

초광대역 M 진 펄스 위치 변조 임펄스 무선 전송 시스템의 성능

정회원 안진철*, 박광희**, 신요안**

Performance of Ultra Wideband M -ary Pulse Position Modulated Impulse Radio Systems

Jinchul Ahn*, Kwonghee Park**, Yoan Shin** *Regular Members*

요 약

최근 들어 초광대역 시간 도약 임펄스 무선 전송 (ultra wideband time hopping impulse radio; 이하 IR) 기술이 실내 무선 LAN이나 군용 무선 통신 시스템 등을 위한 새로운 대역 확산 전송 방식으로서 큰 관심을 모으고 있다. IR 시스템은 1 (nsec) 이하의 매우 짧은 펄스폭의 펄스 위치 변조 (pulse position modulation)된 가우시안 모노사이클 펄스열을 이용함으로써 매우 작은 크기의 수 GHz에 이르는 초광대역 스펙트럼을 가지며 기존의 통신 시스템에 거의 간섭을 미치지 않으면서 사용 가능하다. 본 논문에서는 IR 시스템에 M 진 (M -ary) PPM 방식을 적용하는 경우의 성능을 평가하였다. 특히 의사 잡음 부호 발생기와 10진 변환기 (decimator)로 구성된 시간 도약 패턴을 사용하여 다원 접속 간섭이 배제되는 부가성 백색 가우시안 잡음 채널 하의 동기식 (synchronous) IR 시스템에서, 심벌 수 M , 가우시안 모노사이클 펄스 폭 τ_p , PPM에서 펄스 간 간격 δ , 펄스 반복 횟수 N_s 등과 같은 다양한 시스템 파라미터의 조합에 따른 성능 변화를 모의 실험을 통해 확인하였으며, 이러한 결과를 통해 비트 오류, 시스템 복잡도 및 전송율 등의 사양에 따라 적합한 M 진 PPM IR 시스템의 구성 방안에 대한 근거를 제공하였다.

ABSTRACT

Recently, ultra wideband time hopping impulse radio (IR) systems have drawn much attention as a new type of spread spectrum multiple access communication systems in such applications as in-building wireless LAN and military communication systems. An IR system transmits a train of pulse position modulated baseband Gaussian monocycle pulses with very short duration in the order of sub-nano seconds, yielding very low power spectrum of ultra wide bandwidth of several GHz so that the system causes a negligible interference to the existing radio systems. In this study, we evaluate performances of the IR systems with M -ary PPM schemes. In particular, the synchronous IR systems under additive white Gaussian noise channels with a time hopping sequence generator composed of a pseudo noise code generator and a decimator are considered, and their performances in terms of various system parameters such as M , pulse width τ_p of the Gaussian monocycle pulse, PPM pulse interval δ , and number N_s of pulse repetitions, are evaluated through computer simulation. The results can be exploited to construct a suitable M -ary PPM IR system according to such different system specifications as bit error rate, system complexity, and data rate.

* 현대전자(주)

**송실대학교 정보통신전자공학부 (yashin@logos.soongsil.ac.kr)

논문번호 : 00164-0509, 접수일자 : 2000년 5월 9일

※ 본 논문은 한국과학재단 특정기초연구과제 (#98-0101-12-01-4)의 지원 결과임

I. 서론

신호의 전송을 위해 연속적인 반송파를 사용하는 대부분의 무선 통신 시스템과는 근본적으로 다른 접근 방법으로서 최근 들어 초광대역 시간 도약 임펄스 무선 전송 (ultra wideband time hopping impulse radio system; 이하 IR) 시스템이 큰 관심을 모으고 있다^[1,2,3]. IR 시스템은 1 (nsec) 이하의 매우 좁은 펄스폭의 기저대역 가우시안 모노사이클 펄스열 (Gaussian monocycle pulse train)을 펄스 위치 변조 (pulse position modulation; PPM)하여 상향 변조 없이 그대로 전송하고, 수신단에서는 간단한 기저대역 상관기 (correlator)를 통해 신호를 복조한다. 또한 다원 접속을 위해 각 사용자는 고유의 시간 도약 (time hopping) 패턴을 이용한다. 이러한 특징들로 인해 IR 시스템은 0 Hz - 수 GHz 이상의 주파수 대역을 점유하는 매우 작은 크기의 초광대역 스펙트럼 특성을 갖게 된다. IR 시스템은 특정 시간 간격 내에서 다수의 사용자가 자신의 도약 패턴에 따라 도약을 함으로써 높은 비화성이 가능하며 다원 접속 간섭을 최소화하여 송수신이 가능하다. 또한 기저대역 신호 처리만을 수행함으로써 시스템의 구현이 비교적 간단하며, 좁은 모노사이클 펄스 폭에 의해 처리 이득과 시스템 용량이 크게 증가하고, 다중 경로 채널에서 우수한 경로 분해 성능 (resolvability)에 의해 다이버시티를 통한 페이딩 영향의 보상이 용이하다. 이러한 장점들로 인해 전세계적으로 여러 업체 및 연구소들이 IR 기술을 기반으로 하여 다양한 무선 통신 시스템들을 개발하고 있다^[4,5,6]. 예를 들어, 미국의 Time Domain Corp.에서는 32 (kbps) 전송율의 full duplex 군용 음성/데이터 송수신 시스템, 수 Mbps 전송율의 무선 LAN 및 구내 데이터 통신 시스템 등을 개발하고 있으며, 그 외 미국의 Pile Dynamics, Amerigon, SLC Technologies, Remote Data Systems, Zircon 등의 기업에서 IR 기술을 레이다에 응용하여 지능형 교통 시스템 등의 제품을 개발 중에 있다.

