

다중신호레벨튜닝 기법을 사용한 Mode S 확장스쿼터 수신기의 복조부 설계 및 구현

신희성¹ · 윤준철² · 서종덕¹ · 최상방^{2*}

The Design and Implementation of Mode S Extended Squitter Demodulator with Multi-signal Level Tuning Method

Hee-sung Shin¹ · Jun-chul Yoon² · Jong-deok Seo¹ · Sang-bang Choi^{2*}

¹I.N.Tech Co., Ltd., M2104 technopark IT Center, Songdo-dong, Yeonsu-ku, Incheon 406-840, Korea

²Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

요 약

본 논문은 CNS/ATM의 감시 기술 중 하나인 ADS-B 1090ES 시스템의 수신기 복조부 설계 및 구현에 대한 연구를 하였다. 연구된 복조부는 국제 기술문서 RTCA DO-260B와 EUROCAE ED-129에서 요구하는 모든 성능을 만족하며, 수신감도, 다이내믹 레인지 등의 성능 향상을 위하여 기존에 다중 진폭 샘플 복조 방식 중 베이스라인 다중 샘플 기술을 적용한 단일신호처리 기법을 제안하였다. 또한, 다중신호레벨튜닝 기법을 제안하여 단일신호처리 기법의 단점을 보완하고 송신출력 편차 및 수신기 하드웨어 제작 공정에 따른 균일하지 못한 수신 감도 레벨 차이에 대한 수신을 저하 문제를 최소화 하였다. 측정 결과 제안된 기법을 적용한 수신기는 다이내믹 레인지 0~-87dBm의 성능과 MTL -90dBm이 측정되었다. 이 결과는 ADS-B 1090ES 지상수신 장비의 국제 기술기준에서 요구하는 기준보다 -3dBm 낮은 우수한 성능을 나타냈으며, 이와 유사한 변조방법을 사용하는 시스템에 널리 응용이 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

This paper covered the design and implementation of the demodulation receiver in the ADS-B 1090ES system, which is one of the CNS/ATM's surveillance systems. This researched demodulation performed at the level required by RTCA DO-268B and EUROCAE ED-129. The single signal process method, which applies a baseline multi-sample technique among multi-amplitude sample demodulations, was suggested to improve the quality of the receiver signal, the dynamic range and so on. The suggested multi-signal level tuning method has enhanced the single-signal process method, reducing the unstable reception ratio by the transmit output level difference and manufacturing receiver hardware. The result was that the receiver suggested by the method had 0~-87dBm in dynamic range and -90dBm in MTL. This shows a better performance by -3dBm less than the international standard in ADS-B 1090ES ground receiver equipment. The systems which use a similar modulation method, will be considered to be widely applied.

키워드 : 위성기반항행시스템, 자동종속감시방송, 모뎀, 1090ES 신호처리

Key word : CNS/ATM, Automatic Dependant Surveillance-Broadcast, 1090ES

접수일자 : 2014. 12. 15 심사완료일자 : 2015. 01. 12 게재확정일자 : 2015. 01. 27

* **Corresponding Author** Sang-bang Choi(E-mail:sangbang@inha.ac.kr, Tel:+82-32-860-7417)

Department of Electric Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.3.697>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

항공 교통의 발전에 기여한 레이더는 1934년 미 해군 연구소(L.H Hyland Naval Research Laboratory)의 R.M. Page에 의해서 최초로 항공기 탐지를 성공한 후 약 80여년이 지난 현재에 이르기까지 수많은 기술들이 획기적으로 개발되었고 눈부신 발전을 이루었다[1,2]. 하지만 최근 국제항공운송협회(IATA)가 향후 20년간 항공교통량이 두 배 이상의 규모로 성장할 것으로 예측한 바와 같이[3], 미국과 유럽 등 항공 선진국들은 항공 교통관리의 효율적 운영을 위해 기존 레이더 관제 시스템의 한계를 극복하기 위한 인공위성 기술 등을 융합한 차세대 항행시스템 연구를 추진하고 있다. 또한 국제민간항공기구(ICAO)에서는 급증하는 항공교통량과 안전성 및 효율성을 증대시키기 위해 미국의 FAA가 주도하여 1983년부터 FANS(Future Air Navigation System) 특별위원회를 구성하였고 위성과 데이터링크 통신을 이용하는 CNS/ATM(Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management)의 개념과 기술을 연구해 왔으며[4], 1991년 제10차 ICAO 항행회의에서는 CNS/ATM 개념을 정립하였다[5]. 미국은 2020년까지 모든 항공기에 ADS-B를 탑재하도록 의무화 하였으며, 제13차 ICAO 아태지역 차세대 항행시스템 적용 협력회의에서는 APAC 지역의 국가에서 ADS-B 버전 2를 지원하는 탑재장비 장착 의무화 방안이 추진되고 있다[6].

차세대 항공기 위치탐지 시스템 중에서 가장 주목받고 있는 ADS-B 시스템은 Mode S 데이터 링크를 통해서 항공기의 위치, 고도, 속도 등의 항공관제에 필요한 정보들을 항공기와 지상 관제기관, 항공기와 항공기 사이에 공유하여 항공관제 기능을 향상시키는 기술이며, 기존 레이더 관제시스템의 대체 혹은 이를 보완하기 위한 차세대 항공기 위치탐지 시스템이다[6].

ADS-B의 데이터링크는 1090ES, UAT, VDL 모드4 등이 있으며[7,8], 본 논문에서는 1090MHz 주파수를 사용하는 1090ES 데이터 링크 수신기 설계 및 구현에 대한 연구를 통해서 수신감도, 다이내믹 레인지 등의 핵심 성능 향상을 위해 기존의 복조 기술 중 베이스라인 다중 샘플 기술을 적용한 단일신호처리 기법을 제안하고, 수신기 복조부의 균일한 성능을 나타내기 위해 여러 개의 단일신호처리 모듈을 병렬로 설계한 다중신

호레벨튜닝 기법을 제안한다.

