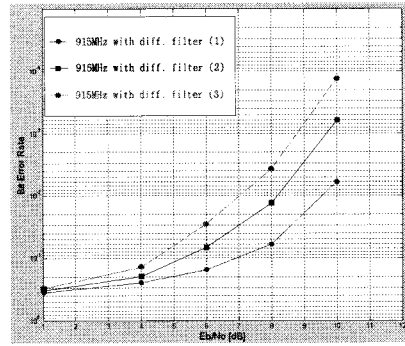
식 (5)에서 확인할 수 있듯이 주파수 옵셋의 영향이 제거됐음을 알 수 있다. 하지만 제품 과정에 의해 잡음의 영향이 가중되는 단점이 있다. 보다 안정적이고 향상된 성능을 얻기 위해 multiple delay differential filter를 적용한다<그림 5>. 1개 이상의 differential filter에서 출력되는 각 T_c delay에 따른 상관 전력값을 더하게 되면, 원하는 심볼에 대한 상관 전력값과 그 이외의 15개의 상관 전력 값 차이가 커지게 되어 성능향상이 된다. AWGN 환경에서 주파수 옵셋이 0Hz 일 때와 주파수 옵셋이 최대값인 73200Hz일 때의 BER을 <그림 6>와 <그림 7>에 나타내었다.

4. 모의실험 결과 및 고찰

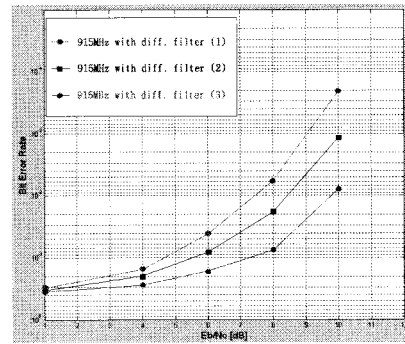
저가를 지향하는 ZigBee 시스템에서는 정확도가 높은 고가의 오실레이터를 사용할 수 없다. ZigBee 표준에서는 915MHz의 oscillator의 정확도를



〈그림 5〉 multiple delay differential filter를 적용한 noncoherent 방식



〈그림 6〉 differential filter를 적용한 frequency offset 0Hz일 때의 BER



〈그림 7〉 differential filter를 적용한 frequency offset 73200Hz일 때의 BER

± 40 ppm으로 규정하고 있다. 송신단과 수신단의 정확도를 모두 고려할 때 최대 ± 80 ppm(73200Hz)의 주파수 옵셋이 발생할 수 있다. 수신 성능 실험으로 data packet 구조를 사용하여 PSDU(PHY Service Data Unit)의 전체 패킷 사이즈를 총 79byte(Addressing field : 4byte, Data payload : 64byte)로 구성하여 모의실험을 하였다. 모의실험의 결과에서 보듯이 주파수 옵셋이 있는 경우에는 성능저하를 볼 수 있다. 하지만 differential filter를 추가하는 간단한 알고리즘으로 주파수 옵셋이 최대인 상황에서도 안정적인 BER값을 확인할 수 있다. differential filter의 수가 증가할수록 성능이 향상되지만 $3T_c$ delay이상의 differential filter를 적용 하였을 때는 약 0.1dB의 성능 향상만을 보였다. differential filter의 수가 증가하게 되면 하드웨어의 복잡도가 증가하여 고 비용이 되는 단점으로 저가를 지향하는 ZigBee특성에는 맞지 않는다. 이러한 특성을 고려하여 $1T_c$, $2T_c$, $3T_c$ delay differential 신호에 대한 상관편을 고려하는 것이 바람직하다. 주파수 옵셋의 영향이 없는 경우에 대한 AWGN 환경에서도 안정적인 수신을 할 수 있는 알고리즘에 대한 연구와 FPGA등의 하드웨어 구현과 같은 차후 연구가 더 필요하다.

[참고 문헌]

- [1] 김기형 외, "IEEE 802.15.4 기반의 유비쿼터스센서 네트워크 기술", 전자공학회지, 제31권 제 12호, 78~84쪽, 2004년 12월
- [2] IEEE 802.15.4TM Part 15.4b: wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WAPNs), P802.15.4REVb/D6 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003). April, 2006
- [3] 김태기, "무선통신을 위한 WLAN 및 ZigBee 모델 칩 개발에 관한 연구", 2006
- [4] 강신우 외, "2.45GHz LR-WPAN 수신기를 위한 Timing Estimator 알고리즘 설계", 한국통신학회 논문지, '06-3vol31 No.3A', 2006
- [5] 강성민 외, "IEEE 802.15.4b 868/915MHz 수신기를 위한 주파수 옵셋 영향 감소", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 39회, 500쪽, 2008년