

# Ku 대역 대용량 공용데이터링크용 RF 송수신기 설계

## Transceiver Design for Terminal Operating with Common Data Link on Ku-Band

정 병 구 · 서 정 원 · 류 지 호\*

Byeoung-Koo Jeong · Jung-Won Seo · Ji-Ho Ryu\*

### 요 약

본 논문에서는 유무인항공기에서 사용될 통달거리 200 km, 전송속도 45 Mbps급 데이터 전송장비의 RF 송수신기에 대해 다룬다. RF 송수신기는 Ku 대역에서 동작하도록 설계되었으며, 상/하향 변환모듈, 고출력 증폭 모듈, 전단 처리 모듈로 구성된다. 제안된 RF 송수신기의 성능을 만족시키기 위해 출력신호 레벨이 10 W급인 전력 증폭기가 요구되었으며, 이는 GaN 소자기반의 전력증폭기로 구현되었다. 또한, 적응형 전송속도 변환기능이 요구되었고, 이를 위해 다양한 대역폭의 신호를 수신할 때의 상호 주파수 간섭을 최소화하기 위하여 6종의 SAW 필터로 구성된 수신기 구조가 적용되었다. 시스템 요구사항의 만족 여부를 확인하기 위해 AWR 시뮬레이션 툴을 이용하였다.

### Abstract

In this paper, we designed a RF transceiver operating up to 200 km operating range and 45 Mbps data rate. The RF transceiver operates in Ku band and composed of up/down converter, high power amplifier, front-end elements. To satisfy the operating range of RF transceiver, 10W power amplifier was required and realized by using GaN power amplifier. Moreover, to mitigate mutual interference for different bandwidth signals due to the adaptive transmission speed control function, SAW filter bank structure was used. To verify system requirement satisfaction AWR simulation tool was used.

Key words: Ku-Band, Transceiver, Fractional-N, Spectrum Mask, SAW Fiter

### I. 서 론

공용데이터링크(Common Data Link: CDL)는 미 국방성에서 이미지/영상 데이터 전송과 Signal Intelligence 확보를 위해서 1991년 표준으로 채택되어졌다. 공용데이터링크는 지상플랫폼과 항공기 간 영상신호를 전송할 수 있으며, 보안, 항재밍, 링크 10개 채널, 200 kbps의 전송속도를 제공하는 상향 링크(return link)와 링크 25개 채널,

10.71 Mbps 또는 45 Mbps의 전송속도를 제공하는 하향 링크(forward link)로 구성되어 있다.

사용하는 주파수로는 Ku 대역과 X 대역을 사용하고 있으며, 점대점 방식으로 데이터를 전송하도록 설계되었다<sup>[1]</sup>.

현재 우리나라의 군운용 시스템에서도 장거리 대용량의 무선 데이터 통신시스템의 필요성이 대두되어지고 있지만, 현재 외산 장비의 규격 및 성능에 대한 자료가 매우

한화탈레스(Hanwha Thales Co., Ltd.)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received September 25, 2015 ; Revised November 11, 2015 ; Accepted November 16, 2015. (ID No. 20150925-070)

· Corresponding Author: Byeoung-Koo Jeong (e-mail: bkoo.jeong@hanwha.com)

부족한 현실이다.

본 논문에서는 대용량 및 장거리 디지털 통신에 적합한 Ku 대역 RF 송수신기를 개발하였다. RF 송수신기는 지상 플랫폼과 탑재 플랫폼으로 구분되며, 각 송수신기는 L대역 변환모듈, Ku 대역 주파수 변환모듈, 고출력 증폭 모듈, 전단처리 모듈 등으로 구성되며, 각 모듈들은 불요 파/고조파 억제, 수신감도, 송신 상호변조 및 위상 잡음 특성, 유·무인기간 주파수 상호 간섭을 최소화하기 위한 스펙트럼 마스크 특성을 고려하여 설계하였다.

또한, 지상 플랫폼과 탑재플랫폼을 광대역 설계 및 송수신 절체구조 설계로 지상/탑재 모듈 공용화가 가능하다.