단일신호처리 기법은 기존의 임계값을 사용한 복조 기술과 중심 진폭을 사용한 복조 기술의 문제점인 수신 신호보다 높은 레벨의 간섭 문제와 수신 신호와 비슷한 레벨의 간섭 문제를 극복한 다중 진폭 샘플을 사용한 복조 방식 중 베이스라인 다중 샘플 기술을 적용하여 설계하며, 수신 성능 향상을 위해 두 개의 감쇠기를 이용하여 이상적인 레벨에서 신호처리가 가능하도록 설계한다.

다중신호레벨튜닝 기법은 단일신호처리 모듈을 적용한 수신기의 높은 수신레벨에서 saturation에 의한 수신 성능 감소와 송신출력 편차 및 수신기 하드웨어 제작 공정에 따른 균일하지 못한 수신 감도레벨 차이에 대한 수신율 저하 문제를 최소화하기 위하여 단일신호처리 모듈을 병렬로 구성하고 각각의 단일신호처리 모듈의 임계치를 설정할 수 있도록 설계한다.

단일신호처리 기법과 다중신호레벨튜닝 기법을 ADS-B 1090ES 수신기에 적용하고 각각의 측정 결과를 분석하여 성능을 비교한다. 측정에 기준이 되는 절차는 국제표준 문서인 RTCA DO-260B와 EUROCAE ED-129에서 제시한 방식을 사용한다[8,9].

II. 관련연구

2.1. ADS-B 1090ES 데이터링크

ADS-B의 데이터링크는 ICAO SICASP(Secondary Surveillance Radar Improvement and Collision Avoidance System Panel)에서 제안한 모드 S 확장스퀴터(1090ES), 미국 FAA에서 제안한 범용접속데이터통신시설(UAT ; Universal Access Transceiver)[10], ICAO AMCP (Aeronautical Mobile Communications Panel)에서 제안한 초단파디지털이동통신시설 모드 4(VDL mode 4) 등이 있으며[11], 주요 특성은 표 1과 같다[12].

Mode S 확장 스퀴터(1090ES) 신호는 그림 1과 같이 크게 프리앰블과 데이터블록으로 나뉘며, 데이터블록의 신호는 펄스위치변조(PPM)로 부호화 한다.

프리앰블 구간은 4개의 펄스로 구성되어 있으며, 각각 $0.5 \pm 0.05 \mu s$ 의 길이의 펄스폭을 갖는다. 각각의 펄스는 첫 번째 송신 펄스로부터 $1.0 \mu s$, $3.5 \mu s$, $4.5 \mu s$ 이격되어 있고 프리앰블 구간은 총 $8.0 \mu s$ 의 길이를 갖는다.

표 1. ADS-B 데이터링크
Table. 1 ADS-B datalink

구분	1090ES	UAT	VDL mode 4
주파수 (MHz)	1,090	978	118~136.975
채널	단일채널	다중채널	다중채널
변조방식	PPM	PFSK	GFSK
다중접속	Random Access	Time slot Access	STDMA
Data rate	1Mbps	1Mbps	192.2Kbps
시간 슬롯	N/A	4000 MSO	75

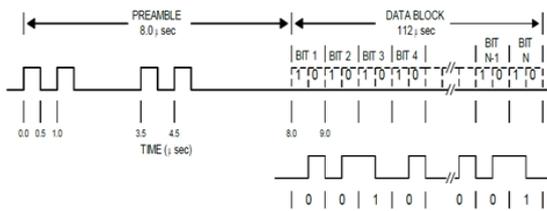


그림 1. Mode S 확장 스쿼터 송신 파형
Fig. 1 1090ES Message Transmission Waveform

데이터블록 구간은 프리앰블 구간이후(8.0 μ s) 시작되며, 하나의 ADS-B 메시지에 112bit(14byte)가 할당된다. 0.5 \pm 0.05 μ s의 펄스폭을 갖는 펄스는 각 비트 위치의 전반부 또는 후반부에 위치하여 전반부에 위치할 경우 '1'을 후반부에 위치할 경우 '0' 값을 나타낸다. 만약 펄스가 어떠한 비트 위치의 후반부에 전송되고 다음 비트 위치의 전반부에 전송된다면, 두 펄스가 결합하여 1.0 \pm 0.05 μ s 펄스폭을 갖는 펄스가 전송된다[8,13,14].

펄스 모양은 하나의 펄스와 메시지 전송의 다른 펄스 사이의 진폭 변동 폭이 2dB를 초과하지 않으며, 펄스 상승시간은 0.05 μ s 미만 0.1 μ s 보다 크지 않고 펄스 하강시간은 0.05 μ s 미만 0.2 μ s 보다 크지 않는다[8].

2.2. 1090ES 복조기술

본 논문에서는 세 가지 확장 스쿼터 복조기술을 설명한다. 확장 스쿼터 복조 기술은 Mode S Narrow-beam 응답기와 TCAS에서 사용하기 위해 개발된 기술에 근거한다[9,15].

2.2.1. 임계값을 사용한 복조 기술

임계값을 사용한 복조 기술은 비트 구간의 1칩과 0칩 중심 진폭을 비교하여 더 큰 진폭을 가진 위치를 비트 값으로 선언하며, 임계값은 프리앰블 기준 레벨 아래 6dBm 으로 정한다. 이는 그림 2에서 나타난 것과 같이 임계값 아래로 수신되는 모든 신호를 무시함으로써 수신 과정에서 낮은 레벨로 입력되는 Mode A/C와 Mode S Fruit 신호의 영향을 제거한다.

