

논문 2006-43TC-12-2

고속 디지털 샘플러 기술을 이용한 저전력, 저복잡도의 초광대역 임펄스 무선 통신시스템 신호처리부 연구

(Study on signal processing techniques for low power and low complexity IR-UWB communication system using high speed digital sampler)

이 순 우*, 박 영 진*, 김 관 호*

(Soon-Woo Lee, Young-Jin Park, and Kwan-Ho Kim)

요 약

본 논문에서는 저전력, 저복잡도 시스템 구현이 가능한 noncoherent IR-UWB (Impulse-radio-based Ultra Wideband: IR-UWB) 무선 통신 시스템을 위한 신호처리부 기술을 제안한다. 제안된 시스템은 OOK(On Off Keying) 변복조 기법을 사용하며, 에너지 검출 기반으로 임펄스 신호를 복원하는 Noncoherent 방식을 사용한다. 특히, 극초단의 펄스 신호를 디지털 신호로 변환하기 위하여 상대적으로 낮은 기준 클럭을 이용하여 나노초 펄스를 검출해 내는 새로운 고속 디지털 샘플러 기술을 제안한다. 또한, 데이터 프레임 송수신을 위하여 Turyn 코드를 사용하였으며, 에러 정정을 위하여 길쌈코드를 사용하였고, 수신부에서는 비터비 디코더를 사용하였다. 제안된 Noncoherent IR-UWB 시스템의 신호처리부 검증을 위하여, 근거리 고품질의 MP3 데이터 전송 시스템을 설계하였다. 제안된 신호처리부 기술은 FPGA 레벨에서 실제 구현하였으며 각각의 기능 동작을 검증하였다.

Abstract

In this paper, signal processing techniques for noncoherent impulse-radio-based UWB (IR-UWB) communication system are proposed to provide system implementation of low power consumption and low complexity. The proposed system adopts a simple modulation technique of OOK (on-off-keying) and noncoherent signal detection based on signal amplitude. In particular, a technique of a novel high speed digital sampler using a stable, lower reference clock is developed to detect nano-second pulses and recover digital signals from the pulses. Also, a 32 bits Turyn code for data frame synchronization and a convolution code as FEC are applied, respectively. To verify the proposed signal processing techniques for low power, low complexity noncoherent IR-UWB system, the proposed signal processing technique is implemented in FPGA and then a short-range communication system for wireless transmission of high quality MP3 data is designed and tested.

Keywords : UWB, Impulse-radio-based UWB, IR-UWB, Turyn code, high speed digital sampler

I. 서 론

2002년 미국 FCC에서 UWB (Ultra Wideband) 주파수 대역에 대한 상업적 허용을 발표한 이후 국내외에서는 UWB 기술에 대한 다양한 연구를 활발하게 진행 중

이다^[1].

최근까지 초광대역 통신은 크게 세 방향으로 기술 개발이 추진되었다. 우선 고속 데이터 전송을 위한 DS-UWB 방식과 여러 개의 광대역을 동시에 사용하는 방법인 MB-OFDM을 주로 사용하였다^[2]. 2006년 1월에 고속 데이터 전송을 위한 사실상 국제 표준화 그룹인 IEEE 802.15 TG3a에서는, 두 기술에 대한 단일 표준안 제정에 대한 합의점을 찾지 못하고, 현재는 각자 상업화를 추진하고 있다.

* 정희원, 한국전기연구원
(Korea Electrotechnology Research Institute
(KERI))

접수일자: 2006년9월12일, 수정완료일: 2006년12월12일

나머지 방식은 시간영역에서 극초단의 임펄스를 사용하는 초광대역 임펄스 기술 IR-UWB (Impulse-radio-based UWB) 방식이다. 이러한 초광대역 임펄스 기술은 1960년대 초부터 “무반송파(carrier-free)”, “기저대역(baseband)”, 또는 “임펄스(impulse)” 기술로 알려져 왔으며, 통신에서 비화 특성이 좋고, 사용하는 신호가 광대역 특성을 가지므로 고해상도 특성을 가지고 있어 군사용으로 많이 사용되었다.

