

# 위상배열안테나 구현을 위한 다채널 Ku/K대역 빔포밍 RFIC 설계

2023.08.23 | ETRI RF기술연구실



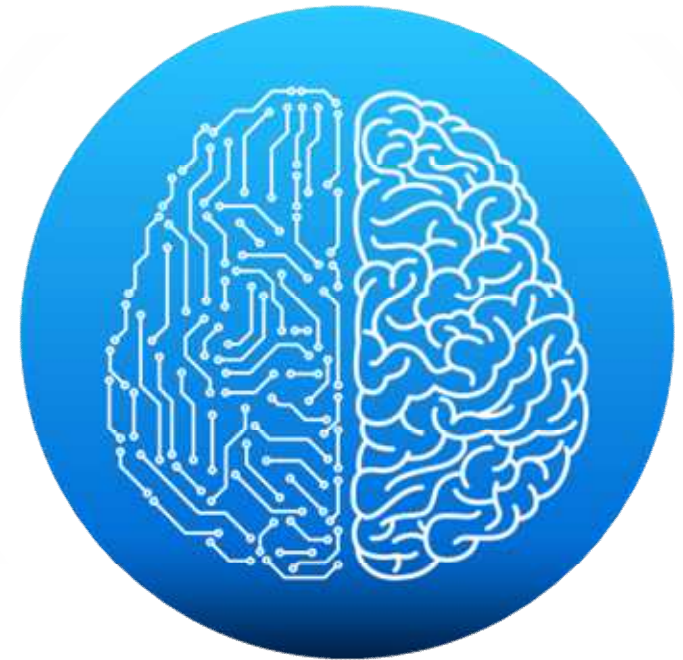
# 목차

**I 다채널 빔포밍 RFIC 응용**

**II Ku대역 빔포밍 RFIC 설계**

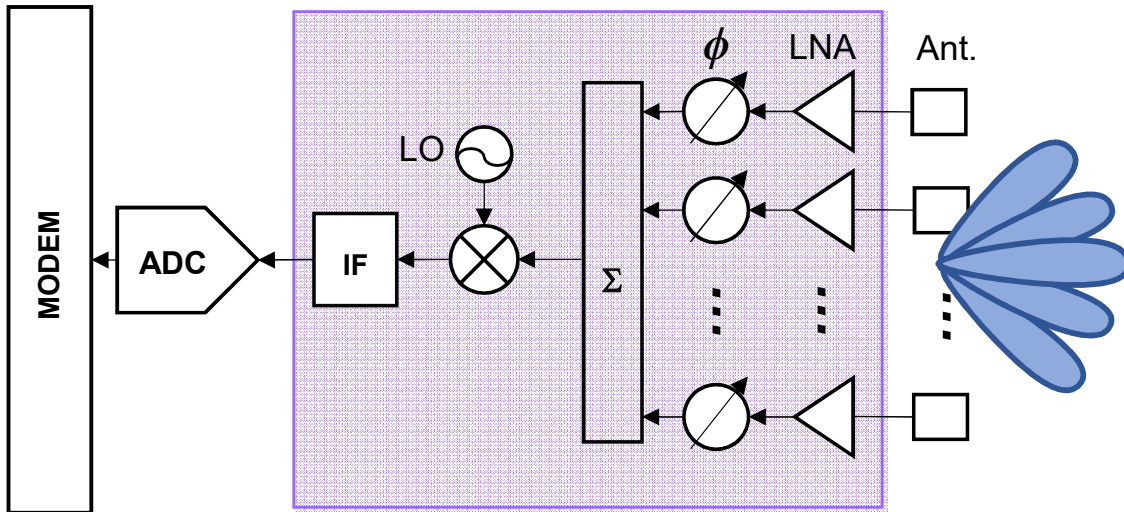
**III K대역 빔포밍 RFIC 설계**

**IV 맺음말**

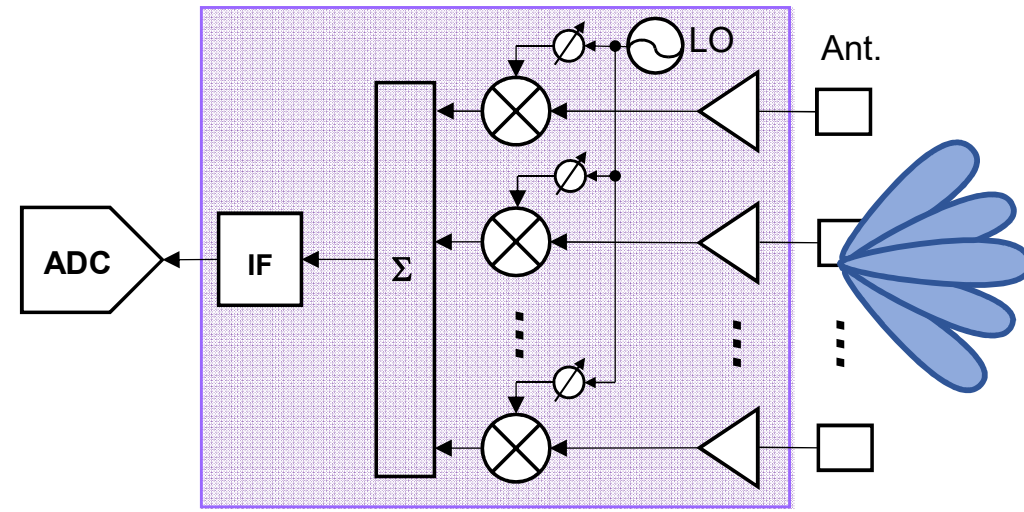


# 빔포밍 기술 이란?

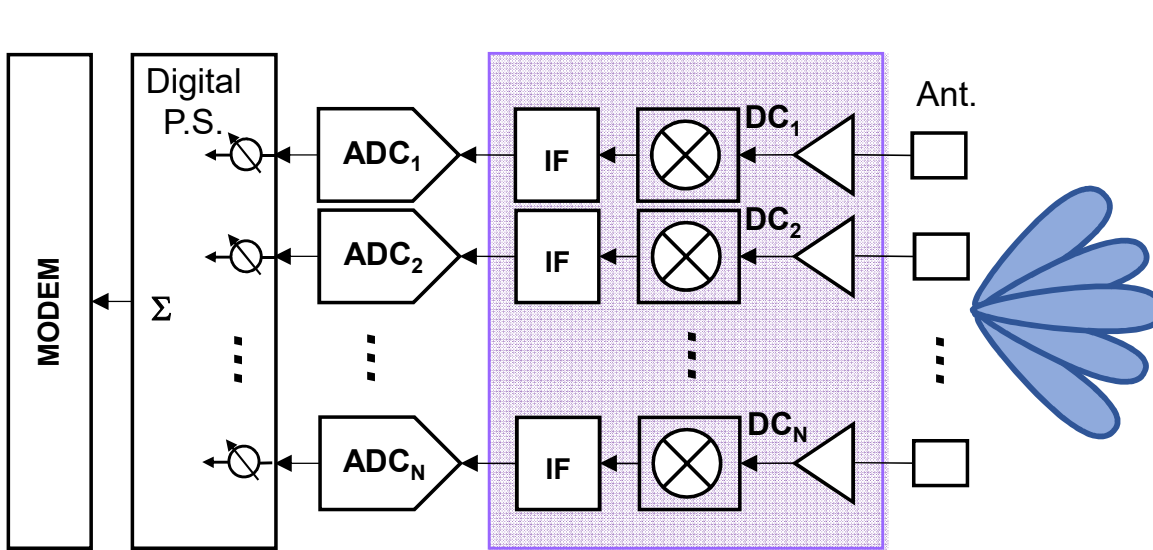
- Beamforming : 고주파 대역에서 커버리지 확대와 빔조향을 위한 핵심기술



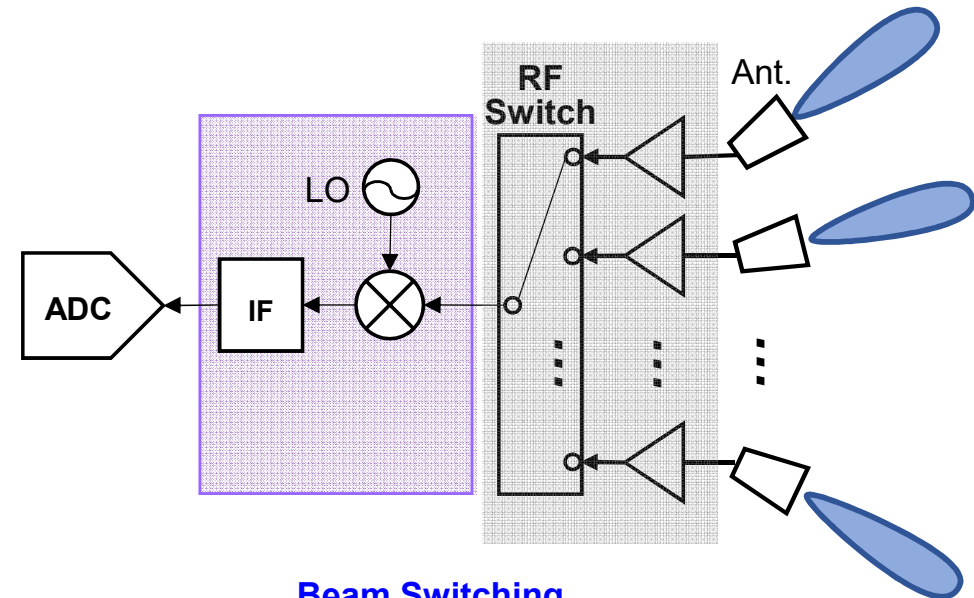
Analog (RF) Beamforming



Analog (LO) Beamforming



Digital Beamforming



Beam Switching

# 빔포밍 구조 분석

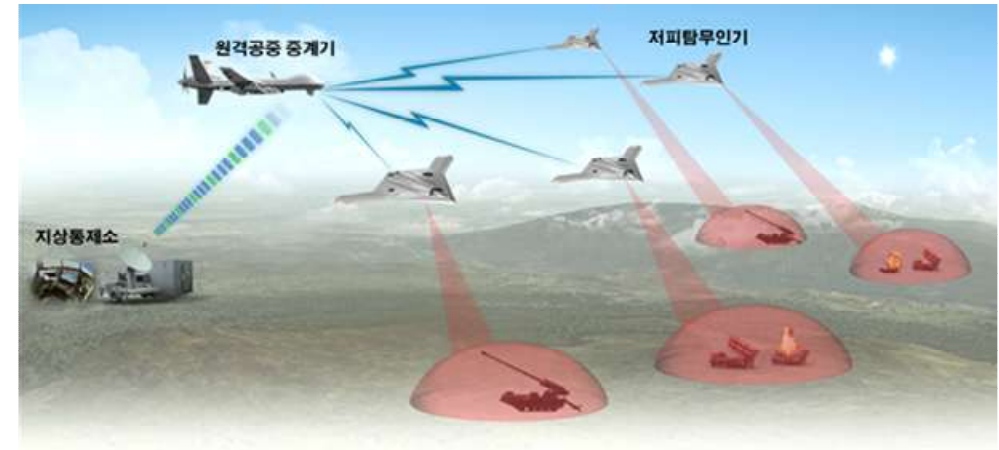
## ■ Beamforming architecture별 비교

	Commercial Products	문제점
<b>Digital Beamforming</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Satellite Terminal                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Starlink</li> </ul> </li> <li>● 다양한 군 통신 장비                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Military AESA Radar</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>ADC 전력소모</b></li> <li>● 냉각장치 (수냉식)</li> </ul>
<b>Beam Switching</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 28GHz RF module (ETRI 5G 시제품)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 정해진 각도로만 빔조향 가능 (beam steering resolution 좋지 않음)</li> </ul>
<b>Analog (RF) Beamforming</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 삼성 28GHz 5G 기지국 칩</li> <li>● Qualcomm 28GHz 5G 단말용 칩셋</li> <li>● Movandi, Anokiwave, MixComm, pSemi 등 수십개 기업 제품</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Phase shifter 손실 증가</li> </ul>
<b>Analog (LO) Beamforming</b>	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>● RF transceiver 구조 복잡</li> </ul>