## II. 본 문

본 논문에서 대용량 공용데이터링크용 RF 송수신기는 그림 1과 같은 각 블록으로 구성되며, 이중 상하향 변환 방식을 적용하였다. L대역 변환모듈은 입력 신호를 상하향변환, 수신 AGC, SAW 필터 뱅크 기능을 가진다.

Ku 대역 주파수 변환모듈은 L대역 신호와 Ku 대역신호를 각각 상/하향 변환하는 기능과 송수신별 주파수 가변이 가능한 2개의 주파수 합성기를 적용하였다.

Ku 대역 고출력 증폭모듈은 고이득 증폭과 10 W급의 평균 출력(3 dB Back-off 기준)을 갖는다.

Ku 대역 전단 처리모듈은 송수신 신호를 분리하는 듀플렉서와 저잡음 증폭기, 송수신 채널 변경과 안테나 선택 기능을 갖는다.

Ku 대역 RF 조립체의 설계 목표는 200 km 이상의 통달거리를 충족하기 위하여 표 1과 같이 규격을 설정하였다.

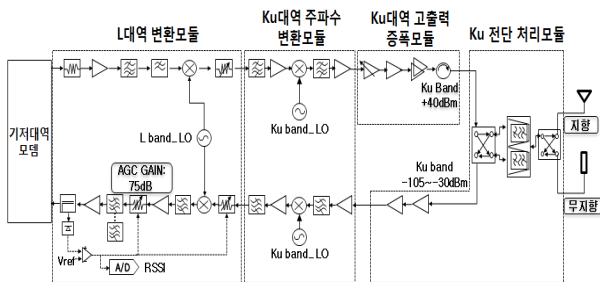


그림 1. Ku 대역 RF 송수신기 블록도  
Fig. 1. The airborne/surface RF terminal architecture for common data link on Ku band.

표 1. RF 송수신 장치 사양

Table 1. RF transceiver specification for common datalink system.

항목	사양	단위
주파수(대역폭)	14.xxx ~ 15.xxx	GHz
순방향·역방향링크 운용대역폭	각 120	MHz
출력	37	dBm
EVM (Error Vector Magnitude)	7이하	%
위상잡음	-75 dBc@1 kHz, -85 dBc@10 kHz, -95 kHz@100 kHz, -105 kHz@1 MHz	
대역외 억압	-60	dBc
시스템 잡음지수	7 이하	dB

### 2-1 L대역 변환반

L대역 변환모듈은 45 Mbps급 70 MHz 기저대역 신호를 모뎀으로부터 수신하여 1.57 GHz의 L대역 신호로 상향변환 및 1.57 GHz의 신호를 70 MHz로 하향변환한다.

1.5 GHz의 국부발진주파수인 LO(Local Oscillator)를 Integer-N 방식으로 Analog Devices사의 ADF 4106을 적용 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 각각 -110 dBc/Hz 이상 @1 kHz, 10 kHz, 100 kHz로 성능을 확보하였으며, Hittite사의 5-bit 디지털 가변 감쇠기를 적용하여 0~39 dB 범위에서 송신출력 가변이 가능하다.

L대역 하향 변환부에서는 39 dB 감쇠가 가능한 전압 제어 감쇠기를 2단으로 설계하여 75 dB 이상의 수신 자동

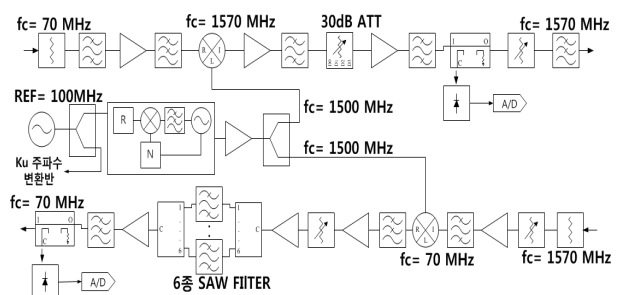


그림 2. L대역 변환모듈 블록도  
Fig. 2. The architecture of L band module.

