

다중 경로 채널에서 임펄스 라디오의 특성

정회원 이호준*, 한병철**, 임성빈***

Characteristics of Impulse Radios for Multipath Channels

Ho Joon Lee*, Byung Chil Han**, Sungbin Im*** *Regular Members*

요약

최근 들어 무선 통신 시스템의 급격한 증가로 인해, 한정된 주파수 자원의 효과적인 배분이 큰 문제로 대두되고 있으며, 이의 근본적인 해결 방안으로서, 초광대역 시간도약 임펄스 라디오 시스템이 많은 관심을 모으고 있다. 임펄스 라디오 시스템은 PPM 변조된 데이터를 1 nsec 이하의 매우 짧은 펄스폭을 갖는 가우시안 모노사이클 펄스를 사용하여 전송한다. 따라서 전송 신호는 매우 낮은 전력의 수 GHz에 이르는 초광대역 스펙트럼을 갖게 되며, 기존의 통신 시스템에 거의 간섭을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 본 논문의 목적은 임펄스 라디오 신호의 다중 경로 전파 특성을 파악하고 다중 경로 환경에서 상관기를 사용하는 수신기의 성능을 평가하는데 있다. 이러한 목적을 위하여 본 논문에서는 결정론적인 2-path 모델과 Saleh와 Valenzuela의 통계적 실내 다중 경로 모델을 고려하였다. 2-path 모델에 대하여 이상적인 기준 파형을 사용하는 상관기의 출력이 간접 경로의 지연 시간과 PPM 이진 데이터의 시간 지연의 상대적 차와 간접 경로의 경로 이득에 의존함을 보이고 모의 실험을 통하여 두 모델에 대한 임펄스 라디오의 비트 오류 특성을 관측하였다. 모의 실험 결과에 의하면 임펄스 라디오의 성능은 간접 경로의 지연 시간과 PPM 이진 데이터의 시간 지연의 상대적 차에 따라서 변하는 것이 관측되었다. 또한 기존의 AWGN (additive white Gaussian noise) 채널 환경에서 사용되는 기준 파형을 다중 경로 채널에서 적용할 수 없음을 관측하였다.

ABSTRACT

Recently, the use of wireless communication systems has been rapidly increasing, which results in a difficult problem in efficient control of limited frequency resources. As a way of solving this problem, the ultra wideband time hopping impulse radio system attracts much attention. The impulse radio system communicates pulse position modulated data using Gaussian monocycle pulses of very short duration less than 1 nsec. Thus the transmitted signal has very low power spectral density and ultra wide bandwidth from near D.C. to a few GHz. It is known that it hardly interferes with the existing communication systems because of its very low power spectral density. The purpose of this paper is to characterize multipath propagation of the impulse radio signal and to evaluate the performance of the correlator-based receiver for the multipath environments. In this paper, we consider the deterministic two-path model and the statistical indoor multipath model of Saleh and Valenzuela. For the two-path model the output of the correlator with the ideal reference waveform varies according to the relative difference between the indirect path delay and the time interval of PPM, and to the indirect path gains. In addition, the characteristics of bit error rates is measured for the two models through computer simulation. The simulation results indicate that the performance of the impulse radio system depends both on the relative difference between the indirect path delay and the time interval of PPM, and on the indirect path gains. Furthermore, it is observed that the reference signal designed for the AWGN channel can not be applied to the multipath channels.

* 삼성전자 네트워크 사업부 이동통신 개발팀 연구원

** 엑트통신기술 부설연구소 연구3실

*** 송실대학교 정보통신전자공학부 (sbi@amcs.ssu.ac.kr)

논문번호 : 00278-0720, 접수일자 : 2000년 7월 20일

* 본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구의 지원 (과제번호: 98-0101-12-01-4)에 의한 결과입니다.

I. 서론

최근 들어 급격히 증가하고 있는 디지털 무선 통신 시스템의 사용은 주파수 자원의 관리에 어려운 문제를 초래하고 있다. 그러한 반면에 고속 무선 통신 수요의 증가로 인해, 좀 더 넓은 대역의 주파수 자원에 대한 필요성이 증대되고 있다. 따라서, 한정된 주파수 자원의 효과적인 분배가 큰 문제로 대두되고 있으며, 이러한 문제에 대한 해결책은, 크게 신호의 협대역화와 새로운 주파수 대역의 이용으로 구분할 수 있다. 고속 멀티미디어 데이터에 대한 수요가 갈수록 증가하고 있는 추세에 비추어, 신호의 협대역화는 한계가 있으며, 수십 GHz 이상의 새로운 주파수 대역에 대한 개발과 이용은 여러 기술적인 제약이 있는 것이 현실이다.

이러한 문제에 대한 근본적인 해결책으로, 기존 시스템과 동일한 주파수 대역을 사용하면서 이들 시스템에 거의 간섭을 미치지 않는 새로운 방법을 이용하는 것을 고려할 수 있다. 현재의 무선 통신 시스템은 여타 시스템에 간섭을 주지 않도록 새로운 주파수 대역을 할당하는 방향으로 개발되고 있으나, 초광대역 시간도약 임펄스 라디오 (ultra wideband time hopping impulse radio)의 초광대역성은 이러한 주파수 관리 패러다임의 근본적인 변화를 요구하고 있다.