IR 시스템의 초광대역성은 기존의 대부분 무선 통신 시스템이 사용하는 대역과의 중복이 불가피하며, 현재의 대부분 무선 통신 법규에 따르면 새로운 무선 통신 시스템의 도입에 의해 일정 기준 이상으로 기존 시스템에 간섭을 미치는 것을 엄격히 규제하고 있다. 하지만 IR 시스템의 초광대역성은 배경 잡음 이하의 수준으로 신호 레벨을 낮추는 것을 가

능케 하여, 실제 최근 연구에 따르면 IR 시스템 송신기에서 방사되는 신호의 전력 스펙트럼이 일반 전기기기에서 비의도적으로 방사 (unintentional radiation)되는 전자파의 전력 스펙트럼과 유사한 레벨의 미미한 수준이며 많은 수의 IR 시스템 송신기가 동시에 동작하여도 여타 통신 시스템에 미치는 영향이 거의 없을 것이라는 결과가 발표되기도 하였다^[7]. 이러한 IR 시스템의 간섭 특성 및 여러 장점들을 인식한 미국 FCC에서는 1998년 9월부터 동 기술의 초광대역성을 수용하는 새로운 주파수 규정을 마련하기 위하여 조사중에 있다^[8].

IR 시스템에 대한 이론적인 연구는 주로 University of Southern California의 R. A. Scholtz 연구팀에 의하여 수행되어 왔다. 이들 연구에서는 대부분 이진 (binary) PPM을 이용하는 IR 시스템을 다루고 있으며, 특히 부가성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise; AWGN) 채널에서 이상적인 랜덤 시간 도약 패턴을 사용하는 경우에 대한 비트오율 분석^[1,2,3]과, 실내의 환경에서 임펄스 신호의 전파 특성을 측정하는 연구^[9,10,11] 및 다중 경로 채널에서 이상적인 Rake 형태의 수신기를 사용하는 경우에 대한 성능 평가^[3] 등을 포함하고 있다. 한편, 우리는 참고 문헌 [1,2,3]에서 제시된 이진 IR 시스템의 성능 분석 결과를 바탕으로 하여, 의사 잡음 부호 (pseudo noise code) 발생기와 10진 변환기 (decimator)로 구성된 시간 도약 패턴 생성기를 사용하여 다원 접속 간섭이 배제되는 동기식 (synchronous) 이진 IR 시스템의 비트오율 성능을 분석하고, 수신기 내 상관기 (correlator)에서 발생된 랜덤 타이밍 지터 (timing jitter)에 의한 시스템 성능 열화를 평가하였다^[12,13,14,15].

본 논문에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 하여, M진 (M-ary) PPM 방식을 이용하는 IR 시스템의 성능을 평가하고자 한다. 특히 심볼 수 M, 모노사이클 펄스 폭 τ_p , PPM에서 펄스 간 간격 δ , 펄스 반복 횟수 N, 등과 같은 다양한 시스템 파라미터의 조합에 따른 성능 변화를 모의 실험을 통해 확인하고자 하며, 이러한 결과를 통해 비트오율, 시스템 복잡도 및 전송율 등의 사양에 따라 적합한 M진 PPM IR 시스템의 구성 방법에 대한 근거를 제공하고자 한다. 이를 위해 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2 절에서는 M진 PPM을 적용한 IR 시스템의 구조 및 특성을 살펴본다. 3 절에서는 모의 실험을 통해 AWGN 채널 하에서 M진 PPM IR 시스템의 비트오율 성능을 확인하며, 특히 여기

서는 다양한 시스템 파라미터가 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 마지막으로 4 절에서 결론을 맺는다.

II. M진 PPM 방식의 IR 시스템

1. 시스템 구성

일반적인 IR 시스템의 송신기에서 신호 전송을 위해 아래 식 (1)로 표현되는 기저대역 가우시안 모노사이클 펄스 (혹은 “임펄스”) $p(t)$ 를 M 진 PPM 변조하고 시간 도약 패턴을 이용하여 각 사용자마다 랜덤화하여 추가적인 상향 변조 없이 그대로 전송한다.

$$p(t) = 2A\sqrt{\pi}e^{-\frac{t}{\tau_p}} e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (1)$$

여기서 A 는 펄스의 크기이고 τ_p 는 펄스의 폭을 결정하는 파라미터이다. 일반적으로 τ_p 는 1 (nsec) 이하의 매우 작은 값이 이용된다. 식 (1)과 같은 가우시안 모노사이클 펄스가 수신기에 입사되는 경우 수신단 안테나의 특성에 의해 수신단의 상관기에는 이의 미분된 형태의 펄스가 입력된다^[1,2,3]. 따라서, 수신기 내 상관기의 입력 파형 $w(t)$ 은 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$w(t) = A' \left(1 - \frac{4\pi t^2}{\tau_p^2}\right) e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (2)$$

