

## 802.15.4 PHY 기술

이종현  
제주대학교

### 요약

유비쿼터스 네트워크 시대가 도래함에 따라 표준화된 기술의 파악 및 이에 따른 응용 서비스 요구가 증대되고 있다. 본 고에서는 저속(Low Rate) 통신규격을 제공하는 표준인 IEEE 802.15.4의 표준화의 기술적 개관 및 물리계층에 대하여 서술한다. 2006년 9월 판 표준안에 제시된 물리계층(PHY)의 주파수 대역별 데이터율과 변조방식 및 심볼 사상에 관하여 기술한다. 또한, 변조 방식 및 전송 주파수에 따른 전송 특성, 채널 할당 방식 그리고 스펙트럼 방사 출력 등에 관해 기술한다.

### I. 서론

초광대역(UWB) 기술은 저비용, 저전력 소비를 특징인 통신기술로, 실내와 음영지역에서 수십 cm 단위로 정밀한 위치인식 및 추적기능을 줄 수 있어 유비쿼터스 네트워크 실현을 위한 핵심 기술로 인식되고 있다. 이에 2004년 3월 IEEE 802.15 Alternate Task Group(TG4a)이 발족되었으며 UWB가 하나의 기술 표준으로 채택되었다. UWB 기술은 중심 주파수의 20%이상의 점유 대역폭을 차지하거나 500MHz 이상의 점유대역폭을 차지하는 기술로, 기존 협대역 또는 광대역 통신시스템에 비해 비교적 낮은 전력밀도를 가지고 있어 간섭영향이 적어 기존 통신 시스템과 양립할 수 있다.

이러한 UWB기술은 광대역의 특징이 있어, 실내나 음영지

역에서의 위치인식이 가능하여 수십 cm 이내의 정밀한 위치인식 및 추적이 가능하다. 따라서 유비쿼터스홈, 스마트 태그, 위험지역에서의 인명구조 및 위치 인식 등을 기반으로 하는 각종 제어분야, 신체 관리 모니터링 및 의료진의 위치 파악 등을 요구하는 의료 관련 분야에 응용될 수 있다.

본 고에서는 IEEE 802.15.4의 표준의 기술적 개관에 대하여 살펴보고 2006년 표준안에 명시된 물리계층에 대한 자세히 살펴본다.

### II. 802.15.4 표준의 기술적 개관

IEEE 802.15.4 표준은 제한된 전력과 낮은 처리 요구량이 적용되는 곳에서의 무선 접속이 허용되는 간단한 저비용 통신 네트워크에 적용가능하다. 본 표준은 설치가 쉽고 신뢰성 있는 데이터 전송, 짧은 범위의 작업, 초 저비용, 그리고 적당한 배터리 수명을 가지고 있으면서 유지보수가 간단하고 프로토콜을 유연하게 지원할 수 있으며 다음과 같은 특징들을 갖는다.

- 무선데이터 전송률: 250 kb/s, 40 kb/s, and 20 kb/s
- 스타 혹은 점대점 동작
- 16 비트 또는 or 64 비트 확장 주소
- guaranteed time slots (GTSs)을 할당할 수 있는 옵션
- Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA-CA) channel access 기능

- 전송신뢰를 위한 완전 인증 프로토콜 (Fully acknowledged protocol for transfer reliability)
- 저 전력소모
- 에너지 검출 (Energy detection (ED))
- 링크품질 표시기(Link quality indication (LQI))
- 2450 MHz밴드의 16 채널, 915 MHz 밴드의 10 채널, 868 MHz 밴드의 1 채널

네트워크를 구성할 때는 완전 기능 디바이스(FFD : Full-Function Device)와 축소 기능 디바이스(RFD : Reduced-Function Device)의 두 가지 형태의 디바이스를 사용하여 구성할 수 있다. FFD는 PAN(Personal area Network) 코디네이터, 단순 코디네이터 혹은 디바이스로서 동작이 가능하며 RFD가 오직 FFD와 통신이 가능한 반면, FFD는 RFD 혹은 또 다른 FFD와도 통신을 할 수 있다. RFD는 많은 양의 데이터 전송이 필요 없거나 한번에 하나의 FFD와 연결되는 전등 스위치 또는 적외선 센서와 같은 아주 단순한 곳에 응용된다. 그러므로 RFD는 최소한의 리소스와 메모리 용량을 사용하는 곳에 적용될 수 있다.

### III. 물리계층

#### 3.1 일반요구사항 및 정의

물리계층(PHY)은 다음과 같은 일을 한다.

- 송수신기의 활성화 및 비활성
- 에너지 검출 (ED)
- 패킷의 링크품질표시기 (LQI)
- (CSMA-CA)에 대한 클리어 채널 표시기 (CCA)
- 채널 주파수 선택
- 데이터 전송 및 수신

본고에서는 다음과 같이 기술된 네 개의 물리계층을 설명한다.

- BPSK 변조기반 868/915 MHz 대역 direct sequence spread spectrum (DSSS) PHY
- O-QPSK 변조기반 868/915 MHz 대역 direct sequence

spread spectrum (DSSS) PHY

- BPSK와 ASK 변조기반 868/915 MHz 대역 parallel sequence spread spectrum (PSSS) PHY
- O-QPSK 변조기반 2450 MHz 대역 O-QPSK PHY

2006년 판에는 868/915 MHz BPSK 방식의 고속 옵션이 두 개 추가되었다. 2개 옵션 모두 868 MHz 대역에서의 20 kb/s 와 915 MHz 대역에서의 40 kb/s를 훨씬 넘는 데이터율을 제공한다. ASK PHY는 868 MHz 와 915 MHz 대역에서 2.4 GHz 대역의 PHY와 같은 250kb/s의 데이터율을 제공하고, O-QPSK PHY는 915 MHz에서는 2.4 GHz 대역과 같은 데이터율을, 868 MHz 대역에서는 100 kb/s의 데이터율을 제공한다.

