

논문 2011-48TC-6-6

도파관 하이브리드 커플러를 이용한 X-대역 모노펄스 레이더용 이미지 제거 SSB 변조기 설계

(Design of Image Rejection SSB Modulator for X-Band Monopulse RADAR using Waveguide Hybrid Coupler)

고 영 목*, 나 극 환**

(Young-Mok Koh and Keuk-Hwan Ra)

요 약

본 논문에서는 도파관 하이브리드 커플러를 이용한 X-대역 모노펄스 레이더용 이미지 제거 SSB 변조기 설계에 대해 연구하였다. 일반적으로 SSB 변조기는 입력되는 IF(RF)신호와 LO 신호를 혼합하여 특정한 RF(IF) 주파수 대역으로 변환한다. 이 경우 SSB 변조기는 RF 대역에서 한쪽 측파대를 전송하기 위해, 이미지 신호와 LO 신호의 제거가 요구된다. LO 신호와 IF 신호를 혼합하기 위해, 도파관 하이브리드 커플러와 크리스탈 믹서 다이오드를 이용하여 평형믹서를 설계하였으며, 두 크리스탈 믹서 다이오드 입력에 적합한 90° 위상차를 갖는 IF(+)와 IF(-)신호 생성을 위한 IF 증폭기를 설계하였다. 설계된 각각의 도파관과 IF 증폭기 케이스는 고주파수 대역에서 높은 전기적 신뢰성을 유지하기 위해 딥 브레이징 기술을 이용하여 알루미늄으로 제작하였으며 제작된 SSB 변조기 측정결과 LO 신호와 측파대 신호 제거비는 각각 14.2dB와 18.5dB의 양호한 결과를 얻었다.

Abstract

From the present paper researched about the Design of Image Rejection SSB Modulator for X-Band Monopulse RADAR using Waveguide Hybrid Coupler. Generally, SSB modulator mixes IF(RF) and LO signals, and then it converts to RF(IF) frequency band. In this case, in order to transmit one sideband from RF band, SSB modulator is demanded the removal of image and LO signal. The balanced mixer was designed using waveguide hybrid coupler and crystal mixer diode to mix LO and IF signal. And also the IF Amplifier was designed for IF(+) and IF(-) signal generation which have 90° phase differences which are suitable in two crystal mixer diode inputs. In order to maintain a high electric reliability from high frequency band the waveguide and IF amplifier's case were manufactured with aluminum using deep brazing techniques. The test result of SSB modulator, LO and sideband signal rejection ratio were 14.2dB and 18.5dB respectively.

Keywords : Single Side Band Mixer, SSB, Balanced Mixer, Image Rejection Mixer, Monopulse Radar

I. 서 론

모노펄스 레이더는 요격 레이더, 미사일 시커(seeker) 및 사격통제용 추적 레이더 등에서 높은 정확도로 고속 전투기나 미사일을 추적하기 위해 사용되

는 펄스 도플러 레이더로, 펄스발생기, 송신기, 고이득 파라볼라 안테나, 모노펄스 수신기, 신호처리기 및 전시장치 등으로 구성된다.

모노펄스 레이더는 표적에서 반사된 에코 신호로부터 진폭과 위상정보를 추출하여 표적 추적을 수행, 표적까지 거리와 방향 등을 결정하고, CW(Continuous wave) 신호를 이용하여 에코 신호의 도플러 주파수를 측정하여 이동 표적의 속도를 결정할 수 있다^[1~3]. 모노펄스 레이더 시스템의 탐지거리와 위치추적 정확도

* 정회원, 광운대학교 전자공학과
(Kwangwoon University)

※ 본 논문은 2010년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음
접수일자 2011년2월21일, 수정완료일: 2011년6월15일

는 사용되는 반송파 주파수에 의존하며, 주파수가 높을수록 정확도는 향상된다.

일반적으로 레이더는 표적정보 획득을 위해 표적을 향해 무선신호를 송신해야 하는데 이때 레이더 송신기에서 주파수 상향변환을 위해 사용하는 장치 중의 하나가 SSB(Single Side Band) 변조기이다. 이러한 SSB 변조기는 고주파수에서 안정적인 동작특성을 가져야 하며, 사용주파수 대역에서 양호한 이득 평탄특성을 가져야 하며 측파대 신호와 LO 신호는 상대적으로 낮은 레벨로 제거되어야 한다^[4]. 특히 레이더의 경우 이러한 특성은 시스템 제작시 필터 등을 제거함으로써 단순화 시킬 수 있을 뿐만 아니라^[5] 추적레이더 시스템의 경우 프론트 엔드 무계를 경량화 시킴으로서 고기동하에서 안정적인 동작을 가능하게 하는 장점이 될 수 있다.