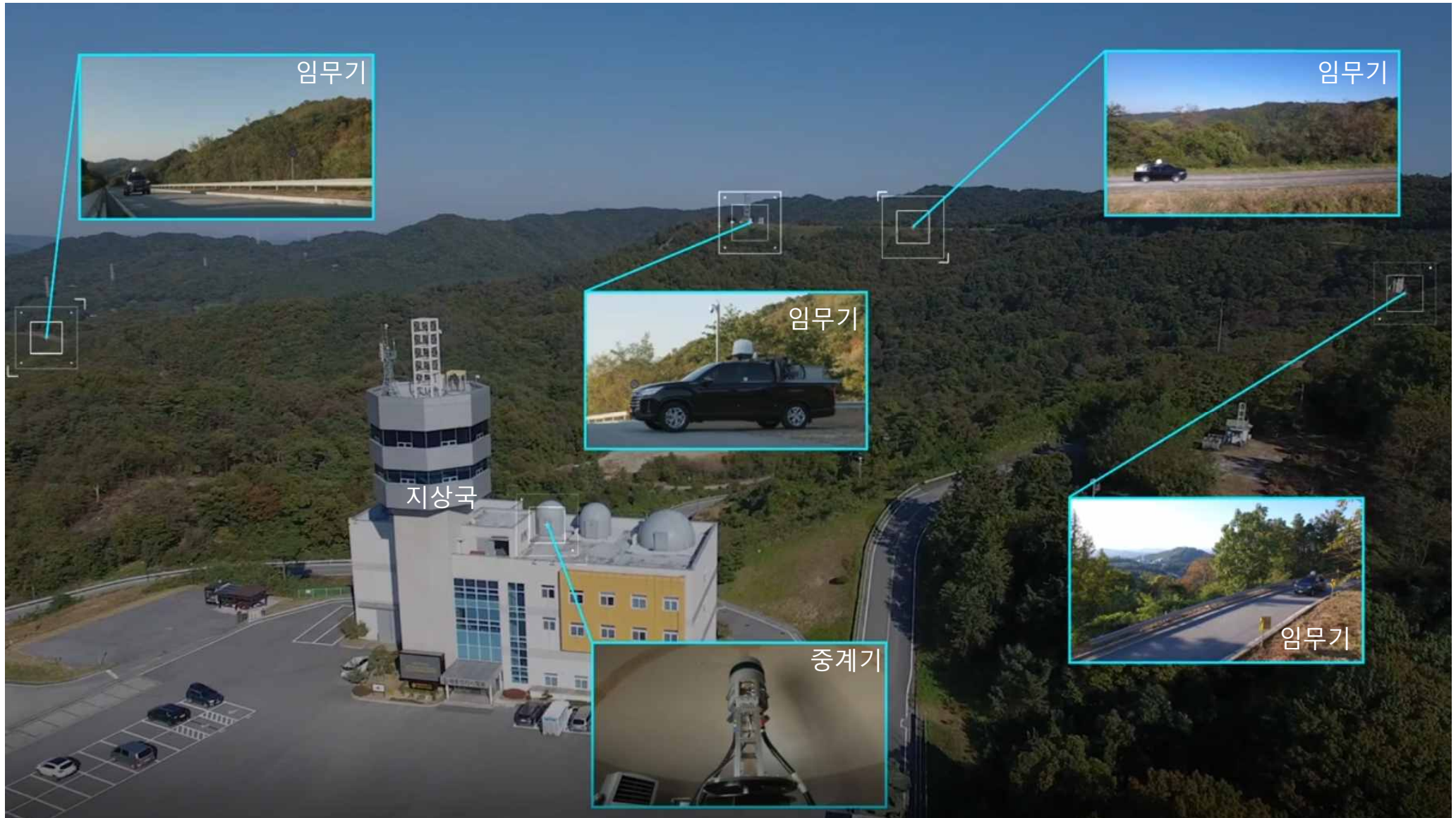
# Ku대역 빔포밍 RFIC 필요성

- 기존 1:1 단일빔 안테나에서 N:1 소형·경량화된 공중 중계네트워크 구축 가능
- 단일 지상체를 통한 다수 무인기 동시 운용 가능
- 가시선 확보되지 않은 위험지역에서 무인기 운용 가능



# Ku대역 빔포밍 RFIC 실증/시연

- 특정 지역에 중계장비모의기, 임무모의기, 지상장비모의기를 설치하여 데이터 송수신 시연 환경 구축

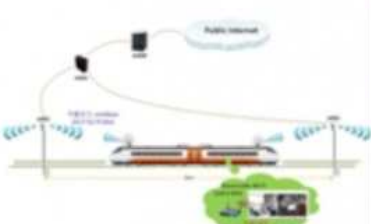
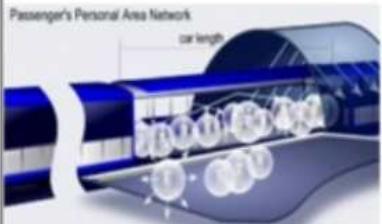


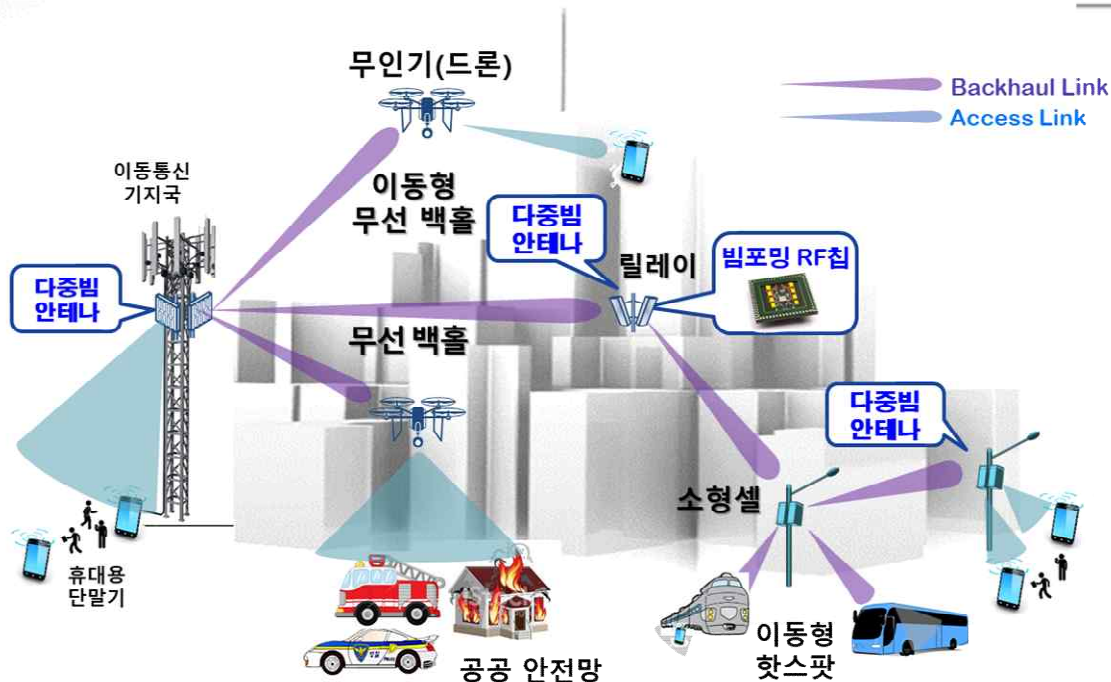
출처: [https://www.youtube.com/watch?v=o1E0W\\_0ERXQ](https://www.youtube.com/watch?v=o1E0W_0ERXQ)