주파수 대역에 따른 데이터속도는 아래와 표1과 같다.

〈표 1〉 주파수 대역과 데이터 속도

PHY (MHz)	Frequency band(MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kc/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate(kS/s)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (옵션)	868-868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (옵션)	868-868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902-928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

#### 3.2 채널할당

“868/915 MHz 대역 ASK PHY의 옵션 규격”과 “868/915 MHz 대역 O-QPSK PHY의 옵션 규격”이 2006년 표준안에 도입됨으로 인해 2003년도 표준안에 명시된 32개의 총 채널 수를 초과하게 되었다. 증가된 채널의 수를 지원하기 위해 채널 할당은 채널 수와 채널 페이지의 결합을 통해 다음과 같이 정의된다.

즉, *phyChannelsSupporte* 안의 32 비트 채널 비트맵의 상위 5 MSB(most significant bit)는 32 채널 페이지를 나타내기 위해 사용되며, 채널 비트맵의 하위 27 비트는 채널 페이지 내에 명시된 채널 수를 나타내기 위해 비트 마스크로 사용

된다. 각 채널 페이지마다 0부터 26으로 구별된 총 27개의 채널이 사용 가능하다. 채널 페이지 0에는 0부터 26까지의 번호가 부여된 27개의 채널은 세 주파수 대역 걸쳐 사용 가능하다. 16개의 채널이 2450 MHz 대역에서 10개 채널은 915 MHz 대역에서, 1개의 채널은 868 MHz에서 사용 가능하다. 이 채널 페이지는 2003년도 표준안에서 정의된 채널도 지원한다. 각 채널의 중앙 주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$F_c = 868.3 \text{ MHz}, k = 0$$

$$F_c = 906 + 2(k-1) \text{ MHz}, k = 1, 2, \dots, 10$$

$$F_c = 20456 + 5(k-11) \text{ MHz}, k = 11, 12, \dots, 260$$

여기서는  $k$ 채널 번호이다.

채널 페이지 1과 2의 경우, 868/915 MHz ASK와 O-QPSK PHY를 각각 지원하기 위한 0부터 10까지의 번호가 부여된 11개의 채널이 사용 가능하다. 10개의 채널은 915 MHz 대역에서, 나머지 1개는 868 MHz 대역에서 사용 가능하다. 이러한 채널의 중앙 주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$F_c = 868.3 \text{ MHz}, k = 0$$

$$F_c = 906 + 2(k-1) \text{ MHz}, k = 1, 2, \dots, 10$$

$$F_c = 20456 + 5(k-11) \text{ MHz}, k = 11, 12, \dots, 260$$

여기서는  $k$ 채널 번호이다.

총 32개의 채널 페이지가 사용 가능하며 3에서 31까지의 채널 페이지는 추후 사용을 위한 것이다. *phyPagesSupported* PHY PIB(PAN information base) 속성은 현재 사용되고 PHY에 의해 제공되는 채널 페이지를 나타내며, *phyCurrentPage* PHY PIB는 현재 사용되는 채널 페이지를 나타낸다.

채널 페이지와 채널 수에 대해 관계가 <표 2>에 나타내고 있다. 예를 들어, 채널 페이지 2의 채널 4 비트맵은 다음과 같이 나타낸다.

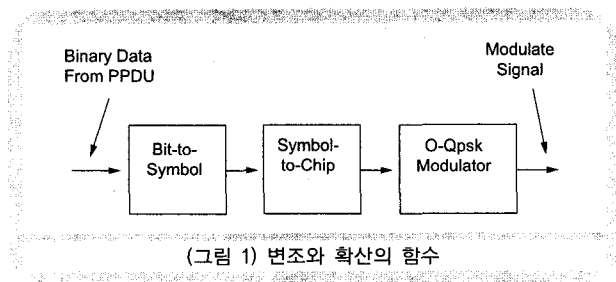
0001000000000000000000000000000010000

<표 2> 채널페이지와 채널 넘버

Channel Page	Channel Page (binary) ( $b_{31}, b_{30}, b_{29}, b_{28}, b_{27}, \dots$ )	Channel numbers	Channel number description
0	00000	0	Channel 0 is in 868 Mhz BPSK
		1-10	Channels 1 to 10 are in 915 Mhz BPSK
		11-26	Channels 11 to 26 are in 2.4 Ghz O-QPSK
1	00001	0	Channel 0 is in 868Mhz band using ASK
		1- 10	Channels 1 to 10 are in 915 Mhz band using ASK
		11-26	Reserved
2	00010	0	Channel 0 is in 868 Mhz band using O-QPSK
		1-10	Channels 1 to 10 are in 915 Mhz band using O-QPSK
		11-26	Reserved
3-31	00011-1111	reserved	Reserved

### 3.3 2450 MHz PHY 규격

2450 MHz PHY의 데이터 속도는 250 kb/s이다. 2450 MHz PHY는 16-ary quasi-직교 변조 방식을 사용하며, 각각의 데이터 심볼 기간 동안 4개의 정보 비트는 16개의 거의 직교인 의사 난수 잡음(PN : Pseudo-random Noise) 중 하나를 선택하기 위해 사용된다. 연속적인 데이터 심볼을 위해서 PN 시퀀스는 계속 연결되며, 모여진 칩 시퀀스의 집합은 O-QPSK(Offset Quadrature Phase-Shift Keying)를 사용하는 반송파에서 변조된다. (그림 1)은 2450 MHz PHY 변조와 확산 함수의 명시한 것이다.



