

위성통신용 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기 캐소드 리플 특성 개선방안

정회원 홍인표*

A Cathode Ripple Resolution Method on 600W SHF TWTA for Satellite Communications

In Pyo Hong* *Regular Member*

요 약

진행파관 증폭기는 입력되는 RF(radio-frequency)신호를 일정한 크기로 증폭하여 안테나로 출력하는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 위성통신용 고출력 SHF(Super High Frequency) 대역 진행파관 증폭기의 캐소드 리플 개선방안을 제안한다. 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기의 구현 및 실험을 통하여 제안한 방안이 설계규격을 만족시키는 결과를 얻었다. 또한 RF부로 공급되는 보조전원의 잡음을 저감하여 예측치 못한 잡음성분들을 제거함으로써 RF 성능이 개선되었다. 따라서 본 논문에서 제안한 방안은 매우 효과적이며, 차후 유사장비 개발 시 적용가능할 것으로 판단된다.

Key Words : 캐소드 리플, 진행파관 증폭기, 잔류 AM, 고압전원모듈, R-L-C 필터

ABSTRACT

TWTA is to perform the function that amplifies the input RF signal and outputs it to the antenna. This paper proposes a method that is to improve the cathode ripple of the SHF TWTA for satellite communications. Through the embodiment and experiment of 600W SHF TWTA, this method satisfies the design specifications. Also, RF performance is improved by reducing the noise of auxiliary power sources supplied to the RF part and eliminating the unexpected noise. Therefore, this method is very effective and can be used to develop the similar equipments.

I. 서 론

위성통신용 600W급 SHF 대역 진행파관 증폭기(TWTA : Traveling Wave Tube Amplifier)는 위성통신 SHF대역 차량용 단말에 사용하기 위해 개발되었다. 차량용 단말의 하드웨어는 공통처리부, 모듈부, IF(Intermediate Frequency) 공동처리부 및 RF 처리부로 구성되며, RF 처리부는 상향주파수 변환기, 하향주파수 변환기, 저잡음 증폭기 및 진행

파관 증폭기 등으로 구성된다¹⁾.

고출력 증폭기에는 클라이스트론(Klystron)관 또는 진행파관(TWT : Traveling Wave Tube)이 사용되고 있다. 클라이스트론은 소비전력이 작고 중량도가 가볍지만 진행파관에 비하여 통과 주파수 대역폭이 좁다. 송신전력이 비교적 작은 지구국이나 위성에서는 사용주파수대에 따라서는 고체증폭기(SSPA: Solid State Power Amplifier)도 사용되고 있다. 진행파관 증폭기는 고체증폭기와 비교하여 광대역 주

* 국방과학연구소 (hip7777@naver.com)

논문번호: KICS2005-08-338, 접수일자: 2005년 8월 17일

파수영역에서 가장 효율적으로 RF 신호를 증폭할 수 있는 장치이며, 특히 대용량 고출력증폭에 적합하다. 고체소자(solid state) 기술과 비교했을 때 최근의 금속-세라믹 진행파관(metal-ceramic traveling tube) 증폭기는 저렴한 가격으로 적합한 성능과 정비지원이 가능하다. 진행파관 증폭기를 사용하는 시스템은 고체증폭기를 사용하는 시스템에 비해 소형이고 가벼우며 훨씬 효과적이다²⁾³⁾.

진행파관 증폭기의 RF 특성을 개선하기 위하여 설계 및 개발시 고려해야할 설계변수로는 진폭/주파수, 상호변조, 지연왜곡, AM(Amplitude Modulation)/PM(Phase Modulation) 변환, 대역 외 방사 및 잔류(residual) AM 특성 등이 있으며, 이들에 대한 주요내용을 기술하면 다음과 같다.

진폭/주파수 : 통상 증폭기의 이득은 주파수에 따라 변화하는데 이 주파수특성을 진폭/주파수특성이라고 하며 어떤 일정한 범위 이내여야 한다. 또한 이득의 주파수에 대한 미분계수를 이득경사라고 하며, 규정된 값 이하여야 한다. 이득경사와 AM/PM 변환특성을 가진 증폭기에 주파수가 다른 복수의 신호가 입력된 경우에는 신호의 위상에 왜곡이 발생하고 AM 변조나 FM 변조를 사용한 음성통신에서는 잡음이 발생한다. 디지털 변조의 경우에는 비트 에러율이 증가한다.

상호변조 : 증폭기의 비선형 증폭특성에 의하여 복수의 신호를 입력한 경우에 상호 변조적이 발생하여 각 신호에 간섭을 한다. 또한 비선형영역에서 동작하고 있는 진행파관의 전기적 길이가 입력신호 전력에 따라 다르기 때문에 입력신호에 진폭변동이 있으면 출력신호에서는 위상변동이 생길 수도 있다. 이 현상을 AM/PM 변환이라고 하며 이것도 상호변조적의 발생원인이 된다. 이들에 대한 대책으로서는 증폭기의 동작점을 내려 선형영역에서 사용하거나 진행파관 증폭기의 입력단에 진행파관 증폭기의 비선형성이나 AM/PM 변환특성과는 역특성을 가진 선형화기(linearizer)를 접속하여 보상하는 등의 방법이 있다.