이 식에서 A' 은 적절한 크기 상수이다. IR 시스템에서는 위 식 (2)와 같은 펄스가 전송된다고 등가적으로 모델링한다^[1,2,3]. 그림 1은 $A=1$, $\tau_p=0.3$ (nsec), $A'=2\sqrt{\pi}e/3$ 일 때 $p(t)$ 와 $w(t)$ 를 도시하

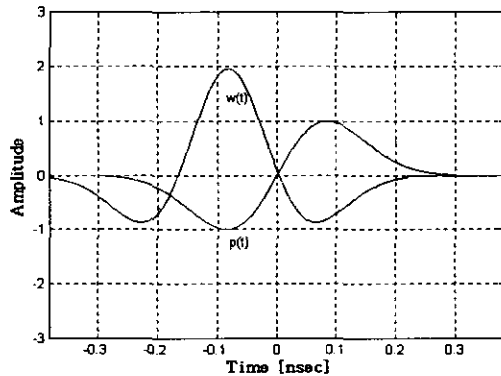


그림 1. 가우시안 모노사이클 펄스 $p(t)$ 와 이 펄스가 수신단 안테나를 통과한 후의 펄스 $w(t)$ 의 예시 ($\tau_p = 0.3$ nsec).

며, 그림 2는 가우시안 모노사이클 펄스 $p(t)$ 의 전력 스펙트럼을 도시한다. 여기서 매우 좁은 폭의 펄스를 이용함으로써 3 dB 대역폭이 약 $1.16/\sqrt{\pi}\tau_p$ (Hz) 가량의 초광대역 특성을 갖게 됨을 알 수 있다.

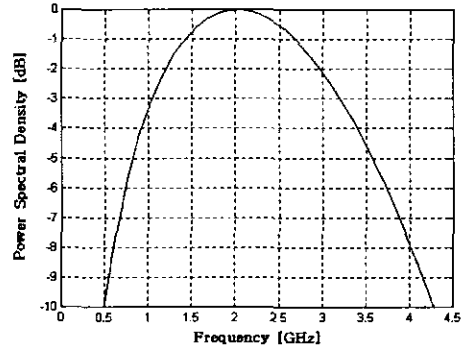


그림 2. 가우시안 모노사이클 펄스 $p(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도 ($\tau_p = 0.3$ nsec).

그림 3은 M 진 PPM 방식을 이용하는 IR 시스템의 송수신기 구성을 도시한다. 송신기에서 비트 전송율 $1/T$ (bps)인 데이터의 $\log_2 M$ 비트 블록은 직렬/병렬 변환기를 거쳐 M 개의 심벌 가운데 하나로 매핑된다. 그 후, 부호 지연기에서 M 진 PPM 방식을 위해 해당 심벌의 펄스 위치 (혹은 시간 지연)를 결정하고 이에 따라 펄스가 생성 전송된다. 따라서 k 번째 사용자의 전송 신호 $s^{(k)}(t)$ 는 식 (2)의 펄스가 등가적으로 이용된다고 할 때 식 (3)과 같이 표현 가능하며, 그림 4는 $M=4$ 일 때 이러한 전송 신호 파형의 예를 도시한다.

$$s^{(k)}(t) = \sum_j w(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \delta d_{(j)N,1}^{(k)}) \quad (3)$$

여기서 T_f 는 펄스 반복 시간 혹은 프레임이며, 일반적으로 모노사이클 펄스 폭의 수백 혹은 수천

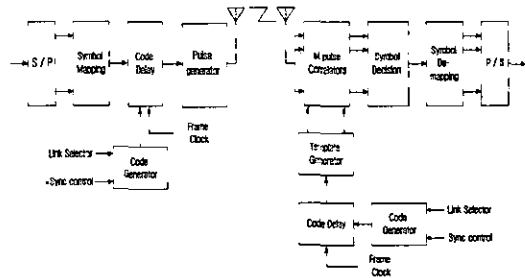


그림 3. M 진 PPM 방식을 이용하는 IR 시스템의 송수신기 구성.

배의 값을 이용하여 IR 시스템은 매우 작은 부하시간 주기 (duty cycle)를 갖게 된다.

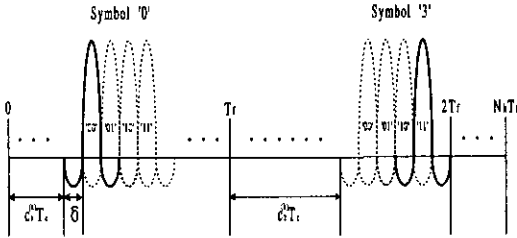


그림 4. M = 4진 PPM IR 시스템 송신 신호의 예.