연속적인 정현파를 사용하는 기존의 무선통신 시스템과는 달리, IR-UWB 통신에서는 시간 영역에서 극초단의 폭을 가지며, 주파수 영역에서 초광대역 주파수 스펙트럼을 갖는 펄스를 사용하기 때문에, 적은 전송 전력을 사용하여도 데이터를 전송할 수 있다. 또한, 극초단의 임펄스를 사용하므로, 정확한 시간 정밀성 특성을 가져 저전력, 저속, 정밀 위치 추적 및 인식 시스템에 활용될 수 있다^[3]. 최근에는 국제 표준화 그룹 IEEE 802.15 TG4a^[4]에서 IR-UWB 기술이 저속 저전력 센서 및 위치 인식 시스템을 위한 핵심 기술로 채택되어, 국내외에서 관련 기술들에 대한 개발을 활발히 진행 중이다.

IR-UWB의 이러한 장점에도 불구하고 임펄스 신호의 나노 초(ns) 단위의 극초단 특성으로 인하여 초광대역 임펄스의 생성, 수신단 RF에서 임펄스의 검출 및 저장 증폭, 디지털 신호처리부에서의 임펄스 신호의 디지털 신호 복원등 IR-UWB 기술의 실용화를 위한 다양한 어려움이 있다. 특히 수신단에서 수 ns 이하의 임펄스를 검출하고, 이를 디지털 신호로 복원하는 기술은 임펄스 통신의 핵심기술이다. 현재까지는 임펄스 신호를 디지털 신호로 복원하기 위하여, 4-6 비트 해상도를 가지는 Flash 타입의 초고속 ADC^{[5][6]}를 사용하고 있다. 그러나 초고속 ADC를 사용할 경우 IR-UWB의 장점인 저전력, 저복잡도 시스템 구현은 현실적으로 어렵다.

본 논문에서는 복잡한 ADC 구조를 사용하지 않고, 시간 지연 소자 및 간단한 디지털 회로만을 이용하여, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 수 있는 고속 디지털 샘플러 방식을 제안하며, 이를 이용하여 저가격, 저복잡도를 갖는 근거리 데이터 통신용 중·저속 IR-UWB 시스템을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 시스템의 복잡도가 낮고, 구현이 상대적으로 단순한 에너지 검출 기반의 Noncoherent IR-UWB 시스템에 대해서 고려하며, 또한, 시스템의 단순화를 위하여 OOK (On Off Keying) 방식의 변복조 방식을 사용한다^{[7][8]}.

본문에서는 상대적으로 주파수가 낮고, 안정된 기준 클럭을 사용하여, DLL(delay locked loop)을 이용하여 규칙적인 위상 차이를 갖는 여러 개의 클럭을 병렬로 배치하여, 수백 MHz의 반복 주파수 기능을 갖는 고속 디지털 샘플러를 이용한 디지털 신호 복원 방법을 구체적으로 설명한다. 또한, 전체 시스템 구성을 위하여 저복잡도를 갖는 Hard decision 기반의 비터비 오류정정 코드를 사용하며, 최소한의 데이터 프레임 구조와 동기화 방식을 제안한다. 제안된 방식의 검증을 위하여, 1Mbps 정도의 데이터 전송 속도를 갖는 MP3 데이터 전송용 Noncoherent IR-UWB 시스템을 설계 하여, FPGA레벨에서 제안된 방식 및 알고리즘을 검증하였다.

II. IR-UWB 신호처리부 구성 및 설계

그림 1에 비동기 에너지 검출 기반의 Noncoherent IR-UWB 시스템에 대한 구성도를 나타내었다. 그림에서 처럼 제안된 시스템은 송신부 및 수신부로 나뉘며 각각 MP3 프로세서, FPGA를 이용한 디지털 신호처리부 및 RF 부로 구성된다.