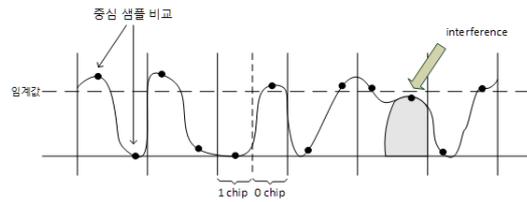


그림 2. 수신 신호와 약한 레벨의 간섭
Fig. 2 Signal plus weaker interference

반면에 그림 3과 같이 수신된 신호 레벨 보다 강한 레벨의 간섭이 있을 경우 즉 1칩과 0칩 모두 임계값 위에 진폭을 가지고 있으면 비트에러가 발생된다. 즉, 임계값을 사용한 복조 기술은 높은 레벨의 중첩 신호에 대하여 큰 단점을 보인다.

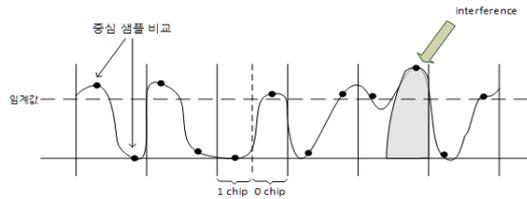


그림 3. 수신 신호와 강한 레벨의 간섭
Fig. 3 Signal plus stronger interference

2.2.2. 중심 진폭을 사용한 복조 기술

프리앰블 펄스를 포함해 모든 1090ES 신호의 펄스는 1~2dB 이내의 균일한 레벨을 가진다[5]. 따라서 프리앰블 검출에서 프리앰블 기준 레벨이 결정되면 데이터 구간의 각 펄스의 레벨을 알 수 있다. 이와 같은 사실로부터 중심 진폭을 사용한 복조 기술은 데이터 구간의 비트를 판별하는데 1칩과 0칩 중심 샘플 레벨에 대하여 \pm 3dBm 이내의 신호를 같은 레벨에 두고 신뢰도를 판정하는 방식이다.

이 방법의 장점은 중첩되는 Mode S 또는 Mode A/C 신호가 프리앰블 기준 레벨 $\pm 3\text{dBm}$ 범위를 벗어나는 경우 비트 오류를 크게 감소시킬 수 있다. 반면에 하나의 비트 구간에 유효한 펄스가 없는 경우와 비슷한 레벨의 중첩신호가 수신되었을 때 비트 오류가 발생하는 단점이 있다. 그림 4는 중심 진폭을 사용한 복조 기술을 나타낸다.

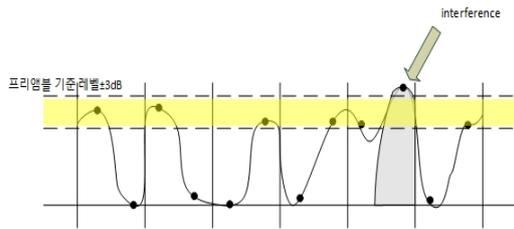


그림 4. 중심 진폭을 사용한 복조 기술
Fig. 4 Use of Center Amplitude

2.2.3. 다중 진폭 샘플을 사용한 복조 기술

다중 진폭 샘플을 사용한 복조는 중심 진폭을 사용하는 방식보다 신호에 대하여 여러 샘플을 기준으로 좀더 정확한 신호 레벨을 판별할 수 있다. 기본적인 복조 과정은 중심 진폭을 사용하는 방식과 동일하나 비슷한 레벨의 중첩신호가 있을 때와 같이 비트를 판별하기 어려운 경우 더 많은 샘플 사용하여 다양한 기준에 따라 비트 오류를 줄일 수 있다. 다중 샘플에 사용되는 샘플 속도는 μs 당 10개의 샘플이고 그림 5는 다중 진폭 샘플을 사용한 복조 기술을 나타낸다.

다중 진폭 샘플 복조 기술은 비트를 판별하는 기준에 따라 베이스라인 다중 샘플 기술, 록업테이블 다중 샘플 기술 및 최소 록업테이블 다중 샘플 기술이 있다. 본 논문에서는 베이스라인 다중 샘플 기술을 적용하여 수신기 복조부를 구현한다.

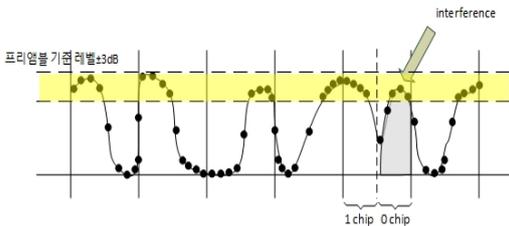


그림 5. 다중 샘플을 사용한 복조 기술
Fig. 5 Multiple sample technique

III. 설계 및 구현

ADS-B 1090ES 수신기는 크게 RF 수신부, 복조부, 메시지 처리부 및 테스트 패턴생성부로 구성되어 있으며, RF 수신부는 1090 MHz 신호를 수신 받아 복조부에서 처리할 수 있는 70 MHz의 IF 신호로 하향 변환을 수행한다. 복조부는 70 MHz IF 신호를 ADC 입력으로 인가하여 16bit 디지털 데이터를 입력받아 신호처리 과정을 수행한다. 복조된 데이터는 메시지 처리부로 전달되어 항공 교통 관리 시스템(ATM)으로 전송하기 위하여 ASTERIX(All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange) Category 021 형식으로 인코딩 된다. 테스트 메시지 생성부는 ADS-B 1090ES 수신기 상태를 점검하기 위하여 1090ES 테스트 메시지를 생성하여 수신기로 제공하고 메시지 처리부는 테스트 메시지 수신여부를 확인하여 수신기의 상태를 판별한다. 이렇게 결정된 수신기의 상태와 ASTERIX 메시지 버전 등을 외부에 전달하기 위하여 ASTERIX Category 023, 247 메시지를 인코딩하여 외부 시스템으로 제공한다. 수신기의 외부 인터페이스는 1090 MHz 신호 수신을 위한 N 타입 케이블 어셈블리, 로컬서비스를 위한 RS-232, ASTERIX 메시지 및 SNMP 메시지 전송을 위한 100base-T 이더넷으로 구성된다.