본 논문에서는 강우 등의 기상조건에 의해 비교적 적은 전파감쇠로 장거리 탐지가 가능한 X-Band 모노펄스 레이더에서 마이크로파 신호 발생을 위한 도파관 구조의 SSB 변조기 설계에 대해 연구하였다. X-Band에서 동작하는 SSB 변조기를 제작하기 위해 LO 신호 및 이미지 신호 제거를 위한 도파관 구조의 평형믹서 설계와 Short-slot 90° 하이브리드 커플러를 설계, 제작하였으며 입력되는 IF 신호를 두 믹서 입력에 적합한 위상차로 분리하기 위해 90° 위상 조종기를 설계하였다.

설계된 도파관과 IF 증폭기 케이스 등을 포함한 SSB 변조기 각 구성품은 열악한 환경조건과 진동 및 충격 등의 조건에서 안정적으로 동작하도록 알루미늄(AI 6061)으로 제작하였으며, 제작된 각 구성품은 고출력 펄스 신호 방사시 이음매 부분에서 아크 방전으로 인한 파손을 방지하고 시스템 안정성을 확보하기 위해 딥 브레이징 기술을 이용하여 제작하였다.

제작된 SSB 변조기는 운용시 고출력 증폭기 전력포화방지와 전력 마진을 위해 출력단에 도파관 구조의 가변 감쇠기를 구성하여 적절한 조정이 가능하도록 하였으며, 시험결과 LO 신호와 USB 신호 제거비는 송신신호인 LSB 신호를 기준으로 각각 14.2dB와 18.5dB로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

II. 펄스 레이더용 변조기 설계 및 제작

2.1 SSB 변조기 개요 및 특성

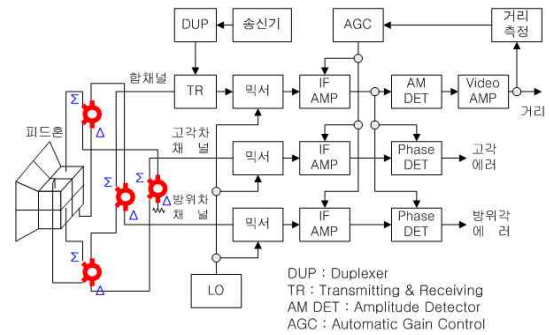


그림 1. 모노펄스 레이더 구성도
Fig. 1. Configuration of monopulse radar.

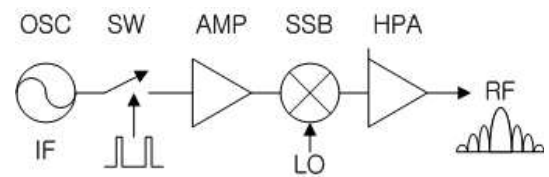


그림 2. 펄스 레이더용 송신기 구성도
Fig. 2. Block-diagram of transmitter for Pulse Radar.

요격 레이더, 미사일 시커 및 사격통제용 추적 레이더 등에서 표적추적을 위해 사용되는 모노펄스 레이더는 그림 1과 같이 모노펄스 신호 발생을 위한 송신기와 표적에서 반사된 신호를 수신하기 위한 피드 혼 안테나 그리고 모노펄스 컴퍼레이터 및 합 채널 신호와 두 개의 차 채널 신호(방위각 신호와 고각 신호)를 하강변환 하기 위한 3 개의 믹서로 구성된다. 각각의 하강 변환 믹서에서는 탐지된 표적의 이동 속도와 거리 추정 신호추출을 위한 합 신호용 하강변환 믹서와 방위각 및 고각 신호 추출을 위한 두 개의 하강 변환 믹서로 구성된다^[1~2, 6].