최근의 발표된 결과에 따르면 임펄스 라디오 송신기에서 방사되는 신호의 전력스펙트럼이 비의도적으로 방사 (unintentional radiation) 되는 전자파의 전력 스펙트럼과 거의 같은, 배경 잡음 이하의 매우 미미한 수준이며^[1], 수백 만대의 임펄스 라디오 송신기가 동시에 동작하여도 여타 통신 시스템에 미치는 영향이 거의 없을 것이라는 연구 결과가 발표되었다^[2]. 이러한 측면에서 본 논문에서 고려하는 임펄스 라디오는 초광대역 시간 도약 무선 전송 기술로서 기존 시스템에 비해 별도의 주파수 할당이 필요 없는 새로운 무선 전송 기술이다.

임펄스 라디오 시스템에서는 1 nsec 가량의 매우 짧은 펄스폭을 갖는 가우시안 모노사이클 펄스 (Gaussian monocycle pulse)를 펄스 위치 변조 (pulse position modulation : PPM)를 이용하여 상향 변조 없이 그대로 기저대역 신호로 전송하고, 수신단에서는 상관기를 통해 복조한다^[3,4,5]. 그리고, 다윈 접속의 측면에서는 시간 도약 PN (pseudorandom noise)시퀀스를 사용한다. 이러한 특징들로

인하여 임펄스 라디오 시스템의 주파수 특성은 PPM 및 시간도약에 의해 평탄화되고, 스펙트럼은 백색 잡음과 유사한 수 GHz 대의 주파수 대역에 걸친 매우 낮은 전력의 초광대역 스펙트럼을 갖게 된다. 이 시스템은 특정 시간 간격 내에서 다수의 사용자가 자신의 도약 패턴에 따라 도약함으로써 높은 비화성을 가지며, 다른 사용자의 신호에 간섭을 주지 않으면서 송수신이 가능하다. 또한 높은 모노사이클 전송속도에 비해 기저대역 신호 처리만을 수행함으로써 시스템의 구현이 비교적 간단하며, 근거리 무선 통신에서 높은 전송 속도와 비화성으로 군사용이나 무선 LAN 및 PAN (personal area network)으로 사용이 용이하다^[5].

임펄스 라디오 시스템에 대한 이론적인 분석 연구는 주로 R. A. Scholtz 연구팀에 의하여 수행되어 왔다^[3,4,5,6,7]. 이들 연구는 부가성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise; AWGN) 채널에서 랜덤한 시간도약 패턴을 사용하는 경우에 대한 비트오율 분석^[3,4,5]과, 실내의 환경에서 임펄스 신호의 전파 특성을 측정하는 연구^[5,6,7] 및 다중 경로 채널에서 이상적인 Rake 형태의 수신기를 사용하는 경우에 대한 성능 분석^[8] 등을 포함한다.

임펄스 라디오는 직접적으로 임펄스 신호를 전송하기 때문에 송수신 시스템 주위의 반사체 및 산란체에 의해 형성된 다중 경로 채널에 의하여 신호의 확산 및 지연이 발생한다. 기존의 임펄스 라디오 수신기는 상관기를 사용하여 수신기에 저장된 기준 파형과 수신 신호 간의 상관값을 계산하고 이것의 부호에 따라서 수신 심볼을 결정하기 때문에 다중 경로 채널의 성분은 상관값의 크기에 영향을 미치게 되어 수신기의 성능을 저하시키게 된다. 본 논문에서는 임펄스 신호의 다중 경로를 통한 전송의 모델링 및 다중 경로 채널 환경 하에서 기존의 임펄스 라디오 시스템의 특성을 알아보려고 한다. 따라서, 본 논문에서는 간단한 결정론적인 2-path 모델과 Saleh와 Valenzuela의 통계적 실내 다중 경로 모델을 기초로 임펄스 라디오 시스템의 성능을 확인하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음절에서는 참고 문헌 [4,5,6]을 바탕으로 임펄스 라디오 시스템의 원리에 대해 정리하고, III절에서는 결정론적인 2-path 모델과 Saleh와 Valenzuela의 통계적인 실내 다중 경로 채널 모델에 대하여 소개하고 임펄스 라디오 시스템의 특성에 의한 고려할 점에 대하여 논의한다. IV절에서는 모의 실험을 통하여 임펄스 라

디오의 다중 경로 특성을 살펴보고 V절에서 결론을 맺는다.

II. 임펄스 라디오 시스템의 원리

1. 가우시안 모노사이클 펄스

임펄스 라디오는 다음의 식으로 모델링되는 가우시안 모노사이클 펄스 $v_{\alpha}(t)$ 를 전송하여 정보를 전달한다.

$$v_{\alpha}(t) = 2A\sqrt{\pi e^{-\frac{t}{\tau}}} \exp[-2\pi(t/\tau)^2] \quad (1)$$

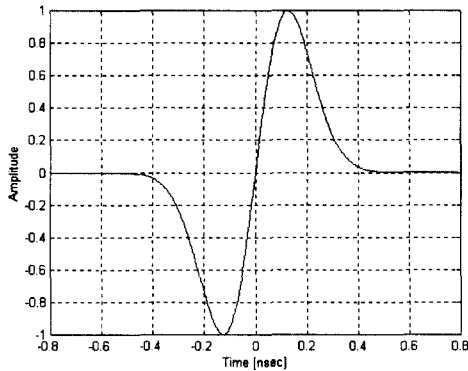


그림 1. 가우시안 모노사이클 펄스 파형.