다원 접속을 위하여 IR 시스템의 여러 사용자들은 하나의 T_f 내에 일정 주기의 서로 다른 시간 도약 패턴을 이용한다. 위 식 (3)에서 $c_j^{(k)}$ 는 k번째 사용자의 j번째 도약 부호를 나타내며, 유효 펄스 폭을 T_c 라 할 때 $T_c \leq MT_c$ 는 제어 가능한 단위 시간으로서 상관 복조 시의 적분 간격이 된다. N_k 를 도약 부호가 가질 수 있는 최대값이라 할 때 $0 < c_j^{(k)} < N_k$ 를 만족하며, 다음 펄스와의 충돌을 피하기 위해서는 아래 조건을 만족하여야 한다.

$$N_k T_c \leq T_f \tag{4}$$

식 (4)에서 $N_k T_c \ll T_f$ 이면, 도약을 위한 부호의 수가 적어 여러 사용자의 펄스 간에 충돌이 발생할 가능성이 커지게 되므로, $N_k T_c \approx T_f$ 를 만족하도록 N_k 와 T_c 를 결정한다. 위에서 언급한 조건들을 만족하는 경우, k번째 사용자의 펄스는 $jT_f + c_j^{(k)}T_c$ 에 존재하고, 다음 펄스는 $(j+1)T_f + c_{j+1}^{(k)}T_c$ 에 존재한다.

한편, 식 (3)에서 δ 는 M진 PPM에서 해당 심벌에 대한 펄스들 간의 시간 간격이고

$$d_{j/N_s,1}^{(k)} \equiv \sum_{i=0}^{\log_2 M - 1} 2^i d_{i,j/N_s,1}^{(k)} \tag{5}$$

는 k번째 사용자의 $\lfloor j/N_s \rfloor$ 번째 심벌을 나타낸다. 이 심벌은 $\log_2 M$ 개의 데이터 비트 $d_{i,j/N_s,1}^{(k)}$ ($i=0, \dots, \log_2 M - 1$)와 대응되며, 식 (5)는 이 비트들을 이용하여 $\{0, \dots, M-1\}$ 가운데 하나의 10진화된 심벌을 생성하는 것을 나타낸다. 이 때 IR 시스템에서는 하나의 심벌을 N_s 개 반복해 보냄으로써, 실제 전송율은 다음과 같다.

$$R_s = \frac{\log_2 M}{N_s T_f} \text{ (bps)} \tag{6}$$

M진 PPM IR 시스템 수신기에서, 수신 신호는 먼저 M개로 복사된 후 각 펄스 위치에 대한 M개의 상관기 (correlator)를 이용하여 복조된다. 이러한 상관기의 M개의 출력을 이용하여 심벌 결정이 수행된 후, 결정된 심벌은 다시 $\log_2 M$ 개의 해당 비트들로 변환된 후 병렬/직렬기를 거쳐 출력된다. AWGN 채널 하에서 $k=1$ 번째 사용자의 신호만을 고려할 경우, 수신 신호 $r(t)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$r(t) = A s^{(1)}(t - \tau) + n(t) \tag{7}$$

여기서 A와 τ 는 채널의 감쇄 및 지연을 나타내고, $n(t)$ 는 AWGN이다. i번째 심벌 $d_i^{(1)} \in \{0, \dots, M-1\}$ 만을 고려할 경우, 식 (7)은 다음과 같이 다시 표현 가능하다.

$$r(t) = A w_{\text{bit}}(t - \delta d_i^{(1)}) + n(t) \tag{8}$$

$$w_{\text{symbol}}(t) \equiv \sum_{j=N_s}^{(i+1)N_s-1} w(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau) \tag{9}$$

m ($m=0, \dots, M-1$)번째 상관기에서 수신 신호와 곱하게 되는 참조 신호 (reference signal) $v_m(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$v_m(t) \equiv w_{\text{symbol}}(t - m\delta) = \sum_{j=N_s}^{(i+1)N_s-1} w(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau - m\delta) \tag{10}$$

T_f 를 심벌 $d_i^{(1)}$ 를 나타내는 N_s 개 펄스의 점유 시간 범위이라 할 때, m번째 상관기의 출력 (decision statistic)은

$$z_m \equiv \int_{t \in T_f} r(t) v_m(t) dt \tag{11}$$

이 되고, 아래의 결정 규칙 (decision rule)에 따라 해당 심벌 \hat{m} 이 결정된다.

$$\hat{m} = \arg \max_{m \in \{0, \dots, M-1\}} z_m \tag{12}$$

우리는 참고 문헌 [12,13,14,15]에서 다원 접속을 위한 시간 도약 패턴 생성기로서, m-시퀀스 발생을 위한 원시 다항식 (primitive polynomial)

$$g(x) = x^n + g_{n-1}x^{n-1} + \dots + g_1x + 1$$

($g_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, n-1$)인 n -stage 선형 케환 시프트 레지스터 구조의 의사 잡음 부호 발생기 (pseudo noise code generator)와 10진 변환기로 구성된 생성기를 고려하였다. n -stage 선형 케환 시프트 레지스터의 i ($i = 0, \dots, n-1$)번째 메모리 소자의 상태를 $b_i \in \{0, 1\}$ 이라 할 때 10진 변환기의 출력인 k 번째 사용자의 j 번째 도약 부호 $c_j^{(k)}$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$c_j^{(k)} = \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i \quad (13)$$

여기서 n 은 다원 접속 사용자 수 N_u 에 의해 결정되며, 식 (4)가 만족될 때 $N_u \leq N_k = 2^n - 1$ 가 되도록 결정된다. 여러 사용자는 서로 다른 레지스터 초기 상태를 사용하여 서로 다른 도약 패턴을 갖게 되며, 사용자 신호 사이의 동기가 완전하게 맞았다는 가정 하에서 (즉 동기식 시스템) 서로의 신호가 시간 영역에서 전혀 겹치지 않아 다원 접속 간섭이 없게 된다. 따라서, 이 경우 다원 접속 상황에서도 기준 사용자에 대하여 다른 사용자의 간섭이 전혀 없으므로 한 명의 사용자만이 접속한 것과 같고, 결국 위에서 언급된 시스템 구성을 그대로 적용 가능하다.