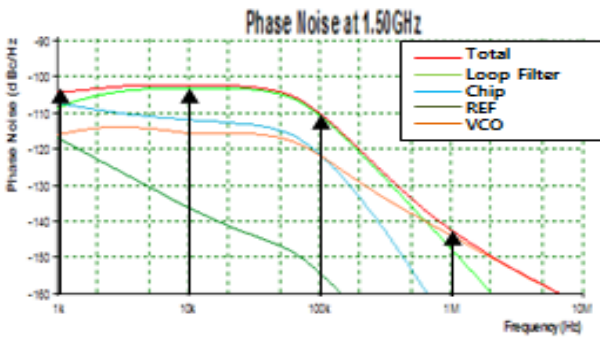


그림 3. L대역 PLL 시뮬레이션 결과  
Fig. 3. PLL simulation results on L band.

이득조절 기능과 간섭 신호 최소화 및 수신 감도 개선을 위한 6개의 SAW 필터 설계로 최대 30 MHz에서 최소 1 MHz의 가변 대역폭 성능을 확보하였다.

2-2 Ku 대역 주파수 변환모듈

Ku 대역 주파수 변환모듈은 1.57 GHz의 신호를 Ku 대역으로 Ku 대역 신호를 1.57 GHz의 L대역 신호로 상/하향 변환하는 기능과 송수신 주파수를 각각 500 kHz 단위로 주파수 가변이 가능한 2개의 Fractional-N Type의 주파수 합성기능을 갖는다. Ku 대역 PLL 소자는 HMC704-LP4E를 사용하였으며, 입력 주파수는 최대 8 GHz까지이며, 위상잡음 레벨은 -230 dBc/Hz이다.

Ku 대역 PLL 회로의 기준 주파수는 L대역 반환모듈과 공유하며, 위상 잡음 향상을 위해 100 MHz 기준 신호를

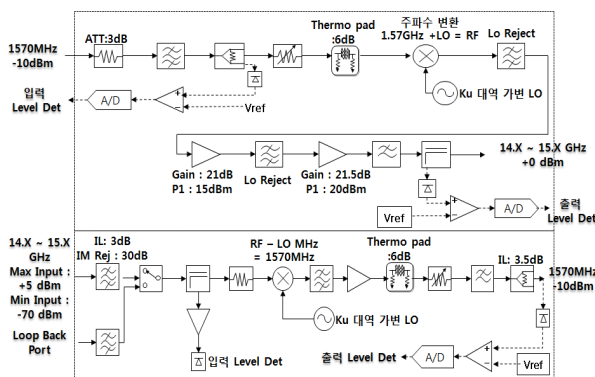


그림 4. Ku 대역 주파수변환 모듈 블록도  
Fig. 4. The architecture of Ku band module.

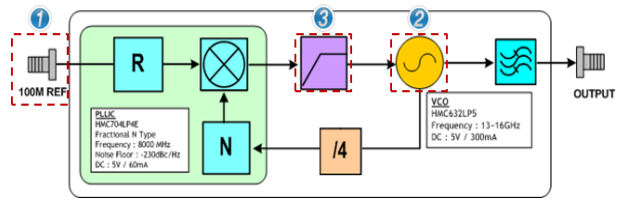


그림 5. Ku 대역 PLL 블록도  
Fig. 5. The architecture of PLL module.

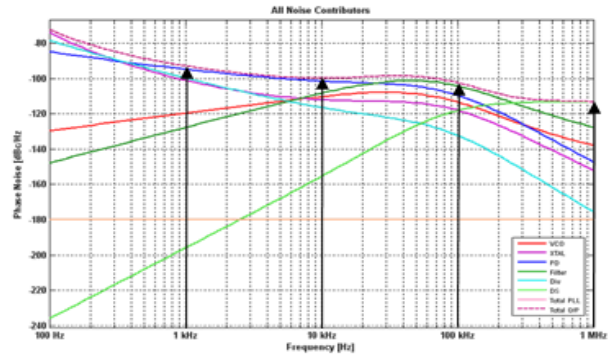


그림 6. Ku 대역 PLL 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. PLL simulation results on Ku band.