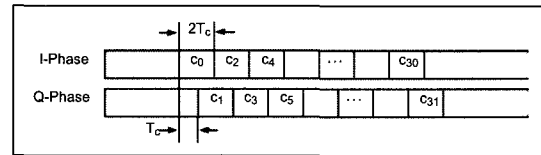
PPDU에 있는 모든 이진 데이터는 위 (그림 18)의 변조와 확산을 기반으로 부호화 된다. 이진 정보로부터 데이터 심볼로의 사상은 아래와 같다. 즉, 각 옥텟의 4 LSBs ( $b_0, b_1, b_2, b_3$ )는 한 개의 데이터 심볼에 사상되며, 4 MSBs ( $b_4, b_5, b_6, b_7$ )는 다음 데이터 심볼에 사상된다. PPDU의 각 옥텟은 변

조와 확산 함수에 통하여 처리되는데, 프리엠블 필드로 시작하여 PSDU의 마지막 옥텟으로 끝나게된다. 각 데이터 심볼은 <표 3>에 명시된 바와 같이 32-칩 PN 시퀀스로 사상된다. 각 PN 시퀀스는 주기적인 천이 또는 공액을 통하여 서로 연결되어있다.

<표 3> 심볼투칩 사상

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) (b0 b1 b2 b3)	Chip values (c0 c1 ... c30 c31)
0	0000	1101100111000011 0101001000101110
1	1000	1110110110011100 0011010100100010
2	0100	0010111011011001 1100001101010010
3	1100	0010001011101101 1001110000110101
4	0010	0101001000101110 1101100111000011
5	1010	0011010100100010 1110110110011100
6	0110	1100001101010010 0010111011011001
7	1110	1001110000110101 0010001011101101
8	0001	1000110010010110 0000011101111011
9	1001	1011100011001001 0110000001110111
10	0101	0111101110001100 1001011000000011
11	1101	0111011101110000 1100100101100000
12	0011	0000011101111011 1000110010010110
13	1011	0110000001110111 1011100011001001
14	0111	1001011000000111 0111101110001100
15	1111	1100100101100000 0111011110111000

각 데이터 심볼을 나타내는 칩 시퀀스는 하프 사인 펄스 모양을 갖는 O-QPSK를 사용하여 변조된다. 우 지수(Even-indexed) 칩은 동 위상(I) 반송파에서 변조되고 기 지수 칩은 직각 위상(Q) 반송파에서 변조된다. 각 데이터 심볼은 32-칩 시퀀스에 의해서 확산되었기 때문에 칩 속도(명목상 2.0 Mchip/s)는 심볼 속도의 32배이다. 동 위상과 직각 위상 칩 변조 사이에서의 오프셋을 주기 위하여 직각 위상 칩은 Tc 만 큼 지연되는데, 여기서 Tc의 칩 속도의 역수이다. (그림 2 참조)

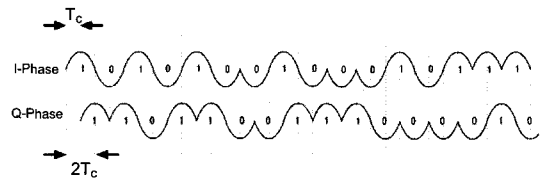


(그림 2) O-QPSK 칩 오프셋

펄스 형상은 다음 식 (1)과 같은 하프 사인 펄스 형상 함수가 사용된다.

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{1}{2T_c} t\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

(그림 3)에 기저대역 칩 시퀀스의 한 예를 보여주고 있다.



(그림 3) 펄스 형상 베이스밴드 칩 서열 샘플

위와 같이 펄스 형상된 심볼은 매 심볼 기간 동안 최하위 칩(c0)을 우선적으로 최상위 칩(c31)은 마지막으로 전송된다.

전송된 스펙트럼 출력은 <표 4>에 명시된 한계보다 작아야 한다. 상대적 한계와 절대적 한계 모두 평균 스펙트럼 파워는 100kHz의 분해능 대역폭을 사용하여 측정된다. 상대적 한계에서, 기준 레벨은 반송파 주파수 ±1MHz 에서 측정된 평균 스펙트럼 파워의 최고치가 된다.

<표 4> 전송 PSD 한계치

Frequency	Relative limit	Absolute limit
f - fcl) > 1.2 MHz	-20 dB	-20 dBm

2450 MHz PHY 심볼 속도는 62.5 ksymbol/s ± 40 ppm이다. 컴플라이언트 디바이스 수신기 감도는 -85 dBm 또는 그 이상이다.

수신기의 최소 방해전파 저항 기준은 <표 5>와 같다. 인접

채널은 기준 채널의 주파수에 가장 가까운 좌우측 채널이며 교대 채널은 인접 채널에서 하나가 제거된 채널이다. 예를 들어 요구된 채널이 13이라면 채널 12와 14는 인접 채널이고 채널 11과 채널 15는 교대 채널이다.

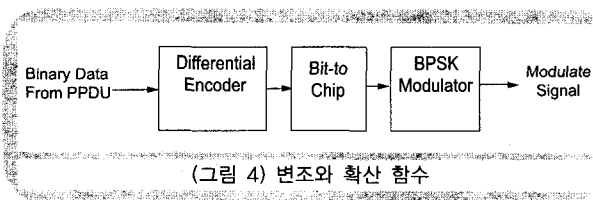
〈표 5〉 2450 MHz PHY의 최소 방해전파 저항 조건

Adjacent channel rejection	Alternate channel rejection
0 dB	30 dB

### 3.4 868/915 MHz 대역 BPSK PHY 규격

868/915 MHz 대역 BPSK PHY의 데이터율은 868 MHz 대역에서는 20 kb/s, 915 MHz 대역에서는 40 kb/s이다. 칩 변조와 차분(differential) 부호화를 사용하는 868/915 MHz 대역 PHY는 BPSK 기반의 직접 시퀀스 확산 스펙트럼(DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum)을 사용한다.

(그림 4)는 868/915 MHz 대역 BPSK PHY의 변조와 확산 함수를 명시한 것이다. PPDU에서 각 비트는 차분 부호화와 비트에서 칩으로의 사상과 변조 기능을 통하여 처리되며, 프리앰블 필드에서 시작되고 PSDU의 마지막 옥텟에서 끝난다. 각 옥텟의 LSB(b0)는 우선으로 처리되고 MSB(b7)는 끝으로 처리된다.