2. 시스템 파라미터의 영향

서로 다른 M 진 PPM IR 시스템에서, M 개 심벌에 대한 펄스 위치를 정하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 먼저 펄스들 간의 시간 간격 δ 와 단위 시간 T_c 를 모든 시스템에 대해 일정한 값으로 유지코자 하는 경우를 들 수 있다. 이 경우는 심벌 수 M 의 증가에 따라 펄스 폭 T_b 를 $M=2$ 인 경우에 비해 $M/2$ 배씩 감소하여야 하므로 대역폭은 같은 비율로 크게 확장된다. 반면에 펄스 폭 T_b 와 단위 시간 T_c 를 일정한 값으로 유지코자 하는 경우는, M 의 증가에 따라 펄스들 사이의 시간 간격 δ 가 줄어들게 되고 (즉 펄스들의 중첩 시간이 더욱 증가하여) 결국 상관기 성능의 열화로 나타날 수 있다. 한편 펄스 폭 T_b 와 펄스들의 시간 간격 δ 를 일정하게 유지코자 하는 경우에는, 단위 시간 T_c 가 증가하여 M 진 PPM 방식을 사용하여도 이진 PPM에 비해 전송율의 향상을 기대하기 어렵다.

이러한 여러 방법들과는 달리, 우리는 여기서 단

위 시간 T_c 가 동일하게 유지되어 M 의 증가에 따라 전송율이 향상되면서 각각의 M 에 적합한 최적의 펄스 간격 δ^* 와 펄스 폭 T_b 를 사용하여 비트 오류 열화와 대역폭 확장을 최소화하는 방법을 이용한다. 그림 5는 $T_c = 0.7626$ (nsec)로 고정된 경우 M 이 각각 2와 4일 때, 이러한 방법에 의한 펄스 $w(t)$ 의 배치를 도식한다. 여기서 펄스 파형은 $w(t)$ 를 고려하였고, 펄스 간격 δ 는 M 이 각각 2와 4일 때 실험을 통해 구한 최적의 값인 0.1626과 0.1141 (nsec)를 이용하였으며, 또한 이 때의 $\tau_b \approx T_b/2$ 는 각각 0.3과 0.21 (nsec)에 해당한다. 또한, 그림 6에서는 동일한 방법으로 M 이 2, 4, 8일 때의 펄스 $w(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도를 도식하고 있다. 여기서 $M=8$ 인 경우는 실험적으로 $\delta^* = 0.07145$ (nsec), $\tau_b = 0.13$ (nsec)가 된다. 이로 부터 앞서 언급된 것처럼 M 의 증가에 따라 대역폭

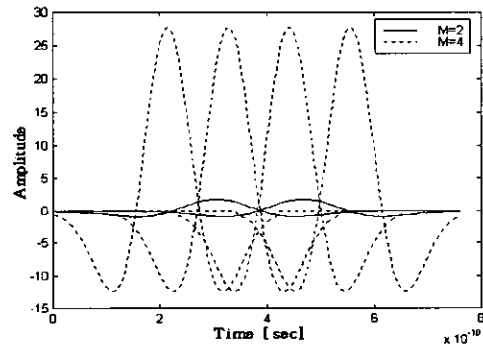


그림 5. M 진 PPM IR 시스템에서, M 이 2와 4일 때 T_c 를 고정하고 최적의 δ^* 와 τ_b 를 사용한 경우 펄스 $w(t)$ 의 배치.

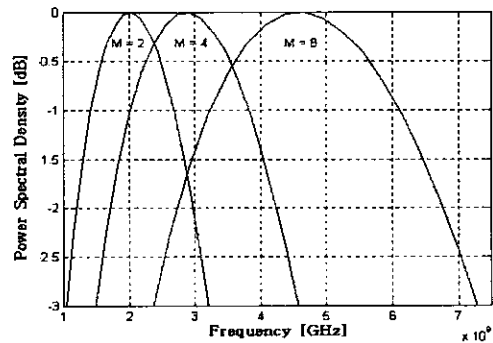


그림 6. M 진 PPM IR 시스템에서, M 이 2와 4일 때 T_c 를 고정하고 최적의 δ^* 와 τ_b 를 사용한 경우 펄스 $w(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도.

이 증가하나 $M > 2$ 일 때 $M/2$ 배 이하의 비율로 증가함을 알 수 있다. 예를 들어, M 이 2, 4, 8일 때 3 dB 대역폭은 약 2, 3, 5 GHz가 된다. 다음 절에서는 실제 이러한 여러 시스템 파라미터 변화에 대한 모의 실험을 통해, M -ary PPM IR 시스템의 성능을 평가하고자 한다.