모노펄스 레이더 시스템의 송신기는 그림 2와 같이 CW 신호 발생원인 발진기(OSC)와 CW 신호를 펄스로 변환하기 위한 스위치(SW), 펄스 변환된 신호의 증폭을 위한 증폭기 및 증폭된 신호를 LO 신호와 합성하여 송신에 적합한 RF 신호로 변환하기 위한 SSB 변조기 및 고출력 증폭기인 HPA로 구성된다. 즉 일반적인 펄스 레이더 시스템은 CW 신호를 RF 스위치를 이용하여 펄스 신호로 변조하고 이를 송신에 적합한 RF 신호 대역으로 변환하며, 이때 펄스 변조된 신호의 스펙트럼은 그림 2 우측과 같다.

2.2 SSB 변조기 설계

본 논문에서 설계, 제작한 SSB 변조기의 상세 구성도는 그림 3과 같이 회로 섹션과 도파관 섹션으로 구

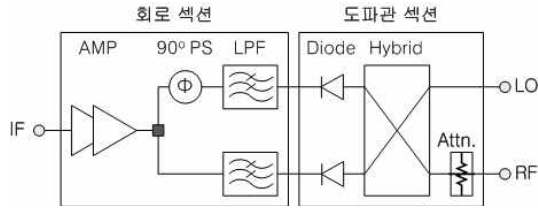


그림 3. SSB 변조기 상세 구성도
Fig. 3. Detail block-diagram of SSB Modulator.

표 1. SSB 변조기 설계 규격
Tabel 1. Specification for SSB Modulator.

항 목		규 격
동 작 주파수	IF	30MHz
	LO	8.5GHz~9.5GHz
	RF	
IF 입력레벨		-15dBm ~ -25dBm
RF 출력레벨		-20dBm ± 2dB
LO 제거비		> 15dB
측파대 제거비		> 15dB
출력레벨 가변범위		0~15dB
인터페이스	LO	WR90
	RF	
	IF	SMC [F]

성된다. 회로 섹션은 입력된 IF 신호를 저잡음 증폭하기 위한 2단 증폭기와 증폭된 신호를 0° 신호와 90° 신호로 분리하기 위한 위상조종기 (PS : Phase shifter) 그리고 저역통과필터(LPF : Low pass filter)로 구성된다. LPF에서 저역통과된 IF 신호는 90° 하이브리드 도파관과 크리스탈 믹서 다이오드^[15~16] 1N23W로 구성된 도파관 믹서에 입력되어, X-Band의 LO 신호와 혼합된 후 X-Band의 RF 신호를 출력한다.

출력된 RF 신호는 모노펄스 레이더 시스템을 구성하고 있는 고출력 전력증폭기인 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier)에 인가된다. 이때 TWTA 전력포화과 출력전력 마진을 위해 SSB 변조기 출력단에 도파관 구조의 가변 감쇄기를 구성하여 적절한 조정이 가능하도록 하였다.

X-Band 모노펄스 레이더의 송신기에서 사용하기 위한 SSB 변조기의 설계규격은 표 1과 같다.

2.2.1 평형 도파관 믹서 설계

무선통신 등에서 이용되는 대부분의 믹서는 불균형되어 있으며 이로 인해 LO 신호와 RF(IF) 신호는 매

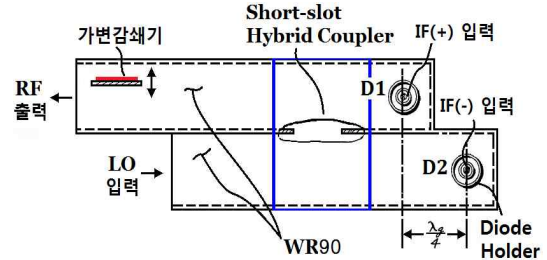


그림 4. 도파관 구조의 평형믹서 구성도
Fig. 4. Configuration of balanced waveguide mixer.

우 높은 레벨이 요구된다. 이들 신호의 높은 레벨로 인해 IF(RF) 출력단에서 원하지 않는 LO 신호와 RF(IF) 신호를 제거하기 위해 필터 등을 사용하여야 하는 단점이 발생한다^[4, 14]. 즉 믹서를 구성하는 각 단자 사이의 격리도 개선을 위해 회로나 모듈 등의 추가가 불가피하다. 이러한 단점을 제거하기 위해서는 믹서 각 단자를 최대한 격리시키고, 입, 출력되는 신호를 평형(Balanced) 신호로 변경하여 믹서에 입, 출력 되도록 함으로서 단자간 격리도를 개선할 수 있는데 이러한 믹서를 평형믹서라 한다^[5, 14].