송신부에 저장된 음원파일 (MP3 데이터형식)은 디지털 신호처리부에서 FEC를 거쳐 OOK(On Off Keying)

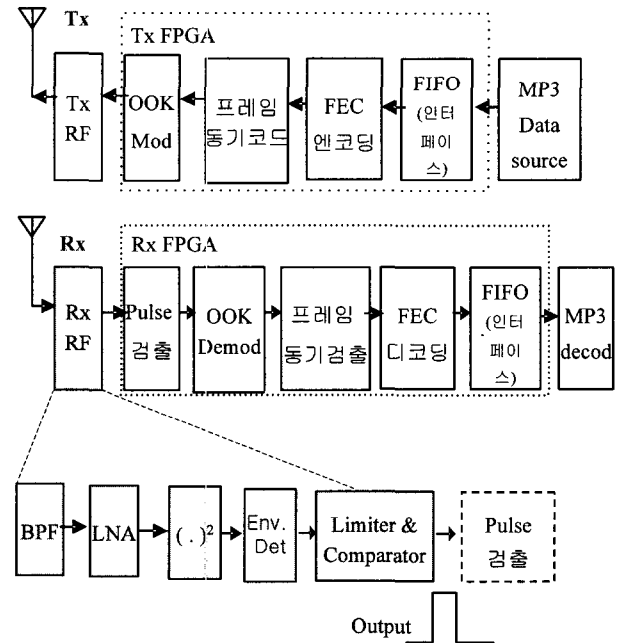


그림 1. 비동기 noncoherent IR-UWB 송신부 신호처리부 및 수신부 RF 구성도

Fig. 1. Block diagram of signal processing part and Rx analog front end for asynchronous noncoherent IR-UWB system.

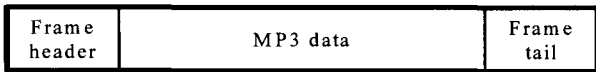


그림 2. IR-UWB 통신 시스템의 데이터 프레임 구조
Fig. 2. Data frame structure of IR-UWB communication system.

방식으로 변조되어 UWB RF 송신단에서 UWB 임펄스 신호로 방사된다. 이 신호는 수신단 RF 부를 거쳐 구형파 펄스를 생성한다. Rx RF로부터 출력된 펄스 신호는 고속 디지털 샘플러로 구성된 구형 펄스 검출단의 입력이 된다. Rx RF의 출력은 대개 수나노 초의 펄스 폭을 가진다. 고속 디지털 샘플러 기반의 펄스 검출 알고리즘을 통하여 검출된 펄스는 디지털 신호로 복원되어, 데이터 프레임 동기 및 FEC 디코딩을 수행한다. FPGA와 MP3와의 인터페이스는 Dual Clock FIFO (First in First out)로 구현되어있고, 인터페이스를 통하여 수신된 데이터는 MP3 플레이어를 통해 재생되어 스피커로 출력된다.

통신은 송·수신 장치간의 일대일 방식으로 이루어지며, 송수신 데이터 프레임 구조는 그림 2와 같이 데이터 프레임 헤더, 음원 데이터 및 프레임 테일로 구성된다.

1. 고속 디지털 샘플러를 이용한 펄스 검출 및 디지털 신호 복원

그림 3에 고속 디지털 샘플러를 이용한 나노 초 펄스 검출 및 디지털 신호 복원 방법을 나타내었다. 그림에서처럼 고속 디지털 샘플러는 상대적으로 낮은 기준 클럭을 사용하여, DLL(Delay locked loop)등을 이용하여 M개의 위상 지연된 클럭을 만드는 과정과 M개의 위상 지연된 클럭과 플립플롭을 이용하여 수신된 아날로그 신호를 디지털 신호로 복원하는 과정으로 구성된다.

제안된 고속 디지털 샘플러 구조의 적용 방법을 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 그림 4는 수신 RF 모듈의 출력 신호를 나타낸다. 출력 신호는 3V 이상의 TTL 레벨 전압 폭이 대략 10ns 정도이다. 이러한 출력이 FPGA 신호처리부에 직접 입력될 경우, 10 nsec의 짧은 펄스 신호를 에러 없이 잡아내기 위해서는 최소한 5 nsec (200MHz 이상) 이하의 샘플링이 요구된다.

