

VDL Mode-2 물리 계층 설계 및 성능 분석

The Design and Performance Analysis of Physical Layer for VDL Mode-2

최준수*, 이한성*, 김태식**, 김인규**, 김현경**

Jun-Su Choi*, Han-Seong Lee*, Tae-Sik Kim**, In-Kyu Kim** and Hyoun-kyoung Kim**

요 약

본 논문에서는 차세대 항공 데이터 통신에 사용되는 VDR(VHF Data Radio)의 물리계층을 국제규격에 만족하도록 설계하였다. VDR의 주파수 대역은 117.975~137MHz이고, CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 다중 접속방식, D8PSK(Differential Eight Phase Shift Keyed), 25kHz의 채널 대역폭을 사용한다. VDR의 성능 요구 조건인 인접 채널 분리, 수신감도, 혼변조, 수신기의 동작영역, 송신기의 선형성, 불요 방사 전력을 선형 및 비선형 시뮬레이션을 통해 분석 하고, 제작을 위한 방향을 제시하였다. 설계 결과 송신부는 Po1dB보다 5dB 낮은 점에서 사용해야하고, 중간 주파수를 45MHz 선정하여 스푸리어스 발생을 억제해야한다. 수신부는 잡음지수 4.5dB, Es/No 27.52dB로 설계 되었고, 혼변조 성분을 최소화하기위해 저 잡음 증폭기의 IIP3를 +10dBm 이상을 사용하고, 혼합기의 절연특성이 30dB이상이 되어야한다.

Abstract

This paper, describes the VDR physical layer design in VDL Mode-2 in order to meet the requirements of International standards. VDR's frequency band is 117.975~137MHz, and CSMA(Carrier Sense Multiple Access), D8PSK(Differential Eight Phase Shift Keyed), 25KHz's channel bandwidth use. The analysis of the isolated channel from near channels, sensitivity of the receiver, dynamic range of the receiver, linear of the transmitter and energy of spurious for linear and non-linear simulation as a requirement condition of performance of VDR and teaches the course of design. The transmitting power level should be lower than 5dB from Po1dB point and the selected IF frequency is 45MHz to suppress the spurious signals. The receiver designed has 4.5dB of Noise figure, 27.52dB of Es/No, Mixer isolation up to 30dB, IIP3 power of LNA up to +10dBm to minimize the intermodulation.

Key words : VDL Mode2, VHF Data Radio, Performance Analysis of Physical Layer

I. 서 론

국제민간항공기구(ICAO)에서는 지속적으로 증가하는 항공 교통량의 증대로 인해 기존의 통신, 항법,

감시 및 관제 시스템의 변화를 진행하고 있다. 이 중에서 지상과 항공기간의 대표적인 데이터 링크 기술인 ACARS 시스템의 변화를 시도하고 있다.

ACARS 시스템은 항공운항관리통신(AOC)를 용도로 텍스트 기반의 지상과 항공기간의 메시지 전송 서

* 파인텔레콤(Pinetelecom. co. Ltd.)

** 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research institute)

· 제1저자 (First Author) : 최준수

· 접수일자 : 2006년 12월 16일

비스를 제공한다. ARINC와 SITA는 ACARS 시스템을 항공운항관리통신에서 항공교통업무로 활용을 하기 시작하였다. 현재 전 세계는 대부분 이 시스템을 사용하여 무선통신망과 네트워크에 활용하고 있다. 하지만 낮은 데이터 전송률(2.4kbps)로 본격적인 항공 교통 업무에 제한이 있어, VDL Mode2(VHF Digital Link Mode 2)로 변화를 시도하고 있다.[1]

VDL Mode2는 D8PSK(Differential Eight Phase Shift Keyed) 변복조방식, 31.5kbps의 데이터 전송률, 25kHz의 채널 간격, CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 다중접속 방식을 사용하며, 117.975~137MHz의 주파수 대역을 사용한다. VDL M2는 지상과 항공기간의 데이터 링크를 제공하며, 항공운항관리통신과 항공교통관제에 사용된다.[2]