지연왜곡 : 주파수에 의존하는 그룹지연(group delay)의 변화는 신호의 전송품질에 영향을 미친다. 그룹지연은 위상량의 주파수에 의한 미분계수와 같다. 따라서 그룹지연에 주파수 의존성이 있다는 것은 주파수에 대한 위상량의 비례관계에서 편차가 생기는 것을 의미하며 이 위상왜곡이 신호의 전송 품질에 영향을 미친다. 통상 대책으로서 IF단 또는

RF단에 등화기(equalizer)를 삽입하여 주파수왜곡을 보정한다.

대역외 방사 : 진행파관 증폭기의 비선형 증폭특성 때문에 상호변조적이거나 고조파가 발생하여 사용하는 주파수 대역 외에 전력을 송신하는 경우가 있다. 이 대역외 복사에 대해서는 송신과 전력의 -50dB 이하로 규정되어 있다. 통상은 진행파관 증폭기의 출력측에 대역통과 필터(band-pass filter)를 삽입하여 불필요파를 제거하고 있다.

잔류 AM : 지구국의 송신파에 필요 없는 AM 성분을 가지고 있으면 위성에 탑재되어 있는 중계기의 AM/PM 변환특성에 의하여 상호변조적이 발생한다. 이 잔류 AM은 전원 전압의 변동 등에 의하여 발생할 수가 있으므로 주의하여 설계할 필요가 있다⁴⁾.

또한 진행파관 증폭기에서 출력전압에 리플이 발생하는 것은 일반적인 문제점이며, 이를 제거하기 위하여 일단 혹은 다단의 L-C 저역통과 필터(low-pass filter)가 주로 사용된다. 그러나 이것은 부피가 크고 손실이 많이 발생된다⁵⁾.

따라서 본 논문에서는 진행파관 증폭기의 RF 특성을 개선하기 위하여 위에서 언급한 설계변수들 중에서 주요변수에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 위성통신용 고출력 진행파관 증폭기 설계 및 개발시 RF 특성에 영향을 미치는 가장 중요한 문제점중의 하나인 진행파관의 캐소드(cathode) 리플(ripple) 개선방안을 제안한다. 진행파관의 캐소드 리플 개선방안은 실제 구현 하는 것이 매우 어렵다. 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기 구현 및 실험결과 고전압발생기 정류회로의 구조를 리플에 유리한 브리지 전파정류회로로 채택하고 캐소드 출력단에 R-L-C 리플 필터를 적용한 결과, 위상잡음(phase noise)과 정격출력(rated power)의 규격을 만족하였으며, 잔류 AM도 개선되어 제안된 규격을 만족시키는 결과를 얻었다.

II. 진행파관 증폭기 특성 및 리플 개선방안

2.1 특성

본 절에서는 진행파관 증폭기의 비선형 특성과 일그러짐에 발생하는 동작상태 및 진행파관과 고전압발생기 사이의 상호작용 및 여러 가지 변수들 사이의 절충(trade-off) 등 기술적인 주요사항을 기술한다. 이상적인 선형증폭기에서는 개별적인 출력신

호의 진폭이나 위상은 공통 증폭되는 다른 신호의 영향을 받지 않는다. 그러나 진행파관 증폭기나 고체증폭기에서는 입력되는 신호전력이 작은 동안에는 선형동작을 하는데 신호전력이 커지면 비선형증폭의 영향이 나타난다. 일반적으로 전력을 효율적으로 사용하기 위해 증폭기가 비선형영역에서 동작되도록 시스템이 설계되는 경우가 많다. 증폭기가 비선형동작을 하는 경우, 공통 증폭되는 신호에 상호변조적 과 신호 왜곡에 의한 스펙트럼의 확대와 같은 영향이 발생한다.

상호변조적의 영향은 복수의 신호를 곱한 적신호가 입력된 신호에 간섭을 미치는 것이다. 신호왜곡의 영향은 출력신호의 스펙트럼이 확대되어 인접하는 채널을 간섭하는 효과나 신호파형 그 자체의 왜곡으로서 나타난다. 비선형증폭기에 입력되는 전체 입력신호전력 대 전체 출력신호전력의 관계는 입력되는 신호수에 따라 다르다. 신호수가 증가함에 따라 증폭기가 포화하는 입력전력 및 출력전력은 저하된다.

복수파인 경우에 전체 출력전력이 단일파인 경우에 비하여 저하되는 것은 상호 변조적이 발생함으로써 신호와는 다른 주파수대에 출력전력이 흩어지기 때문이다. 통상, 상호변조적의 고차항이 될수록 그 성분의 전력 기여는 작아진다. 이 상호변조 주파수가 신호 주파수와 일치 또는 가까운 경우에는 간섭파로 되어 신호열화의 요인이 된다. 이러한 상호 변조적의 영향을 경감시키기 위해 통상 사용되고 있는 방안이 있다. 즉, 입력 백오프(back-off)를 충분히 크게 하여 증폭기의 비선형특성의 영향을 경감시킨다. 이 경우 너무 백오프를 크게 하면 전력 이용효율이 저하된다. 또한 선형화기 등을 사용하여 비선형증폭 특성을 개선한다. 이 방법은 진행파관 증폭기의 비선형특성과 반대의 특성을 가진 선형화기를 사용하여 비선형증폭 특성의 영향을 경감시키는 것이다⁶⁾.

순간진폭에 미치는 비선형성 외에 AM/PM 변환에 의한 비선형효과가 발생한다. 이것은 입력되는 다수의 신호 전체 포락선의 변화가 출력신호의 위상에 영향을 미치는 효과이며, 이 효과에 의해서도 상호 변조적이 발생한다. 여기서는 진폭에서의 비선형효과인 AM/AM 변환특성과 위상에서의 비선형효과인 AM/PM 변환특성에 대하여 설명한다.