# K대역 빔포밍 RFIC 필요성

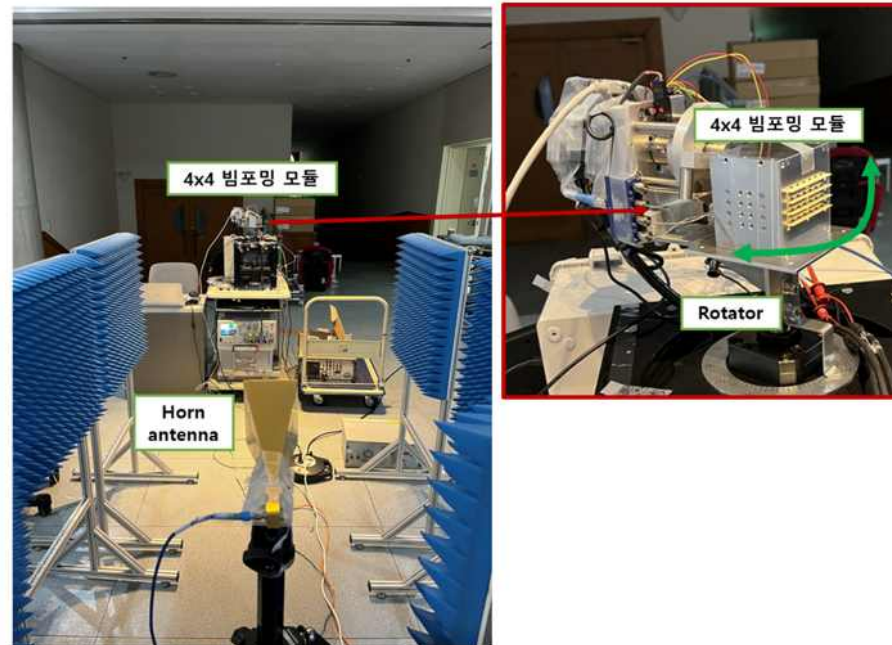
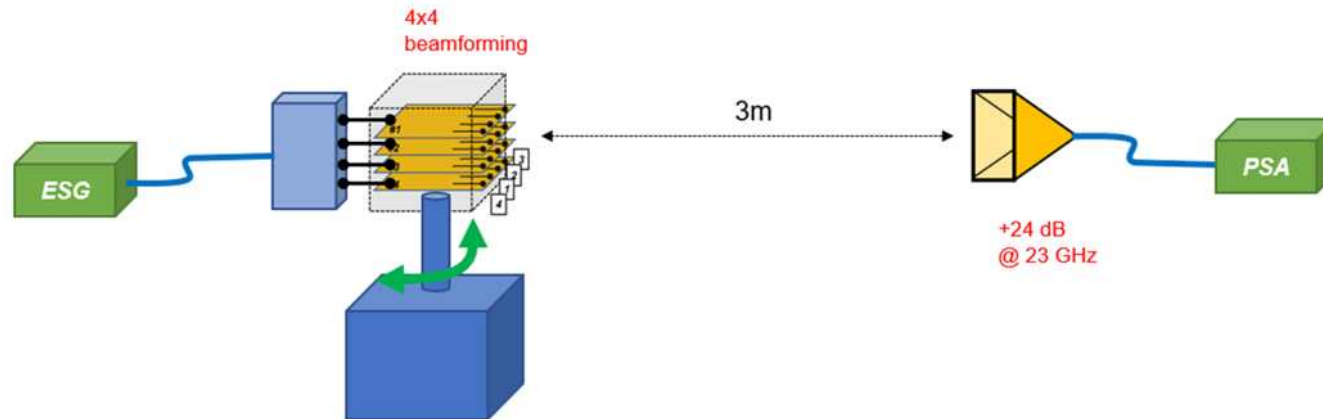
- 2018년 1월 용도자유대역 주파수(22~23.6GHz) 공급 완료
- 고정 및 모바일 무선백홀, 드론 통신 및 공공 안전망 구축에 활용

현 재	추진내용	2020년
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 실험용 초고속 무선백홀</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 광대역 비면허 주파수 추가 공급 (1.6GHz폭)</li> <li>⇒ 低비용·超고속 무선백홀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 상용 초고속 무선백홀</li> </ul> 



# K대역 빔포밍 RFIC 실증/시연

- 다채널 K대역 위상배열시스템 원전계(Far-Field) 시험 장치를 구성하여 시연



[ 다채널 K대역 빔포밍 RF칩 시연 구성도 ]