본 장에서는 신호처리 전 단부 시스템에 대하여 기술하고 베이스라인 다중 샘플 기술을 적용한 단일신호처리 모듈과 수신율 향상을 위해 단일신호처리 모듈을 병렬로 설계한 다중신호레벨튜닝 기법에 대하여 설명한다.

3.1. 신호처리 전 단부 시스템

ADS-B 1090ES 시스템의 수신기는 RTCA DO-260B와 EUROCAE ED-129의 기준에 만족하도록 설계 및 제작한다. 제작에 사용한 주요 부품은 ADS5484(16bit, 170-MSPS ADC), AD8310(Logarithmic Amplifier), XC6SLX100T(FPGA Spartan-6 101,261 Logic Cells) 등으로 구성하고 xilinx ISE 14.5를 사용하여 개발한다. 그림 6은 RF 수신부 및 복조부의 블록도를 나타낸다.

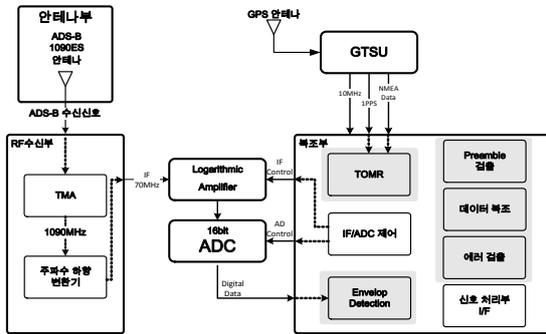


그림 6. RF 수신부 및 복조부
Fig. 6 RF receiver and Demodulator

수신기는 항공기에 장착된 트랜스폰더 CLASS 중 송신출력이 가장 낮은 A0 등급(70W)으로 기준을 두었으며 1090ES 수신기의 RF입력 단에서 수신되는 1090 MHz의 신호(dBm) 전력 레벨은 식 (1)로 계산된다.

$$P_{rx_dBm} = 10\log(P_{out}) + Loss_TX + G_{tx} + Path_Loss + L_{at} + G_{rx} + Loss_RX \quad (1)$$

$$= 10\log(P_{out}) + Loss_TX + G_{tx} - 32.44 + 20\log Fc + 20\log d - 0.009 * R + G_{rx} + Loss_RX$$

P_{rx_dBm} 은 수신기의 RF 입력 수신 전력을 의미하고 P_{out} 는 트랜스폰더의 송신 전력을 의미한다. R 은 송신기와 수신기 사이의 거리, $Loss_TX$ 는 전송 손실, G_{tx} 는 송신 안테나 이득, G_{rx} 는 수신 안테나 이득, $Loss_RX$ 는 수신 손실, L_{at} 는 대기상의 손실을 의미한다. 그리고 수신거리상 손실 $Path_Loss$ 는 식 (2)로 계산된다.

$$Path_Loss = 10\log(\lambda / (4\pi R))^2 \quad (2)$$

송신 전력 P_{out} 는 트랜스폰더 클래스에 의존하기 때문에 송신기에서 출력된 신호의 레벨은 수신기 안테나에서 식 (3)과 같다.

$$P_{rx_dBm} = -50.043 + G_{tx} + G_{rx} - 0.009R - 20\log(R) \quad (3)$$

항공기 송신기의 최소출력은 70W(48.45dBm)로 정

의하였으며 안테나 이득은 0dB로 가정한다. 표 2는 입력 변수 값과 수신기의 수신감도를 나타내고, 표 3은 입력 변수 값과 200NM 거리에 따른 수신기의 최소 수신 전력을 나타낸다.

표 2. 수신기의 수신감도
Table. 2 Receiver Sensitivity

항목	Power	단위
1MHz Bandwidth(BW)	60.000	dBm
Thermal Noise	-174.65	dBm /Hz
수신기 Noise Figure(NF)	4.00	dB
신호 대 잡음비(SNR)	12.00	dB
수신기 구현 손실	1.20	dB
Receiver Sensitivity ($S = -174 + BW(1M) + NF + SNR$)	-97.450	dB

표 3. 200NM 거리에 따른 수신기의 최소 수신 전력
Table. 3 The minimum required power of receiver by 200NM distance

항목	Power	단위
Transponder Power	18.4	dBW
	48.4	dBm
Tx Cable Loss	0.3	dB
Tx Antenna Gain	0	dB
Atmospheric attenuation	-1.8	dBm
Path Loss	-144.562	dB
상수	-32.440	dB
Operation Distance(Km)	-51.373	dB
Operation Frequency(MHz)	-60.749	dB
Range	200	N/M
	370.4	KM
1090MHz Rx Antenna Receiving Power	-97.662	dB
1090MHz Rx Antenna Gain	8	dB
Rx Cable Loss	-0.28	dB
Receiver Receiving Power	-89.942	dB

따라서 거리에 따른 수신기의 최소 수신 전력 -89.942dB와 수신기의 수신감도 -97.45dB에 의해 수신감도 7.51dBm 마진이 있다. 버짓 결과는 그림 7에서 나타낸다.

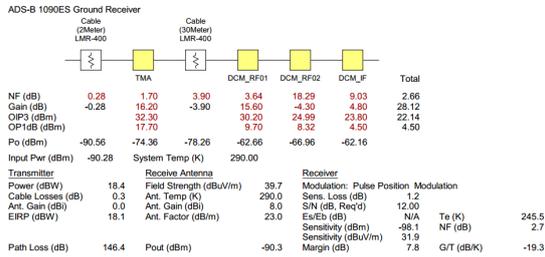


그림 7. ADS-B 1090ES 수신기 버짓 계산
Fig. 7 1090ES budget

3.2. 복조부의 단일신호처리 모듈

단일신호처리 모듈은 1090MHz의 ADS-B RF 신호를 70MHz의 IF 신호로 다운컨버팅하고 로그앰프를 이용하여 포락선 검파를 한 후 ADC를 통하여 16bit 디지털 데이터를 획득한다.