진행파관 증폭기에 입력되는 n 파의 신호를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$u(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \cos(2\pi f_0 t + 2\pi f_i t + \phi_i(t)) \quad (1)$$

여기서 $A_i(t)$ 는 개별적인 신호의 진폭, $\phi_i(t)$ 는 위상이다. 또한 f_0 는 진행파관 증폭기 통과 주파수 대역의 중심주파수이며, $(f_0 + f_i)$ 로 개별적인 통신신호의 반송파 주파수를 표시한다. 또한 $f_0 \gg f_i$ 가 성립된다. 이것은 주파수 대역폭이 반송파 주파수보다 훨씬 작다는 것, 즉 협대역신호를 의미한다. 일반적으로 위성통신에 사용되는 신호는 협대역신호이다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (2)$$

여기서 각 변수는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (3)$$

$$\phi(t) = -\arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (4)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i(t)) \quad (5)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \sin(2\pi f_i t + \phi_i(t)) \quad (6)$$

이 때의 출력신호는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$v(t) = G(A(t)) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t) + \Psi(A(t))) \quad (7)$$

여기서 $G(A)$ 는 포락선의 비선형특성이며, $\Psi(A)$ 는 AM/PM 변환을 표현하는 항이다. 식 (7)은 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$v(t) = G_p(A(t)) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t)) - G_q(A(t)) \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (8)$$

여기서 $G_p(A(t))$ 와 $G_q(A(t))$ 는 아래 식과 같다.

$$G_p(A(t)) = G(A(t)) \cos(\Psi(A(t))) \quad (9)$$

$$G_q(A(t)) = G(A(t)) \sin(\Psi(A(t))) \quad (10)$$

이들 식으로 표현되는 비선형특성은 그림 1과 같은 동위상 직교 모델(in-phase/quadrature model)로 표시할 수 있다.

상기모델은 진행파관 증폭기의 AM/AM 변환 및

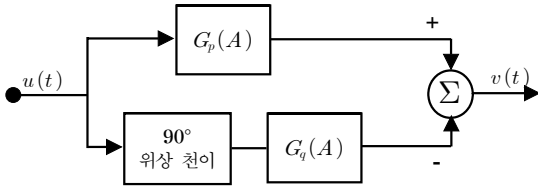


그림 1. 진행파관 증폭기의 동위상 직교 모델

AM/PM 변환의 영향이 동위상 및 직교 채널에서의 진폭의 비선형특성만으로 표현될 수 있다는 것을 나타내고 있다. 즉 위상왜곡을 직접적으로 고려할 필요가 없다는 것이다. 그리고 동위상 및 직교 채널의 출력은 독립적이고 출력신호의 전력 스펙트럼은 각 채널의 출력전력 스펙트럼의 합으로 표현할 수 있다. 앞의 성질에서 지금까지 설명한 진폭에 관한 비선형의 성질이 AM/PM 변환에 의한 비선형성을 포함하는 경우에도 성립되는 것을 알 수 있다. 또한 식 (9), (10)에서 알 수 있듯이 진폭에 관해서 선형이라도 AM/PM 변환이 있는 경우에는 동위상 및 직교의 전달함수는 비선형으로 되며 상호변조적이 발생한다. 진행파관 증폭기의 동작레벨이 작을 때에는 AM/AM 변환의 영향이 작고 AM/PM 변환의 영향이 우세하게 된다. 그러나 동작레벨이 진행파관 증폭기의 포화레벨에 접근하면 반대로 진폭 비선형성의 영향이 우세하게 된다^[4].

2.2 리플개선방안

진행파관 증폭기에서 전자빔(electronic beam)의 속도에 영향을 미치는 요소가 RF 출력신호에 위상변화를 초래한다. RF 입력전원 레벨이 비선형영역에서 증가되면, RF파로 에너지가 전이되므로 전자빔 속도가 느려진다. 이러한 현상을 AM/PM 변환이라고 하며, 선형영역에 있는 RF 입력전원에서는 상대적으로 덜 민감하다. 진행파관이 포화영역에서 구동되면, 위상변화율이 증가한다. 최대 AM/PM값은 일반적으로 포화영역에서 몇 dB 아래에서 나타나며 주파수에 따라 변화한다(통상적으로 주파수가 증가하면 증가한다).

전자빔의 속도를 변화시키는 요소가 시간에 따라 변화하면, 그 결과로서 RF 출력신호에 위상변조가 발생된다. 전자빔의 속도에 영향을 미치는 가장 큰 요소가 캐소드전압이다. 다른 전압 혹은 외부 요소들(진행파관 근처에 송풍기를 설치함으로써 발생하는 전압 등)은 부차적인 것들이다. 각 요소별로 RF 출력신호의 위상변조에 영향을 미치는 정도가 다르다 : 즉, 캐소드전압의 1% 변화 → 100°, 그리드

“on” 전압의 1% 변화 → 10°, 콜렉터(collector)전압의 1% 변화 → 0.0005°. 이 값들은 근사치이며, 어떤 특정 진행파관에 대한 실제 위상값은 전자총(gun)의 퍼비언스(perveance), 이득 및 효율 등에 의해 결정된다. 주기적인 전압변조를 함으로서 변조주파수에 의해 주 신호에서 분리된 측파대(signal side bands)가 생성된다. 사인파 리플에 대한 이득 불요파의 저하량(δ (dB))은 아래식과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\delta = 10 \text{Log} \frac{1.13 \times 10^3 \times L_T^2 \times f_{RF}^2 \times v_c^2}{V_c^3} \quad (11)$$