차분 부호화는 이전 코딩된 비트와 입력 데이터와 modulo-2 덧셈으로 생성된다. 이것은 송신기에 의해서 수행되며 수식 (2)로 표현된다.

$$E_n = R_n \oplus E_{n-1} \quad (2)$$

여기서

$R_n$  는 부호화될 데이터,

$E_n$  차분 부호화된 비트

$E_{n-1}$  이전에 차분 부호화된 비트.

전송된 각 패킷에서  $R_n$ 은 부호화된 첫번째 원 데이터 비트이고  $E_0$ 는 0으로 가정한다. 역으로 수신기에서 수행되는 복호화 처리는 아래 수식 (3)과 같이 처리된다.

$$R_n = E_n \oplus E_{n-1} \quad (3)$$

여기서, 수신된 각 패킷에서  $E_1$ 은 복호화된 첫번째 비트이고  $E_0$ 는 0으로 가정한다.

각각의 입력 비트는 〈표 6〉에 명시된 바와 같이 15-칩 PN 시퀀스로 사상된다.

〈표 6〉 심볼투칩 사상

Input bits	Input bits Chip values (c0 c1 ... c14)
0	111101011001000
1	000010100110111

칩 시퀀스는 올림 코사인 펄스 모양(raised cosine pulse shaping, 롤오프 인수=1)을 갖는 BPSK를 사용하여 변조된다. 여기서 칩값이 1이면 양의 펄스 0이면 음의 펄스가 사용된다. 칩 속도는 868 MHz 대역폭에서 300 kchip/s이고 915 MHz 대역폭에서는 600 kchip/s이다. 각 기저대역의 칩에 사용된 올림 코사인 펄스는 수식 (4)와 같이 표현된다.

$$p(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin(\pi t / T_c)}{\pi t / T_c} \cos(\pi t / T_c) \\ 1 - (4t^2 / T_c^2) \end{array} \right\} \quad (4)$$

각 심볼 기간 동안 최하위 칩( $c_0$ )은 처음으로 전송되고 최상위 칩( $c_{15}$ )는 마지막에 전송된다.

868/915 MHz BPSK PHY는 868.0-868.6 MHz 주파수 대역과 902-928 MHz 주파수 대역에서 동작된다. 전송된 스펙트럼 출력은 〈표 7〉에 명시된 한계보다 작아야 한다. 상대적 한계와 절대적 한계 모두 평균 스펙트럼 파워는 100 kHz의 분해능 대역폭을 사용하여 측정된다. 상대적 한계에서, 기준 레벨은 반송파 주파수  $\pm 600$  MHz 에서 측정된 평균 스펙트럼 파워의 최고치가 된다.

868/915 MHz BPSK PHY의 심볼 속도는  $\pm 40$  ppm, 868 MHz 대역에서는 20ksymbol/s이고 915 MHz 대역에서는 40ksymbol/s이다.

〈표 7〉 915 MHz 대역 전송 PSD 한계

Frequency	Relative limit	Absolute limit
$ f - f_{cl}  > 1.2 \text{ MHz}$	-20 dB	-20 dBm

컴플라이언트 디바이스 수신기 감도는 -92 dBm 또는 그 이상이다. 902-928 MHz 대역에서의 최소 방해전파 저항 레벨은 〈표 8〉에 명시하였다.

〈표 8〉 915MHz PHY의 최소 수신기 방해 전파 필요 조건

Adjacent channel rejection	Alternate channel rejection
0 dB	30 dB

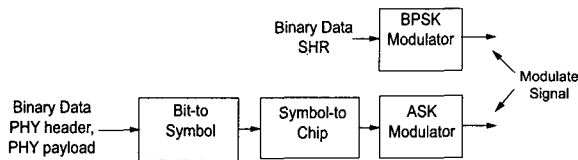
### 3.5 868/915 MHz 대역 옵션ASK PHY 규격

ASK PHY의 데이터율은 868 MHz 대역과 915 MHz 대역에서 250 kb/s 이지만 ASK PHY는 868/915 MHz 대역에서 의무 사항은 아니다. 만약 ASK PHY가 868/915 MHz에서 사용된다면 동일한 디바이스는 868/915 MHz BPSK PHY 시그널링도 가능해야한다.

ASK PHY는 일반적으로 OCDM(orthogonal code division multiplexing)으로 알려진 PSS(parallel sequence spread spectrum)으로 불리는 멀티 코드 변조를 사용한다. 매 데이터 심볼 주기마다 868 MHz 에서 20 정보 비트와 915 MHz 에서 5 정보 비트는 각각 길이가 20과 5 에서 거의 직교 PN 시퀀스로 변조된다. 868 MHz의 20, 915 MHz의 5 PN 시퀀스는 선형적으로 합하여져서 멀티 레벨 32-칩 심볼을 구성하는데, 이는 64-하프칩(868 MHz)과 다중 레벨 35-칩(915 MHz)과 같다.

그 후 단순한 프리코딩이 매 심볼에 실행되고, 끝으로 멀티 레벨 64-하프칩(868 MHz)과 다중 레벨 35-칩(915 MHz)은 ASK를 사용하는 반송파로 변조된다

(그림 5)는 PSS 변조와 확산 함수를 명시한 것이다.



