

군위성통신 차량용단말 X-대역 TWTA용 HVPS 개발

정희원 박재돈*, 장진상*, 동문호*

Development of HVPS of the X-Band TWTA for Military Transportable Satellite Communications

Jaedon Park*, Jeensang Jang*, Moonho Dong* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 군위성통신의 차량용단말에 사용되는 X-대역 TWTA용 HVPS를 설계 및 제작하고 그 성능을 측정하였다. 본 HVPS는 X-대역에서 600 W의 RF 신호 출력을 발생시키는 TWT를 구동시키기 위하여 제작되었다. HVPS의 스위칭 주파수는 80 kHz로 설계되었고 입력전원은 380 V의 직류전원을 사용한다. HVPS의 출력전압은 Cathode 전극에 -10.95 kV의 최대전압을 발생시키고 두개의 Collector 전극에 각각 -4.27 kV, -6.57 kV의 고압 전원을 제공하며 총 출력 전력은 1.6 kW를 발생시킨다. 한편, ripple 전압의 peak-to-peak 크기는 Cathode 전극의 경우 6 V, Collector1은 12 V, Collector2는 6 V로서 출력전압에 비해 각각 0.055 %, 0.281 %, 0.091 % 수준으로 상당히 안정된 전원특성을 얻었다.

Key Words : HVPS, TWTA, transformer, satellite communications

ABSTRACT

The HVPS of the TWTA for military satellite communications is developed and tested. With 380 V input DC voltage, the HVPS provides -10.95 kV for Cathode, -4.27 kV for Collector1 and -6.57 kV for Collector2 of the TWT that generates 600 W X-band output signal power. The total output power of the HVPS is about 1.6 kW. The voltage ripples of Cathode, Collector1 and Collector2 are 6 V, 12 V and 6 V, respectively, which are only 0.055 %, 0.281 % and 0.091 % compared to the absolute output voltages.

I. 서론

군위성통신은 지상 36,000 km의 정지궤도 위성 에 X-대역 증계기를 탑재하여 운용된다. 정지궤도 위성증계기를 이용하여 위성통신을 수행하기 위해서 지상 위성통신단말은 70 dBW 이상의 Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP)가 요구되며, 또한 다채널 통신을 지원하기 위하여 500 MHz 정도의 운용 대역폭이 필요하다. 이러한 고출력 및 광대역 위성통신을 지원하기 위해서 지상 위성통신단말은 Traveling Wave Tube Amplifier (TWTA) 형태의

고출력증폭기를 사용한다. TWTA는 Helix 형태의 진공관 증폭기인 TWT를 이용하여 RF 신호를 증폭 하는 고출력증폭기로서 500~1000 MHz의 광대역에서 2.5 kW 정도의 고출력 특성을 얻는다^{1,2}.

이와 같이 고출력 및 광대역 특성을 지니는 TWT는 요구되는 바이어스 전원 역시 상당히 크다. TWT의 전원 전극은 크게 Cathode와 Collector로 구성되어 있는데, 각각 최대 -10 kV 정도의 고압전 원을 필요로 한다. 그러므로 TWTA 제작에 있어서, TWT를 위주로 한 RF 회로 모듈 제작 기술뿐만 아니라 TWT에 이러한 고압전원을 제공해 주는 High

* 국방과학연구소 4체계개발본부 1부 2팀 (jaedon@add.re.kr)
논문번호 : KICS2005-02-070, 접수일자 : 2005년 2월 17일

Voltage Power Supply (HVPS)를 제작하는 기술 또한 매우 어렵고 중요한 핵심 기술이다.

현재 위성통신용 HVPS 개발업체로는 미국의 CPI사, MCL사 및 Xicom사를 비롯하여 프랑스의 Thales사 등이 있다. 한편, 국내에서는 전자전 레이 다용으로 개발된 바 있는데, 그 HVPS는 80 kHz의 스위칭 주파수로 설계되어 Cathode 전극에 최대전압 -4.1 kV를 제공하며 총전력은 1.67 kW급으로 개발되었다³⁾.

본 논문에서는 이번에 개발에 성공한 X-대역 TWTA용 HVPS 기술을 소개한다. 본 HVPS는 TWTA의 최대 600 W의 신호출력을 지원하기 위해서 Cathode 전극에 최대 -10.95 kV의 고전압을 제공하고 총 1.6 kW의 고전력을 TWT에 제공한다.