본 논문에서는 도파관 구조의 하이브리드 커플러를 이용하여 그림 4와 같은 마이크로파 신호 합성을 위한 평형믹서를 설계하였다^[7~8]. 그림 4에서 다이오드 홀더에 장착된 비선형 임피던스 특성을 갖는 크리스탈 다이오드 D1과 D2에 IF 신호와 LO 신호가 인가되면, RF 출력신호가 생성된다.

그림 4의 평형믹서에서 LO 신호는 Short-slot 하이브리드 커플러에서 0° 신호와 90° 위상 이동된 신호로 분배된 후, 트랜스포머 2차 권선에 연결된 다이오드 D1과 D2에 인가된다. 이때 다이오드 D2 위치를 다이오드 D1보다 Short-slot 하이브리드 커플러에서 RF 이미지 주파수 파장의 $\lambda_g/4$ 차이 나게 배치함으로써 에너지 손실과 변환 이득 감소를 피할 수 있다^[7]. 즉 이러한 다이오드 배치를 통해 RF 이미지 신호가 LO 단자 쪽으로 진행되는 것을 방지함으로써 손실을 최소화 할 수 있다.

따라서 Short-slot 하이브리드 커플러를 이용한 평형믹서는 “매직 T”나 “RAT RACE” 구조와 비교하여 동일한 효율을 가지면서 부피가 작은 믹서 구현이 가능하다.

2.2.2 Short-slot 하이브리드 커플러 설계

Short-Slot 하이브리드 커플러는 Henry J. Riblet에

표 2. Short-slot 하이브리드 커플러 설계규격
Table 2. Specification of short-slot hybrid coupler.

항 목	요구규격
Amplitude Balance	± 0.25 dB
Phase Balance	$90^\circ \pm 2^\circ$
삽입손실	0.1dB 이하
Isolation	25dB [min.]
VSWR	1.10:1 [max.]

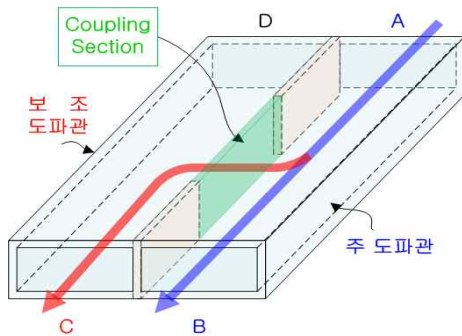


그림 5. Short-slot 하이브리드 커플러 구조
Fig. 5. Internal structure of short-slot hybrid coupler.

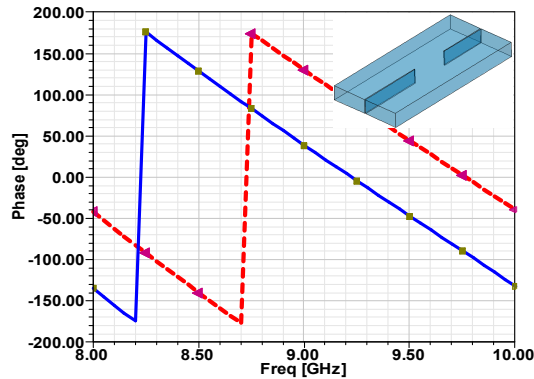
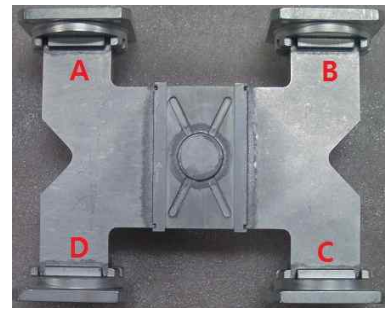


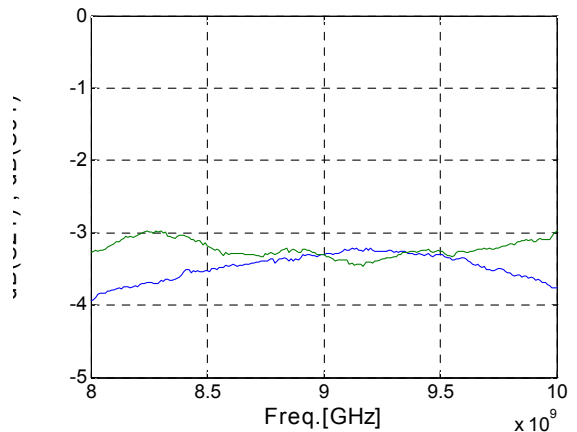
그림 6. Short-slot 하이브리드 커플러 시뮬레이션
Fig. 6. Simulation of short-slot hybrid coupler.