III. 성능 평가

2 절에서 설명된 M 진 PPM IR 시스템의 성능 평가를 위해 모의 실험을 수행하였다. 이를 위해 평균이 0, 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ (Watt/Hz)인 AWGN 채널을 가정하고 수신단에서 기준 사용자의 시간 지연이 정확히 추정되어 상관가를 이용한 복조를 위한 동기가 정확히 맞았다고 가정하였다. 또한 앞 절에서 설명된 시간 도약 패턴 발생기에서 $n = 7$ -stage 선형 케환 시프트 레지스터를 사용한다고 가정하였고, 여러 사용자 신호 사이의 완벽한 동기여 (즉 동기식 시스템) 최대 $N_u = N_k = 127$ 명의 사용자가 접속하여도 이들 사이의 다원 접속 간섭을 무시할 수 있는 상황을 설정하였다^[12,13]. 따라서 이 경우 기준 사용자의 상관기 출력은 기준 사용자 1 명만이 접속한 상황과 동일하게 된다.

신호 전송을 위한 가우시안 모노사이클 펄스로는 수신단 안테나를 통과한 경우를 설정하여 식 (2)의 $w(t)$ 를 이용하였고, 이 때 펄스 크기 A' 은 $2\sqrt{\pi e}/3$ 로 정하였으며, τ_p 는 단위 시간 (즉 상관기의 적분 시간) T_c 를 일정하게 유지코자 하는 경우 M 이 2, 4, 8에 대해 각각 0.3, 0.21, 0.13 (nsec)가 된다. 한편 M 진 PPM에서의 펄스 사이의 간격 δ 의 경우는 M 이 2, 4, 8일 때 실험을 통해 구한 최적의 값 δ^* 이 각각 0.1626, 0.1141, 0.07145 (nsec)가 된다. T_c 가 고정되는 경우에 대한 실험에서는 이 값을 0.7626 (nsec)로 정하여 사용하였으며, 이 값은 $M=2$ 이고 이 때의 최적의 값인 $\delta^* = 0.1626$ (nsec)를 사용할 때의 값과 동일하다^[12,13]. 이 경우, 최소로 가능한 펄스 반복 시간 혹은 프레임 T_f 는

$$0.7626 \times (2^n - 1) = 96.85 \text{ (nsec)} \quad (14)$$

가 되며, 따라서 데이터 전송율은 식 (6)으로부터 아래와 같이 구해진다.

$$T_f^{-1} \approx \frac{\log_2 M \times 10.3}{N_s} \text{ (bps)} \quad (15)$$

그림 7은 해당 M 값에 대한 최적의 δ^* 와 τ_p 를 사용하는 경우 M 의 변화가 성능에 미치는 영향을 보여주며, 이 때 상관기의 적분 구간인 T_c 는 M 에 무관하게 일정한 값 0.7626 (nsec)이다. 여기서는 M 이 2, 4, 8로 변화할 때 신호대잡음비인 “모노사이클 펄스 에너지 대 잡음 전력 스펙트럼 밀도비” E_p/N_0 의 변화에 따른 비트오율 (bit error rate; BER) 성능의 변화를 도시하며, E_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} w^2(t) dt \quad (16)$$

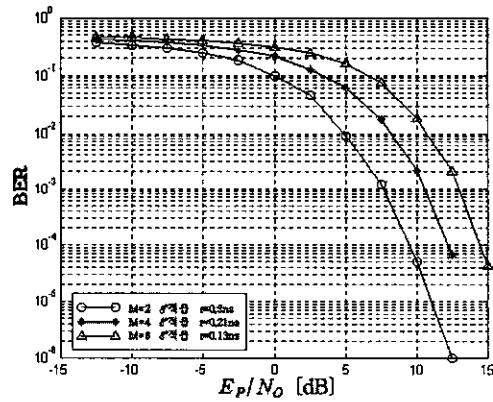


그림 7. M 이 2, 4, 8일 때, 각각 최적의 τ_p 와 δ^* 를 사용한 경우의 비트오율 성능.

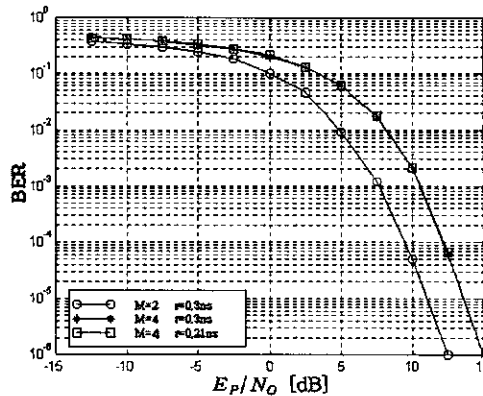


그림 8. $M=4$ 일 때 서로 다른 펄스 폭 τ_p 에 따른 비트오율 성능.

이 그림으로부터 M 이 2 배씩 증가함에 따라 10^{-4} 의 비트오율에 대해 신호대잡음비가 약 2.5 (dB) 씩 악화됨을 알 수 있으나, 전송율의 경우는 10.3, 20.6, 30.9 (Mbps)로 증가함을 알 수 있다.