표 1은 본 TWTA의 핵심부품인 Teledyne사의 X-대역 신호출력 600 W급 TWT (MEC5450)의 전원 요구규격을 보여주고 있다. 본 TWT는 600 W의 상당히 큰 RF 신호 전력을 발생시키기 때문에 HVPS로부터 제공받아야 할 전원 역시 상당히 크다. Cathode 전극은 -10.95 kV의 대단히 높은 전압과 338 mA의 정격 전류를 필요로 한다. Collector 전극은 효율을 증대시키기 위하여 2개로 구성됐으며 각각 -4.27, -6.57 kV의 고전압과 42 mA, 293 mA의 정격 전류를 필요로 한다. 그리고, Helix 전극은 기준전위로 사용된다. 한편, 본 TWT는 히터와 Focus Electrode (FE) 전원이 추가로 필요한데, 그에 대한 상세한 설계 내용은 본 논문에서는 다루지 않았다.

표 1. TWT 전원 요구규격.

항목	전압	전류	
히터	-6 Vdc	1.25 A	
Helix	Ground	3 mA	
FE	On	-6 Vdc	0.01 mA
	Off	-1600 Vdc	0.01 mA
Cathode	-10.95 kVdc	338 mA	
Collector	#1	-4.27 kVdc	42 mA
	#2	-6.57 kVdc	293 mA

II. HVPS 설계 및 제작

그림 1과 같이 본 HVPS는 크게 DC/DC 변환기, DC/AC 변환기, 고압전원발생기로 구성되어있다. HVPS는 외부로부터 380 V의 DC 전원을 공급받아서 DC/DC 변환기를 통하여 330 V로 전압을 조절

한 후 DC/AC 변환기에서 교류전원으로서의 변경과정을 거친 후 병렬 transformer로 구성된 고압전원발생기에서 3가지 서로 다른 고압전압을 발생시킨다^{1,2)}. 본 HVPS는 TWT 뿐만 아니라 반도체증폭기를 비롯한 TWTA의 모든 회로에 전원을 제공해 주는데 본 논문에서는 제작기술이 상당히 어려운 부분인 TWT 전원 공급부만을 언급하겠다.

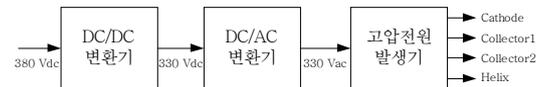


그림 1. HVPS 블록도

2.1 DC/DC 변환기

DC/DC 변환기는 외부에서 입력되는 380 V 크기의 DC 전압을 본 HVPS가 필요로 하는 330 V의 DC 전압으로 변환하는 기능을 수행한다. 전압 변환은 Pulse Width Modulation (PWM) 스위치에 의해 제어되는 2개의 Power MOSFET 으로 구성된 Buck Converter 구조를 이용하였다²⁾. 각각의 Power MOSFET은 80 kHz의 주파수로 시비율 0.5 이내에서 On/Off 된다. Power MOSFET은 600V/44A 특성과 On시에 0.13 ohm의 저항 특성을 지닌 IXYS사의 IXFX44N60을 사용하였고, 환류다이오드는 600V/30A의 특성을 지닌 FairChild Semiconductor사의 ISL9R3060G2를 사용하였다.

2.2 DC/AC 변환기

DC/AC 변환기는 DC/DC 변환기로부터 입력되는 330 V의 DC 전압을 330 V의 교류 전압으로 변환하여 출력시키는 기능을 수행하기 위하여 단상 Full-bridge Inverter 구조를 사용하였다²⁾. 주 스위치 회로는 4개의 Power MOSFET을 사용하였는데, IXYS사의 MOSFET인 IXKF40N60SCD1 (600 V, 38 A, 60 70 ns)을 이용하여 회로를 구성하였다.

2.3 고압전원발생기

고압전원발생기는 HVPS의 출력단에 위치하는 핵심 구성품으로서 그 구조는 그림 2와 같이 입력 교류전원을 정류하는 직렬공진탱크를 비롯하여 고전압 펄스 Transformer, 배압회로(Voltage Doubler) 및 출력 커패시터 탱크로 구성된다²⁻⁴⁾.