0.05 ppm인 Morion 사의 MV136 OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillators)를 사용하였다. 설계된 루프 대역폭은 100 kHz이다.

시뮬레이션 결과, 1 kHz에서 -90 dBc/Hz, 10 kHz에서 -98 dBc/Hz, 100 kHz에서 -102 dBc/Hz, 1 MHz에서 -112 dBc/Hz로 설계되었다.

2-3 Ku 대역 고출력 증폭모듈

Ku 대역 고출력 증폭모듈은 장거리 통달거리(200 km 이상)를 만족하기 위해 고출력 증폭 및 디지털 신호의 EVM 특성을 최적화하기 위하여 제한된 성능에서 선형성을 최대화하기 위해 8PSK의 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)을 고려하여 3 dB back-off 증폭기를 설계하였다.

고출력 증폭모듈은 이득증폭부에서 40 dB 이상의 고선형, 고이득 증폭기능과 불요파 및 고조파 억제, 광대역 이득 특성을 위해 설계 제작하였다.

고출력증폭부는 최종단 증폭기로서 각각 TOSHIBA사의 15 W급 GaAs FETs와 50 W급 GaN HEMT 소자를 적

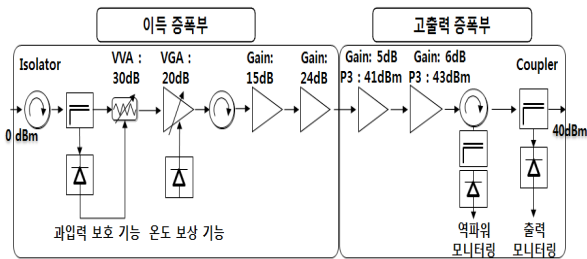


그림 7. 고출력 증폭모듈 블록도  
Fig. 7. The architecture of power-amplifier module.

용하여 각각 대신호 이득을 5 dB 이상으로 설계하였다. 고출력 증폭모듈의 기능으로는 과입력으로부터 고출력 증폭모듈을 보호하기 위한 ALC(Auto Level Control) 기능과 온도에 따른 출력 레벨 보상을 위한 온도 보상회로, 출력 측정기능, 출력의 open 또는 short 시 역방향 출력을 측정하여 고출력 증폭모듈의 안정성을 확보하였다.

### 2.4 전단 처리모듈

RF 송수신기는 FDD 방식의 전이중 통신을 위해 Ku 대역 전단 처리모듈에서 송신 신호에 의한 수신 감도 열화 제거를 위해 듀플렉서의 격리도를 -80 dBc 이상 설계하였으며, 잡음지수 4 dB이하, 35 dB 이상의 고이득 저잡음 증폭기능과 2x2 Matrix SW1의 송수신 절체로 지상 및 탑재 장비의 호환이 가능하며, 2x2 Matrix SW2 적용으로 2종의 안테나 선택 및 탑재 플랫폼에 적용될 경우 SMA Term 단자에 RF 송수신기를 장착하면 동시 운용이 가능하다.

### 2.5 RF 시스템

Ku 대역 RF 송수신기는 AWR 시뮬레이션 TOOL을 적

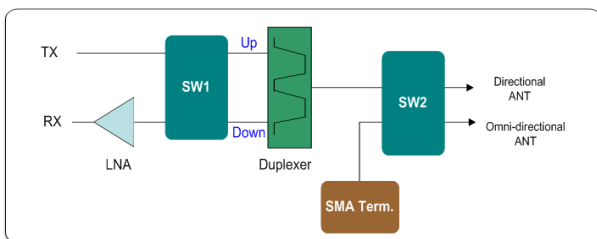


그림 8. 전단 처리반 블록도  
Fig. 8. The architecture of front-end module.