# 목차

**I** 다채널 빔포밍 RFIC 응용

**II** Ku대역 빔포밍 RFIC 설계

**III** K대역 빔포밍 RFIC 설계

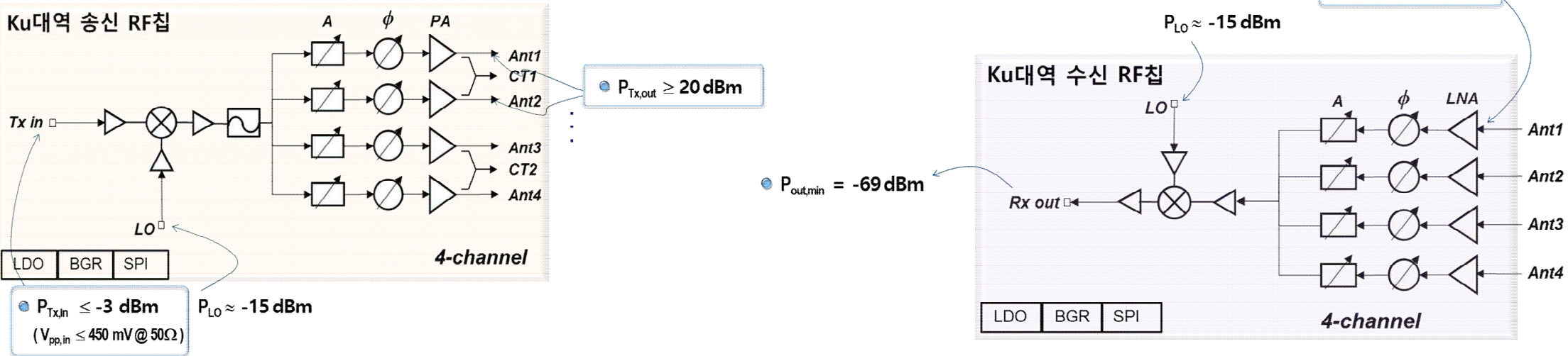
**IV** 맺음말



# Ku대역 빔포밍 RFIC 구조도

## 다채널 Ku대역 빔포밍 RFIC 구조설계

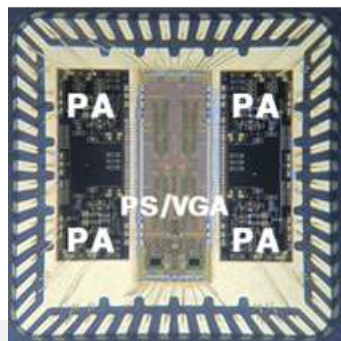
### Ku대역 송수신 RFIC Link budget



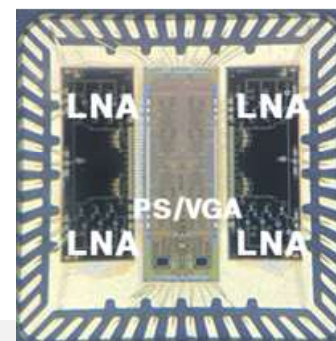
## 다채널 Ku대역 빔포밍 RFIC Full-chip 구성

- 패키지 타입 : QFN56pin 패키지(System-in-Package 형태)
- 송신 : PA (2 Bare die, GaAs, Output power), Phase shifter, U-Mixer 등(1 Bare die, CMOS, Switching 특성)
- 수신 : LNA (2 Bare die, GaAs, Noise figure), Phase shifter, D-Mixer 등(1 Bare die, CMOS, Switching 특성)

Ku-band Tx RF



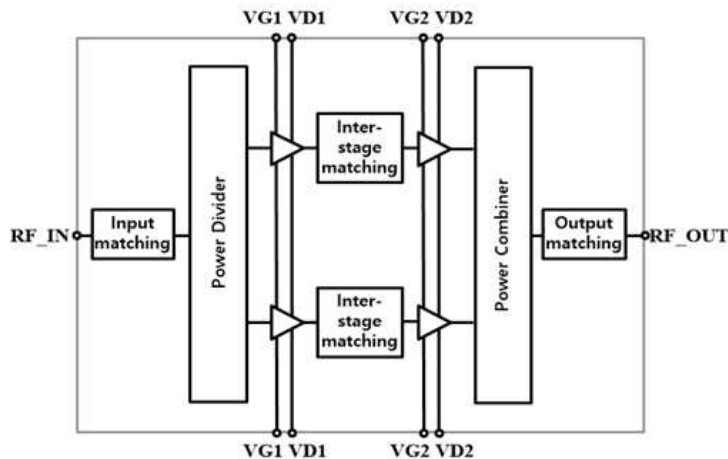
Ku-band Rx RF



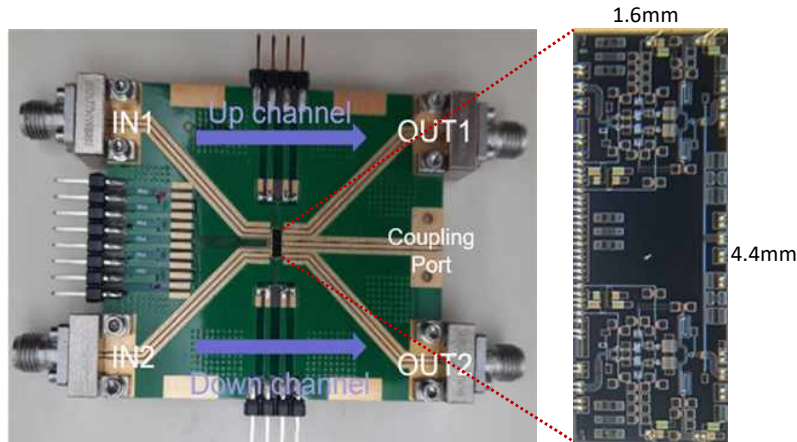
# Ku대역 빔포밍 송신 RFIC 설계

## ■ 고출력, 고효율용 Ku대역 전력증폭기

- Enhancement-mode GaAs pHEMT 기반의 Common-source 증폭 구조
- 고효율을 위한 Class-A/AB 동작, 고출력을 위한 병렬 구조 전력결합기 사용



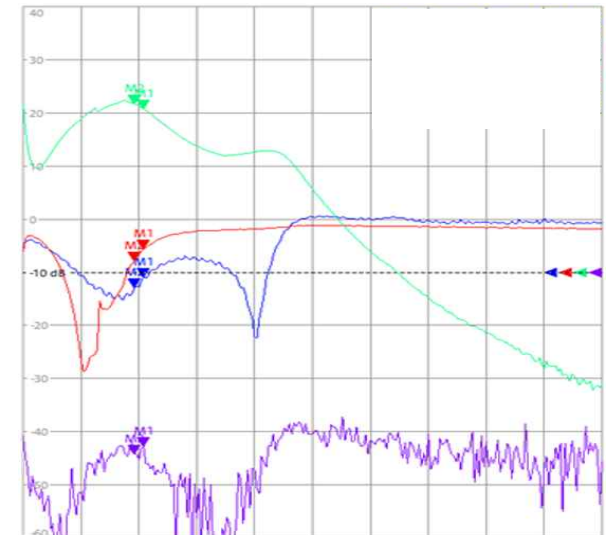
[ 전력증폭기 구성도 ]



[ 시험보드 및 칩사진 ]

Parameter	Measurement	Note
Frequency	Ku band	
Gain	20.7 dB	
Output P1dB	21.8 dBm	1 channel
$P_{MAX}$	22.7 dBm	1 channel
Peak PAE	19.2%	

[ 전력증폭기 측정결과 ]



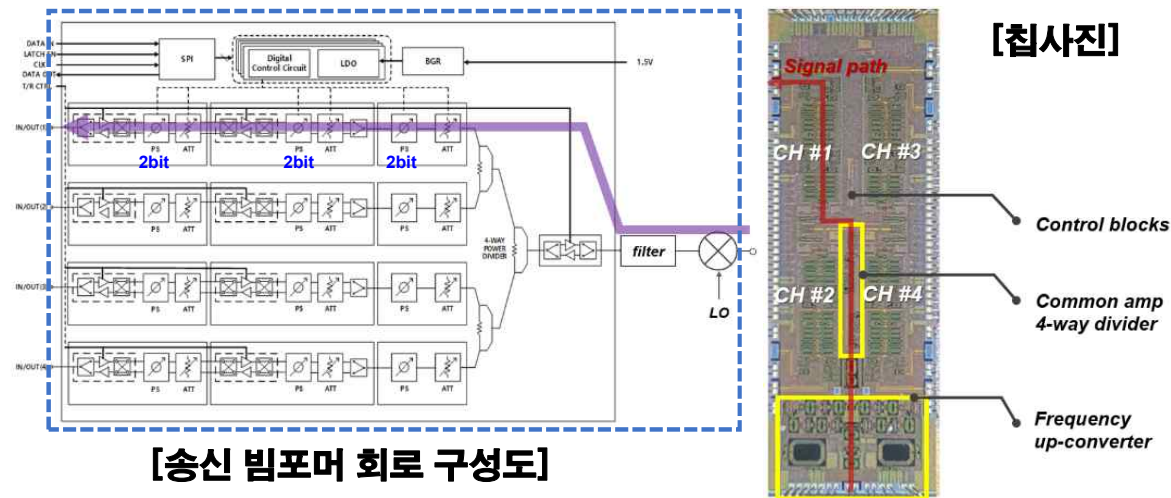
[ Measured S-parameter ]