식 (1)에서 A 는 펄스의 크기이고 τ 는 펄스의 폭을 결정하는 파라미터이다. 일반적으로 τ 는 1 nsec 이하의 매우 작은 값을 사용한다. $v_{\alpha}(t)$ 의 파형을 그림 1에 도시하였다. 이상적인 자유공간에서의 전파되는 펄스의 파형 $v_{\alpha}(t)$ 는 송신기에서 발생한 가우시안 펄스가 송신 안테나 시스템을 통과하면서 안테나 시스템의 미분 특성에 의하여 1차 미분된 형태로 표현된다. 이 신호에 대하여 수신 안테나의 미분 특성에 의하여 수신된 신호는 가우시안 신호의 2차 미분 형태로 나타나며, 이상적인 수신 펄스는 다음과 같이 모델링이 가능하다^[9].

$$w(t) = [1 - 4\pi(t/\tau)^2] \exp[-2\pi(t/\tau)^2] \quad (2)$$

그림 2는 안테나 시스템을 통과한 수신 신호의 파형을 보여 주고 있으며 이 때 식 (2)의 $\tau = 0.4472$ nsec를 가정하였다.

2. 디지털 PPM 변조와 시간 도약 다원 접속 임펄스 라디오 시스템에서는 한 사용자의 전송

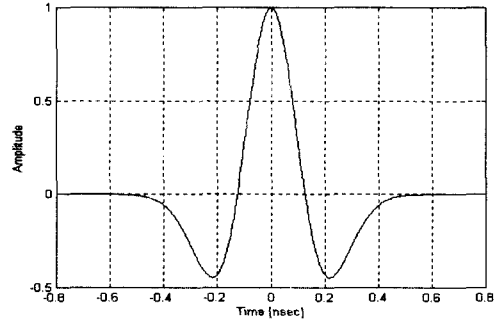


그림 2. 안테나 시스템을 통과하여 수신된 이상적인 수신 펄스의 파형.

신호는 시간 축에서 불규칙적으로 위치한 펄스 열로서 구성되며 하나의 전송 프레임 당 하나의 펄스를 전송하며 각 펄스는 1 nanosecond 미만의 펄스 폭을 갖는다. 길이가 T_f 초인 프레임은 N 개의 슬롯으로 구성되며 각 슬롯의 길이는 T_c 초이다. 하나의 프레임에서 모노사이클 펄스의 위치는 pseudo-random noise (PN) 코드로 구성된 도약 부호에 의해서 이 도약 슬롯 (hopping slots)들 가운데서 하나가 선택되며, 정보 비트의 내용에 따라서 이 도약 슬롯 내에서 펄스 위치가 결정된다. 매우 좁은 펄스 폭과 펄스 위치의 불규칙적인 변화에 의하여 전송 신호는 수 GHz 대역에 이르는 초광대역 특성과 매우 낮은 전력 스펙트럼 밀도를 갖게 된다. 디지털 임펄스 라디오 시스템에서는 위 식 (2)와 같은 펄스가 전송된다고 등가적으로 모델링하며, 이러한 펄스를 이용할 경우 사용자 k 의 전송 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다^[3,4,5].

$$s^{(k)}(t) = \sum_j w(t - jT_f - c_j^{(k)} T_c - \delta d_j^{(k)}) \quad (3)$$

여기서, $w(t)$ 는 전송된 펄스 파형을 나타내며, T_f 는 펄스 반복 시간으로서 일반적으로 펄스폭의 수백 혹은 수천 배의 값을 이용한다. 따라서 임펄스 라디오 시스템의 펄스의 duty cycle은 매우 작은 값을 갖게 된다. 이는 하나의 T_f 내에 각각의 사용자가 시간도약 패턴에 따라 충돌을 최소화하면서 펄스를 전송하기 위해서이다. 임펄스 라디오 시스템에서는 사용자간의 충돌을 방지하고 비화성을 유지하기 위해, 시간도약 패턴을 이용한 다원 접속 방법을 이용한다. 식 (3)에서 $c_j^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 (10진수로 표현된) j 번째 도약 부호이며, T_c 는 우리가 제어 가능한 단위 시간이다. N_k 를 도약 부호가 가

질 수 있는 최대값이라 할 때 $0 \leq c_j^{(k)} < N_k$ 를 만족하며, 다음 펄스와의 충돌을 피하기 위해서는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$N_k T_c \leq T_f \quad (4)$$

식 (4)에서 $N_k T_c \ll T_f$ 이면, 도약을 위한 부호의 수가 적어 여러 사용자의 펄스간에 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, k 번째 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.

식 (3)에서 δ 는 PPM에서 비트 '0'과 비트 '1'을 나타내는 펄스의 시간 간격을 의미하고, $d_j^{(k)} \in (0, 1)$ 는 사용자 k 의 j 번째 이진 정보 비트를 나타낸다. 따라서, $d_j^{(k)}$ 가 0인 경우 도약 슬롯 내에서 추가적인 지연은 없으며, 1인 경우에는 도약 슬롯 내에서 δ 만큼의 시간 지연을 가진 동일 펄스 파형이 전송된다. 따라서, 임펄스 라디오 시스템에서는 다중 접속을 위한 도약 부호의 패턴과 전송되는 정보가 프레임 클럭에 대하여 시간 이동으로 나타나게 된다. 임펄스 라디오 시스템에서는 하나의 데이터 비트를 N_s 개 반복해 보냄으로써, 실제 전송률 R_s 는 식 (5)와 같다.

$$R_s = \frac{1}{N_s T_f} \quad (\text{sec}^{-1}) \quad (5)$$

PPM 방식에서 비트 오류를 최소화하기 위해서는 시간 간격 δ 의 선택을 최적화하여야 한다. AWGN 채널에 대하여 비트 오류를 최소화하는 최적값 δ^* 는 아래와 같이 구할 수 있다^[3,10].

$$\delta^* = \arg \min_{\delta} I(\delta) \quad (6)$$

$$I(\delta) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} w(t)w(t-\delta)dt \quad (7)$$

위의 조건은 단일 사용자 접속한 경우 내지는 다중 사용자 간섭이 없거나 매우 적은 경우에 한하여 최적값임을 제시하고 있다.