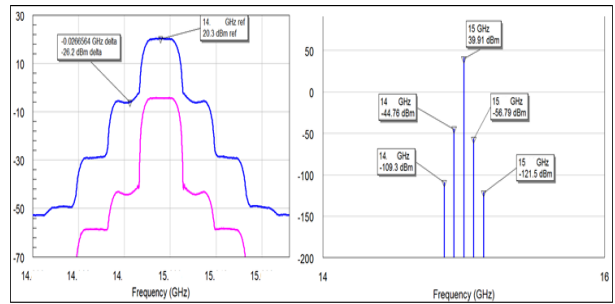


그림 9. 송신부 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. The simulation results of the spectrum mask & spurious(AWR).

용하여 송신 시뮬레이션을 수행하였다.

송신 시뮬레이션을 통해 스펙트럼 마스크 특성을 확인하였으며, ACP 특성을 30 dB 이상, 송신의 간섭신호 특성을 60 dBc 이상 확보하였다.

수신 시스템 시뮬레이션을 통해 수신 잡음지수 및 최저 수신레벨의 수신부 이득을 시뮬레이션하였다.

시뮬레이션 결과, 잡음지수는 5.5 dB 이하, 이득은 83 dB이상 시뮬레이션 되었다.

최대 45 Mbps급 데이터 신호의 대역폭은 28 MHz이며, 요구 SNR(Signal to Noise Ratio)은 13 dB, 잡음 지수 7 dB로 식 (1)에서 최종 수신 감도는 약 -80 dBm이다.

$$\text{수신감도} = -174 \text{ dBm/Hz} + 10\log B + NF + SNR \quad (1)$$

수신 감도에서의 SNR은 13 dB로 EVM은 약 22.5 % 이하이다. 또한, 송신 EVM은 고출력증폭기 및 시스템의 비선형 지표로서, 디지털 변조를 적용하는 RF 시스템에서는 필요한 요구 규격이다. EVM은 신호 크기와 위상의 왜곡 특성으로서 벡터신호분석기에서 측정이 가능하다. EVM

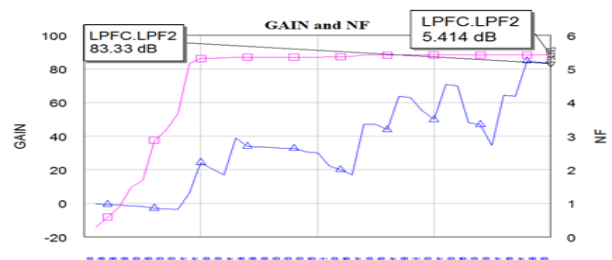


그림 10. 수신부 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. The simulation results of the Gain & NF(AWR).

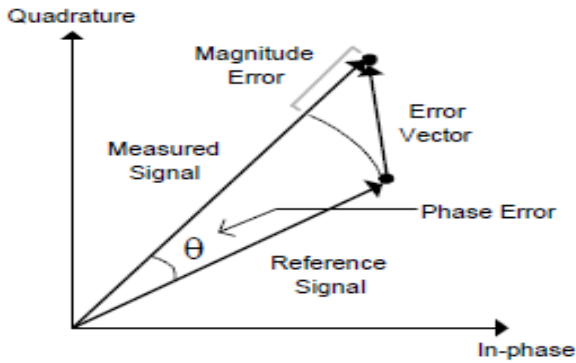


그림 11. EVM과 변화량의 관계  
Fig. 11. Error vector magnitude and related quantities.

신호의 정의는 다음과 같다.

$$EVM = \sqrt{(I_{MEAS} - I_{REF})^2 + (Q_{MEAS} - Q_{REF})^2} \quad (2)$$

8PSK 디지털 변조 방식에서 SER(Symbol Error Rate)의  $10^{-3}$  이상의 수신 성능을 확보하기 위해서는  $E_s/N_0$ 는 약 15 dB의 신호성능을 확보하여야 한다<sup>[6]</sup>.

여기서  $E_s$ 는 심벌당 에너지를,  $N_0$ 는 잡음 전력 밀도를 나타낸다.