그림 8은 동일한 M 과 δ 에 대해 펄스 폭의 변화에 의한 성능 변화를 보기 위해서, $M=4$ 이고 $\delta^* = 0.1141$ (nsec), $N_s=1$ 로 동일하나 τ_p 는 0.3 (nsec)와 0.21 (nsec)가 되어 T_c 가 각각 1.086 (nsec)와 0.7626 (nsec)인 경우의 비트오율 성능을 비교한다. 예상한대로 이들 두 경우의 비트오율 성능은 동일하나 전송율은 $\tau_p=0.21$ (nsec)인 경우가 약 1.43배 향상된다. 한편 이 그림에서는 비교를 위해 그림 7에서 도시되었던 $M=2$ 의 경우를 역시 도시하고 있다.

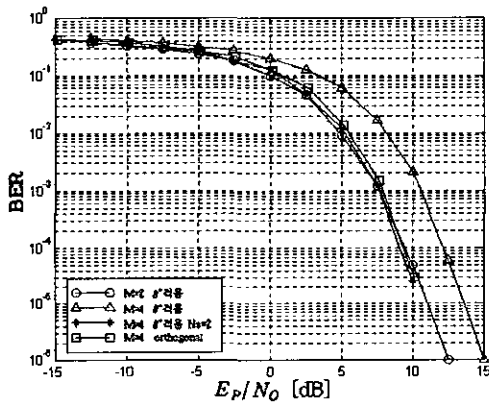


그림 9. PPM 펄스 간격 δ , 펄스 폭 τ_p , 펄스 반복 횟수 N_s 등의 시스템 파라미터의 조합에 따른 IR 시스템의 비트오율 성능 (그래프 설명을 위한 legend에서 위로부터 시스템 #1 - #4이며 이들 시스템에 대한 구체적인 정의는 본문을 참조 바람).

PPM 펄스 간격 δ , 펄스 폭 τ_p , 펄스 반복 횟수 N_s 등의 시스템 파라미터의 조합에 따른 IR 시스템의 성능 변화를 보기 위해, 그림 9에서는 다음에 정의되는 4 가지의 M 진 PPM IR 시스템들에 대하여 비트오율의 변화를 보여준다. 고려된 IR 시스템 가운데 시스템 #1 - #3은 모두 $T_c = 0.7626$ (nsec)로 고정되어 있고 각각의 M 에 대한 최적의 τ_p 와 δ^* 를 사용하나, 시스템 #1은 비교를 위한 $M=2$ 이고 펄스 반복이 없는 경우 ($N_s=1$), 시스템 #2는 $M=4$ 이고 $N_s=1$ 인 경우, 그리고 시스템 #3은 $M=4$ 이나 $N_s=2$ 인 경우를 나타낸다. 따라서 식 (15)로부터 이들 시스템의 전송율은 각각 10.3,

20.6, 10.3 (Mbps)가 된다. 한편 시스템 #4는 $M=4$ 이면서 $\delta = 2\tau_p = 0.42$ (nsec)인 경우이다. 즉 펄스들 사이의 간격이 $w(t)$ 의 유효 펄스 폭과 동일하므로 이 시스템은 펄스들이 전혀 겹치지 않는 직교 (orthogonal) 방식이며,

$$T_f = T_c(2^M - 1) = \delta M(2^M - 1) = 213.36 \text{ (nsec)}$$

이고 따라서 전송율은 $T_f^{-1} = 4.7$ (Mbps)로 크게 감소한다. 그림 8로부터 시스템 #1과 #3의 성능을 동일함을 알 수 있으며, 시스템 #2의 경우 #1에 비해 전송율이 2배 향상되었으나, 비트오율 성능은 악화되었음을 알 수 있다. 또한, 시스템 #4는 #1과 동일한 비트오율 성능을 얻으나 전송율이 2배 이상 악화됨을 알 수 있다.

이들 평가 결과로부터 M 진 PPM IR 시스템의 다양한 시스템 파라미터가 성능에 미치는 영향을 다음과 같은 정리할 수 있다.

- (1) 단위 시간 (상관기의 적분 시간) T_c 가 일정하게 유지되고 각각의 M 에 대한 최적의 펄스 폭 τ_p 와 펄스 간 간격 δ^* 를 사용하는 경우, M 의 증가에 따라 비트오율이 악화되나 데이터 전송율은 비례하여 증가한다.
- (2) 이 때, M 이 증가할 때 펄스 반복 횟수 N_s 를 비례하여 증가하면 비트오율의 악화를 막을 수 있으나, 데이터 전송율은 향상되지 않는다.
- (3) 동일한 M 과 τ_p 에 대해 δ 와 T_c 를 증가시켜 PPM 펄스들 사이의 직교성이 유지되는 경우, 비트오율 성능은 향상되나 전송율은 크게 악화된다.
- (4) M 과 δ 가 동일하게 유지되는 경우, τ_p 가 증가하여도 동일한 비트오율 성능을 보이나 전송율은 악화된다.