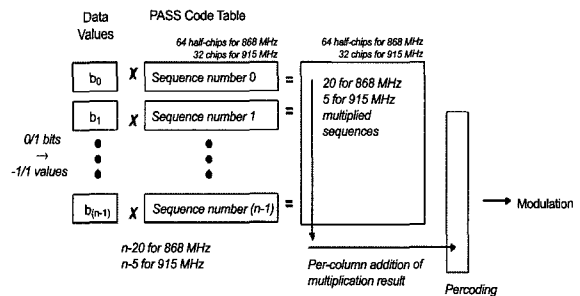
(그림 5) 변조와 확산 함수

PPDU의 각 옥텟은 확산과 변조 함수를 통하여 연속적으로 처리된다. (그림 22)에서 나타내는 것과 같이 동기화 헤더는 BPSK 변조기로 부호화 되고 PHY 헤더와 PHY 페이로드는 bit-to-symbol 사상과 symbol-to-chip 사상 그리고 ASK 변조기를 거치게 된다.

PHY 헤더 첫 번째 옥텟의 LSB(b0)와 함께 시작되어 그 다음 옥텟으로 계속되는 868 MHz의 처음 20 비트와 915 MHz의 처음 5 비트는 첫 번째 데이터 심볼에서 사상된다.

PPDU 끝까지 이어지는 868MHz의 그 이후의 20 비트와 915MHz의 그 이후의 5 비트는, 옥텟의 LSB가 제일 먼저 사상되어가면서, PHY 헤더의 모든 옥텟과 페이로드가 심볼에 사상될 때까지 각 하위 데이터 심볼에 순차적으로 사상된다. 각 심볼에 LS 칩은 가장 먼저 전송된다. 마지막 입력비트 후에는 남은 부분은 심볼을 채우기 위해 0으로 채워진다. 또한, 이 0으로 채워진 비트는 PSS로 확산되어 최대한 랜덤한 특성을 갖도록 부호와 된다.

각각의 데이터 심볼은 이 절에서 설명된 바와 같이 868 MHz의 멀티 레벨 64-half 칩과 915 MHz 멀티 레벨 32 칩으로 사상된다. (그림 6)은 심볼투칩 사상의 개요를 보여준다.



(그림 6) PHY 헤더와 PHY 페이로드의 심볼투칩 사상

데이터 열의 각 비트는 〈표 15〉과 〈표 16〉에서 정의된 868MHz 대역 915MHz대역 수열과 곱해진다. PSSS 코드 표는 택하여, 31 칩 기반 수열을 868MHz에서는 20, 915MHz에서는 5 만큼 순환적으로 이동시키고, 1비트 순환 확장자를 각 수열에 더함으로써 생성된다.

868MHz PSSS에서는 31 칩 기저 수열을 순환적으로 1.5 칩 이동하여 표에 있는 다음 수열을 만든다. 915MHz PSSS에서는 31 칩 기저 수열을 순환적으로 6 칩 이동하여 표에 있는

다음 수열을 만든다.

데이터 심볼을 구성하는 비트 벡터는 PSSS 코드 표와 곱해진다. 다시 말하면, 비트 b0는 수열 번호 "0"과 곱해지며, 비트 b1는 수열 번호 "1"과 곱해진다. 곱셈하기 앞서서 데이터 비트는 2진 수로, 즉 "1"은 +1로 "0"은 -1로 변환된다. 곱셈을 한 결과가 변조된 코드표인데 이는 표30과 표31과 유사하지만 각 행은 데이터비트에 따라 반전또는 비반전 되어있다. (Appendix 참조)

그 결과, 변조된 코드표의 모든 행은 선형적으로 더해져 868MHz일 경우는 다중 64반칩 심볼 915MHz일 경우는 다중 32칩 심볼을 생성한다. 예를 들어, 각각 변조된 수열로부터 칩 0을 선형적으로 더하면 다중 수열의 칩0이 생성된다. 열에 해당하는 결과는 915MHz에서는 32칩 c0 ... c31이고 868MHz에서는 c0에서 c63까지의 64 반칩이다.

다음은 915MHz용 다중 32 칩 심볼과 868MHz용 다중 64 반칩 심볼에 프리코딩이 수행된다. 이 프리코딩은 심볼과 심볼사이에서 독립적으로 수행되며 두 단계로 구성된다. 첫 단계에서 한 상수가 915MHz용 다중 32 칩 심볼과 868MHz용 다중 64 반칩 심볼에 더해진다. 이 상수는 결과 수열의 최소값과 최대 값이 0을 중심으로 대칭이 되도록 선택되어진다. 원 다중 32칩 심볼 수열을 p(m)이라 표시하고 1단계 프리코딩 후 수정된 수열을 p'(m)으로 표시하면 프리코딩의 일단계는 다음(5)와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$p'(m) = p(m) - \frac{(Max - Min)}{2} \quad (5)$$

$$p''(m) = \frac{p'(m)}{Max'} \quad (6)$$

여기서 Max'는 p'(m) 중에서 최대이다.

915MHz에서 32 다중칩으로 868MHz에서 64 다중반칩으로 프리코딩된 수열은 아래에 기술된 반송파로 변조된다. 칩 시퀀스는 루트 올림 코사인 펄스 형상을 갖는 ASK를 사용하는 반송파로 변조된다. 868 MHz의 칩 속도는 800 khalf-chip/s 와 같은 400 kchip/s 이고 915 MHz의 칩 속도는 1600 kchip/s 이다.

각각의 기저대역 칩을 나타내는데 사용되는 루트 올림 코

사인 펄스 형상은 식 (7)과 같다.

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\left\{ \pi(r-1) \cdot \sin\left(\frac{\pi(r+1)}{4r}\right) + \pi(r-1) \cdot \cos\left(\frac{\pi(r-1)}{4r}\right) - 4r \cdot \sin\left(\frac{\pi(r-1)}{4r}\right) \right\}}{2\pi\sqrt{T_c}}, & t = (\pm T_c)/(4r) \\ \frac{4r}{\pi\sqrt{T_c}} - \frac{(r-1)}{\sqrt{T_c}}, & t = 0 \\ \frac{4r \cos((1+r)\pi/T_c) + \sin((1-r)\pi/T_c)(4r/T_c)}{\pi\sqrt{T_c}(1-(4r/T_c)^2)}, & t \neq 0 \text{ and } t \neq (\pm T_c)/(4r) \end{cases} \quad (7)$$

여기서, 868 MHz와 915 MHz의 롤오프 계수 =0.2 이다. 펄스 형상 필터를 위한 펄스는 915/868 MHz의 칩율/반칩율로 발생된다. 식 (7)의 는 칩의 지속 시간이다. 각 심볼 주기 동안 LS 칩/반칩(c0 / hc0)이 가장 먼저 전송되고, MS 칩 (c31 / hc63)은 마지막에 전송된다.