3. 상관 복조

AWGN 채널하에서 N_u 명의 사용자가 다원 접속할 경우 수신 신호 $r(t)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} A_k s^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \quad (8)$$

여기서, A_k 와 τ_k 는 k 번째 사용자 신호 $s^{(k)}(t)$ 의 감쇠 성분 및 지연을 각각 나타내고, $n(t)$ 는 평균이 0, 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 AWGN이다. 첫 번째 사용자의 i 번째 비트 $d_i^{(1)} \in (0, 1)$ 만을 고려할 경우, 식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = A_1 w_{bit}(t - \delta d_i^{(1)}) + n(t) \quad (9)$$

$$w_{bit}(t) = \sum_{j=N_s}^{(i+1)N_s-1} u(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau_1) \quad (10)$$

임펄스 라디오 시스템에서 복조 과정은 상관기를 이용하며, 상관기에서 사용되는 기준(reference) 신호 $v_{bit}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다^[3,4,5].

$$v_{bit}(t) = w_{bit}(t) - w_{bit}(t - \delta) = \sum_{j=N_s}^{(i+1)N_s-1} u(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau_1) \quad (11)$$

$$u(t) = w(t) - w(t - \delta) \quad (12)$$

이러한 기준 신호를 사용할 경우, 결정 회로에서는 다음과 같은 이진 결정을 통해 복조를 수행한다^[3].

$$\int_{t \in T_s} r(t)v_{bit}(t)dt > 0 \Leftrightarrow "0" \quad (13)$$

$$\int_{t \in T_s} r(t)v_{bit}(t)dt < 0 \Leftrightarrow "1"$$

여기서 T_s 는 $d_i^{(1)}$ 를 나타내는 모노사이클 펄스가 존재하는 시구간들의 집합이며, 이런 시구간의 개수는 N_s 개 이다.

그림 3은 펄스 라디오 시스템의 상관 복조기의 개략도를 보여주고 있다. 동기 정보를 이용해서 시

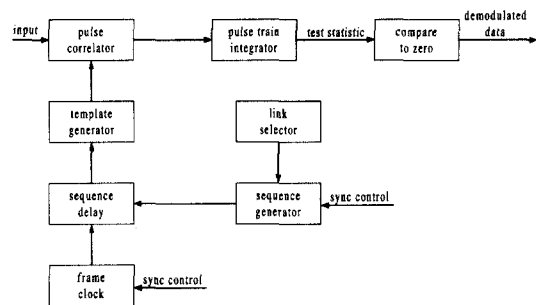


그림 3. 임펄스 라디오 시스템의 상관 복조기 구조^[5].

간 도약 시퀀스가 발생하고, 이를 이용해서 상관기에 입력되는 N_s 개의 기준 신호를 발생시키게 된다. 이를 통해서 N_s 개의 기준 신호와 수신 신호간의 상관값이 출력되고, 이를 N_s 개 단위로 합쳐서, 결정을 내리게 된다. PPM을 위한 시간 간격 δ 는 비트 오류율을 최소로 하는 최적의 값 δ^* 를 식 (6)을 통해 구할 수 있으며, 참고문헌 [10]에 의하면 AWGN 단일 경로 채널에 대하여 최적값은 $\delta^*=0.1697$ nsec 이다. 이 값을 기초로 하여 0.1697 nsec 지연된 신호를 '1'로 지연되지 않은 신호를 '0'으로 하여 PPM 변조하는 경우에 대하여 상관기

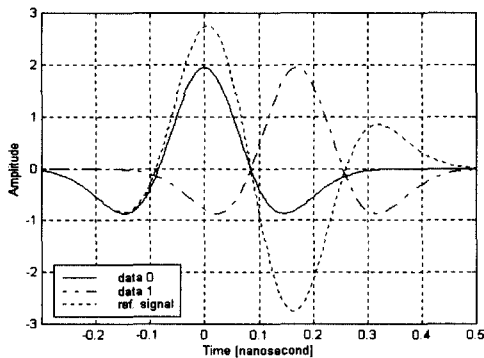


그림 4. 상관기에 입력되는 수신 펄스 '0'과 '1'의 파형 및 상관기의 기준신호

의 입력신호 $w(t)$ 와 기준신호 $x(t)$ 를 그림 4에도시 하였다. 그림 4에 도시된 것과 같이 PPM에서 정보 비트 '0'을 표현하는 $w(t)$ 와 $x(t)$ 는 동일 부호의 영역에서 상관값이 계산되므로 상관기의 출력이 양의 값이 되고, 정보 비트 '1'을 표현하는 $w(t-\delta^*)$ 와 $x(t)$ 는 서로 다른 부호의 영역에서 상관값이 계산되므로 상관기의 출력이 음의 값이 된다.

III. 다중 경로 채널 모델

임펄스 라디오에 대한 다중 경로 채널 특성의 파악에 사용된 다중 경로 채널 모델에 대하여 본 절에서 소개한다. 앞에서 설명한 것처럼 임펄스 라디오는 연속적인 반송파가 아닌 임펄스 신호에 가까운 가우시안 모노사이클 펄스와 PPM를 사용하므로 수신 신호 파형의 왜곡은 임펄스 라디오의 성능 저하에 치명적이다. 이러한 과정을 단계적으로 살펴보기 위하여 결정론적인 2-path 모델 [11]과 Saleh와 Valenzuela가 제시한 통계적인 실내 다중 경로 모

델 [12]을 소개한다.