# Ku대역 빔포밍 송신 RFIC 설계

## ■ 4채널 Ku대역 송신 빔포머

- 4채널 송신 빔포밍 IC (CMOS 65nm process) :  
True Time Delay구조 (출력전력, 대역폭 증가를 위해)
- 빔포머/LDO/SPI/PoR/BGR integrated

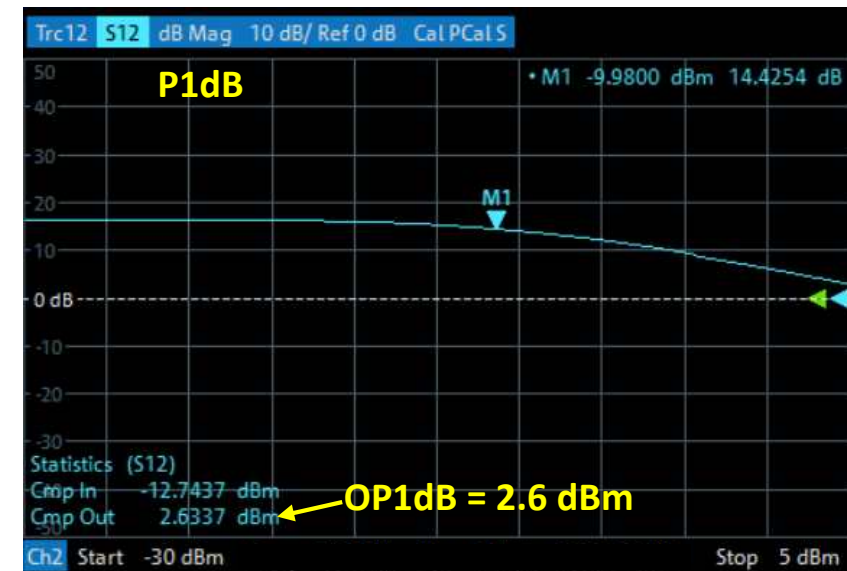


Parameter	Measurement	Note
Frequency	Ku band	
Gain	16.5 dB	
위상천이 해상도	11.25 deg	
OP1dB	2.6 dBm	1 channel
칩크기	4.8mm x 1.7mm	

**[송신 빔포머 측정결과]**



**[ Measured S-parameter]**

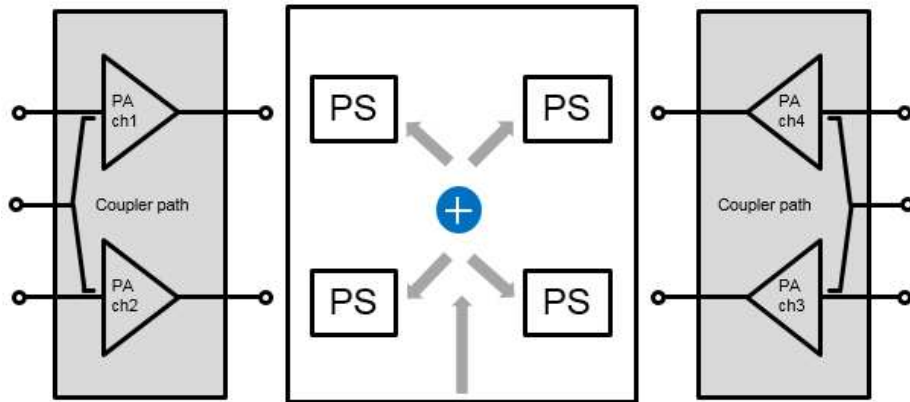


**[ Measured output power]**

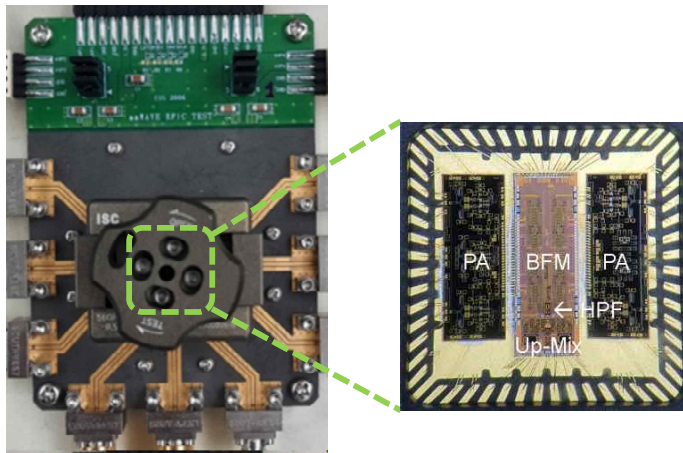


# Ku대역 빔포밍 송신 RFIC 설계

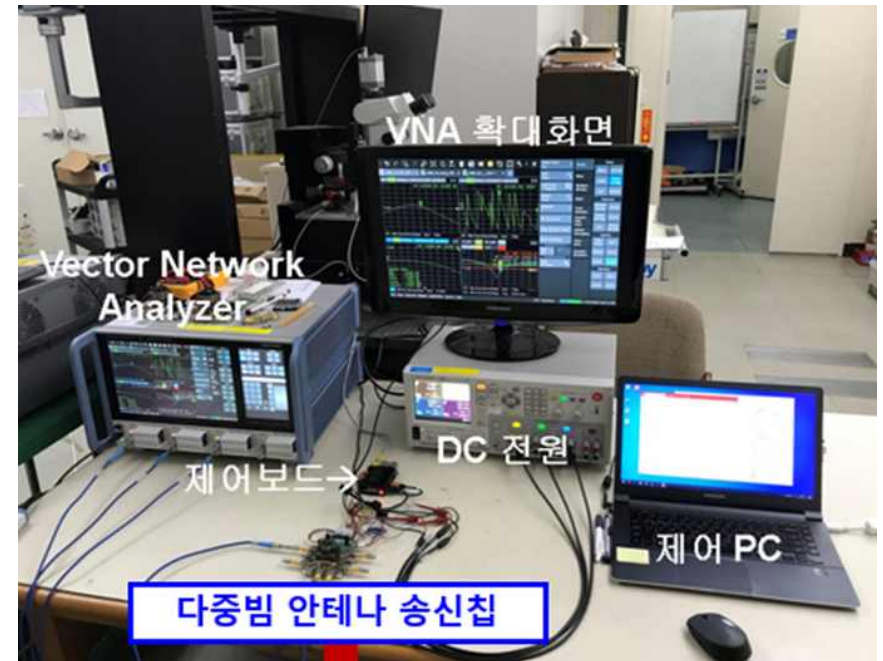
- Ku대역 송신 빔포머 통합 RF모듈 성능 검증 및 시험
  - 4채널 Ku대역 송신 빔포머 RF칩 구현
  - Ku대역 고출력(100mW 이상) 전력증폭기 구현
  - 칩 모니터링을 위한 coupler path 구현