표 1. VDL Mode 2 송수신기 성능 요구 항목
Table 1. VDL Mode2 Transceiver Requirement

구분	항 목
시스템	동조 주파수 대역 (117.975~137MHz)
	변복조 방식 (D8PSK)
	채널 변경시간 (100ms 이내 해당 채널 동조)
	송신 전환시간 (DO-186A 참조)
	수신 전환시간 (DO-186A 참조)
	채널 감지 기능 - CSMA 기능을 수행 가능
수신부	수신감도 ($-98\text{dBm}@10^{-3}\text{BER}$)
	CW 간섭조건에서의 수신 성능 (DO-186A 참조)
	스퓨리어스 방사 전력 (DO-186A 참조)
	대역외의 간섭조건에서의 수신 성능 (DO-186A 참조)
	동작영역 ($-98 \sim -7\text{dBm}$)
	최대 입력신호 ($+20\text{dBm}$ 에서 수신기 고장 여부)
	동일 채널에 의한 간섭 조건 (DO-186A 참조)
	FM 방송주파수에 의한 혼변조 (DO-186A 참조)
	대역에 포함 된 신호에 의한 혼변조 (DO-186A 참조)
	Symbol Rate Capture Range (Symbol Offset : $\pm 50\text{ppm}$, $-87\text{dBm}@10^{-3}\text{BER}$)
	Frequency Capture Range (Frequency Offset : $\pm 96\text{Hz}$, $-98\text{dBm}@10^{-3}\text{BER}$)
송신부	채널 전송속도($31.5\text{Kbps} \pm 0.005\%$)
	송신출력 (15Watt 이상)
	송신출력 상승 및 하강시간 (DO-186A 참조)
	스퓨리어스 방사 조건 (DO-186A 참조)
	정제파비 (DO-186A 참조)
	심볼 배열 에러 (EVM 6% 이하)
	주파수 안정도 ($\pm 5\text{ppm}$)
인접채널 방사 (DO-186A 참조)	

VDL Mode2 송수신기의 성능 요구 조건은 RTCA의 문서인 DO-186A MOPS(Minimum Operational

Performance Standards)과 DO-224A MAPS(Minimum Aviation System Performance Standards)에 명시되어 있다.[3]

VDL Mode2 시스템은 통신 관리를 수행하기 위한 CMU와 데이터 송수신을 하기위한 VDR로 구성된다. CMU(Communication Management Unit)는 VDL Mode2에서 지상국과 항공기 사이에서 데이터를 송수신하는 데에 필요한 제어를 수행한다.

본 논문에서는 MOPS와 MAPS에서 요구하는 VDL Mode2용 VDR의 물리계층 설계 및 제작에 필요한 성능을 분석한다.

II. VHF Data Radio 구조

VDR의 시스템 구성은 그림 1과 같다.

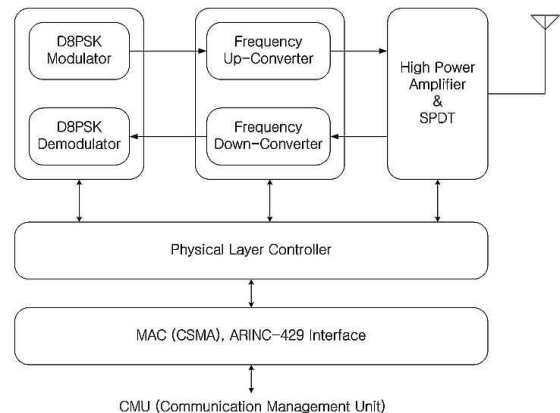


그림 1. VDR(VHF Data Radio) 구성도
Figure 1. VHF Data Radio Block Diagram

25W의 송신 출력과 송수신 스위치를 담당하는 블록, 117.975~137MHz의 고주파 신호를 중간 주파수 대역으로 변환하기 위한 상 하향 변환기, D8PSK 신호를 변조 혹은 복조하기 위한 블록과 물리계층 제어기(Physical Layer Controller), CSMA 알고리즘과 통신 관리 장치(CMU)와의 ARINC-429 인터페이스를 제공하기 위한 제어기로 구성된다.