이러한 고속 샘플링을 FPGA로 구현하기 위해 DLL 회로가 포함된 Xilinx FPGA의 DCM (Digital Clock Management) 모듈^[9]을 활용하여 그림 5와 같이 기준 클럭 보다 위상이 조금씩 지연된 여러 개의 클럭을 만

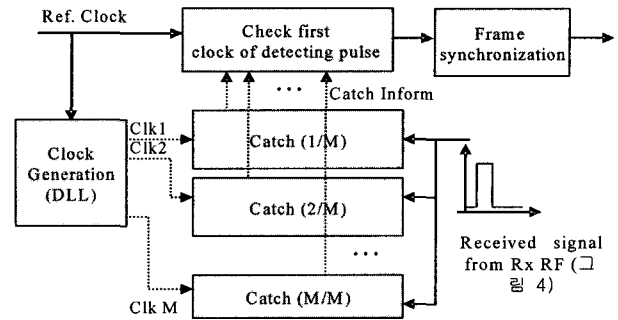


그림 3. 서로다른 위상을 갖는 클럭 파형
Fig. 3. Clock signals with the phase delay of 1/M.

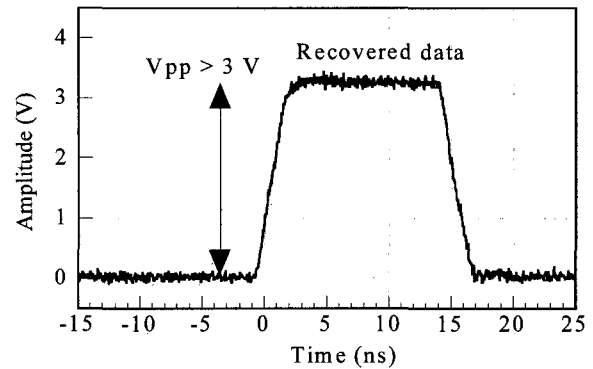


그림 4. RF 수신부 출력 파형
Fig. 4. Output waveform of receiver RF.

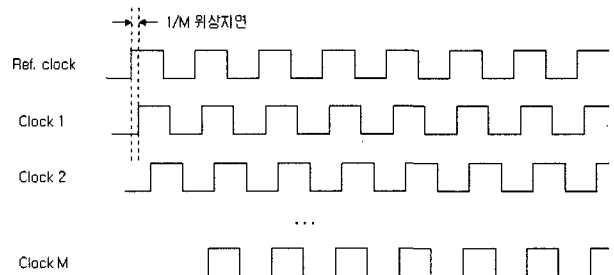


그림 5. 1/M 위상 지연을 갖는 클럭 파형
Fig. 5. Clock signals with the phase delay of 1/M.

들었으며, 각 클럭은 임펄스 신호의 검출을 위한 FPGA 내의 플립플롭의 기준 신호가 되어 고속 샘플링이 가능하다. 위상 지연 간격과 위상 지연된 기준 클럭 수는 그림 4의 RF 수신부에서 생성되는 펄스의 폭에 따라 결정된다.

제안된 고속 디지털 샘플러 방식은 ADC를 사용한 디지털 신호 복원 방법에 비하여, 훨씬 간단하게 구현될 수 있어 복잡도 낮고 및 전력 소모가 아주 적은 장점이 있다.

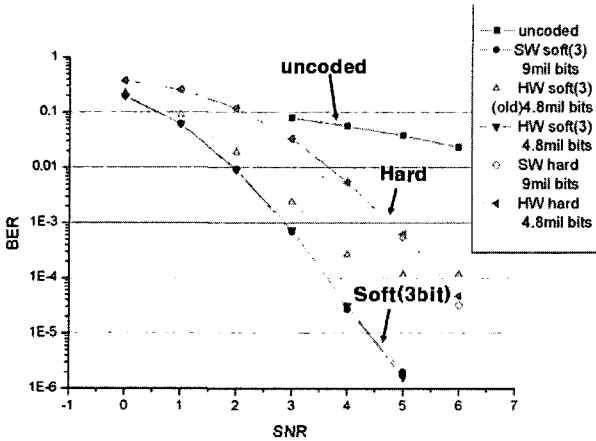


그림 6. 제작된 Viterbi 디코더 (K=7, R=1/2) 의 성능
 Fig. 6. Performance of Viterbi decoder (K=7, R=1/2).