- L_T : 진행파관의 RF 입력에서 출력까지의 길이(“)
- f_{RF} : RF 신호 주파수 (GHz)
- v_c : 캐소드 리플 침두치(Vp-p)
- V_c : 캐소드전압(V)

예를 들면, L_T 가 10” 이고 캐소드 전압이 10KV 인 진행파관에서 $\pm 0.5V$ 의 사인파 리플이 10GHz에서 -49.5dBc의 측파대를 발생시킨다. 위상리플 침두치($\Delta\phi_p$ (°))는 아래식과 같이 소 신호 이득 리플 침두치(dG_p (dB))와 직접적으로 관계가 있다.

$$\Delta\phi_p \cong 57.3 \times (10^{(dG_p/20)} - 1) \quad (12)$$

즉, $\pm 0.2\text{dB}$ 의 소 신호 이득 리플로 인하여 $\pm 1.35^\circ$ 의 위상 리플이 발생된다. 시간지연은 신호가 진행파관을 통과하는데 걸리는 시간(통상적으로 3~5 nsec)과 위상지연을 미분한 것을 합한 시간이다. 따라서 시간지연 왜곡이 발생하는 원인은 위상의 비선형성을 초래하는 것과 동일한 구조 때문이다. 이득과 위상 리플에 의해 발생하는 시간지연의 최대 변화율($\Delta\gamma$ (nsec/MHz))은 아래 식으로 계산된다.

$$\Delta\gamma \cong \frac{\pi \times (10^{(dG_p/20)} - 1)}{dN_f^2} \times 10^{15} \quad (13)$$

여기서 dN_f (Hz)는 소 신호 이득 리플의 주파수 주기수이다. $\pm 0.2\text{dB}$ 의 크기를 갖는 200MHz 이득 리플은 3.7 psec/MHz의 시간지연 왜곡을 초래한다.

상기 기술된 바와 같이 캐소드 리플, 잔류 AM 및 위상잡음 사이에는 밀접한 연관관계가 있다. 즉, 캐소드 리플을 개선함으로써 잔류 AM과 위상잡음 성능을 향상시킬 수 있다.

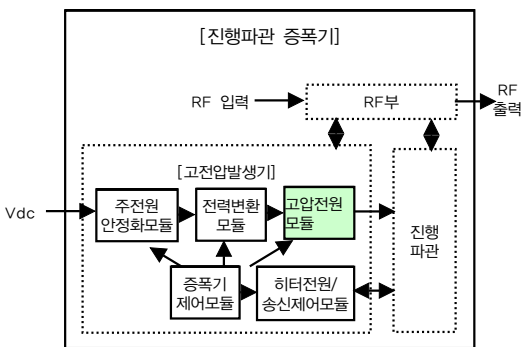
본 논문에서 설계/구현한 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기는 그림 2에 제시된 바와 같이 크게 고전압발생기, 진행파관, 그리고 RF부로 구성된다. 고전압발생기는 주전원안정화모듈, 전력변환모듈, 고압전원모듈, 증폭기제어모듈, 히터전원 송신제어모듈로 구성되며, 각 모듈의 주요 기능은 다음과 같다. 주전원안정화모듈은 전력변환모듈로 안정된 전압을 공급해주는 역할을 담당하며, 귀환제어를 이용하여 출력 과전압 보호 및 과 온도에 대한 오류를 검출한다. 전력변환모듈은 인버터로 구성된 모듈로써 고전압발생을 위해 전력을 변환하여 고압전원모듈로 변환된 전력을 공급해주는 역할을 담당하며, 인버터 과전류 보호 및 과온도 오류 검출, 고전압발생기 온도를 검출한다. 고압전원모듈은 전력변환모듈에서 공급된 전력을 이용하여 진행파관의 캐소드 콜렉터, 나선(helix)에 고압의 안정된 전원을 공급해주는 역할을 담당하며, 진행파관의 나선전류, 전자빔전류, 캐소드 과전압/저전압 상태를 검출한다. 히터전원/송신제어모듈은 FE(Focus Electrode) 및 히터전압을 제어하는 역할을 담당하며, 히터의 과전류/저전류 오류검출 및 히터전류를 검출한다. 증폭기제어모듈은 시스템제어장치와 진행파관 증폭기 내부의 연동

을 담당하며, RS-485포트를 이용하여 시스템제어장치로부터 진행파관의 제어 및 상태감시에 대한 정보를 교환한다. 진행파관은 RF 증폭기이며 진행파관이 적절한 증폭기능을 수행하도록 전압을 공급시켜주는 장치가 고전압발생기이다. RF부는 격리기(isolator), 선행화기 등으로 구성되며, 주로 기 개발된 부품을 이용하므로 설계규격 및 변수값에 적합한 부품을 선정하여 사용한다¹¹.