고출력 증폭기는 상향 변환기로부터 입력되는 D8PSK 신호를 25W의 송신 출력을 제공되도록 증폭한다. A급 증폭기는 동작점이 활성영역의 중간에 위치하여 선형성은 양호하나 항상 전력이 소모되며, 효율이 좋지 않다. 반면 B급 증폭기는 Crossover

distortion이 발생하고, 전력 소모는 A급 증폭기에 비해 효율이 좋다.

송, 수신 스위치는 송신 시 수신기의 저 잡음 증폭기에 영향이 없도록 높은 절연(Isolation) 특성을 가져야 하며, 송수신 전환 시간에 영향을 고려해야 한다.

상향 변환기는 선형성과 스퓨리어스 방사조건, 주파수 안정도를 고려해 설계해야 한다.

하향 변환기는 동작영역(Dynamic Range)을 만족할 수 있는 저 잡음 증폭기와 자동이득 제어회로, 주파수 안정도, 혼변조 등을 고려해 설계해야 한다.

III. 물리계층의 구성

VDR의 D8PSK 변복조기를 제외한 물리계층의 구성은 그림2와 같다.

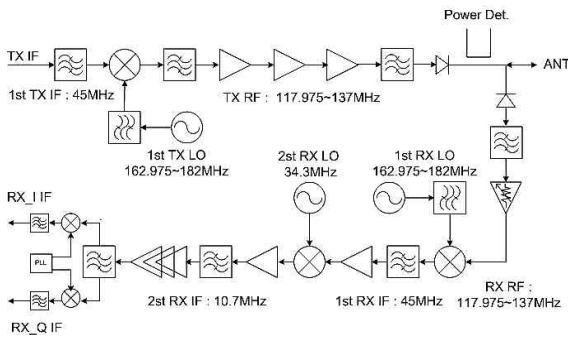


그림 2. 물리계층 구성도
Figure 2. Physical Layer Block Diagram

VDR은 반이중 통신 방식을 사용한다. 송신 모드에서 수신기의 저 잡음 증폭기를 보호하고, 송수신 전환 시에 빠른 동작을 보장하는 PIN 다이오드 스위치를 사용하였다.

수신부의 저 잡음 증폭기는 잡음지수(Noise Figure)가 작고, 자동이득 제어에 의해 충분한 동작영역(Dynamic Range)이 확보될 수 있도록 이득 20dB, 잡음지수 2dB, IIP3 +10dBm인 부품을 선정하였다.

사용 주파수 대역을 첫 번째 중간 주파수로 하향 변환을 하기위해 High Side Injection 방식의 믹서를 사용하였다. 첫 번째 중간 주파수는 45MHz로 선정하여, 송신기와 수신기가 공유 할 수 있도록 하였고, 또한 송신 시 누설 된 국부발진 주파수 성분을 안테나 출력 전에 충분히 제거 되도록 25.975MHz의 주파수 간격을 두었다.

첫 번째 혼합기를 통과한 45MHz의 중간 주파수는 역압특성이 좋은 MCF (Monolithic Crystal Filter)을 사용하여 스퓨리어스 성분을 제거하고, 원하는 신호만 추출하였다. 두 번째 중간주파수는 10.7MHz로 선정하였고, 이 중간 주파수에는 90dB의 제어 범위를 갖는 증폭기를 사용하였다. 10.7MHz의 중간주파수는 D8PSK 복조기로 입력된다.