복조부의 단일신호처리 모듈은 그림 8과 같이 프리앰블 디텍터 유닛, 데이터 디코더 유닛, 에러체크 유닛, Leading Edge 감지 유닛 및 Trailing Edge 감지 유닛으로 구성되어 있다.

신호처리 모듈의 동작은 Leading/Trailing Edge 감지 유닛으로부터 시작되며 8.0usec 의 프리앰블 구간을 프리앰블 검출 유닛이 감지하면 데이터 디코더 유닛이 데이터 구간을 해독한다. 데이터 구간 해독이 완료되면 최종 에러체크 유닛이 데이터 구간에 포함된 24bit 패리티 비트(PI)를 이용하여 CRC 검사를 수행하고 데이터 구간에 오류가 없으면 TOMR (Time of Message Reception) 과 함께 해독된 데이터를 출력한다.

일반적으로 신호처리를 위해서 전체구간을 나눠서 처리하지 않고 단일구간으로 처리를 한다. 이때 신호의 포화를 방지하기 위해서 초단에 Attenuator를 사용하게 된다. Attenuator를 사용하면 고속처리가 요구되는 경우 신호가 작으면 왜곡이 발생한다.

Attenuator 제어 유닛은 단일신호처리 모듈에서 사용되고 입력 신호의 감쇄를 통해 회로의 saturation을 방지하여 안정적인 동작과 회로 소자를 보호하는 역할을 한다. 예를 들어 강한 신호를 수신하였을 때 saturation 이 발생하여 수신된 펄스의 Edge가 길어짐에 따라 신호의 두 구간의 기준을 갖는 단일신호처리 모듈은 데이터 복조가 어렵게 된다. 따라서 RF 수신부에 로그앰프를 이용하여 입력 신호의 전력레벨을 감지하고 강한 신호가 수신되었을 때 두 개의 Attenuator를 제어하여 수신 신

호를 감쇄시킨다. 이에 따라 ADC로부터 수신 받은 데이터는 신호처리가 문제없이 기능을 수행할 수 있게 한다.

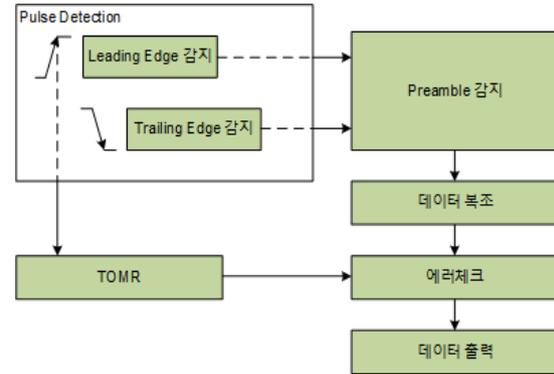


그림 8. 단일신호처리 모듈
Fig. 8 Single Signal Processing module

하지만 매우 높은 레벨의 수신 신호에 대하여 saturation이 발생하게 되면 하모닉 성분 및 펄스 edge가 길어지는 현상 등의 문제로 단일신호처리 모듈이 제대로 동작하지 않아서 수신율이 크게 저하되는 문제가 발생한다.

3.3. 다중신호레벨튜닝 기법

다중신호레벨튜닝 기법은 여러 개의 단일신호처리 모듈을 병렬로 설계하고 각 모듈별로 임계치를 설정하여 신호처리 구간을 수신신호 레벨에 따라 나누는 기법이다. 이렇게 구성함으로써 단일신호처리 모듈의 단점을 보완하고 실제 운용환경에서 송신출력 편차 및 수신기 하드웨어 제작 공정에 따른 균일하지 못한 수신 감도 차이에 대한 수신율 저하 문제를 최소화할 수 있다.

설계된 단일신호처리 모듈은 수신 평탄도 ±1dBm, 노이즈 레벨을 제외한 ADC 해상도 0.15V 및 로그앰프 1dBm 당 0.25V 해상도에 의해 진폭오차가 발생하게 된다. 이와 같은 진폭오차는 국제 기술문서에 명시된 수신 신호의 펄스 진폭변화 임계치인 ±3dBm 이내를 만족하며[9] 진폭오차 및 모듈사이의 중복 해독 구간을 고려하여 설계한다. 그림 9는 다중신호레벨튜닝 기법을 나타낸다.

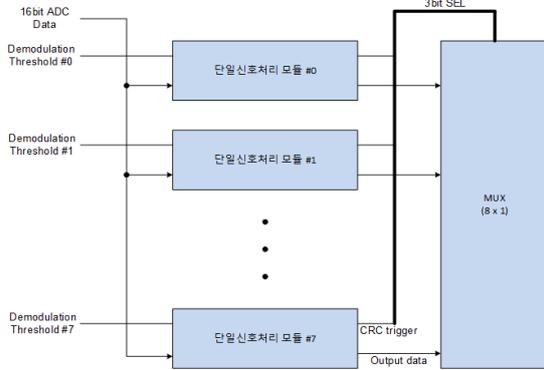


그림 9. 다중신호레벨튜닝 기법
Fig. 9 Multi-signal Level Tuning method

각각 단일신호처리 모듈의 복조 구간을 10dB로 나누고 강한 레벨의 수신 신호 구간 0~20dBm을 하나의 구간으로 처리하여 -90dBm까지 임계치를 설정할 수 있도록 8개의 단일신호처리 모듈을 병렬로 설계한다. 이와 같이 각각의 단일신호처리 모듈은 설정된 범위 내에서 데이터 복조를 한다.

다중신호레벨튜닝 기법의 데이터 복조는 단일신호처리 모듈에서 적용한 베이스라인다중샘플 기술을 기반으로 임계치를 설정할 수 있도록 설계 한다. 그림 10은 데이터 복조 유닛의 실행 개념을 나타낸다.