### III. 측정 결과

본 논문에서는 제작된 Ku 대역 공용데이터링크용 송수신기는 그림과 같은 형상을 갖는다. 제작된 RF 조립체 특성은 각각의 반별 시뮬레이션 결과를 취합하였으며, 최종 측정 결과는 송수신 EVM 특성 및 ACP 특성, 위상잡음, 수신감도에서의 시험 측정 결과를 도시하였다.

#### 3.1 송신부 측정결과

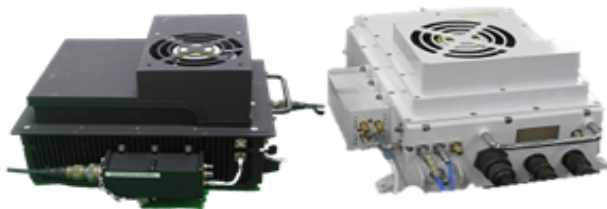


그림 12. 지상/탑재 RF 조립체  
Fig. 12. The airborne/surface RF terminal for common data link on Ku band.

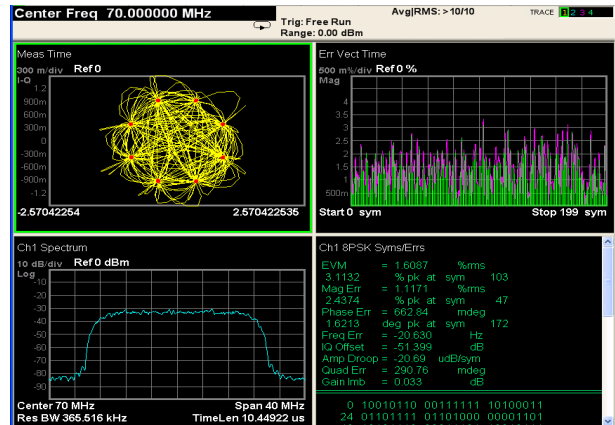


그림 13. 모사된 신호 발생기 기저대역 신호  
Fig. 13. Modulation output of vector signal generator.

시험의 객관성을 위하여 모뎀 신호는 Keysight의 PSG 벡터 신호 발생기를 이용하여 8 PSK, 45 Mbps급 신호를 모사하였다. 신호분석을 위하여 동일 회사인 Keysight의 PSA 벡터신호 분석기를 이용하여 EVM을 측정하였다. 신호원의 EVM은 약 1.6 %이다.

최종 평균 출력은 전단처리 모듈의 손실을 포함한 37 dBm(3 dB back-off 적용)이었으며, ACP 측정 결과 -30 dBc 이상의 특성으로 측정되었다.

최종 RF 송수신기 출력의 EVM은 상향링크와 하향링크 각각 7 % 이하의 성능을 확인하였다.

최종 출력 위상 잡음 측정 결과, 1 kHz에서 -84 dBc/Hz, 10 kHz에서 -92 dBc/Hz, 100 kHz에서 -98 dBc/Hz,

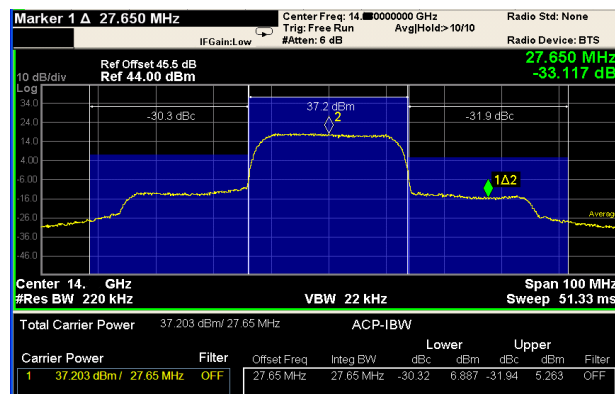


그림 14. 송신 ACP 특성(45 Mbps급)  
Fig. 14. Measured result of adjacent channel power.