송신기는 D8PSK 변조기로 45MHz의 중간 주파수로 입력된다. 입력 된 중간 주파수는 송신 국부 발진 주파수와 혼합되어 상향 변환된다. 상향 변환 시 발생하는 송신 국부 발진주파수 성분, 중간 주파수 성분들을 제거하기 위해 대역 통과 필터를 사용하였다. 송신기의 선형성을 유지하기 위해 각 블록의 증폭기는 PO1dB 보다 5dB 낮게 사용하였다. 또한 AB급 증폭기로 설계를 하여, 효율 대비 선형성을 최대화 하였다. 고출력 증폭기 뒷단에는 5-Pole 저역 통과 필터를 삽입하여, 스퓨리어스 성분을 제거하였다.

IV. 송신부 설계 및 분석

VDR의 송신부는 25W의 출력, 31.5kbps±0.005%, ±5ppm의 주파수 안정도를 가져야하며, EVM=6% 이하이다. 또한 MOPS와 MAPS에 명시된 스퓨리어스 방사기준을 만족해야하며, 반이중 통신방식을 사용하기 때문에 송신출력 상승 및 하강시간 기준을 만족해야한다.

그림3은 규격을 만족하기 위한 송신기 블록도이다. D8PSK 변조기로부터 45MHz, -20dBm의 크기를 갖는 신호를 입력 받는다. 입력 된 신호는 초단 중간 주파수 증폭기에 의해 출력을 증가 시킨 뒤, 역압 특성이 좋은 대역 통과 필터를 사용해 발생된 스퓨리어스와 인접채널의 전력을 최소화 시킨다. 혼합기에 인가되기 전에 스퓨리어스를 제거함으로 통과 후 발생하는 스퓨리어스를 최소화 시킬 수 있다. 혼합기를 통과 된 RF신호는 다단 증폭된 후 고출력 증폭기에 인가된다.

VDR의 송신기는 D8PSK 변조방식을 사용하기 때문에 선형성이 중요한 요소이다. 그렇기 때문에 각 증폭기는 P1dB에서 4~5dB 이하의 선형구간을 사용해야한다. 송신기의 전체 이득은 다음과 같다.

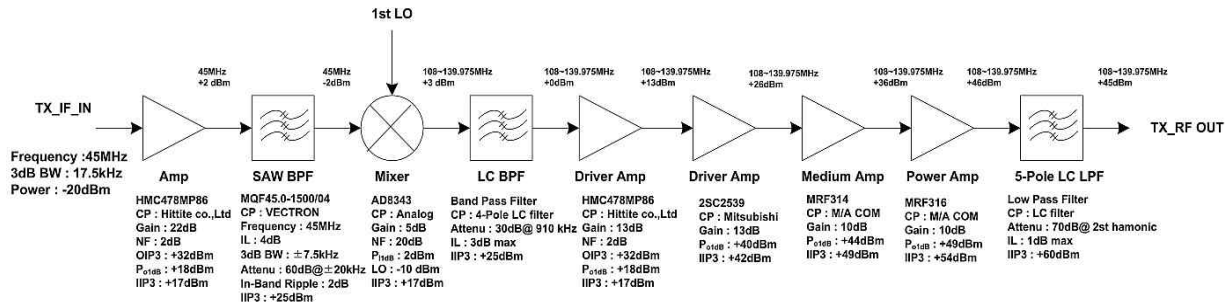


그림 3. 송신기 상세 블록도
Figure 3. Transmitter Detail Block Diagram

V. 수신부 설계 및 분석

$$G(\text{total}) = G_1 + G_2 + G_3 + \dots = 65\text{dB} \quad (1)$$

채널 폭이 25kHz, 온도 20°C, 입력 신호 크기를 -20dBm이라 할 때, 출력전력은 +45dBm이다. 뒷 단의 SPDT 스위치의 손실 1dB를 고려하면, 최종 안테나 단에서의 출력은 +44dBm이다.

송신기 전체 잡음지수는 다음과 같다.

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 \times G_2} + \dots = 5.04\text{dB} \quad (2)$$

D8PSK 복조기는 표2에서 보듯이 수신기의 잡음지수를 10dB라 가정 할 때 $E_s/N_0=21.77\text{dB}$ 가 확보되면 수신기의 요구사항인 $-98\text{dBm}@10\text{-}3\text{BER}$ 을 만족한다.