2. 에러정정 코드 (FEC)

데이터 송수신 중 발생할 수 있는 전송 오류를 막기 위하여 본 시스템은 에러 정정 코드를 가지며, 음원 데이터의 원활한 실시간 재생을 위하여 단방향 에러정정 방식 (FEC) 을 택하였다. 사용된 에러 정정코드는 K=7, 코드율 R=1/2의 길쌈 코드로서 복호를 위해 Viterbi 디코더를 사용하였다. 제작된 디코더의 성능은 그림 6과 같다.

시스템 구성을 간단히 하기 위해 hard decision 방식을 사용하였으나, BER 1E-4에서 3 bit soft decision 방식에 비해 약 2dB의 SNR 손실이 발생한다.

3. 데이터 프레임 동기

제안된 시스템에서는 프레임 동기를 위하여, 프레임 헤더 및 테일에 32비트 Turyn 코드를 사용하였다^[10]. 또한 동기 코드는 그림 1, 2에서 처럼 데이터 전송과 중

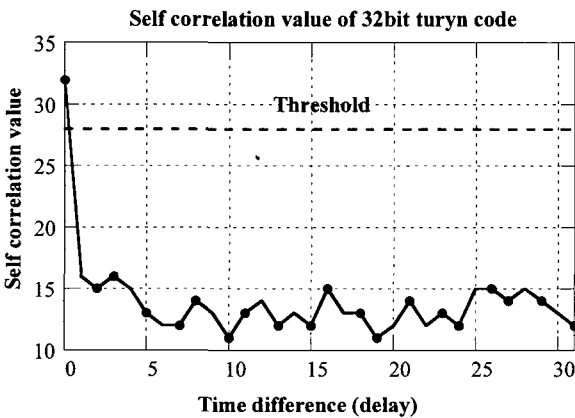


그림 7. 32 bit turyn code의 자기상관 특성
 Fig. 7. Self correlation behavior of 32bit Turyn code.

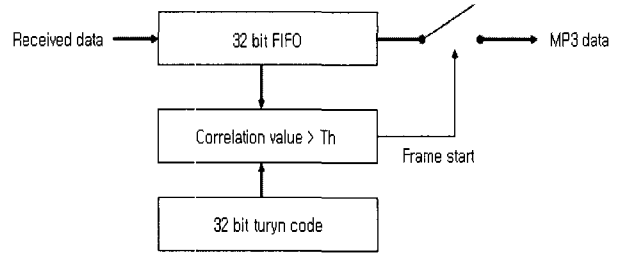


그림 8. 프레임 동기화 블록도
 Fig. 8. Block diagram of frame synchronization.

료를 알리기 위하여 사용하였다.

사용된 32bit Turyn 코드의 자기 상관 값은 그림 7과 같이 delay가 0인 경우를 제외하면 모두 낮은 값을 가지며, 이러한 특성으로 인해 간단하면서도 비트 에러에 강인한 프레임 동기화를 실현할 수 있다.

그림 8에는 Turyn코드를 사용하여 데이터 프레임 동기를 찾는 과정을 나타낸다. 그림에서 처럼, 수신된 데이터의 자기 상관 값을 계산하고 이를 문턱치와 비교하여 데이터 프레임의 동기를 확인하고 데이터 전송 및 종료로 시작하게 된다.

III. IR-UWB 신호처리부 검증

앞 장에서 제시된 Noncoherent IR-UWB 데이터 전송을 위한 신호 처리부 알고리즘의 검증을 위하여, 근거리 고음질 MP3 음원 데이터 전송을 위한 무선 통신 시스템을 구현하였다. RF 송수신 부는, 본 연구원에서 제작된 임펄스 발생기^[11] 및 IR-UWB RF 수신기를 각각 사용하였다.