의해 1952년 IRE에 발표된 “The Short-Slot Hybrid Junction” 논문에 기초하듯이, 주 도파관과 보조 도파관 사이에 커플링을 허용하기 위해 그림 5와 같이 두 도파관 사이의 공통 벽 일부를 제거한 후 두 도파관을 나란하게 맞붙인 것으로, 두 도파관이 서로 대칭이므로, 커플러 성능을 저하시키는 일 없이 4 개 단자 중 하나를 입력으로 사용할 수 있다^[8~11].

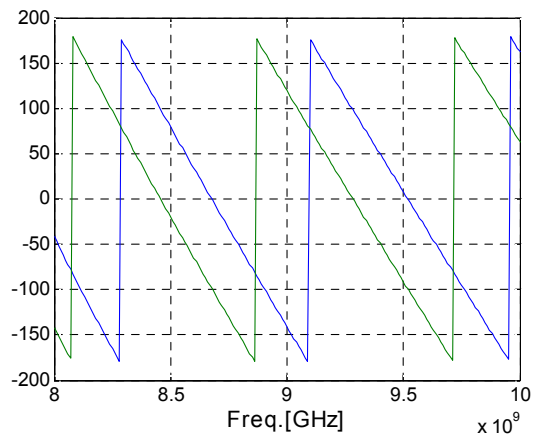
Short-slot 하이브리드 커플러의 입력 전력은 두 출력단자에서 동일하게 나누어지며, 나머지 단자는 격리된다. 그림 5에서 입력단자가 A이고, 출력 단자 B, C가 단락되어 있을 경우, A에 입력된 RF 신호는 위상 이동 없이 출력단자 B, C에서 입력단자 A로 반사된다.



(a) Short-slot 하이브리드 커플러 사진
(a) Photo of short-slot hybrid coupler



(b) 삽입손실 : dB(S21), dB(S23)
(b) Insertion Loss : dB(S21), dB(S23)



(c) 위상 : Phase(S21), Phase(S31)
(c) Phase : Phase(S21), Phase(S31)

그림 7. Short-slot 하이브리드 커플러 제작 사진 및 측정결과

Fig. 7. Photo of manufactured short-slot hybrid coupler & test result.

단자 C의 반사로 인해 단자 A에서 전압은 90° 위상 이동된 신호가 더해지며 단자 B의 반사 신호를 제거하여 순수한 입력신호만 존재한다. 마찬가지로 단자 B의

반사로 인해 단자 D에 도달하는 반사 신호는 90° 위상이동 되고 따라서 단자 C로부터 반사 신호를 상쇄시킨다.

그림 6은 그림 5의 구조를 이용하여 Ansoft 사의 HFSS를 이용하여 설계한 결과를 나타낸다. 설계된 하이브리드 커플러는 성능 검증을 위해 그림 7(a)와 같이 알루미늄 6061을 이용하여 딥 브레이징 기술로 제작하였다. 각 단자는 용이한 측정을 위해 동일한 길이의 L자 모양 도파관으로 연결하였다.

그림 7(b)와 7(c)는 네트워크 분석기를 이용하여 측정한 결과를 나타낸다. 표 2의 설계규격과 비교하였을 경우 두 출력단자에서의 진폭균형 (Amplitude Balance)은 양호한 일치를 보였으나 삽입손실은 약 0.2dB 차가 발생하였다. 이러한 차이는 설계에서 도출된 하이브리드 커플러 외에 측정 편의를 위해 연결된 L 자형 도파관 삽입손실이 반영된 결과이다. 또한 두 단자의 위상차는 약 90° 정도로 양호하지만, 그림 6 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 발생하는 것은 연결된 L 자형 도파관 길이로 인한 것으로, 이를 고려하였을 경우 제작결과는 전반적으로 설계규격 및 시뮬레이션 결과와 양호한 일치를 보였다.