본 논문에서는 D8PSK 복조기의 요구사항에 맞추어 잡음지수가 10dB 미만, E_s/N_0 가 21.77dB 이상으로 설계를 하는데 중점을 두었다.

초단 대역통과 필터는 대역외의 간섭조건과 FM 방송 주파수에 의한 혼변조를 방지하기 위해 사용하였다.

VDR은 $-98 \sim -7\text{dBm}$ 의 동작 영역을 만족해야 한

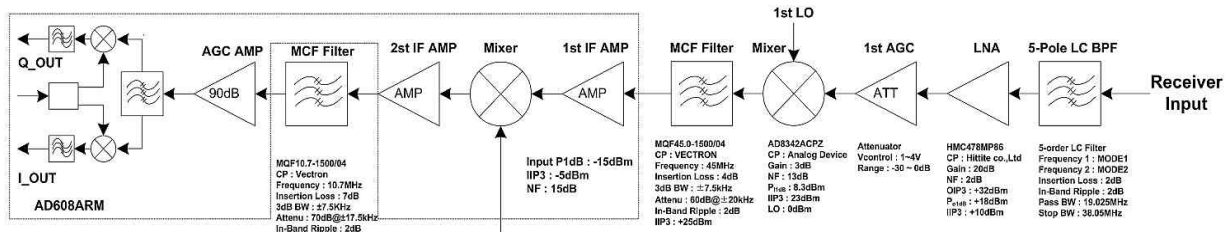


그림 4. 수신기 상세 블록도
Figure 3. Receiver Detail Block Diagram

스퓨리어스 방사 기준을 만족하기 위해서는 한 번의 상향 변환이 타당하다. 중간 주파수는 고출력 증폭기 뒷단의 대역통과필터에서 누설된 국부발진기의 누설 성분을 제거할 수 있는 대역을 선정해야

한다. 반 이중 통신방식에서 송신부와 수신부가 동일한 국부 발진기를 사용하는 것이 유리하기 때문에 중간 주파수를 45MHz로 설정하였다.

다. 첫 번째 혼합기의 잡음지수=13dB 이므로, 저 잡음 증폭기는 이득이 20dB인 증폭기를 사용해야만 최대 잡음지수를 확보할 수 있다. 반면 저 잡음 증폭기의 이득이 증가하면, VDR이 요구하는 동작영역 (Dynamic Range)를 첫 번째 혼합기에서 확보하기 어렵다. 그래서 아날로그 감쇄기를 사용한 자동이득 제어회로를 추가하여 큰 신호가 입력될 때 혼합기가 포화되는 것을 방지한다.

표 2. D8PSK 복조기 파라미터

Table 2. D8PSK De-modulator Parameter

$E_b/N_0@10^{-6}BER$	13dB
E_s/N_0 (without Loss)	17.77dB
Imp.Loss + RC Loss	4dB
E_s/N_0 (with Loss)=SNR	21.77dB
KTo	-174dBm/Hz
Effective Noise Figure	10dB
Baud Rate (R)	40.21dBHz
No*R	-28.79dBm
Required Receiver Input	-103dBm

$$G(total) = G1 + G2 + G3 + \dots = 17dB \quad (3)$$

채널 폭이 25kHz, 온도 20°C, 입력 신호 크기를 -98dBm이라 할 때, 잡음 전력의 크기와 잡음지수는

$$P(noise) = KTB = -130.03dBm \quad (4)$$

$$NF = NF1 + \frac{NF2 - 1}{G1} + \frac{NF3 - 1}{G1 \times G2} + \dots = 4.5dB \quad (5)$$

이며, 수신기에 입력되는 S/N=27.52dB이고, 신호 크기는 -81dBm이다. 설계한 결과는 D8PSK 복조기의 요구사항에 만족함을 확인할 수 있다.

VDL M2 송수신기의 요구조건 중 혼변조에 관련된 항목이 포함되어 있다. 대역외의 신호는 수신기 초단 대역통과 필터에서 충분히 제거가 되나 대역에 포함된 신호에 의한 혼변조는 수신감도에 큰 영향을 미친다.