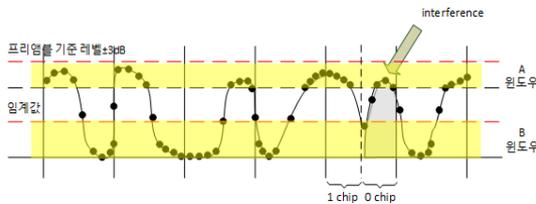


그림 10. 데이터 복조 유닛 실행 개념
Fig. 10 The concept of demodulator

일반적으로 다중 샘플을 사용한 복조 기술은 신호 간섭이 비슷한 레벨에서 발생하였을 때 비트에러를 발생시킬 확률이 증가한다. 하지만 그림 10과 같이 임계치를 설정하여 A, B 두 구간의 윈도우를 나누고 1칩과 0칩의 스코어를 계산하는 방식은 비트에러를 크게 줄일 수 있다.

데이터 복조를 위해 A와 B 두 구간이 설정되면 각 구간 범주에 있는 샘플의 수를 세고 각 칩의 첫 번째와 마

지막 샘플을 제외한 샘플에 2배의 가중치를 두고 계산한다. 이러한 과정을 식 (4)에서 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 1\text{Chip Type A} &= \text{타입 A의 1칩에서 가중 처리된 샘플 수} \\
 1\text{Chip Type B} &= \text{타입 B의 1칩에서 가중 처리된 샘플 수} \\
 0\text{Chip Type A} &= \text{타입 A의 0칩에서 가중 처리된 샘플 수} \\
 0\text{Chip Type B} &= \text{타입 B의 0칩에서 가중 처리된 샘플 수}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

다음으로 식 (5)에 의해 비트 판별과정에서 기준이 될 '0'과 '1'의 점수를 산출한다.

$$\begin{aligned}
 1\text{Score} &= 1\text{Chip Type A} - 0\text{Chip Type A} + 0\text{Chip Type B} - 1\text{Chip Type B} \\
 0\text{Score} &= 0\text{Chip Type A} - 1\text{Chip Type A} + 1\text{Chip Type B} - 0\text{Chip Type B}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

식 (5)의 상대적으로 높은 점수가 비트 값을 결정하고 두 점수가 같을 경우 기본 값 '0'으로 결정한다. 두 점수의 차이가 클수록 높은 신뢰도를 의미한다.

각각의 단일신호처리 모듈에서 데이터 복조가 끝나고 최종 출력이 되는 데이터는 MUX에서 에러체크 유닛의 CRC 트리거 신호를 감지하여 결정한다.

3.4. 신호처리부 구현

신호처리부는 1090ES 지상 수신 장비의 신호처리를 위한 기능을 수행하고 빠른 신호처리를 위하여 고성능의 FPGA(XC6SLX100T)로 구성되며 1090ES로 수신된 신호를 디지털 신호로 복조 및 RF 수신부의 제어를 담당한다.

Logarithmic Amplifier는 Analog Device社의 AD8310을 사용하며, 입력주파수 DC-400MHz, 95dB 다이내믹 레인지 등의 주요 특징을 갖는다. AD8310을 통해 1090MHz에서 70MHz의 주파수 하향 변환된 1090ES 신호의 다이내믹 레인지는 65dBm으로 측정되었다. ADC는 Texas Instrument社의 ADS5474를 사용하며, Sample Rate 400MSPS, 14bit 해상도, 1.4GHz 입력 Bandwidth, 최대 2.2Vpp Differential 입력 전압 등의 특징을 갖으며, ADC에서 신호의 샘플링 클럭은 10MHz (100ns)를 사용한다. 50MHz의 오실레이터를

이용하여 FPGA의 동작 클럭으로 사용한다. 그림 11은 제작한 신호 처리부를 나타낸다.

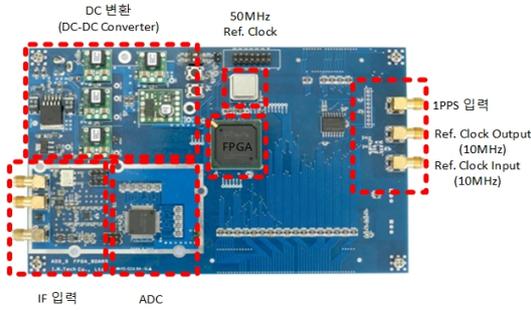


그림 11. 신호처리부
Fig. 11 Signal Processing

IV. 측정 및 고찰

본 장에서는 제작한 수신기가 RTCA DO-260B의 성능 기준을 만족하는지 테스트하였다. 성능측정에는 Agilent사의 4438C 신호발생기, N9030A 스펙트럼 분석기, N8975A 잡음지수 분석기 및 N400A 잡음센서를 이용하였다. 그림 12는 기본 시험 구성도를 나타낸다.

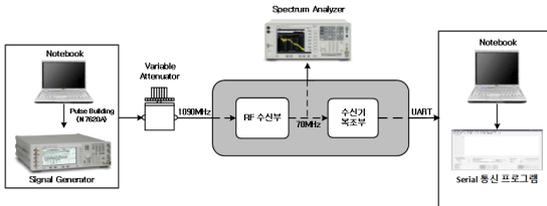


그림 12. 기본 시험 구성
Fig. 12 The principal test configuration diagram

4.1. 단일신호처리 모듈을 적용한 수신기 측정

그림 13은 단일 신호처리 모듈을 적용하여 -20dBm의 강한 신호를 입력하였을 때의 로그앰프 출력파형이다. 그림에서 보듯이 saturation이 발생하면서 edge와 펄스폭이 길어지는 것을 볼 수 있다. 또한, 하모닉 성분에 의한 두 번째 프리앰블 펄스가 묻히게 되어 정상적인 프리앰블 검출이 되지 않으며, 두 번째와 세 번째 프리앰블 펄스 사이에 하모닉 성분이 나타나서 신호처리부의 수신율을 크게 저하시키게 된다.