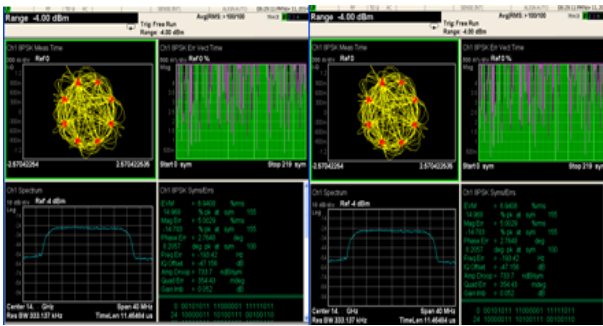


그림 15. 송신출력 EVM(45 Mbps급)  
Fig. 15. Measured result of EVM on Ku band.

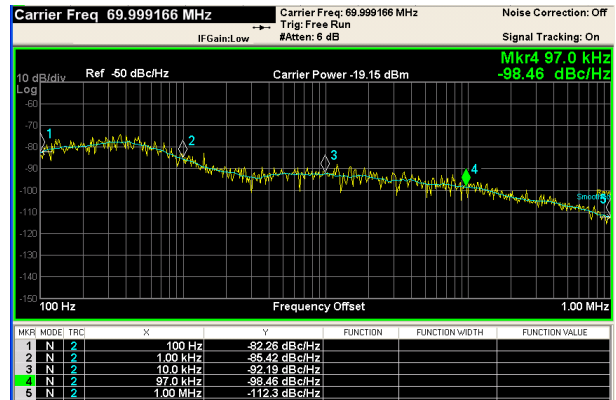


그림 18. 수신 위상노이즈 측정 결과  
Fig. 18. Measured result of phase-noise on IF band.

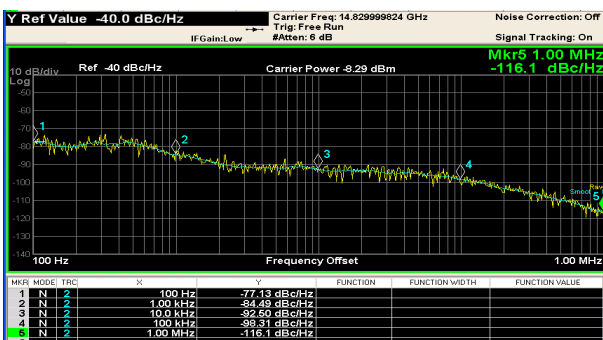


그림 16. 송신 위상노이즈 측정 결과  
Fig. 16. Measured result of phase-noise on Ku band.

1 MHz에서  $-116$  dBc/Hz로 시뮬레이션 결과와 유사한 측정 데이터를 확인하였다.

### 3-2 수신부 측정결과

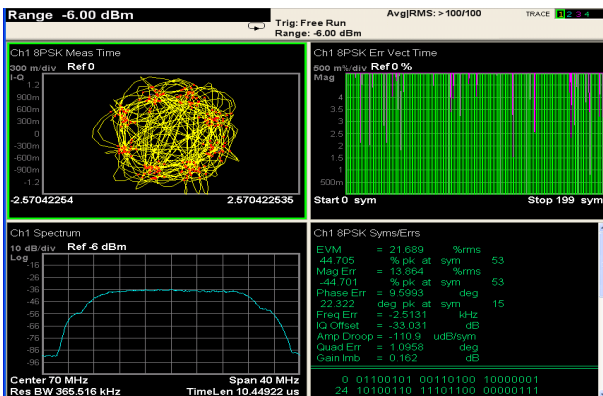


그림 17. 기저대역 출력 EVM(45 Mbps급)  
Fig. 17. Measured result of EVM on IF band.

수신부는 기저대역 70 MHz에서 EVM과 위상잡음을 측정하였으며, 각각의 측정 결과는 그림 17과 같다.

수신감도에서 기저대역 출력은 AGC된  $-15$  dBm으로 측정되었으며, 약 22 % 이하의 EVM 성능을 확인하였으며, 상하향 대역에서 동일한 성능을 확인하였다.