표 3. 대역 내에 포함된 혼변조 신호

Table 3. In-band Intermodulation Signal

수신 신호	신호크기 : -75dBm, 변조방식 : D8PSK
잡음 신호1	신호크기 : -32dBm, 변조방식 : 무변조
	주파수 : 시험채널 ± 1MHz
잡음 신호2	신호크기 : -32dBm, 변조방식 : D8PSK
	주파수 : 시험채널 ± 2MHz

MAPS와 MOPS에서는 대역에 포함된 혼변조에 대하여 표3과 같은 조건을 제시하고 있다.

혼변조에 영향을 주는 요소는 초단 저 잡음 증폭기의 선형성, 혼합기의 절연특성, 중간 주파수 선정,

중간 주파수 필터의 억압특성, 혼합기의 비선형성을 주된 원인으로 볼 수 있다.

혼변조는 선정된 부품의 비선형 테이블을 ADS 틀을 사용하여 분석 하였다.

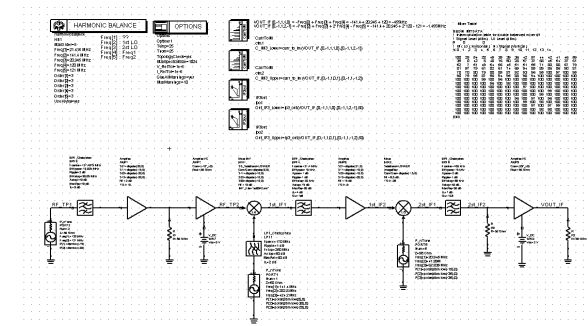


그림 5. 혼변조 시뮬레이션 구성도

Figure 5. Intermodulation Simulation Block Diagram

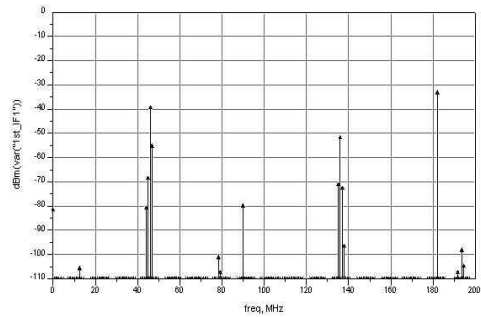


그림 6. LNA IIP3=-20dBm, 45MHz IF
Figure 6. LNA IIP3=-20dBm, 45MHz IF

그림6은 저 잡음 증폭기의 IIP3가 -20dBm 일 때 45MHz 중간 주파수의 출력 파형이다. 혼변조를 일으키는 45MHz±1MHz, 45MHz±2MHz의 주파수 성분이 생성됨을 알 수 있다.

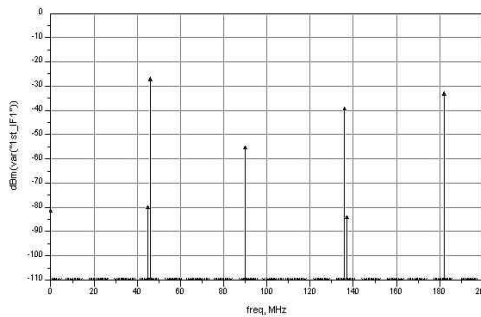


그림 7. LNA IIP3=+10dBm, 45MHz IF
Figure 7. LNA IIP3=+10dBm, 45MHz IF

그림7은 저 잡음 증폭기의 IIP3가 +10dBm 일 때 45MHz의 중간주파수 출력 결과이다. 혼변조를 일으키는 성분이 발생되지 않음을 알 수 있다.

그림4과 같이 수신기를 구성 하였을 때 혼변조 성분에 의한 수신감도 저하를 막기 위해서는 저 잡음 증폭기의 IIP3가 +10dBm보다 큰 것을 사용하는 것이 바람직하다.