868/915 MHz ASK PHY는 868.0-868.6 MHz와 902-928 MHz 주파수 대역에서 운용된다. 전송된 스펙트럼 출력은 <표 9>에 명시된 한계보다 작아야 한다. 상대적 한계와 절대적 한계 모두 평균 스펙트럼 파워는 100 kHz의 분해능 대역폭을 사용하여 측정된다. 상대적 한계에서, 기준 레벨은 반송파 주파수 ± 600 KHz 에서 측정된 평균 스펙트럼 파워의 최고치가 된다.

<표 9> 915 MHz 대역 ASK PHY 전송 PSD 한계

Frequency	Relative limit	Absolute limit
f - fc  > 1.2 MHz	-20 dB	-20 dBm

ASK PHY 심볼 속도는 868 MHz 에서 12.5 ksymbol/s ± 40 ppm 이고 915 MHz 에서 50 ksymbol/s ± 40 ppm 이다.

컴플라이언트 디바이스 수신기 감도는 -85 dBm 또는 그 이상이다.

최소 방해전파 저항 레벨은 <표 10>에 명시하였다.

<표 10> 915 MHz ASK PHY의 최소 수신기 방해 전파 필요 조건

Adjacent channel rejection	Alternate channel rejection
0 dB	30 dB

지금부터는 SHR (Synchronization Header)에 관하여 논한다. SHR은 PHR(PHY Header)과 PSDU를 위한 PSSS 부호의 서브셋을 사용한다. SHR 칩은 PHR과 PSDU에 사용된 칩 속도와 펄스 형상을 사용하여 BPSK 변조되어 전송된다. 그러나 동기화 헤더는 다른 심볼투칩(symbol-to-chip) 을 사용한다.

프리앰블은 <표 15>와 <표 16>의 시퀀스 넘버 0을 868 MHz에서 두번 반복하여 915 MHz의 여섯번 반복하여 발생된다. 프리앰블 지속 시간은 868 MHz에서는 160  $\mu$ s, 915 MHz에서는 120  $\mu$ s가 된다. “-1” 값을 갖는 가장 왼쪽의 칩 넘버 “0”이 제일 처음 전송되며 프리앰블은 BPSK 변조된다. 펄스 형상은 PHY 페이로드에 사용된 식(7)과 같다.

868 MHz와 915 MHz의 SFD(start-of-frame delimiter)는 각각 <표 15>와 <표 16>의 반전된 시퀀스 0이며 SFD는 BPSK 변조된다. 펄스 펄스 형상은 PHY 페이로드에 사용된 식(7)과 같다. <표 11>은 915 MHz 코드 표인 <표 16>을 사용하여 부호화 되는 5-비트 심볼 예제를 보여준다.

<표 11> 5 비트 심볼 예제

Data bits	
Bit	Bit value
b0	1
b1	-1
b2	1
b3	-1
b4	-1

<표 35>에 있는 가중수열은 수열 0을  $b_0$ 으로, 수열 1을  $b_1$ 로, 그리고 수열 4를  $b_4$ 로 가중함으로써 계산된다. PSSS 심볼  $p(m)$ 은 가중수열의 열을 더함으로 계산되며, 868 MHz에서 의 반 칩은 열을 따라서 더해진다.

예를 들어 <표 35>의  $p(m)$ 은 최대  $|p(m)|=5$ 이고 최소  $|p(m)|=-5$ 이다. 한 심볼의 프리코딩은 식 (5)와 식(6) 두 단계를 거친 다른 심볼의 프리코딩과 독립적으로 수행된다.  $p'(m)$ 과  $p''(m)$ 의 결과를 <표 36>에서 보여주고 있다.

부록의 (그림 10)은 식(7)에서 펄스 형상화 필터가 적용될  $p(m)$  칩 가중치를 보여주고 있다.

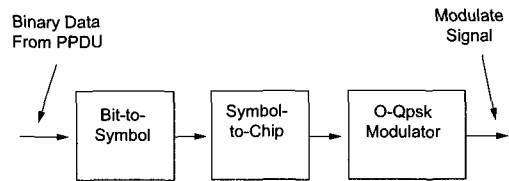
### 3.6 868/915 MHz 대역 옵션 O-QPSK PHY 규격

O-QPSK PHY의 데이터율은 868 MHz 대역과 915 MHz 대역에서 각각 100 kb/s 250 kb/s 이지만 O-QPSK PHY는 868/915 MHz 대역에서 의무 사항은 아니다. 만약 O-QPSK PHY가 868/915 MHz에서 사용된다면 동일한 디바이스는 868/915 MHz BPSK PHY를 사용한 시그널링도 가능해야한다. O-QPSK PHY는 16-ary quasi-orthogonal 변조 기술을 사용하며 각 데이터 심볼 주기동안 4개의 정보 비트는 16 직교 PN 수열 중 한 수열로 되어 전송된다. 연속적인 데이터 심볼

의 PN 시퀀스는 연결되어 이렇게 모여진 칩 수열은 O-QPSK로 변조된다.

(그림 7)는 868/915 MHz 대역 PHY 변조와 확산 함수의 명시한 것이다.