임펄스 라디오 신호의 왜곡 과정에 대한 이해를 얻기 위하여 먼저 간단한 2-path 모델을 사용한다. 이 모델을 통하여 경로간의 지연 시간과 경로 이득이 상관기의 출력에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 또한 불규칙하게 변하는 실내 다중 경로 무선 채널 환경에서 임펄스 라디오의 성능을 알아보기 위하여 Saleh-Valenzuela 모델을 사용하였다. 현재 사용되는 실내 무선 환경 모델들은 연속적인 반송파의 전송을 가정하고 실험이 수행되고 모델이 수립되었기 때문에 임펄스 열을 사용하는 임펄스 라디오에 직접적으로 적용하기에 부적당하다. 그 중에서 Saleh-Valenzuela 모델이 모델 수립 과정에서 수행된 실험 조건들이 임펄스 라디오의 특성에 가장 부합되는 모델로 판단되어 본 연구에서 사용한다.

1. 2-path 모델

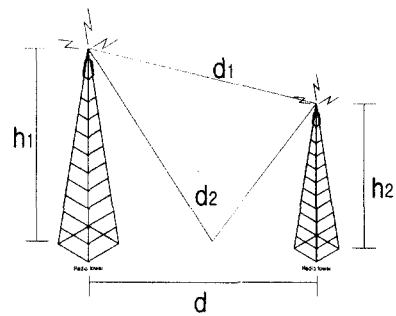


그림 5. 결정론적인 2-path 모델^[11].

임펄스 라디오 시스템은 펄스 열을 사용하여 직접 기저대역으로 정보를 전송하고 수신기에서는 수신된 신호에서 정보의 구분을 δ 값에 의존한다. 따라서 간접 경로를 통하여 수신되는 신호의 시간 지연이 δ 값과 유사한 경우 상관기에서 신호를 검출하는데 상당히 큰 영향을 미칠 것이다. 이에 대한 구체적인 영향을 분석하기 위하여 그림 5에 도시된 직접 경로와 하나의 간접 경로를 갖는 간단한 결정론적인 2-path 모델을 사용하였다. 그림 5에서 송수신 안테나간의 직선 길이는 d 이며 각 안테나의 높이는 각각 h_1, h_2 이다. 직접 경로의 거리는 d_1 , 간접 경로의 거리는 d_2 이다. 간접 경로와 직접 경로간의 거리 차 Δd 는 근사적으로 다음과 같이 안테나의 높이와 안테나 간의 직선 거리로 표현된다.

$$\Delta d \approx \frac{2h_1h_2}{d} \tag{14}$$

따라서, 직접 경로로 전송된 펄스에 대하여 간접 경로로 전송된 펄스의 시간 지연 $\Delta\tau$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\tau = \frac{2h_1 h_2}{cd} \quad (15)$$

여기서 c 는 광속을 나타낸다. 예를 들어, 실내의 경우 송수신 안테나 높이가 반사체에 대하여 9 cm 이고 거리가 1 m 정도 떨어져 있는 경우 약 0.05 nsec의 지연이 발생한다. 이 경우 반사체의 반사 계수가 -1에 근접한 값을 갖는 경우 간접 경로로 전송된 신호는 직접 경로 성분에 대하여 치명적인 간섭을 초래한다. 이것은 IV절의 모의 실험 결과에서 확인할 수 있다.

식 (2)에 나타난 이상적인 수신 펄스 파형 $w_{rx}(t)$ 에 대하여 정규화된 상관 함수는 다음과 같다^[9].

$$R(\Delta t) = \left[1 - 4\pi \left(\frac{\Delta t}{\tau} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} \left(\frac{\Delta t}{\tau} \right)^4 \right] \cdot \exp \left[-\pi \left(\frac{\Delta t}{\tau} \right)^2 \right] \quad (16)$$

앞에서 언급된 간단한 2-path 모델에서 데이터 비트 0의 전송 시에 정확히 수신 동기가 일치된 경우 수신 파형과 기준 파형 간에 펄스 에너지로 정규화된 상관 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$R_0(\Delta t) = \beta_1 - \beta_1 R(\delta) + \beta_2 R(\Delta t) - \beta_2 R(\delta - \Delta t) \quad (17)$$

$$R_1(\Delta t) = -\beta_1 + \beta_1 R(\delta) + \beta_2 R(\Delta t + \delta) - \beta_2 R(\Delta t) \quad (18)$$

식 (17)에서 β_1 과 β_2 는 직접경로와 간접 경로의 경로 이득을 각각 나타내고 Δt 는 앞에서 언급된 경로 차에 따른 시간 지연을 나타낸다. δ 는 PPM에서 데이터 비트 0과 1사이의 시간 지연 나타낸다. 반면에 데이터 비트 1의 전송 시에 상관 함수는 다음과 같다.

식 (17)과 (18)은 수신 신호가 직접 경로와 간접 경로 성분간의 중첩으로 표현되고 상관 함수의 선형성을 이용하면 식 (16)에서 유도할 수 있다. 식 (17)과 (18)에 나타난 것처럼 간접 경로의 성분은 경로 이득 β_2 와 시간 지연 Δt 에 따라서 그 값이 변한다. 시간 지연 Δt 가 감소함에 따라서 β_1 과 β_2 의 부호가 서로 다른 경우 R_0 와 R_1 의 절댓값은 단일 경로의 경우에 비하여 상당히 작은 값을 갖게 되며 따라서 비트 오류 특성은 채널 잡음의 영향을 심하게 받는다.