고전압발생기가 진행파관의 RF 신호 특성에 영향을 미치는 부분 중 가장 큰 부분이 위상잡음 영향이라 할 수 있으며, 이는 고전압발생기에서 발생하는 리플 및 잡음이 진행파관의 전자빔에 영향을 주어 출력되는 RF의 위상에 영향을 미치는 결과로 나타난다. 고전압발생기의 리플 중 특히 영향이 큰 부분은 캐소드에 인가되는 리플이다. 고전압발생기에서 리플을 감소시키기 위해서는 캐패시터 뱅크(capacitor bank)를 증가시켜야 하나 이는 충전되는 에너지를 증가시켜 진행파관의 아킹(arc) 발생시 과도한 에너지를 공급하여 진행파관에 악영향을 미칠 수 있으며, 장비의 크기가 증가하고 가격이 상승한다⁷⁾. 따라서 본 논문에서 구현한 고전압발생기는 출력에 발생하는 리플을 검출하여 이와 역 위상이 되는 신호를 발생시켜 이를 합성하여 리플을 감소시키는 회로를 구현하였다. 이와 같이 여러 가지 요인에 의해 발생하는 진행파관의 캐소드 리플을 개선하기 위하여 본 논문에서는 고전압발생기의 핵심 모듈인 고압전원모듈의 출력단에 그림 3과 같이 캐소드 리플필터를 사용하였다.



(a) 외형도



(b) 구성도

그림 2. 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기

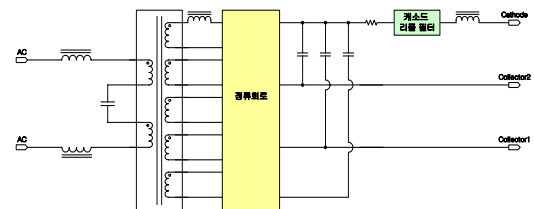


그림 3. 고압전원모듈 구성도

고압전원모듈의 정류회로와 캐소드 리플 필터 사용방식에 따라 캐소드 리플, FFT 스펙트럼 및 RF의 잔류 AM이 다르게 나타난다. 브리지 전과정류회로의 출력전압은 입력전압의 실효치로 나타나며, 출력 리플전압은 아래의 식으로 결정된다.

$$V_{ripple} = \frac{I_{ca}}{4f_{AC}C_o} \quad (14)$$

여기서, I_{oa} 는 캐소드에 흐르는 전류, f_{AC} 는 AC 입력 전압의 주파수, C_o 는 정류회로 출력단 캐패시터이다.

동일한 출력전류와 주파수, 커패시터의 용량을 가진다면 브리지 전파정류회로의 출력 리플전압은 전파배압 정류회로에 비해 0.8배로 줄어든다. 본 논문에서 구현한 고압전원모듈의 경우 전파배압 정류회로를 사용한 구조로는 잔류 AM 규격을 만족시킬 수 없었다. 따라서 분석 및 실험을 통하여 브리지 정류회로를 채택 적용하였다. 그리고 캐소드 리플 필터 종류에 따라 RF 특성이 개선됨을 알 수 있었다 ; 즉, 잔류 AM과 위상잡음 성능이 향상된다. 또한 예상치 못한 잡음에 대한 분석 및 실험결과 RF 부로 공급되는 보조전원의 리플이 영향을 준다고 판단되어 고전압발생기에서 RF부로 공급되는 +15V, -15V, +5V의 보조전원을 전해콘덴서로 평활 처리함으로써 이러한 추가 잡음성분들이 제거되었다.

III. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 구현한 위성통신용 600W급 SHF 대역 진행파관 증폭기는 설계 및 개발 시 2장에 기술된 캐소드 리플 개선방안과 표 1에 제시된 설계 규격을 적용하였다. 표 1은 진행파관 증폭기의 전기적 성능 규격 중 리플과 관련된 사항만을 정리한 것이다.

표 1. 리플과 관련된 진행파관 증폭기 설계규격.

순번	항목	규격
1	Flange 출력	• 537W 이상(57.3dBm)
2	잔류 AM 잡음	• 10KHz 이하 : -50dBc 이하
		• 10KHz ~ 500KHz : -20(1.5+log f[KHz]) dBc이하
3	위상잡음	• 500KHz 이상 : -80dBc 이하
		• 10Hz : -40dBc/Hz
		• 100Hz : -70dBc/Hz
		• 1KHz : -80dBc/Hz
		• 10KHz : -90dBc/Hz
		• 100KHz : -100dBc/Hz

IESS(Intelsat Earth Station Standards)308/309 위상잡음 마스크(mask)의 규격인 -90dBc를 만족하기 위해서는 고전압발생기의 캐소드 리플이 100mV 이내로 제한되어야 한다. 표 1의 규격 중 위상잡음 규격은 IESS 규격보다 10dB 이상 낮게 설정되어있다. 상기 규격에 따라 진행파관 증폭기를 설계 및 제작한 후 실험을 통해 캐소드 리플 필터 종류에 따라 캐소드 리플, FFT 스펙트럼 및 RF의 잔류

AM이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 캐소드 리플 필터 종류에 따른 RF 특성 개선 내용이 아래에 기술되어 있다.

• 필터가 없는 경우

전파배압 정류회로 구조를 가지는 고압전원모듈에 캐소드 리플 필터가 없는 경우의 캐소드 출력파형이 그림 4에 나타나있다.

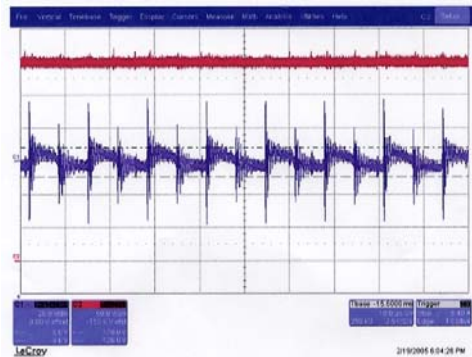


그림 4. 필터가 없는 경우의 캐소드 리플 파형

이 경우 스위치 리플은 1000:1 고압 탐침(probe)의 20V/div.에서 17.6Vp-p이며, 이 때의 잔류 AM은 그림 5와 같다.