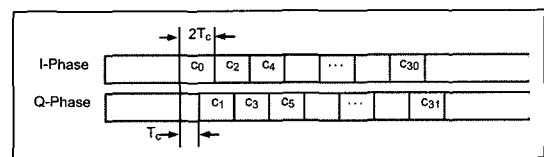
PPDU의 각 비트는 비트와심볼(bit-to-symbol) 사상과 심볼과칩(symbol-to-chip) 사상 그리고 옥텟의 순서(octet-wise order)에서의 변조 함수를 통하여 프리앰블 필드에서 시작하여 PSDU의 마지막 옥텟을 끝으로 처리된다. 각각의 옥텟에서 LSB는 처음으로 처리되고 MSB는 마지막에 처리된다.



(그림 7) 변조와 확산 함수

PPDU에서의 모든 바이너리 데이터는 (그림 25)에서 보여주는 변조와 확산 함수를 사용하여 부호화 된다. 각 옥텟의 4 LSB( $b_0, b_1, b_2, b_3$ )는 하나의 데이터 심볼로 4 MSB( $b_4, b_5, b_6, b_7$ )는 다음 데이터 심볼로 사상된다. PPDU의 각 옥텟은 프리앰블 필드에서 시작하여 PSDU의 마지막 옥텟을 끝으로 연속인 변조와 확산 함수를 통하여 확산된다. 각 옥텟에서 LSB ( $b_0, b_1, b_2, b_3$ )는 처음으로, MSB ( $b_4, b_5, b_6, b_7$ )은 그 다음으로 처리된다. 각 데이터 심볼은 <표 12>에서 보이는 바와 같이 16-칩 시퀀스로 사상된다.

각 데이터 심볼을 나타내는 칩 시퀀스는 하프 사인 펄스 형상을 사용하는 반송파로 변조된다. 우 지수(Even-indexed) 칩은 in-phase (I) 반송파에서 변조되고 기 지수(odd-indexed) 칩은 quadrature-phase (Q) 반송파에서 변조된다. 각 데이터 심볼이 16-칩 시퀀스로 표현되었기 때문에 칩 속



(그림 8) O-QPSK 칩 오프셋



〈표 12〉 O-QPSK의 심볼투칩 사상

Data symbol (10진)	Data symbol (이진) (b0 b1 b2 b3)	Chip values (c0 c1 ... c30 c31)
0	0 0 0 0	1101100111000011 0101001000101110
1	1 0 0 0	1110110110011100 0011010100100010
2	0 1 0 0	0010111011011001 1100001101010010
3	1 1 0 0	0010001011101101 1001110000110101
4	0 0 1 0	0101001000101110 1101100111000011
5	1 0 1 0	0011010100100010 1110110110011100
6	0 1 1 0	1100001101010010 0010111011011001
7	1 1 1 0	1001110000110101 0010001011101101
8	0 0 0 1	1000110010010110 0000011101111011
9	1 0 0 1	1011100011001001 0110000001110111
10	0 1 0 1	0111101110001100 1001011000000111
11	1 1 0 1	0111011110111000 1100100101100000
12	0 0 1 1	0000011101111011 1000110010010110
13	1 0 1 1	0110000001110111 1011100011001001
14	0 1 1 1	1001011000000111 0111101110001100
15	1 1 1 1	1100100101100000 0111011110111000

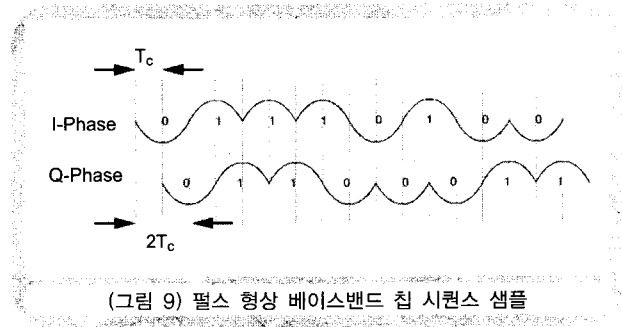
도(보통 868MHz와 915MHz에서 400kchips/s와 1.0 Mchips/s)는 심볼 속도의 16배가 된다. I-phase와 Q-phase 변조 사이에서 오프셋을 주기 위하여 Q-phase 칩은 I-phase 칩보다  $T_c$ 만큼 지연된다.

각 기저대역 칩을 나타내기 위하여 사용된 하프-사인 펄스 형상은 식 (8)과 같다.

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

(그림 9)은 기저대역 칩 시퀀스의 하나의 예이다.

각 심볼 기간 동안 1S 칩(c0)는 제일 먼저, MS 칩(c15)은 마지막에 전송된다.



(그림 9) 펄스 형상 베이스밴드 칩 시퀀스 샘플

868/915 MHz O-QPSK PHY는 868.0-868.6 MHz 대역과 902-928 MHz 주파수 대역에서 동작한다.

868 MHz 대역에서, 전송신호는 송신 PSD를 만족하기 위해 필터링 된다. 이 필터는 아래 (9)식과 같이  $r=0.2$ 인 이상적인 올림 코사인 필터가 사용된다.

$$p(t) = \begin{cases} \frac{\sin \pi / T_c \cos r \pi / T_c}{\pi / T_c (1 - 4r^2 t^2 / T_c^2)}, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases} \quad (9)$$

전송된 스펙트럼 출력은 〈표 13〉에 명시된 한계보다 작아야 한다. 상대적 한계와 절대적 한계 모두 평균 스펙트럼 파워는 100 kHz의 분해능 대역폭을 사용하여 측정된다. 상대적 한계에서, 기준 레벨은 반송과 주파수  $\pm 600$  KHz에서 측정된 평균 스펙트럼 파워의 최고치가 된다.

〈표 13〉 915 MHz 대역 O-QPSK PHY 전송 PSD 한계

Frequency	Relative limit	Absolute limit
$ f - f_c  > 1.2$ MHz	-20 dB	-20 dBm

O-QPSK PHY 심볼 속도는 868 MHz 대역에서 25 ksymbol/s  $\pm 40$  ppm 이고 915 MHz 대역에서 62.5 ksymbol/s  $\pm 40$  ppm 이다. 컴플라이언트 디바이스 수신기 감도는 -85 dBm 또는 그 이상이다. 최소 방해전파 저항 레벨은 〈표 14〉에 명시하였다.