2.2.2 IF 증폭기 설계

그림 3의 SSB 변조기 구성도에서 IF 신호는 두 믹서 입력에 적합한 신호레벨을 가져야 할 뿐만 아니라 믹서 변환손실 보상을 위해 적절한 증폭도를 갖도록 설계되어야 한다. 또한 두 크리스탈 믹서에 입력되는 IF(+) 신호와 IF(-) 신호의 위상차가 90°를 가져야 하며, 두 신호간의 진폭 불균형은 최소가 되도록 구성해야 한다.

이러한 요구조건을 충족시키기 위해 본 논문에서는 그림 8과 같은 구성을 갖는 IF 증폭기를 설계하였다.

그림 8에서 IF 증폭기는 믹서 변환손실 보상을 위해

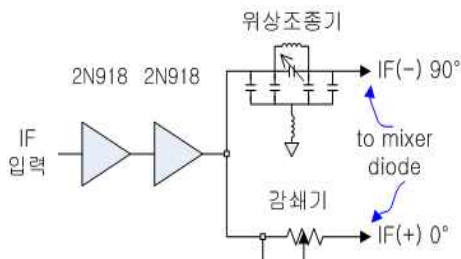
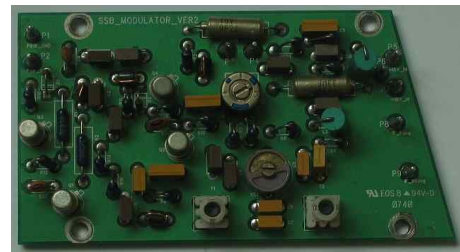
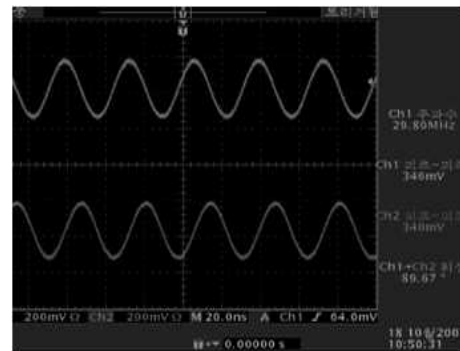


그림 8. IF 증폭기 구성도
Fig. 8. Block-diagram of IF Amplifier.



(a) IF 증폭기 사진
(a) Photo of IF Amplifier



(b) 신호 위상차 @ IF(+), IF(-) 단자
(b) Phase difference @ IF(+) & IF(-) ports

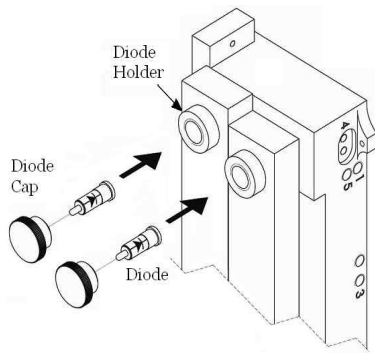
그림 9. 두 믹서 입력을 위한 IF 증폭기 출력파형
Fig. 9. IF Amplifier output waveform for two mixer input.

2 단의 2N918 트랜지스터로 구성된 증폭기와 증폭된 신호를 90° 위상차로 분배하기 위한 위상조종기 및 두 신호간의 진폭 불균형을 최소화하기 위한 감쇄기로 구성하였다.

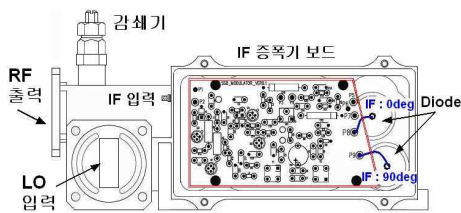
그림 9는 제작된 IF 증폭기 사진과 IF 증폭기의 두 출력단자에서 출력된 신호의 위상차 측정 결과이다. 그림 9(b)에서 알 수 있듯이 감쇄기 및 위상 조종기에서 조종이 완료된 IF 증폭기 두 출력단자의 진폭은 각각 346mV와 340mV로서 두 출력단자의 진폭불균형은 약 6mV로 작았으며, 두 신호의 위상차는 약 89.67°로 이론적인 90° 위상차와 비교하여 약 0.33°차이를 가져 위상균형 역시 매우 양호한 결과를 가짐을 알 수 있다.