그림 13. 감쇄된 프리앰블 로그앰프 출력파형
Fig. 13 The reduced pattern of output wave by attenuator

4.2. 다중신호레벨튜닝 기법을 적용한 수신기 측정

다중신호레벨튜닝 기법을 적용한 수신기의 측정을 위하여 다중신호레벨튜닝 모듈은 각각의 단일신호처리 모듈의 임계치를 설정한다.

그림 14는 수신신호의 0~-40dBm 범위에서 10dBm 간격으로 프리앰블 구간을 나타낸다. 그림에서 보듯이 0~-20dBm 구간의 경우 수신된 신호의 레벨 차이는 크지 않다. 따라서 이 구간은 같은 임계치를 적용하고 상대적으로 차이가 나는 -30dBm, -40dBm 구간을 나눠 임계치를 설정한다. 그리고 그래프에서 볼 수 있듯이 강한 레벨의 신호에서 saturation이 발생하여 Low 레벨에서 수치상으로 0까지 떨어지지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 같은 구간 수신신호의 모든 펄스에서 동일한 수신레벨을 보이기 때문에 임계치 설정을 통해서 복조가 가능해진다.

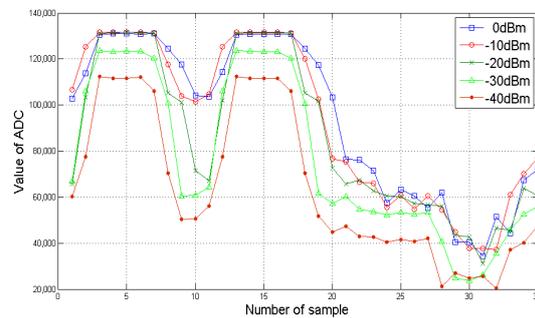


그림 14. 0, -10, -20, -30, -40dBm에서 수신신호
Fig. 14 The receiver signal at 0, -10, -20, -30 and -40dBm

그림 15는 수신신호의 -40~-60dBm 범위에서 10dBm 간격으로 프리앰블 구간을 나타낸다. 각각의 구간을 살펴보면 수신 레벨에 따라 눈에 띄게 레벨 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 -50dBm, -60dBm 수신 레벨을 기준으로 신호처리 구간을 나눠 임계치를 설정한다.

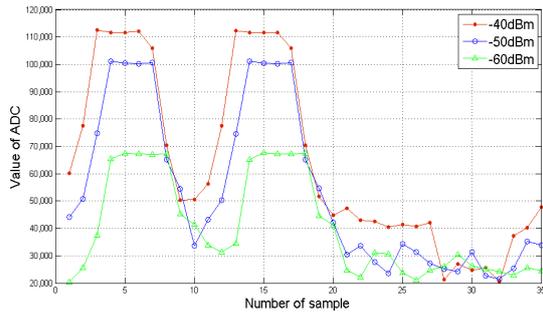


그림 15. -40, -50, -60dBm에서 수신신호
Fig. 15 The receiver signal at -40, -50 and -60dBm

그림 16은 수신신호의 -60~-80dBm 범위에서 10dBm 간격으로 프리앰블 구간을 나타낸다. 각각의 구간을 살펴보면 수신 레벨에 따라 눈에 띄게 레벨 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 -70dBm, -80dBm 수신 레벨을 기준으로 신호처리 구간을 나눠 임계치를 설정한다.

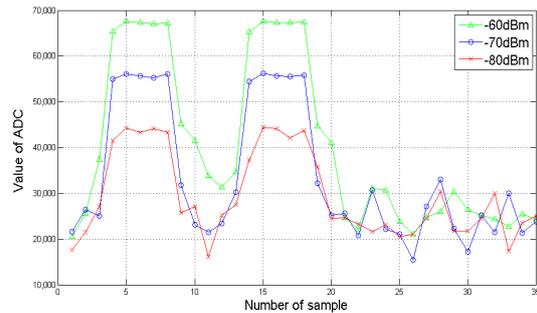


그림 16. -60, -70, -80dBm에서 수신신호
Fig. 16 The receiver signal at -60, -70 and -80dBm

그림 17은 수신신호의 -80~-90dBm 범위에서 -80dBm, -84dBm, -87dBm, -90dBm 수신레벨에서 프리앰블 구간을 나타낸다. 각각의 구간을 살펴보면 -87dBm부터 수신신호에 대한 평탄도가 노이즈레벨에

의해 크게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 수신 신호에 대하여 신호처리가 어렵다는 것을 의미한다. 이에 따라 -80dBm~-87dBm을 포함하는 구간을 나누어 임계치를 설정하고 -87dBm 이하의 낮은 레벨을 포함하여 신호처리 할 수 있도록 임계치를 설정 한다.

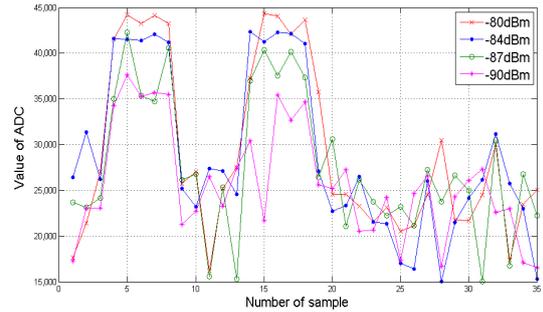


그림 17. -80, -84, -87, -90dBm에서 수신신호
Fig. 17 The receiver signal at -80, -84, -87 and -90dBm

측정결과 다중신호레벨튜닝 기법을 적용하였을 때 0~-87dBm 범위에서 99% 이상의 균일한 수신 성능을 보였으며, -90dBm에서 90% 이상의 수신 성능을 보였다.