2. Saleh-Valenzuela 모델

본 논문에서는 Saleh와 Valenzuela가 제안한 실내 다중 경로에 대한 통계적인 모델 [12]을 이용하였다. 이 통계적 모델은 실험 데이터를 기초로 하여 ray의 클러스터링(clustering) 현상을 모델링하고 있다. 클러스터링 현상은 ray들의 도착이 시간적으로 그룹을 형성하며 그 크기는 시간에 대한 지수함수로 감소하며 클러스터내의 ray의 크기 또한 지수함수로 감소한다.

클러스터의 도착 시간과 클러스터 내의 ray의 도착 시간은 독립적인 두개의 Poisson 프로세스로 표현되며 각각의 rate는 Λ 와 λ 이다. l 번째 클러스터의 도착 시각을 T_l 로 표시하고 l 번째 클러스터의 k 번째 ray의 도착 시각을 τ_{kl} 로 표시하면, T_l 과 τ_{kl} 은 다음과 같은 독립적인 지수 확률 밀도 함수로 표현이 가능하다.

$$p(T_l | T_{l-1}) = \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{l-1})], \quad l > 0 \quad (19)$$

$$p(\tau_{kl} | \tau_{(k-1)l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{kl} - \tau_{(k-1)l})], \quad k > 0 \quad (20)$$

채널의 임펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{kl} \delta(t - T_l - \tau_{kl}) \quad (21)$$

여기서, β_{kl} 은 ray의 진폭을 나타내며 크기는 가우시안 분포를 갖는다. mean square 값 $\overline{\beta_{kl}^2}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{\beta_{kl}^2} = \frac{\overline{\beta^2(T_l, \tau_{kl})}}{\overline{\beta^2(0,0)} e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{kl}/\gamma}} \quad (22)$$

여기서, Γ 와 γ 는 각각 클러스터와 ray에 대한 지상수이다. $\overline{\beta^2(0,0)}$ 은 첫 번째 클러스터의 첫 번째 ray의 평균 전력으로 송수신 안테나의 이득 및 거리에 의하여 결정된다.

채널의 특성은 앞에서 언급된 채널의 파라미터들의 값에 따라서 변하게 된다. 따라서, 적절한 채널의 파라미터를 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 임펄스 라디오의 임펄스의 폭이 1 nsec 미만인 점을 감안하고 참고 문헌 [6]에 나타난 결과들을 고려하여 파라미터들을 $1/\Lambda = 2$ nsec, $1/\lambda = 0.5$ nsec, $\Gamma = 33$ nsec, $\gamma = 5$ nsec로 사용하였고 그림 6에 $\overline{\beta_{kl}^2}$ 을 도시하였다.

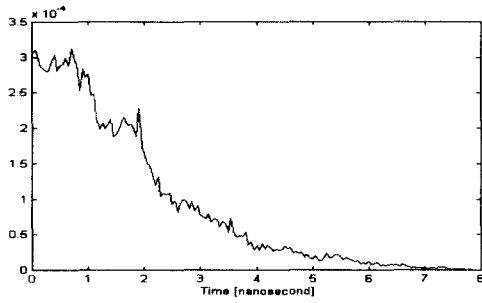


그림 6. 본문의 파라미터에 대한 채널 계수의 mean square 값.

IV. 다중 경로 채널에서 임펄스 라디오의 특성

본 절에서는 앞에서 설명된 채널 모델들에 대해서 임펄스 라디오의 비트 오류율을 측정하였다. 이 모의 실험에서는 2-path 모델에서 송수신기 안테나간의 거리를 1 m로 고정하고 다양한 송수신기 안테나의 높이를 가정하였다. 안테나의 높이에 따라서 간접 경로 성분이 갖는 시간 지연이 다르게 발생한다.

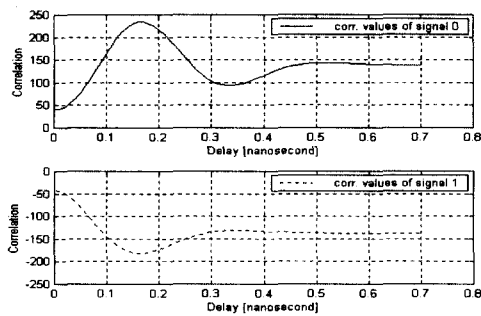


그림 7. 간접경로의 이득이 -0.7인 경우 간접 경로의 시간 지연에 대한 상관값.

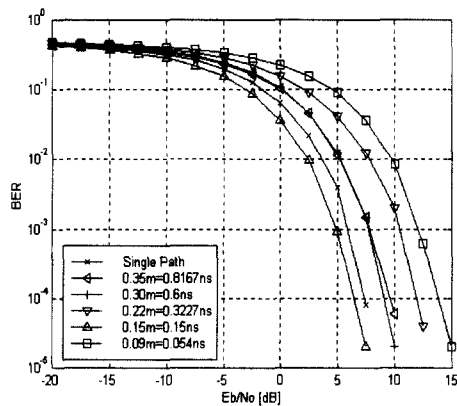


그림 8. 간접 경로의 이득이 -0.7일 때 다양한 안테나 높이에 대하여 Eb/NO에 따른 비트 오류 특성.