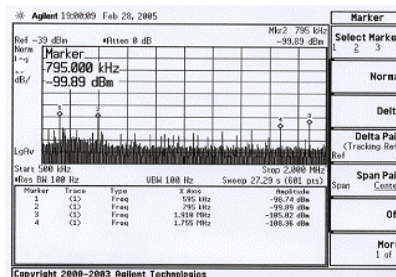
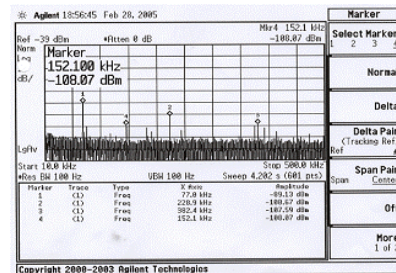


그림 5. 필터가 없는 경우의 잔류 AM

그림 5에서 스위칭 주파수 성분(77KHz)이 높게 나타나며 이의 고조파 성분이 규격을 만족하지 못

함을 알 수 있다. 이것은 R-L-C 필터를 사용함으로써 개선되었다. 500KHz ~ 2MHz 사이에서 예상치 못한 잡음성분이 약 100KHz 간격으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 이것에 대한 개선내용이 그림 16에 제시되어 있다.

•R-C 필터를 사용한 경우

그림 6은 전파배압 정류회로 구조를 가지는 고압 전원모듈의 캐소드 출력단에 사용한 R-C 필터의 주파수 특성을 시뮬레이션하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 캐소드 리플이 스위칭 주파수(77KHz)에서 3dB 감소된다.

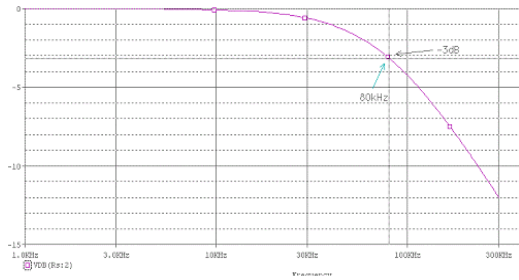
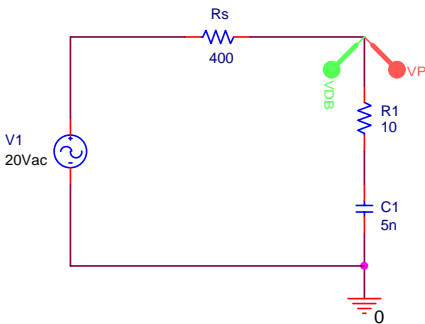


그림 6. R-C 필터의 회로도 및 주파수 응답 특성

필터가 없을 경우의 리플이 17.6Vp-p이고, 이것이 3dB 감소되면 12.5Vp-p가 된다. 그림 7은 실제로 구현하여 측정된 파형으로, 캐소드 리플이 11Vp-p로 측정되었으나 이 리플값으로는 잔류 AM의 규격을 만족하지 못하므로 이에 대한 RF 실험은 하지 않고 L을 추가하는 실험을 수행하였다.

•R-L-C 필터를 사용한 경우

그림 8은 브리지 전파정류회로 구조를 가지는 고압 전원모듈의 캐소드 출력단에 R-L-C 필터를 적용한 경우의 캐소드 파형이다. 1000:1 고압 탐침의 20V/div.으로는 측정이 불가능하여 2V/div.으로 측

정하였다. 그 결과 리플이 1Vp-p 이하로 측정되었으며, 이 때 FFT 스펙트럼값은 -11.3dBm이다. 따라서 이것은 RF 실험시 나타나지 않는 성분으로 판단할 수 있다.

그림 9는 캐소드 리플파형을 오실로스코프의 FFT 기능을 이용하여 도출한 스펙트럼이다. 스위칭 주파수(77KHz)성분은 보이지 않으며, 96.9KHz에서 8dBm으로 측정되었고, 나머지 고주파 성분도 10dBm 근처에 나타난다. 고주파로 가면 9MHz와 11MHz대