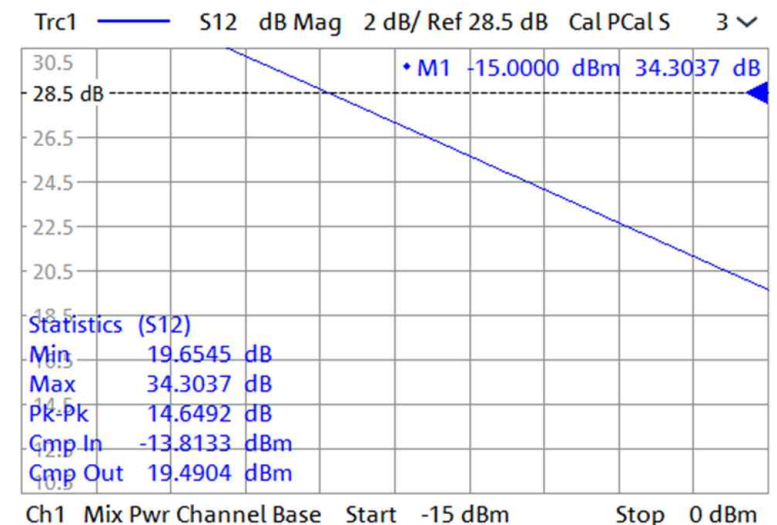
[ 회로도 ]



[ 소켓 검증보드 및 칩 사진 ]



[ 빔포머 통합RF모듈 특성 시험 환경 ]



[ 4번째채널출력특성:  $19.49 + 1.22(\text{선로손실}) = 20.71\text{dBm}$  ]

# Ku대역 빔포밍 송신 RFIC 설계

군수용 송신  
통합 RF칩

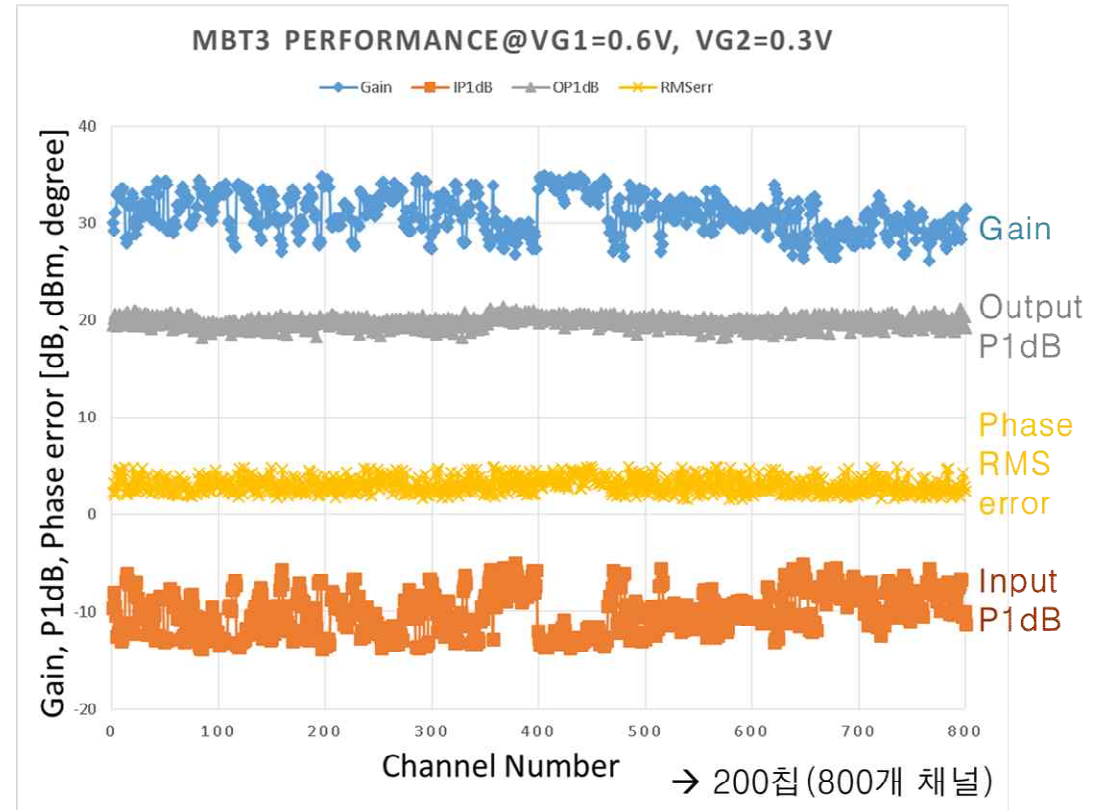


- Ku대역 송신 빔포머 통합 RF모듈 성능 검증 및 시험
  - 세계 최고 출력 Ku대역 송신 빔포머
  - 높은 수율과 안정된 동작의 칩 제작

[ 대량시험 결과표 ]

[ 측정결과 요약표 ]

Parameter	Measurement	Note
TX Frequency	Ku band	
TX Gain	34 dB	1 channel
TX OP1dB	20.7 dBm	1 channel
Phase Resolution	5 bit	
RMS phase error	3.7 deg	
PA Coupling level	-19.7 dBc	