그림 7과 8은 간접 경로 이득을 -0.7로 고정된 경우이고, 그림 9와 10은 간접 경로 이득을 0.7로 고정된 경우의 상관기의 출력값 특성과 비트 오류 특성을 도시하였다. 그림 7은 잡음이 없는 상황에서 수신된 신호 파형과 기준 파형간의 상관값을 간접 경로의 지연 시간에 따라서 도시한 것으로 전송된 데이터가 각각 0과 1일 경우를 나누어 보여 주고 있다. 그림 8은 신호 대 잡음비에 따른 비트 오류 특성을 다양한 안테나 높이에 따라서 도시하였다. 안테나의 높이가 낮은 것은 임펄스 라디오의 프로토타입에서 사용되는 안테나의 높이와 송수신 시스템이 데스크탑으로 놓여 있는 경우를 가정하고 있다. 그림 8에서 비트 오류 10^{-3} 을 기준으로 하여 살펴보면, 시간 지연이 0.054 nsec일 때 단일 경로의 성능보다 약 5 dB가 떨어지고 있다. 이는 식 (17)과 (18)에 나타난 것처럼 경로 이득이 음수로서 시간 지연이 작아 질수록 직접 경로로 전송되는 파형에 대한 왜곡이 증가하여 상관값의 절대값을 감소시키므로 성능이 저하된다. 반면에 시간 지연이 0.15 nsec일 때는 단일 경로보다 우수한 성능을 보여주고 있는데 이 현상은 데이터 비트 0이 전송되는 경우 간접 경로의 성분이 기준 파형의 $\delta=0.1697$ nsec와 거의 일치하고 경로 이득의 부호가 음수이므로 수신 파형이 기준 파형과 유사하게 되어 상관값을 증가시키게 된다. 반면에 데이터 비트 1이 전송되는 경우 간접 경로의 성분은 추가적인 시간 지연 δ 를 갖게 되어 기준 파형의 창에서 벗어나게 되어 상관값 계산에 거의 영향을 주지 않는다. 이러한 이유로 단일 경로보다 우수한 성능이 나타난다.

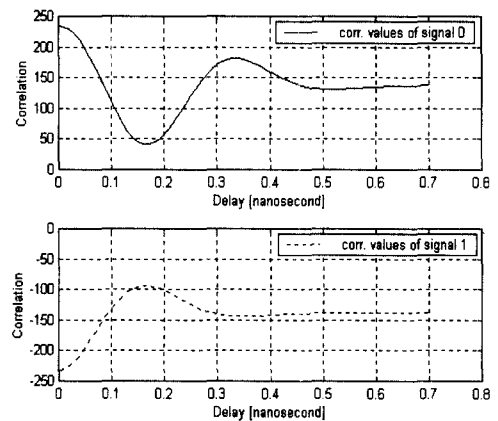


그림 9. 간접경로의 이득이 0.7인 경우 간접 경로의 시간 지연에 대한 상관값.

그림 9는 그림 7과 마찬가지로 간접 경로 이득이 0.7일 때 간접 경로의 지연 시간에 따라서 상관값을 도시한 것으로 경로 이득이 양수이므로 간접 경로의 지연 시간이 적을수록 상관값의 절대값은 증가하며 지연 시간의 값이 $\delta=0.1697$ nsec에 접근할수록 상관값의 절대값은 감소하게 된다. 이러한 이유로 그림 10에서는 그림 8의 결과와 반대로 간접 경로의 지연 시간이 0.15 nsec 일 때 성능이 가장 열등하며 시간 지연이 0.054 nsec일 때는 간접 경로의 이득이 양수이므로 단일 경로의 성능보다 우수하게 나타난다.

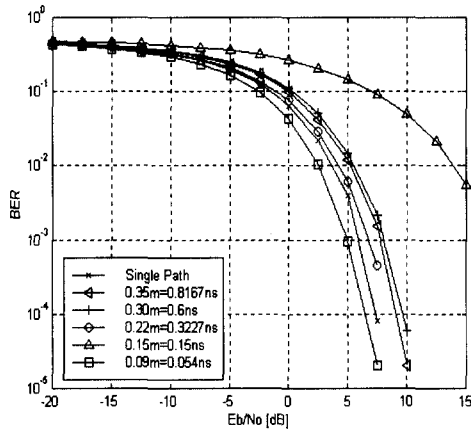


그림 10. 간접 경로의 이득이 0.7일 때 다양한 안테나 높이에 대하여 Eb/N0에 따른 비트 오류 특성.

그림 8과 10에서 가장 열악한 성능을 갖는 경우를 비교해보면 단일 경로에 대하여 그림 8에서는 약 5dB인 반면 10dB이상의 성능 저하를 보인다. 이러한 현상은 그림 7과 9의 상관값을 각각의 지연 시간에서 비교하여 보면, 그림 9 (경로 이득 0.7)에서는 지연시간 0.15 nsec에서 상관값의 절대값의 최저에 놓이게 되는 반면에 그림 7 (경로 이득 -0.7)에서는 상관값의 절대값의 최저값은 지연시간 0 nsec에서 발생한다. 따라서, 간접 경로 이득 및 간접 경로 신호의 시간지연과 PPM 방식의 시간지연 δ 와의 상대적인 관계가 임펄스 라디오 시스템의 성능에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

그림 11은 통계적 실내 채널 모델에 대하여 모의 실험을 수행한 결과이다. 채널 계수는 그림 6에 도시된 평균 제곱값을 갖는 것을 사용하였으며 실내 무선 환경이 천천히 변한다는 가정 하에 채널 계수를 100비트 주기로 갱신하였다. 마름모로 표시된 비트 오류 곡선은 수신기에서 사용되는 기준 파형으

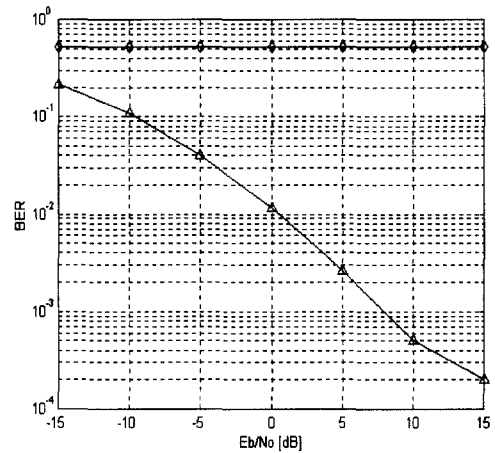


그림 11. 통계적 실내 다중 경로 모델에서 Eb/N0에 따른 비트 오류 곡선.