IV. 결론

본 논문에서는 최근 들어 실내 무선 LAN이나 군용 무선 통신 시스템을 위한 새로운 대역 확산 전송 방식으로서 큰 관심을 받고 있는 초광대역 시간도약 임펄스 무선 전송 (ultra wideband time hopping impulse radio; IR) 시스템에서 M 진 PPM 방식을 이용하는 경우 시스템의 성능을 평가하였다. 특히 AWGN 채널 하의 동기식 M 진 PPM IR 시스템에서 의사 잡음 부호 발생기와 10진 변환기로

구성된 시간 도약 패턴 발생기를 사용하여 다원 접속 간섭이 배제되는 경우, 심벌 수 M , 모노사이클 펄스 폭 τ_p , PPM에서 펄스 간 간격 δ , 펄스 반복 횟수 N , 등과 같은 다양한 시스템 파라미터의 조합에 따른 성능 변화를 모의 실험을 통해 확인하였다. 본 논문의 이러한 결과는 아직 어떠한 다른 논문에서도 보고되어 있지 않은 결과이며, 실제 비트 오류, 시스템 복잡도 및 전송율 등의 사양에 따라 적합한 M진 PPM IR 시스템을 구성코자 할 때 여러 시스템 파라미터의 결정을 위해 반드시 필요한 근거로 활용될 수 있다는 점에서 연구의 독창성을 찾아 볼 수 있다.

본 논문의 결과는 수신기에서의 완벽한 동기를 가정하였으나 이러한 가정이 맞지 않는 경우 여기서 고려된 시간 도약 패턴 역시 다원 접속 간섭이 발생하며, 따라서 향후 연구 과제로서 이에 대한 M진 PPM IR 시스템의 성능 분석 및 평가가 필요 하리라 판단된다. 특히 실내와 같은 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 이러한 다원 접속 간섭 문제가 더욱 심각하게 발생하며, 이러한 채널 환경에 대한 시스템의 성능 평가 및 성능 향상을 위한 다이버시티 기법 등에 대한 연구 개발이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] R. A. Scholtz, "Multiple access with time-hopping impulse modulation," *Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM '93)*, vol. 1, pp. 447-450, Boston, USA, Oct. 1993.

[2] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio : How it works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.

[3] R. A. Scholtz and M. Z. Win, "Impulse radio," in *Wireless Communications* (S. G. Glisic and P. A. Leppanen Eds.), Kluwer Academic Publishers, 1997.

[4] S. Kolenchery, et al., "A novel impulse radio network for tactical military wireless communications," *Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM '98)*, vol. 1, pp. 59-65, Boston, USA, Oct. 1998.

[5] P. Withington, "Impulse radio overview," Tech. Report available at <http://www.time-domain.com>.

[6] *1st Int'l Ultra Wideband Conference Presentation Material*, Washington D.C., USA, Sep. 1999.

[7] Time Domain Corp., "Time-modulated ultra wideband radio measurement and spectrum management issues," *Presentation Material at National Radio Science Meeting*, Boulder, USA, Jan. 1999.

[8] Federal Communications Commission, *Notice of Inquiry in the Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*, ET Docket No. 98-153, Sep. 1998.

[9] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "On the robustness of ultra-wide bandwidth signals in dense multipath environments," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 51-53, Feb. 1998.

[10] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth signal propagation for indoor wireless communications," *Proc. Int'l Conf. Commun. (ICC '97)*, vol. 1, pp. 91-95, Montreal, Canada, June 1997.

[11] M. Z. Win, F. Ramirez-Mireles, and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth (UWB) signal propagation for outdoor wireless communications," *Proc. Vehicular Technol. Conf. (VTC '97)*, vol. 1, pp. 251-255, Phoenix, USA, May 1997.

[12] Y. Shin, J. Ahn and S. Im, "A performance analysis of ultra wideband time hopping impulse radio communication systems," *Proc. Int'l Tech. Conf. on Circuits/Systems, Computers & Commun. (ITC-CSCC '99)*, Vol. 2, pp. 1346-1349, Niigata, Japan, July 1999.

[13] 안진철, 신요안, "초광대역 시간도약 임펄스 무선 전송 시스템의 성능 분석," *제9회 통신정보종합학술대회 (JCCI '99) 논문집*, 1권, pp. 133-137, 1999년 4월.

[14] Y. Shin and J. Ahn, "Effect of timing jitters in an ultra wideband impulse radio system," *Int'l Symp. Intelligent Signal Proc. & Commun. Syst. (ISPACS 2000)*, Honolulu, USA, Nov. 2000, to appear.

[15] 안진철, 신요안, "초광대역 시간 도약 임펄스 무선 전송 시스템에서 타이밍 지터에 의한 성능

열화," 1999년도 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집, 하권, pp. 1805-1808, 1999년 7월.

안 진 철(Jinchul Ahn)

정회원



1998년 2월: 숭실대학교
전자공학과 졸업 (학사)
2000년 2월: 숭실대학교
전자공학과 졸업 (석사)
2000년 3월:
현대전자(주) 연구원

<주관심 분야> 이동통신 시스템

박 광 회(Kwonghee Park)

정회원



1999년 2월: 숭실대학교
전자공학과 졸업 (학사)
1999년 3월~현재: 숭실대학교
전자공학과 석사과정
<주관심 분야>
이동통신 시스템

신 요 안(Yoan Shin)

정회원

현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 조교수
한국통신학회논문지 제23권 제7호 참조