수신 위상 잡음 측정 결과는 1 kHz에서  $-85$  dBc/Hz, 10 kHz에서  $-92$  dBc/Hz, 100 kHz에서  $-98$  dBc/Hz, 1 MHz에서  $-116$  dBc/Hz로 시뮬레이션 결과와 유사한 측정 데이터를 얻을 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 Ku 대역에서 최대 45 Mbps급 데이터 송수신용 RF 송수신기의 설계 및 제작을 통해 출력 및 수신 성능 측정 결과를 제시하였다. 대용량의 광대역 신호의 장거리 전송을 위한 디지털 변조된 신호의 특성을 고려한 측정 항목으로 EVM 및 위상잡음 특성을 측정하였으며, EVM은 상하향 대역 모두 7 % 이하의 성능과 위상잡음 성능은 1 kHz에서  $-84$  dBc/Hz, 10 kHz에서  $-92$  dBc/Hz, 100 kHz에서  $-98$  dBc/Hz, 1 MHz에서  $-116$  dBc/Hz 이하의 성능을 확보하였다. 200 km 통달거리 기준(안테나 이득 및 모뎀 SNR을 반영)인  $-80$  dBm의 수신감도에서는 약 22 %의 EVM 특성과 위상 잡음은 1 kHz에서  $-84$  dBc/Hz, 10 kHz에서  $-92$  dBc/Hz, 100 kHz에서  $-98$  dBc/Hz, 1 MHz에서  $-116$  dBc/Hz 특성 및 AGC된  $-15$  dBm 신호의 특성을 확보하였다.

그 외에도 45Mbps급 이하의 16, 8, 4, 2 Mbps급 전송속도에서도 유사한 성능을 만족하였다. 또한, 실험실의 실제 운용환경에서도 200 km 통달거리 시험을 통해 Ku 대역 송수신기의 야외 운용 송수신 성능을 검증하였다.

따라서 본 논문에서는 기존의 외산 장비에 의존하던 대용량의 장거리용 RF 송수신 장비를 국산화 기술을 통해 개발하여 Ku 대역에서 45 Mbps급 데이터 전송용 RF 송수신기의 성능을 입증하였다. 이 기술을 적용하여 군통신용 탑재 및 지상 장거리 송수신 단말로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### References

[1] 백호기, 정승명, 임재성, "네트워크중심작업을 위한 전송데이터링크 기술 동향", 정보과학회지, 28(7), pp.

59-69, 2010년 7월.  
 [2] Dean Banerjee, *PLL Performance, Simulation, and Design*, 2nd Ed., 2001.  
 [3] M. Moghavvemi, H. Ameri "Assemble a Ku-band frequency synthesizer", *Microwaves & RF*, pp. 80-85, Jan. 2009.  
 [4] Behzad. Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall , pp. 32-64, 1998.  
 [5] B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall Inc., pp. 302-311, 1985.  
 [6] J. L. Pinto, I Darwazeh, "Effects of magnitude and phase distortion in 8-PSK systems on error vector magnitude measurements", *Electronics Letters*, vol. 37, issue 7, pp. 437-438, Mar. 2001.

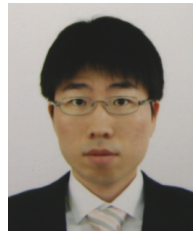
### 정 병 구



2001년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
 2003년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2009년 12월: 단암시스템즈(주) 선임연구원  
 2009년 12월~현재: 한화탈레스 전문연구원

[주 관심분야] 초고주파 송수신기 및 시스템, DATA LINK 시스템 설계 등

### 류 지 호



2004년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2006년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학석사)  
 2013년 4월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] DATA LINK 시스템 설계

### 서 정 원



2007년 2월: 경북대학교 전자전자전기공학부 (공학사)  
 2009년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
 2010년 1월~현재: 삼성탈레스 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 송수신기 및 시스템, DATA LINK 시스템 설계 등