로 그림 2의 이상적인 수신 파형을 사용하여 식 (12)에 의하여 발생시킨 신호를 이용한 경우이다. 그림에 나타난 것처럼 상관 복조가 불가능함을 알 수 있다. 삼각형으로 표시된 곡선은 수신기의 기준 파형으로 채널 계수가 갱신될 때마다 채널 계수와 그림 2의 파형을 콘볼루션시키고 식 (12)에 의하여 파형 만들어 수신한 경우의 비트 오류 곡선이다. 이 경우 기존의 기준 파형을 사용하는 것에 비하여 개선된 성능을 얻을 수 있으나, 수신기에서 완벽하게 채널의 특성을 파악하고 있어야 하는 단점을 갖고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 경로 채널 환경에서 임펄스 라디오 시스템의 특성을 관찰하였다. 간단한 결정론적인 2-path 모델을 통하여 임펄스 라디오의 상관 복조기의 출력이 경로 이득 및 부호와 시간 지연에 의존함을 보였다. 또한 2-path 모델과 Saleh와 Valenzuela의 통계적 실내 다중 경로 채널 모델에 대하여 모의 실험을 수행하여 그 성능 변화를 관측하였다. 결정론적인 2-path 모델을 이용한 모의 실험 결과에 의하면 임펄스 라디오의 성능은 간접 경로의 지연 시간과 PPM 변조의 이진 데이터간의 시간 지연의 상대적 차 및 간접 경로의 경로 이득에 따라서 변함이 관측되었다. 통계적 실내 다중 경로 채널 모델에 대한 모의 실험 결과에 의하면 AWGN 채널 환경에서 사용되는 기존의 기준 파형을 다중 경로 채널 환경에 적용할 수 없음을 확인하였다. 같

은 상황에서 채널 특성이 반영된 기준 파형을 사용하는 경우 어느 정도의 성능 개선이 이루어짐을 관측하였다. 따라서, 다중 경로 채널에서의 임펄스 라디오의 특성을 개선하기 위해서는 다중 경로 채널에 대한 특성을 추정하고 이것을 효율적으로 이용할 수 있는 새로운 형태의 수신기를 개발하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Time Domain Corp., "Time-Modulated Ultra Wide-Band Radio Measurement & Spectrum Management Issues," *Presentation Material at National Radio Science Meeting, Boulder, USA*, Jan. 1999.

[2] J. Markoff, "FCC Nulls Wider Commercial Use of Radical Radio Technology," *The New York Times (Tech. Section)*, Dec. 21, 1998.

[3] R. A. Scholtz, "Multiple Access with Time Hopping Impulse Modulation," *Proc. IEEE MILCOM '93*, pp. 447-450, Oct. 1993.

[4] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse Radio : How It Works," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.

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

[6] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "On the Robustness of Ultra-Wide Bandwidth Signals in Dense Multipath Environments," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 2, pp. 51-53, Feb. 1998.

[7] M. Z. Win, F. Ramirez-Mireles, and R. A. Scholtz, "Ultra-Wide Bandwidth (UWB) Signal Propagation for Outdoor Wireless Communications," *Proc. VTC97*, pp. 251-255, May 1997.

[8] P. Withington, "Impulse Radio Overview," Technical Report available at <http://www.time-domain.com>.

[9] F. Ramirez-Mireles and R. A. Scholtz, "System Performance of Impulse Radio Modulation," *Proceedings of RAWCON'98*, pp. 67-70, 1998.

[10] 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 & Communication. (ITC-CSCC '99)*, vol. 2, pp. 1346-1349, Niigata, Japan, July 1999.

[11] K. Pahlavan and A. H. Levesque, *Wireless Information Networks*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[12] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela. "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, vol. SAC-5, no. 2, pp. 128-137, February 1987.

이 호 준(Ho Joon Lee)

정회원

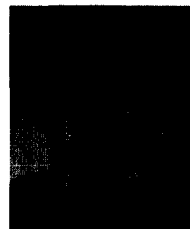


1998년 2월 : 숭실대학교
정보통신공학과 졸업
2000년 8월 : 숭실대학교
정보통신공학과 석사
2000년 7월~현재 : 삼성전자
네트워크 사업부 이동
통신 개발팀 연구원

<주관심 분야> 이동통신, CDMA2000, UMTS, DSP

한 병 칠(Byung Chil Han)

정회원



1999년 2월 : 남서울 대학교
정보통신공학과 졸업
2001년 2월 : 숭실대학교
전자공학과 석사
2001년 2월~현재 : 예트통신
기술 부설연구소 연구3실

<주관심 분야> IMT2000, DSP, CDMA, 통신시스템

임 성 빈(Sungbin Im)

정회원

현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 조교수
<주관심 분야> 통신신호처리, 고출력 증폭기 선형
화

한국통신학회논문지 제23권 제9B호 참조