고압전원발생기는 330 V의 DC 전원을 입력받아서 최종적으로 4개의 출력전원을 제공한다. TWT의 Cathode 전극으로는 -10.95 kV의 고전압과 338 mA의 전류를 제공하고 Collector1 전극으로는 -4.27

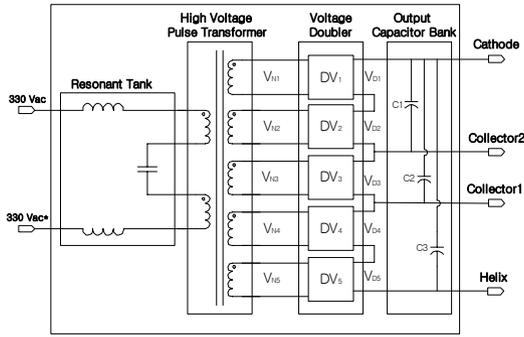


그림 2. 고압전원발생기 설계도

kV의 고전압과 42 mA의 전류를, Collector2 전극 으로는 -6.57 kV의 고전압과 293 mA의 전류를 제공한다. Helix 전극으로는 기준전위 단자를 제공한다. 그러므로 본 HVPS는 최종적으로 1,596 W의 전력을 TWT에 제공하게 된다.

2.3.1 고전압 펄스 Transformer

고전압 펄스 Transformer는 입력되는 교류전압의 크기를 상승변환 (step-up)하는 기능을 수행한다. 그림 2와 같이 1차측은 DC/AC 변환기로부터 330 V의 교류전원을 입력받고, 2차측은 5개의 병렬 transformer 구조로 구성되어 각각 독립적으로 출력 전압을 제공하도록 하였다. Transformer 효율은 95%로 가정하였으며, 1, 2번 출력전압은 1095 V, 3번 출력전압은 1150 V, 그리고 4, 5번 출력전압은 1067.5 V가 되도록 설계하였다. 그리고 1, 2번 출력전류는 0.75 A, 3번 출력전류는 0.32 A이고 4, 5번 출력전류는 0.02 A로 설계하였다. 그러므로 transformer 전체 출력전력은 2053 W가 된다. 그리고 transformer 입력 전력 2084 W를 고려하면 transformer가 다룰 전체 전력은 4137 W가 된다. 이와 같은 설계 조건으로 transformer를 설계하기 위해서는 다음과 같이 core 설계, insulation 처리, 권선턴수 결정의 단계를 거쳐야 한다.

• Core 설계

본 transformer에서는 Magnetics사의 C-core를 사용하였다⁵⁾. Magnetics사의 제공 데이터에 의하면 C-core의 core configuration constant는 25°C에서 323 이고, transformer가 다룰 전체 전력은 4137 W가 된다. 예상되는 flux density는 1500 G이며 전원의 스위칭 주파수는 80 kHz이다. 이러한 자료를 바탕으로 필요한 core area product를 구해보면 54.82 cm⁴이 된다⁵⁾. 그러므로 본 transformer에서는 Ma-

gnetics사의 C-core 중에서 Superperm80 core를 사용하여 core area product가 54.87cm⁴이 되도록 설계하였다. Magnetics사의 제공 데이터에 의하면 이에 대한 core loss는 50W가 된다⁵⁾. 표 2에 core 설계내역을 요약하였다.

표 2. Core 설계내역

항목	내역	비고
요구 전력	4137 W	I/O 전체
선정 core	Superperm80	C-core
core 1 film 두께	0.001 inch	0.0254 mm
core 전체 무게	1 pound	453 g
flux density	1500 G	0.15 T
동작 주파수	80 kHz	
core area product	54.82 cm ⁴	필요치
core area product	54.8743 cm ⁴	설계치
window area	21.7742 cm ²	
cross-sectional area	2.5202 cm ²	
core loss	50 W	at 1500 G

• Insulation film

Transformer의 core에 wire를 감을 때 layer 층 사이 및 1~2차 layer 사이에 insulation이 필요하다. Layer 층 사이의 electric strength는 2 kV 정도 발생되며 1~2차 layer 사이에는 9 kV 정도 발생된다. 그러므로 PLEO사의 insulation film 중에서 5 mil 두께의 Nomex410을 사용하였다⁶⁾. 이 제품은 1 film의 dielectric strength가 3.35 kV이므로 layer 층 사이에는 1장의 film을 사용하였고 1~2차 layer 사이에는 4장의 film을 사용하였다.