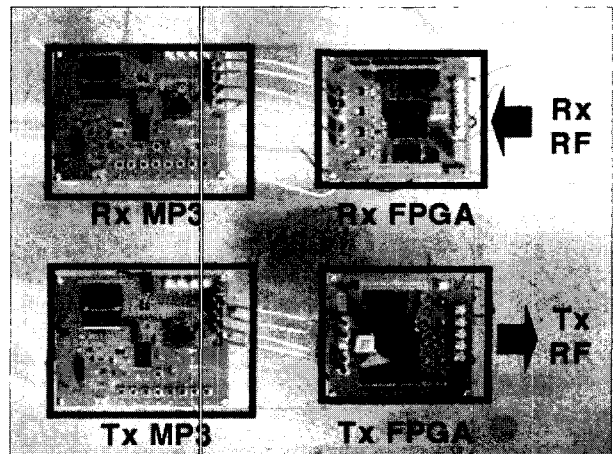


그림 9. 개발된 IR-UWB 통신시스템 신호처리부 사진
 Fig. 9. Photograph of signal processing unit of developed IR-UWB communication system.

표 1. 제안된 비동기 noncoherent IR-UWB 시스템 사양

Table 1. Specifications of asynchronous noncoherent IR-UWB communication system proposed.

항목	사양	비고
Data rate	< 1Mbps @ 5m	중/저속
Band Plan (RF)	3.1-4.9 Ghz	UWB Low Band
Modulation	On Off Keying	단일밴드 이용
FEC	Viterbi	K=7, Rate=1/2
FPGA	Xilinx X2CV 2000	
FPGA Clock 1 (high rate sampling unit)	80Mhz	DCM을 이용하며 최대 640Mhz 샘플링
FPGA Clock 2 (data processing unit)	< 5Mhz	
MP3 Decoder	Telechips TCC76	ARM940T 내장
MP3 data bit-rate	192Kbps 고음질	44Khz sampling

그림 9에 제작된 송·수신단 신호처리부 사진을 나타내었다. 전체 시스템은 그림과 같이 총 4개의 보드로 구현되었고 각각 송신단 MP3 보드, 송신단 FPGA 보드, 수신단 MP3 보드, 수신단 FPGA 보드로 이루어진다.

표 1에는 설계된 IR-UWB 시스템의 사양을 나타내었다. 표에서처럼 시스템은 3.1~4.9 GHz의 주파수 대역을 사용한다.

1. 송·수신단 MP3 보드 구성

송수신단 MP3 보드는 음원 데이터를 송신부에 공급하고, 수신된 음원 데이터를 재생하기 위해서 MP3 디코더, LCD 디스플레이, 플래쉬 메모리 등으로 구성되었다. MP3 디코더는 Telechips 사의 TCC76 칩을 사용하였으며, 이 칩은 MP3 디코더 이외에도 ARM940T, 로컬 버퍼를 비롯한 각종 IP가 내장되어 Firmware 프로그래밍을 통해 LCD, 플래쉬 메모리 제어 및 FPGA와의 인터페이스 신호를 생성 할 수 있다. MP3 보드는 송·수신부 관계없이 동일한 하드웨어로 구성되며 각각의 용도에 따라 Firmware 프로그래밍을 달리하였다.

음원은 192Kbps로 샘플링된 MP3 형식의 데이터를 사용하며, 신호처리부는 384Khz 클럭을 사용한다. 이는 FEC의 코드율 R=1/2 을 고려하여 실시간으로 MP3 데이터의 송수신을 처리하기 위한 값이다.

2. MP3 보드와 FPGA 보드 인터페이스

송신부 MP3 보드의 플래쉬 메모리에 저장된 MP3 음원 파일은 일정한 단위로 한번에(burst) TCC76 내의 로컬 버퍼에 로딩되며, 이후 비트 직렬화(serialization)를 통해 비트 열로 바뀐다. 또한 수신부 MP3 보드에서는 수신된 비트열을 일정 양만큼 워드 단위로 로컬 버퍼에 저장한 뒤 다시 플래쉬 메모리에 저장하여 MP3 파일을 재생한다.

MP3 보드에 사용된 TCC76은 사용자가 사용할 수 있는 한 개의 단일 포트 메모리를 내장하고 있으며, 본 시스템에서는 이 내장 메모리를 FPGA 보드와 MP3보드의 플래쉬 메모리간의 원활한 데이터 교환을 위한 버퍼로 사용하였다.