4.3. 복조부 수신 성능 비교

그림 18은 단일신호처리 모듈을 적용한 수신기와 다중신호레벨튜닝 기법을 적용한 수신기의 측정결과로부터 수신 성능을 비교하여 나타낸다.

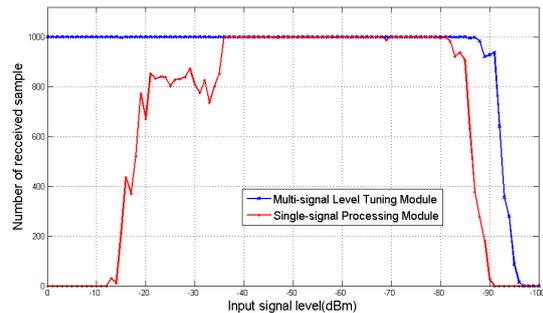


그림 18. 신호처리 측정 결과
Fig. 18 The result of signal process

측정 결과 다중신호레벨튜닝 기법을 적용한 수신기는 단일신호처리 기법을 적용한 수신기와 비교하여 22.14%의 높은 수신율 향상이 있는 것을 확인 하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 ADS-B 1090ES 시스템 수신기의 복조부 성능을 향상시키기 위한 다중신호레벨튜닝 기법을 제안하였다.

수신기의 복조부 성능향상을 위하여 베이스라인다중샘플 기술을 적용한 단일신호처리 기법을 제안하였고 이 기법의 단점을 보완한 다중신호레벨튜닝 기법을 제안하였다. 또한, 다중신호레벨튜닝 기법은 송신출력 편차 및 수신기 하드웨어 제작 공정에 따른 균일하지 못한 수신 감도 차이에 대한 수신율 저하 문제를 최소화 하였다. 그 결과 다중신호레벨튜닝 기법을 적용한 수신기는 단일신호처리 기법을 적용한 수신기와 비교하였을 때 22.14% 수신율이 증가하였음을 확인하였다.

제작된 수신기는 국제 기술문서를 분석하여 모든 기능과 성능을 만족할 수 있도록 제작하였으며, 성능 측정을 통해서 제안된 기법은 국제 기술문서에서 요구한 ADS-B 1090ES 지상 수신 장비 Class A3의 기준인 다이내믹 레인지 0~-84dBm, MTL -87dBm 보다 3dBm 마진을 확보하여 기준에 충분히 만족하는 것을 보였다. 이러한 연구 결과물은 동일한 데이터 링크를 사용하는 차세대 항공관제시스템 및 이와 유사한 변조방법을 사용하는 시스템에 응용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 "MLAT 수신기, 외부연동장치 및 시스템 통제 감시 장치 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] S. S. Lee and J. S. Kang, "Introduction of Radar," in *Radar Engineering*, Boseong Culture Pub., ch. 1, pp. 17-55, 1997.
- [2] J. Y. Cho, J. C. Yoon, C. S. Park, H. D. Park and S. Y. Kang, "Designing and Realizing the Ground Station Receiver Low Noise Amplifier of the Next-Generation Aeronautical Surveillance System", vol. 17, no.10, pp. 2273-2280, 2013.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "PBN Road Map", 2010.
- [4] G. R. Oh, J. C. Kim and G. U. Nam, "CNS/ATM Technology Trend", vol. 2, no. 1, pp. 51-63, 2004.
- [5] National Radio Research Agency, "Study for The Technical Regulation of Broadcasting and Communications Radio Equipment", 2009.
- [6] Korea Airports Corporation, "Automatic Dependant Surveillance Study and Implementation Task Force", 2014.
- [7] ICAO, "Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems", 2002.
- [8] G. R. Oh and J. C. Kim, "VHF Data Link and ADS-B of the CNS/ATM," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 2, pp. 850-853, Nov.2002.
- [9] RTCA, "260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast(TIS-B)", 2009.
- [10] T. H. Cho, "Study and Implementation of Improved Aircraft Tracking Methods for ADS-B System", Ph. D. dissertation, INHA University, Incheon, 2014.
- [11] Garcia, Manuel L., et al. "Test for success: next generation aircraft identification system RF simulation." *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, 2007. ICNS'07. IEEE, 2007.
- [12] Gustavsson, Niclas. "VDL Mode 4/STDMA-a CNS data link." *Digital Avionics Systems Conference*, 1996., 15th AIAA/IEEE. IEEE, 1996.
- [13] J. Y. Cho, "A Study on Design and Implementation the Front End of ADS-B(1090ES) Receiver", M. S. Theses, INHA University, Incheon, 2012.
- [14] RTCA, "181D. Minimum Operational Performance Standards for Air Traffic Control Radar Beacon System/ Mode Select(ATCRBS/Mode S) Airborne Equipment", 2008.
- [15] Schäfer, Matthias, et al. "Bringing up OpenSky: a large-scale ADS-B sensor network for research." *Proceedings of the 13th international symposium on Information processing in sensor networks*. IEEE Press, 2014.v



신희성(Hee-Sung Shin)

한국산업기술대학교 전자공학과 공학사
인하대학교 전자공학과 공학석사
(주)아이엔텍 주임연구원
※관심분야: 항공통신시스템, 컴퓨터 구조, 임베디드 시스템



윤준철(Jun-Chul Yoon)

한국산업기술대학교 전자공학과 공학사
인하대학교 전자공학과 공학석사
인하대학교 전자공학과 박사과정
※관심분야: 항공통신시스템, RF통신, 임베디드 시스템



서종덕(Jong-Deck Seo)

한국산업기술대학교 전자공학과 공학사
(주)아이엔텍 선임연구원
※관심분야: RF통신, 임베디드 시스템 설계



최상방(Sang-Bang Choi)

한양대학교 전자공학과 공학사
University of washinton 공학석사
University of washinton 공학박사
인하대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 컴퓨터 구조, 컴퓨터 네트워크, 무선 통신, 병렬 및 분산 처리 시스템