• Wire 설계

Transformer의 core에 감은 권선 턴수에 의해 1차측에 대한 2차측의 전압이 결정되므로 권선 턴수는 매우 중요하다. 1차측에 사용된 wire는 Litz Cable 중에서 0.08 mm 두께의 AWG40을 125 가닥 엮은 것을 3개씩 다시 엮어 만든 케이블을 22 턴 감았고, 2차측은 0.1 mm 두께의 AWG38을 4 가닥 엮은 것을 2차측 1, 2번 transformer에는 16 개씩 다시 엮어 만든 케이블을 80 턴, 3번 transformer에는 8개씩 엮어 만든 케이블을 82 턴, 그리고 4, 5번 transformer에는 4개씩 엮어 만든 케이블을 76 턴씩 감았다.

2.3.2 배압회로 및 출력 커패시터 뱅크

배압회로는 그림 2와 같이 펄스 transformer로부터 5가지 경로의 교류전압(V_{N1}-V_{N5})을 입력받아 각

각의 경로 전압을 2배 크기의 DC 전압으로 승압 및 정류하는 기능을 수행한다. 회로 구성은 다이오드와 커패시터 조합을 이용한 다이오드 정류기로 구현하였다²¹.

배압회로의 출력 단자들은 그림 2와 같이 직렬로 연결되어 고전압을 얻는다. 5번 배압회로(DV₅)가 기준이 되며 Helix로 기준전압 (0V)을 제공한다. 4번 배압회로(DV₄)의 출력이 Collector1으로 -4.27 kV의 DC 전압을 제공하며, 3번 배압회로(DV₃)의 출력은 Collector2로 -6.57 kV의 DC 전압을 제공한다. 1번 배압회로(DV₁)는 Cathode로 -10.95 kV의 가장 큰 DC 전압을 제공한다.

그리고, 출력 커패시터 बैं크의 각 커패시터 용량은 다음 식 (1)과 같이 ripple 전압의 크기와 출력 전류로 결정된다²¹.

$$C = \frac{I_o}{2 \times f \times v_{ripple}} \quad (1)$$

위 수식에 따른 전극별 허용 ripple과 출력전류에 의해 구해진 용량은 다음 표 3과 같다.

표 3. 각 전극별 커패시터 용량 계산

전극	허용 ripple [Vp-p]	정격전류 [mA]	용량 [uF]
Cathode	10	338	0.211
Collector1	15	42	0.017
Collector2	15	293	0.122

그런데, arcing이 발생할 경우 TWT의 Cathode로 전달되는 최대 에너지는 MEC5450 TWT의 경우 7 J 이하로 제한되어야 한다. 그러므로 Cathode 전극의 출력 커패시터 용량은 커패시터에 저장되는 에너지가 7 J 이하가 되도록 적당한 값을 선정해야 한다. 이때 커패시터에 저장되는 에너지는 아래 식 (2)와 같다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

-10.95 kV의 Cathode 전압을 적용할 경우 Cathode 커패시터 용량이 0.211 uF일 경우 축적 에너지는 12.65 J이 되므로 이 커패시터는 사용할 수가 없다. 그러므로 0.1 uF의 커패시터를 선정하여 축적 에너지가 5.99 J 로서 7 J 이하가 되도록 한다. 한편, Collector1, 2 전극들은 Cathode 전극과 달리 arcing에 대한 제한 사항이 없으므로 ripple 전

압에 대해 계산된 커패시터 용량인 표 3의 제시값 근처인 0.02 및 0.3 uF을 각각 사용하였다.

III. HVPS 측정결과

앞장에서와 같이 설계/제작된 HVPS는 그림 3과 같이 실제 TWT와 연동되어 각 전극별 출력전원 특성이 측정되었다. 시험을 위하여 외부 전원공급장치가 380 V의 직류전원을 공급해 주었으며, Teledyne 사가 제작한 X-대역 600 W급 TWT (RF 출력신호 기준)가 이용되었다. 측정장비로는 각 전극별 출력 전압의 크기와 전압 ripple의 크기를 측정하기 위해서 Multi Meter와 Oscilloscope가 사용되었다.