III. SSB 변조기 제작 및 측정결과

도파관 구조로 설계된 SSB 변조기는 알루미늄 6061을 이용하여 제작하였다. 일반적으로 알루미늄(Al)은 열팽창 계수가 동(Cu)보다 다소 크기는 하지만 (Cu : 16.8×10⁻⁶°C, Al : 23.86×10⁻⁶°C @20°C) 가벼운 장



(a) 크리스탈 다이오드 믹서 홀더
(a) Crystal diode mixer holder



(b) SSB 변조기 조립도
(b) Assembling drawing of SSB modulator



(c) 제작된 SSB 변조기 사진
(c) Photo of manufactured SSB Modulator

그림 10. 제작된 SSB 변조기 조립도 및 사진
Fig. 10. Assembling drawing and photo of manufactured SSB modulator.

점이 있어, 고출력 레이더 시스템의 RF 프론트 엔드를 도파관으로 구성할 경우 전체 무게를 줄이는 효과를 가질 수 있지만, 납땀이나 용접이 어려운 단점으로 인해 가공이 용이하지 않다.

본 논문에서는 Short-slot 하이브리드 커플러 등을 비롯한 설계된 각 도파관 부품들을 이용하여 일체형 SSB 변조기를 제작하기 위해 딥 브레이징 기술을 이용하였다. 브레이징이란 피접합체는 용융시키지 않고 용융금속(filler)의 퍼짐성, 습윤성 및 모세관 현상을 이용하여 용융금속을 채운 후 두 재료를 접합시키는 방법으로서 제품의 변형 및 손상을 방지하는 접합방법으로 고출력 레이더와 같이 고주파수 대역에서 높은 전기적 신뢰성을 유지하기 위해서는 핵심기술이라 할 수 있다^[12~13]. 이러한 브레이징 기술을 이용하기 위해서는

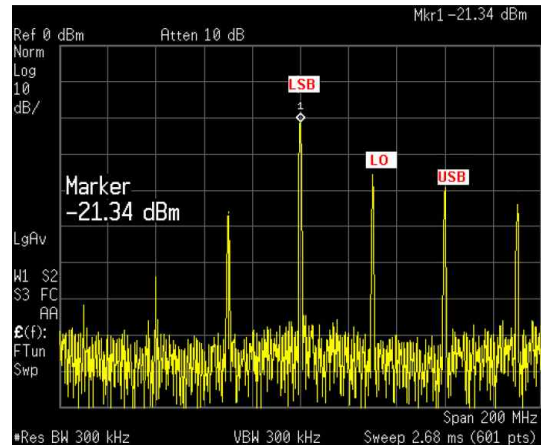


그림 11. SSB 변조기 RF 스펙트럼 @ RF 단자
Fig. 11. RF spectrum of SSB modulator @ RF port.

피접합체의 제작이 1/100 mm의 정밀도로 제작되어야 하며, 브레이징 과정에서도 일정한 틀을 유지하도록 하는 것이 핵심이다.

그림 10은 딥 브레이징 기술을 이용하여 제작된 X-Band SSB 변조기 사진과 변조기 조립도를 나타낸다.

그림 11은 SSB 변조기 RF 출력단에서 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정된 결과를 나타낸다. 본 논문의 경우 SSB 변조기 출력 신호는 LSB(Low Side Band) 신호가 되도록 설계하였으며, 따라서 측정 결과는 LSB를 기준으로 LO=LSB+30MHz와 USB=LO+30MHz 신호를 볼 수 있다. 이 경우 LSB 신호를 기준으로 LO 신호와 USB(Upper Side Band) 신호 제거비는 각각 14.2dB와 18.5dB로서 설계규격(표 1참조)과 비교하여 LO 신호 제거비가 다소 열화된 출력을 갖는데, 이러한 원인은 IF 증폭기와 다이오드와의 부정합으로 인한 것으로서, 정합이 양호하고 IF 증폭기 보드에 구현된 신호 감쇄용 가변 저항기와 위상 조종기용 가변 인덕터 및 가변 캐패시터를 정밀한 부품으로 선정할 경우 LO 및 이미지 신호 제거비를 상당히 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고출력 모노펄스 레이더 시스템의 프론트 엔드에서 사용하기 위한 도파관 구조의 X-Band SSB 변조기에 대한 설계 및 제작에 대해 논하였다. 산악 및 해상 등의 열악한 환경과 진동 및 충격 등의 조건에서 안정적으로 동작하도록 무게가 가벼운 알루미늄

미늄으로 도파관을 비롯한 IF 증폭기 케이스 등을 제작하였으며, 제작된 각 구성품은 고출력 펄스 신호 방사시 이음매 부분에서 아크 방전으로 인한 파손을 예방하고 시스템 안정성을 확보하기 위해 딥 브레이징 기술을 이용하여 제작하였다.