한편 내장된 단일 포트 메모리의 특성상 동시에 메모리 읽기/쓰기를 할 수 없기 때문에 플래쉬 메모리에 저장된 음원파일을 송신단 FPGA에 공급하거나 수신단 FPGA에서 받은 데이터를 플래쉬 메모리에 저장할 때에 데이터 끊김 현상이 발생한다. 이러한 데이터 끊김 현상 문제를 극복하고, MP3 데이터의 실시간 재생을 위해 그림 10과 같이 송·수신단 FPGA 내에서 dual clock FIFO(First In First Out)를 사용하였다. 또한, 두 개의 클럭 소스로 인한 데이터 동기문제를 해결하기 위해 MP3 소스 모듈과 FPGA 모듈간의 데이터 교환은 비동기식 Handshaking 방식을 이용하였다.

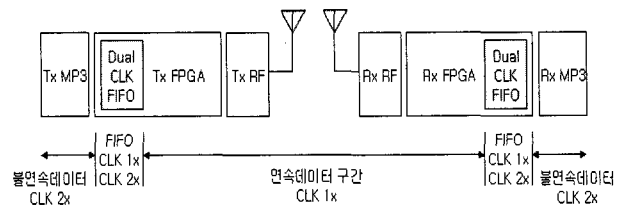


그림 10. Dual clock FIFO를 사용한 실시간 재생 개념도
Fig. 10. Real time implementation using dual clock FIFO.

3. 신호처리부 검증 및 측정 결과

실제 구현된 시스템을 일반적인 사무실 환경에서 시험하였으며, 송수신 거리를 변화시켜 가며, 시스템 특성을 시험하였다. 데이터 전송률은 약 384Kbps으로(에러 정정 코드가 포함된 고음질 MP3 데이터의 비트율) 고음질 MP3를 전송하여, 수신부에서 실시간으로 MP3 데이터를 재생하였다.

그림 11은 로직분석기 Agilent 1682AD로 측정한 송수신부의 디지털 파형을 나타낸다.

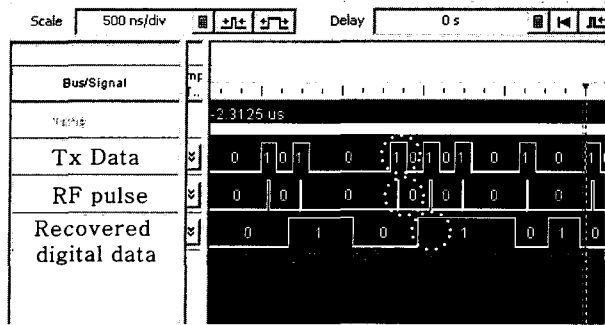


그림 11. 로직분석기로 측정된 데이터 복조 파형

Fig. 11. Measured waveform of IR-UWB signal by logic analyzer.

Tx data는 송신 FPGA 신호처리부의 OOK Mod. (그림1참조)에서 Tx RF로 입력되는 파형을 나타낸다. 그림에서처럼 Return-to-zero의 디지털 신호가 입력된다. RF pulse 신호는 수신 RF부에서 로직 분석기를 이용하여 극초단의 임펄스를 샘플링하여 검출된 것을 보여준다. 측정된 펄스 폭은 대략 10ns정도이다. 이 결과는 그림 4의 측정된 결과와 유사하다. 이 펄스는 80MHz를 사용하는 FPGA 클럭을 사용하여, 본 논문에서 제안한 고속 디지털 샘플러 기술을 이용하여 펄스를 검출하였다.

그림의 Recovered digital data는 고속 디지털 샘플러를 이용하여 복원된 디지털 신호이다. 복원된 신호는 Non-return-to-zero 파형이다.

그림에서 처럼 송신 신호가 완벽하게 디지털 신호로 복원됨을 알 수 있다. 특히, 거리 지연 때문에 송신 신호와 복원 신호 사이는 약간의 시간 지연 차이를 관찰할 수 있다.