VI. 결 론

본 논문은 MOPS와 MAPS의 기준에 만족하는 VDL Mode2용 VDR의 물리계층을 설계하고, 성능을 분석하였다. 또한 요구조건인 인접 채널 분리, 수신감도, 혼변조, 수신기의 동작영역, 송신기의 선형성, 불요 방사 전력을 선형 및 비선형 시뮬레이션을 통해 분석 하고, 제작을 위한 방향을 제시하였다.

수신기는 잡음지수가 10dB 미만, Es/No가 21.77dB 이상으로 설계를 하는데 중점을 두었다. 설계한 결과 잡음지수 4.5dB, Es/No는 27.52dB이다. -98dBm@10-3BER의 수신감도를 만족하기에 충분한 값이다. 혼변조 성분에 의한 수신감도를 저해하는 요소는 저 잡음 증폭기의 IIP3와 혼합기의 RF to LO, LO to IF, RF to IF 성분에 의해 발생함을 확인 할 수 있었다. 혼변조에 의한 영향을 최소화 하기 위해서는 높은 IIP3를 갖는 저 잡음 증폭기를 사용하고, 혼합기의 절연 특성이 30dB 이상 되는 부품을 선정하는 것이 바람직하다.

송신기는 스푸리어스 조건과 왜곡 특성을 최소화 하기 위해 직접 변환방식이 유리하고, 인접채널 누설 전력을 최소화 하기 위해서는 중간 주파수에서 혼합기에 인가하기 전에 누설 전력 억압특성이 좋은 MCF 필터를 사용해야한다. 증폭기는 선정 시 Po1dB 보다 4 ~ 5dB 정도 낮은 점에서 사용하는 것이 D8PSK 신호의 왜곡을 최소화 할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부 “국가교통핵심기술개발사업”의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

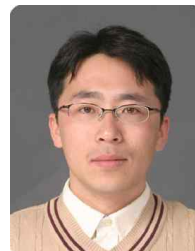
- [1] 배중원 외3, “민간항공용 데이터링크 기술동향”, 항공우주산업기술동향 4 권2호, 2006
- [2] RTCA, "Signal-in-space minimum aviation system performance standards for advanced VHF digital data communications including compatibility with digital voice techniques", RTCA D0-244A, Chap 3.0, 2000
- [3] RTCA, "Minimum Operational Performance Standards For Airborne Radio Communication Equipment Operating Within The Radio Frequency Range 117.975-137MHz", RTCA D0-186A, Chap 2.0, 2000
- [4] ICAO, "VHF air-ground digital link (VDL)", International Standards and Recommended Practices, Annex 10, Volume III, Part I, Chap. 6, 2000

최 준 수 (崔準洙)



2000년 2월 : 목원대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월 : 목원대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 11월 ~ 현재 : (주)파인텔레콤 선임 연구원
 관심분야 : 주파수 변환기, FSK 모뎀, 고출력 증폭기, 통신 시스템

이 한 성 (李漢聖)



1999년 2월 : 건양대학교 정보통신공학과(공학사)
 1999년 9월 ~ 2004년 3월 : (주)다익정보통신 연구원
 2003년 2월 : 한밭대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2004년 4월 ~ 현재 : (주)파인텔레콤

선임 연구원

관심분야 : 디지털 신호처리, 마이크로프로세서, 통신시스템.

김 태 식 (金太植)



1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

1991년 3월 ~ 2001년 2월 : 국방과학 연구소 선임연구원

2001년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연

구원 선임 연구원

관심분야 : 광대역 데이터 전송 시스템, 레이다 시스템 설계, 레이다 신호처리

김 인 규 (金仁規)



1994년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)

1996년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연 구원 선임 연구원

관심분야 : 레이다 신호처리, 전자과

해석, 모델

김 현 경 (金炫京)



1999년 2월 : 충북대학교 컴퓨터공학과(공학사)

2001년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과(공학석사)

2000년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연 구원 연구원

관심분야 : 디지털 신호처리, 데이터

통신, 관제시스템