제작된 SSB 변조기는 실제 운용시 고출력 증폭기인 TWTA 전력포화방지와 전력 마진을 위해 출력단에 도파관 구조의 가변 감쇄기를 구성하여 레벨 조정이 가능하도록 하였으며, 시험결과 송신신호인 LSB 신호를 기준으로 LO 신호와 USB 신호 제거비는 각각 14.2dB와 18.5dB로, 정합이 양호하고 정밀 조종이 가능한 부품을 사용할 경우 설계규격 이상의 성능을 달성할 수 있으리라 판단된다.

본 논문에서 설계, 제작된 X-Band SSB 변조기는 다양한 군용 레이더 시스템과 통신 시스템 및 무인항공기 등에 이용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Merrill Skolnik, *Introduction to RADAR Systems 3rd Ed.*, McGraw-Hill, pp. 210-238, 2001.
- [2] Guy Morris, Linda Harkness, *Airborne Pulsed Doppler RADAR 2nd Ed.*, Artech House, pp. 289-322, 1996.
- [3] Bassem R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB 2nd Ed.*, Chapman & Hall/CRC, pp.465-525, 2005.
- [4] Donald E. Norgaard, "The phase-shift method of single-sideband signal generation", *Proc. of IRE*, vol. 44, No. 12, pp.1718-1735, Dec. 1956.
- [5] Ben R. Hallford, Microwave Balanced Mixer Circuit, US3659206, Apr. 23, 1972.
- [6] George C. Reeder, Jr., Monopulse Radar Antenna Structure, US3711858, Jan. 16, 1973.
- [7] Wilbur L. Pritchard, Carlo P. Domenichini, Balanced mixers which utilize image frequency power reflected from detector diodes, US2834876, May 13, 1958.
- [8] Henry J. Riblet, "The Short-Slot Hybrid Junction", 1952, IRE, p.180-184
- [9] Peter A. Rizzi, Microwave Engineering Passive Circuits, Prentice Hall, pp. 347-410, 1988.
- [10] Henry J. Riblet, Wellesley, Mass, Microwave hybrid junctions, US2739287, Mar. 20, 1956.
- [11] Henry J. Riblet, Wellesley, Mass, Microwave hybrid junctions, US2876421, Mar. 3, 1959.

- [12] http://www.fpga-faq.org/sb-metal_hold/CD_08/TheBrazingBook.pdf
- [13] M. Roulin, J. W. Luster, G. Karadeniz & A. Mortensen, "Strength and Structure of Furnace-Brazed Joints between Aluminum and Stainless Steel", *Welding Journal*, pp.151-155, MAY 1999.
- [14] Stephen A. Maas, *Microwave Mixers 2nd Ed.*, Artech House, pp. 237-312, 1993.
- [15] Messenger, G. C, McCoy, C. T., "Theory and Operation of Crystal Diodes as Mixers", *Proc. of IRE*, pp. 1269-1283, 1957.
- [16] A. Lindell, B.Sc, and T. Oxley, "Radar crystal valves", *The Institution of Electrical Engineers*, No. 3104E, pp. 426-433, Jan. 1960.

저자 소개



고영목(정회원)
1991년 2월 광운대학교
전자공학부 (공학사)
1993년 2월 광운대학교
전자공학과 (공학석사)
2006년 9월~현재 (주) 디에스티

<주관심분야 : Radar system, UWB Antenna, 수치지해석>



나극환(정회원)
1981년 7월 프랑스 ENSEEIHT
국립 종합 과학대학
(공학박사)
1981년 9월~1986년 12월 광운대
학교 전자공학과 부교수
1987년 1월~1988년 1월 미국

COSMST 연구소 객원 연구원
1988년 2월~현재 광운대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : RF 및 마이크로파 통신시스템, 밀리미터파 통신시스템, 수치지해석>