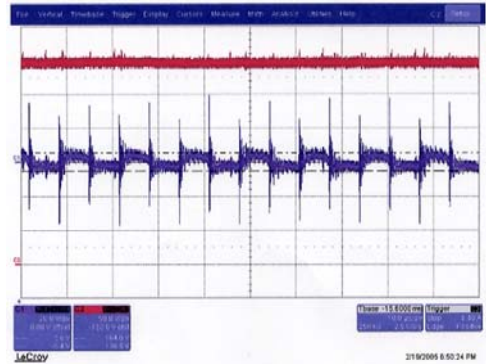


그림 7. R-C 필터를 사용한 경우의 캐소드 리플파형

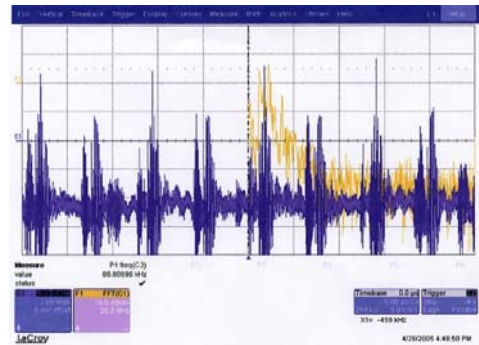


그림 8. R-L-C 필터를 사용한 경우의 캐소드 리플 파형

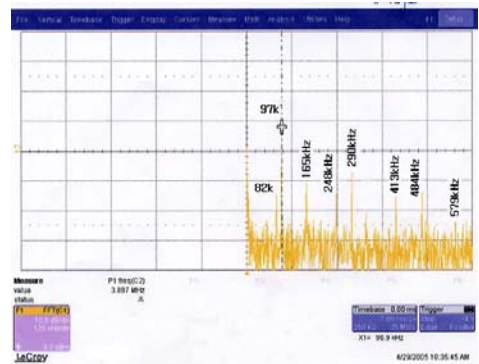


그림 9. 캐소드 리플파형의 FFT 스펙트럼

에서 고조파성분이 계속되거나 그 크기도 8dBm 정도로 미미하여 잔류 AM 측정에서 나타나지 않을 것으로 예측되었으며, 실제 RF 실험에서도 나타나지 않았다.

즉, 96.9KHz 성분은 히터전원/송신제어모듈과 고압전원모듈을 연동하면서 나타나는 것으로 이는 FE 전압의 스위칭 주파수 성분으로 밝혀졌다. 이 주파수 성분은 잔류 AM 측정에서 96.6KHz에서 93.16dBm으로 측정되었다.

그림 10~그림 14는 R-L-C 필터를 사용한 경우의 최종 RF 실험결과로, 잔류 AM이 전 주파수 대역에서 규격을 만족함을 알 수 있으며, 위상잡음과 정격출력도 규격을 만족하였다

또한 그림 5에서 계속된 500KHz~2MHz 사이의 예상치 못한 잡음에 대해 검토한 결과, RF부로 공급되는 보조전원의 리플이 영향을 주는 것으로 분석되었다. 고전압발생기에서 RF부로 공급되는 보조전원 +15V, -15V 및 +5V 중에서 대표적인 +15V에 대하여 리플을 측정한 결과가 그림 15이고 그 값은 200mVp-p이며, 470uF의 전해콘덴서로 리플을

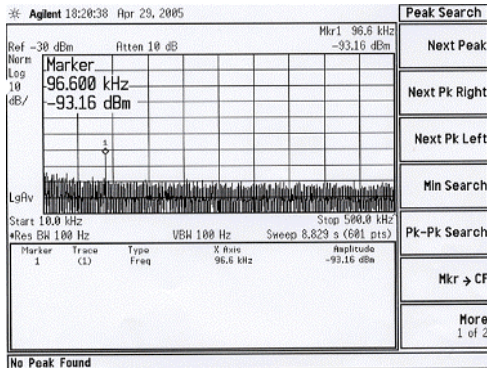


그림 10. 잔류 AM 측정 결과(10KHz~500KHz)

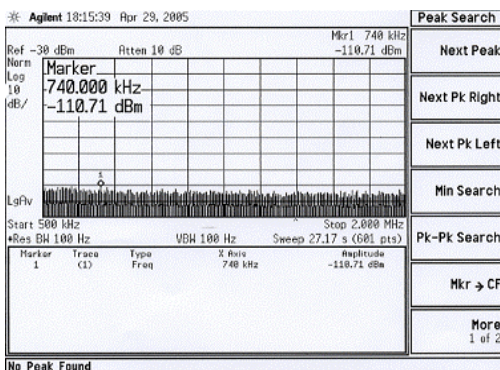


그림 11. 잔류 AM 측정 결과(500KHz ~ 2MHz)

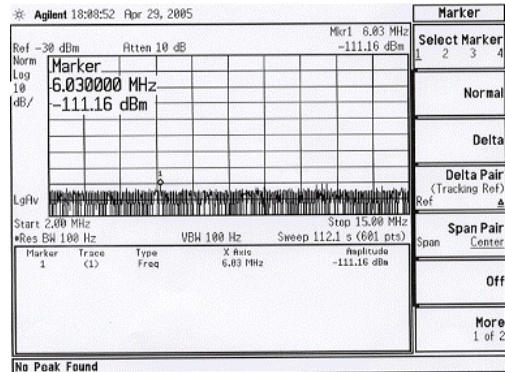


그림 12. 잔류 AM 측정 결과(2MHz~15MHz).

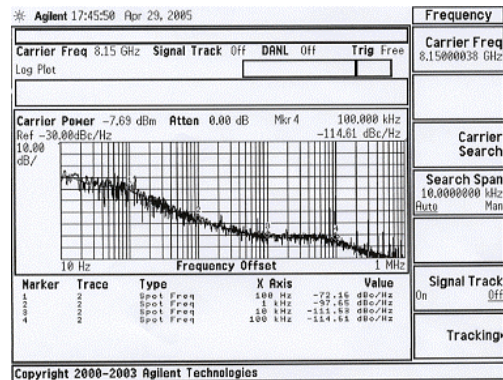


그림 13. 위상잡음 측정 결과

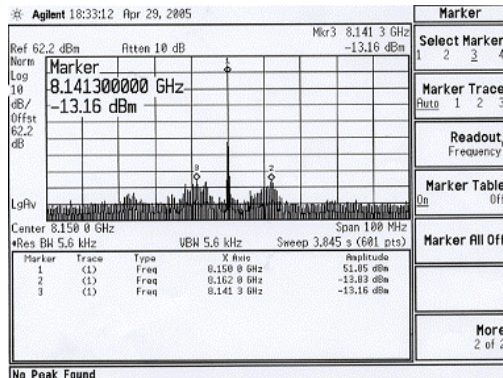


그림 14. 정격출력 측정 결과.