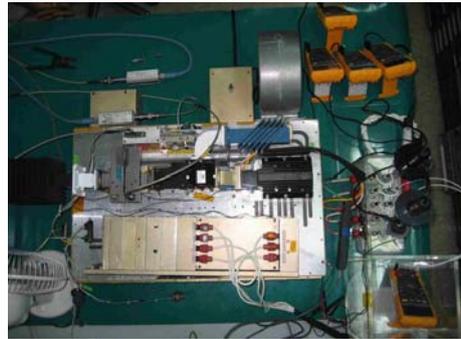


그림 3. TWT와 연동된 HVPS

3.1 전극별 출력 전압

HVPS의 3개 출력 전극(Cathode, Collector1, Collector2)의 출력전압을 측정하기 위하여 각 전극에 Multi Meter를 연결하여 발생 전압의 크기를 측정하였다. 측정 probe는 1000:1 probe를 사용하였다. 전압 측정결과에 의하면 설계규격대로 Cathode의 경우 -10.95 kV, Collector1의 경우 -4.27 kV, Collector2의 경우 -6.57 kV의 고압전원을 출력시키고 있는 것을 확인하였다.

3.2 전극별 전압 ripple

앞 장에서의 HVPS 설계에서 상세히 설명했듯이, 본 HVPS의 구조는 80 kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 DC/DC 변환기, DC/AC 변환기 및 고압전원발생기로 구성되어 있다. 따라서 이러한 스위칭 주파수 성분이 HVPS의 최종 출력전원에 ripple의 형태로 나타나게 된다. 본 연구에서는 오실로스코프를 이용하여 HVPS의 각 전극별 전압 ripple을 측정하였다. 이때 이용된 오실로스코프의 측정 Probe는 1000:1 Probe를 사용하였다.