IV. 결 론

저가격, 저복잡도를 갖는 IR-UWB 시스템 구현을 위한 단일 밴드 비동기 noncoherent OOK 방식의 IR-UWB 신호처리부를 설계, 구현하였다. 극초단의 아날로그 신호를 간단하게 디지털 신호로 복원할 수 있는 고속 디지털 샘플러 기술을 제시하였고, 데이터 통신을 위한 데이터 프레임 동기 기술 및 에러 정정 기술을 제시하였다. 특히, 상대적으로 안정되고 낮은 클럭을 사용하여, 높은 해상도를 갖는 병렬 고속 디지털 샘플링 기술은 전체 시스템의 복잡도를 매우 단순화 시킬 수 있고, 전력 소모 관점에서도 기존 시스템보다 우수하다.

본 논문에서는 제안된 신호처리부를 근거리 MP3 무선 전송 시스템에 적용하였으나, 제안된 시스템의 장점

들은 컴퓨터 주변기기 데이터 전송등과 같은 다양한 근거리 무선 통신 시스템 개발에 응용될 것으로 기대된다. 특히, 수십 Mbps 정도의 데이터 통신도 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Federal Communications Commission (FCC), Revision of part 15 of the Commission's Rules regarding Ultra wideband transmission system first report and order, ET Docket 98-153, FCC02-48, adopted Feb. 2002.; Released Apr. 2002.
- [2] IEEE 802.15 WPAN high rate alternative PHY T G 3a [Online]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>.
- [3] Ian Oppermann, "UWB Theory and Applications", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [4] IEEE 802.15 WPAN low rate alternative PHY TG 4a [Online]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>.
- [5] R. Thirugnanam, D. S. Ha, and S. S. Choi, "Design of a 4-bit 1.4G samples/s low power folding ADC for DS-CDMA UWB transceivers", Proceedings of the 2005 IEEE Int. conf. on ultra-wideband (ICU 2005), 2005, pp. 536-541.
- [6] R. Blazquez, *et al.* "A baseband processor for pulsed ultra-wideband signals", proceedings of the IEEE 2004 Custom Integrated Circuits Conference, Oct. 3-6, 2004, pp. 587-590.
- [7] S. Paquelet, L.-M. Aubert, and B. Uguen, "An impulse radio asynchronous transceiver for high data rates," proceeding of Joint UWBST & IWU WBS 2004, Kyoto, Japan, May 18-21, 2004, pp. 1-5.
- [8] L. Stoica, A. Rabbachin, and I. Oppermann, "A low-complexity noncoherent IR-UWB transceiver architecture with TOA estimation," IEEE Trans. Microwave theory and techniques, vol. 54, no. 4, pp. 1637-1646, April 2006.
- [9] www.xilinx.com.
- [10] R. A. Scholtz, "Frame Synchronization Techniques" IEEE Trans. Communications, vol COM-28, no. 8, Aug. 1980, pp. 1204-1213.
- [11] J.-W. Lee and Y.-J. Park, *et al.*, "System-On-Package Ultra Wideband Transmitter using CMOS Impulse Generator" IEEE Trans. Microwave theory and techniques, vol. 54, no. 4, pp. 1667-1673, April 2006.

저 자 소 개



이 순 우(정회원)
 2001년 부산대학교
 전자공학과 학사 졸업
 2003년 한국과학기술원
 전기전자과 석사 졸업
 2004년~2005년 Hynix 반도체
 2005년~현재 한국전기연구원
 전기정보망기술연구그룹
 근무.

<주관심분야 : 통신 및 영상 신호처리, VLSI>



박 영 진(정회원)
 1997년 중앙대학교
 전자공학과 학사졸업
 1999년 한국과학기술원
 전기전자과 석사 졸업
 2002년 University of Karlsruhe
 전기전자과 박사 졸업
 2002년 11월~현재 한국전기연구원 전기정보망
 기술연구그룹 근무.

<주관심분야: Impulse radio propagation, UWB image radar, short range automotive radar, digital beam forming, power line communications (PLC)>



김 관 호(정회원)
 1978년 송전대학교
 전자공학과 학사 졸업
 1980년 연세대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 1980년~1983년 한국전력공사.
 1983년~현재 한국전기연구원
 전기정보망 기술연구그룹
 그룹장.

<주관심분야 : 전파통신, 전력선통신시스템, 무선 에너지 전송, UWB 레이더 및 센서>