평화한 결과가 그림 16이다. 따라서 보조전원의 리플을 전해콘덴서로 평화 처리한 후 RF 실험을 수행한 결과 위에서 언급한 예상치 못한 잡음성분들이 제거됨으로서 RF 특성이 개선되었다.

상기 실험결과를 종합하면 잔류 AM은 필터를 사용하지 않은 경우와 R-C 필터를 사용한 경우에는 규격을 만족하지 못하였으나 R-L-C 필터를 사용한



그림 15. 개선 전의 +15V 리플 잡음

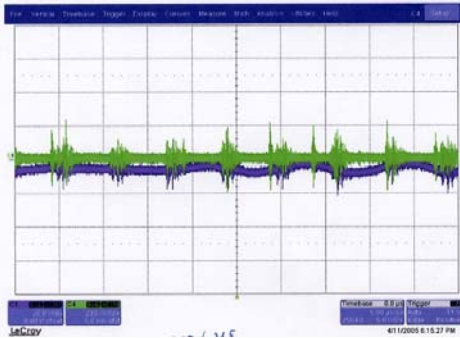


그림 16. 개선 후의 +15V 리플 잡음.

경우에는 규격을 만족하였다. 또한 R-L-C 필터를 사용한 경우 선진국 유사장비인 ETM사의 ETM 400C 와 XICOM Technology사의 XTRD-550X에 비해 위상잡음은 약 5~7dB, 잔류 AM은 약 5dB정도 향상되었음을 알 수 있다.

IV. 결론

진행파관 증폭기는 현재까지 광대역 주파수 영역에서 마이크로파(microwave) 출력을 가장 효과적으로 생성시키는 소스(source)로 알려져 있다.

본 논문에서는 고효율 SHF대역 진행파관 증폭기의 RF 특성을 개선하기 위하여 고압전원모듈 정류회로의 구조를 리플에 유리한 브리지 전파정류회로로 채택하고, 캐소드 출력단에 R-L-C 리플 필터를 적용하였다. 구현 및 실험결과 위상잡음, 정격출력 및 잔류 AM의 값이 요구규격을 만족시키는 결과를 얻었다. 또한 RF부로 공급되는 보조전원의 잡음을 저감하여 예측치 못한 잡음성분들을 제거하였다.

진행파관 증폭기의 RF 특성, 특히 잔류 AM과 위상잡음에 대한 이론적인 배경 및 관련된 사항들이 기존 논문 및 서적에 많이 제시되어 있으나 실

제 600W급 SHF대역 고효율 진행파관 증폭기에서 진행파관의 캐소드 리플을 제거하여 RF 특성이 IESS 규격을 만족할 수 있도록 정밀하게 제어하는 제품을 개발하는 것은 매우 어려운 일이다. 그 이유는 고전압으로 증폭시 발생하는 고조파 및 예측하지 못한 잡음성분들을 제거하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 이론 보다는 설계 및 실험내용을 중심으로 결과를 제시하였다. 본 논문에서 제안한 방안을 적용하여 구현한 진행파관 증폭기에 대한 실험결과 동급의 유사장비에 비해 RF 특성이 우수함을 알 수 있다(위상잡음은 약 5~7dB, 잔류 AM은 약 5dB).

따라서 본 논문에서 제안한 600W급 SHF대역 진행파관 증폭기의 리플특성 개선방안은 매우 유용하고 효과적이며, 차후 유사장비 개발 시 적용가능한 기법임을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] 홍인표, *군위성통신 차량단말용 SHF대역 TWT 설계 및 개발방안 연구*, 기술보고서, 국방과학연구소, no. IEDC-522-050334, 2005. 4.
- [2] Peter Ehret, Helmut Vogt, Andreas Peters, and Ernst Bosch, "L-Band TWTAs for Navigation Satellites", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 52, no. 5, pp. 679-684, May 2005.
- [3] Jan M. Weekley and Bill J. Mangus, "TWT Versus SSPA: A Comparison of On-Orbit Reliability Data", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 52, no. 5, pp. 650-652, May 2005.
- [4] 최용석, *위성통신*, 성안당, 4장 & 7장, 1999.
- [5] Mirosław Mikolajewski and Marian K. Kazimierczuk, "Zero-Voltage-Ripple Rectifiers and DC/DC Resonant Converters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 12-17, January 1993.
- [6] International Telecommunication Union, *Handbook on satellite communications, 3rd ed.*, Wiley-Interscience, New York, ch. 7, 2002.
- [7] Toshihisa Shimizu, Yasuhiro Jin, and Gunji Kimura, "DC Ripple Current Reduction on a Single-Phase PWM Voltage-Source Rectifier",

IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 36, no. 5, pp. 1419-1429, September/October 2000.

홍인표 (In Pyo Hong)

정회원



1982년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

1997년 2월 충북대학교 정보통신공학과 공학석사

2004년 2월 연세대학교 전기전자공학과 공학박사

1984년 3월~현재 국방과학연구

소 책임연구원

<관심분야> 위성통신, SAR/IFSAR, Data/Image Fusion