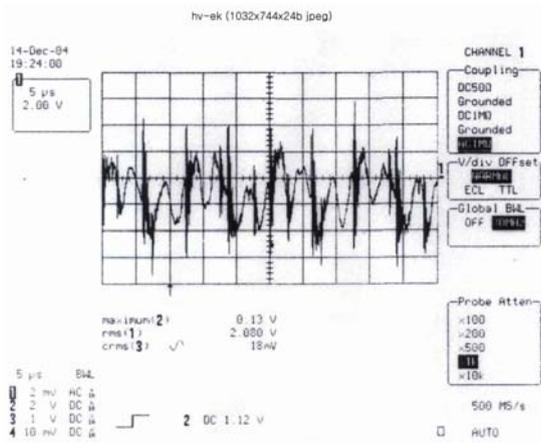


그림 4. Cathode ripple

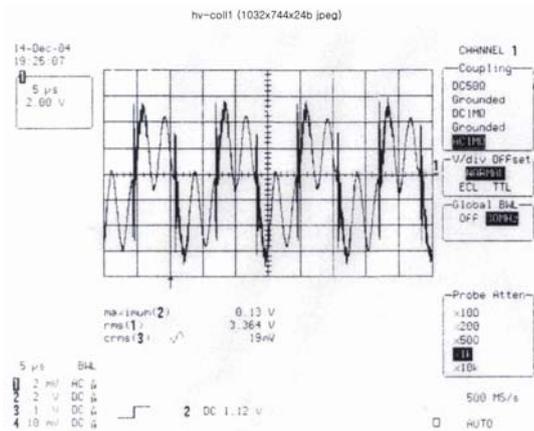


그림 5. Collector1 ripple

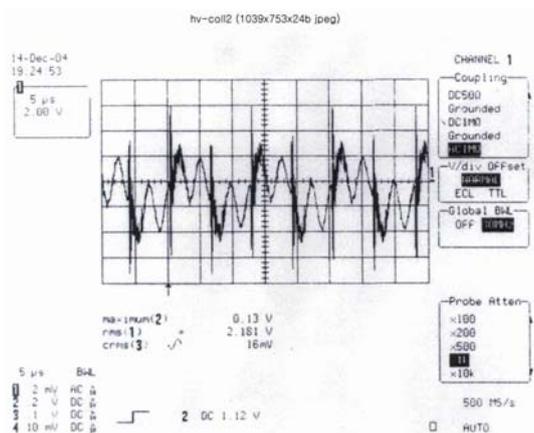


그림 6. Collector2 ripple

그림 4~6은 Cathode, Collector1, Collector2의

전압 ripple 측정 결과를 보여주고 있다. 오실로스코프의 측정화면은 50 us 동안 보여주고 있으며 한 눈금별 시간은 5 us, 전압은 2 V이다. Cathode 전극의 전압 ripple 특성을 보여주고 있는 그림 4를 살펴보면 전압 ripple의 peak-to-peak 크기가 약 6 V임을 알 수 있다. 이는 -10.95 kV의 Cathode 전극의 출력전압에 대해 0.055%로서 상당히 안정적인 출력 안정도를 가짐을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 각각 Collector1, Collector2의 ripple 측정결과를 보여주고 있는데 그림에 의하면 peak-to-peak 크기가 각각 12 V와 6 V로 발생되고 있음을 알 수 있다. 그런데, Collector1과 Collector2의 출력전압은 각각 -4.27 kV와 -6.57 kV이기 때문에 본 ripple 특성은 각 전극전압에 대해 각각 0.281%, 0.091%로서 상당히 안정적인 출력 안정도를 가짐을 알 수 있다. 그리고, 각 전극별 전압 ripple의 크기는 일정한 주기(약 12.5 us)로 반복되고 있는데, 그 주파수를 계산해 보면 약 80 kHz로서 스위칭 주파수와 정확히 일치함을 알 수 있다.

3.3 고전압 펄스 Transformer 특성

HVPS의 개발에 있어서 가장 중요한 핵심회로인 고전압 펄스 Transformer의 primary inductance와 leakage inductance를 측정하였다. 우선, transformer의 1차측에서 측정한 primary inductance는 1.68 mH로 측정되었다. 그리고, transformer의 누설전력을 발생시키는 leakage inductance는 1.2uH로 매우 낮은 수준으로 측정되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 균위성통신 차량용단말 고출력증폭기에 사용될 HVPS를 설계 및 제작하고 측정을 통하여 그 성능을 검증하였다. 제작된 HVPS는 실제 TWT와 연동된 상태에서 TWT의 3개 전극(Cathode, Collector1, Collector2)에 제공되는 고압전원의 특성들이 측정되었다. 측정결과 출력전압의 크기가 각각 -10.95 kV, -4.27 kV 그리고 -6.57 kV로서 설계값과 정확히 일치함을 확인하였다. 그리고, 발생 전원의 안정도를 확인하기 위해서 각 전극별 출력전압 ripple의 peak-to-peak 크기를 측정하였는데, 그 결과 Cathode 전극의 경우 6 V, Collector1 전극의 경우 12 V, Collector2 전극의 경우 6 V의 ripple 특성을 확인하였다. 이는 각 전극의 출력전압의 크기에 대해 각각 0.055%, 0.281%, 0.091%로서

상당히 안정적인 출력 특성임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] L. Sivan, *Microwave Tube Transmitters*, London : Chapman & Hall, 1994.

[2] A. I. Pressman, *Switching Power Supply Design*, New York : McGraw-Hill, 1999.

[3] S. C. Kim, S. H. Nam, and D. H. Kim, "Development of High-Power Density, 4-kV Pulse Transformers for TWTA," *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 32, pp. 1873-1878, Oct. 2004.

[4] 박영주, 이규송, 류시찬, "항공 전자전용 고전압 전원공급기 개발," *통신/전자 학술대회*, 6(51), 2002.

[5] "Cut Core Design Manual : Superperm 80," *Magnetic Metals*. [Online] <http://www.magmet.com/>

[6] "Specific Product Information & Principal Uses For Each Thickness & Type : NOMEX Brand paper," P.LEO & Co. [Online] <http://www.pleo.com/>

박 재 든 (Jaedon Park)

정회원



2000년 2월 한양대학교 전자·전기공학부 졸업(학사)
 2002년 2월 한국정보통신대학교(ICU) 공학부 졸업(석사)
 2002년 1월~현재 국방과학연구소 연구원
 <관심분야> 위성통신, 전술네트

워크, MIMO

장 진 상 (Jeensang Jang)

정회원



1985년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1987년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(석사)
 2003년 12월 Univ. of Toledo 전기컴퓨터과학과 졸업(박사)
 1987년 2월~현재 국방과학연구소

선임연구원

<관심분야> 통신네트워크, OFDM, MIMO

등 문 호 (Moonho Dong)

정회원



1980년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
 1982년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(석사)
 1994년 1월~1995년 1월 U.S Army CECOM 교환과학자
 1997년 5월~1999년 4월 프랑

스 Matra Marconi Space 파견근무

1982년 9월~현재 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야> 관측위성 데이터링크, 위성통신, 전술네트워크