〈표 14〉 915 MHz O-QPSK PHY의 최소 수신기 방해 전파 필요 조건

Adjacent channel rejection	Alternate channel rejection
0 dB	30 dB

### IV. 결 론

유비쿼터스 네트워크 시대가 도래함에 따라 표준화된 기술의 파악 및 이에 따른 응용 서비스 요구가 증대되고 있다. 본 고에서는 이러한 요구에 부합하기 위해 제정된 저속 (Low Rate) 통신규격을 제공하는 표준인 IEEE 802.15.4 의 표준화의 기술적 개관 및 물리계층에 대하여 설명하였다. 본 고에서는 2006년 9월 판 표준안을 기반으로 하여 주파수 대역별 물리계층(PHY)의 규격을 기술하였다. 또한, 주파수 대역 및 변조방식에 따른 데이터율과 심볼 사상에 관하여 기술하였으며, 전송 특성, 채널 할당 방식 그리고 스펙트럼 방사 출력 등에 관해 기술하였다. 제시된 표준안을 바탕으로 국내 정부출연연구원, 대기업, 대학 그리고 여러 중소기업이 UWB 칩, 플랫폼 및 응용 개발에 참여하고 있어, 가까운 미래에 유비쿼터스 네트워크 시대가 도래할 전망이다.



- [1] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE 802.15.4, Sep, 2006.
- [2] 오미경, 김재영, “유비쿼터스홈 의 실현: 위치인식 UWB 기술”, 전자공학회지 제34권 제 2호 pp 202-211, 2007년 2월
- [3] 허재두, 이현정, 박광로, 남윤석, “WiMedia UWB 기술 동향”, 전자공학회지 제34권 제 2호 pp 157-168, 2007년 2월
- [4] Shellhammer, S. J., “Estimation of Packet Error Rate Caused by Interference using Analytic Techniques-A Coexistence Assurance Methodology,” IEEE 802.19-05/0028r0, September 14, 2005.
- [5] Sklar, Bernard, Digital Communications: Fundamentals and Applications, New Jersey: Prentice Hall, 1988.

### APPENDIX

Sequence number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

〈표 15〉 868 MHz에서 심볼투침 사상이 사용된 PSSS 코드 테이블

Sequence number	Chip number																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
2	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

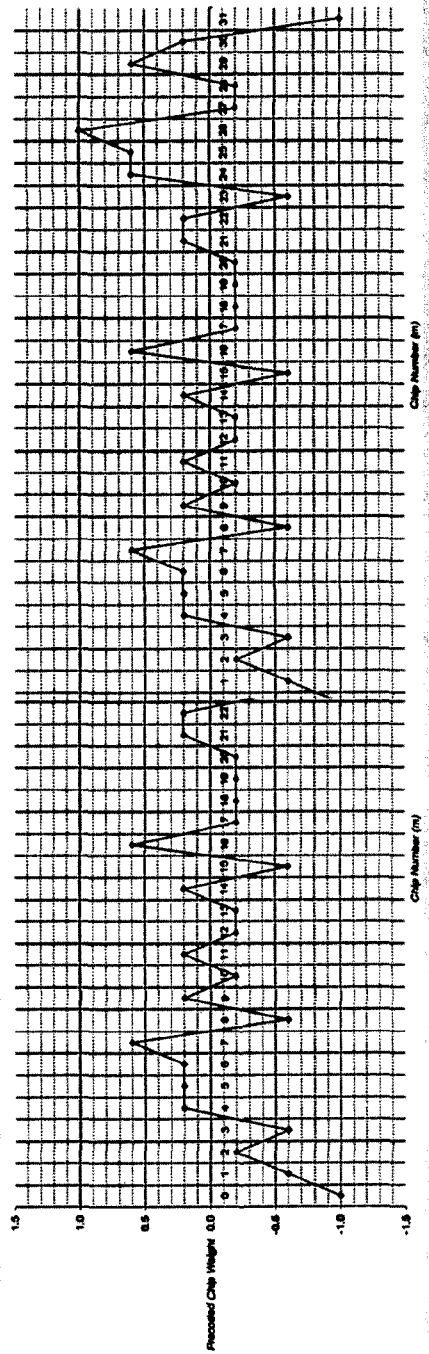
<표 16> 915 MHz에서 심볼루틴 사상이 사용된 PSSS 코드 테이블

Weighted sequence	Chip number																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	
1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
2	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
$p'(m)$	-5	-3	-1	-3	1	1	1	1	3	-3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-3	3	3	5	-1	-1	3	1	-5

<표 17> 가중 시퀀스

<표 18> 제로 PSSS 심볼에 대칭으로 정렬 된  $p'(m)$ 와 프리코드된 PSSS  $p''(m)$

$p'(m)$	-5	-3	-1	-3	1	1	1	1	3	-3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-3	3	3	5	-1	-1	3	1	-5
$p''(m)$	-1.0	-0.6	-0.2	0.2	0.6	-0.6	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	1.0	-0.2	-0.2	0.6	0.2	-1.0



(그림 10) 프리코드된 PSSS심볼  $p''(m)$

약 령



이 중 현

1985년 한양대학교 (공학사)  
1987년 Michigan Technological University (공학석사)  
2002년 한국과학기술원 (공학박사)  
1990년 ~ 1995년 한국전자통신연구원 선임연구원  
2003년 ~ 2006년 서경대학교 전임강사  
2006년 ~ 현재 제주대학교 해양과학대학 해양공학부 조교수  
관심분야: 신호처리, 이동통신 시스템, 차세대 이동통신,  
디지털 방송 기술