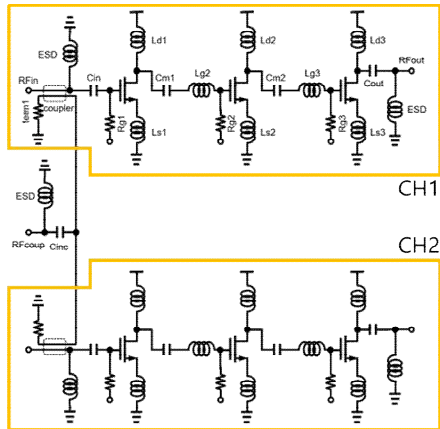


◆ 200칩(800개 채널) Output P1dB 분석

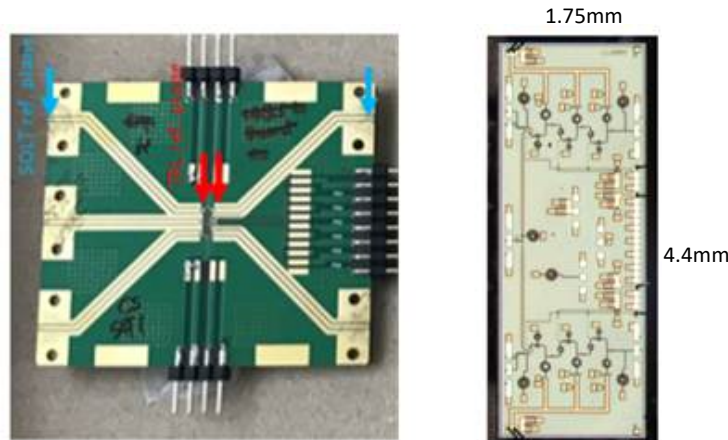
- 평균 19.84 dBm
- 최고 21.34 dBm
- 최저 18.14 dBm

# Ku대역 빔포밍 수신 RFIC 설계

- 고이득, 저잡음용 Ku대역 저잡음증폭기
  - 3-stage Common-source amplifier with source degeneration
  - 2-CH LNA with input monitoring coupler port



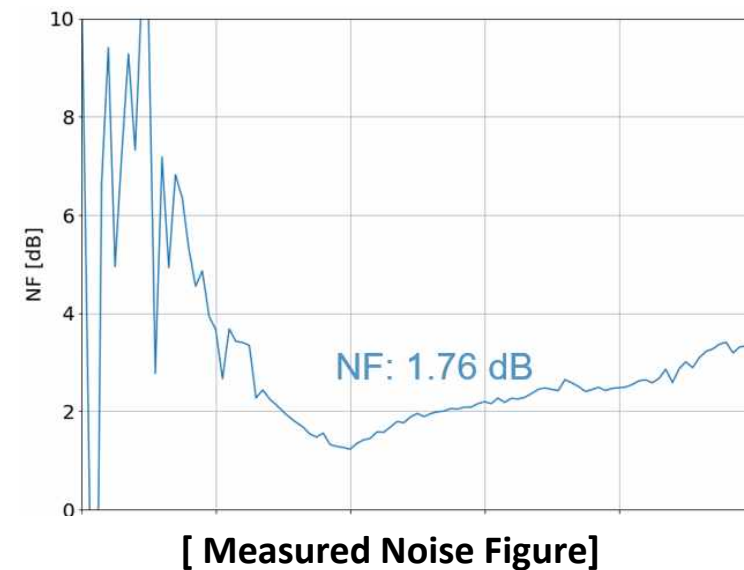
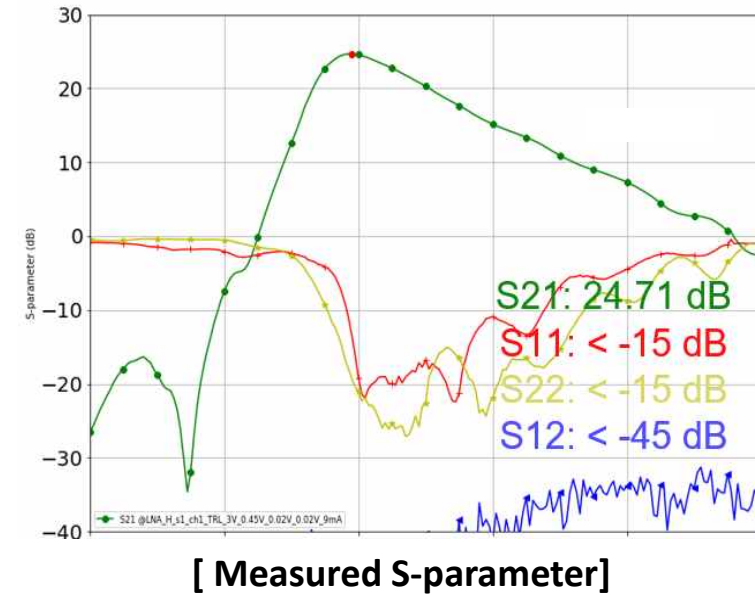
[저잡음증폭기 회로도]



[시험보드 및 칩사진]

Parameter	Measurement	Note
Frequency	Ku band	
Gain	24.7 dB	
Noise Figure	1.76 dB	1 channel
Input P1dB	-15 dBm	1 channel

[저잡음증폭기 측정결과]

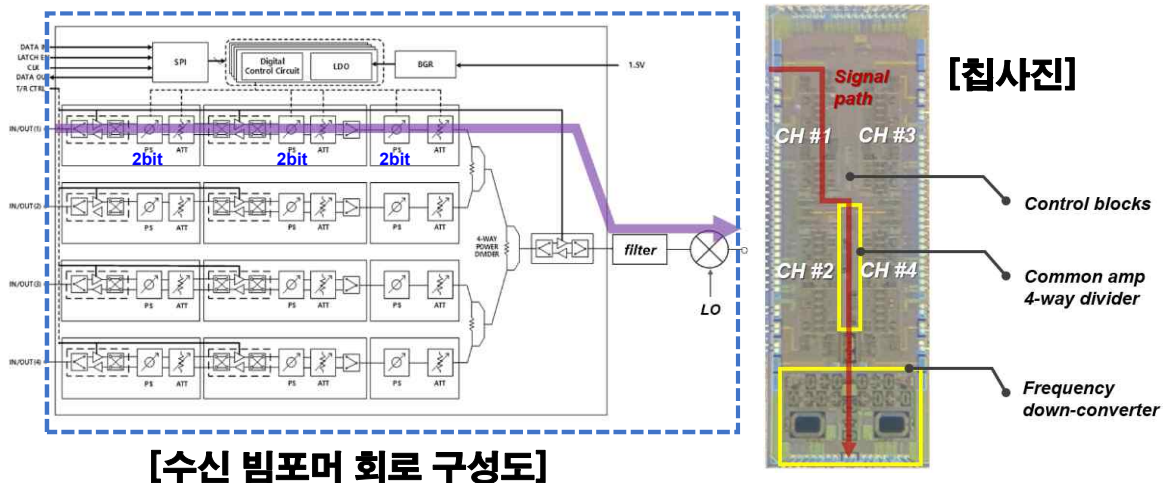




# Ku대역 빔포밍 수신 RFIC 설계

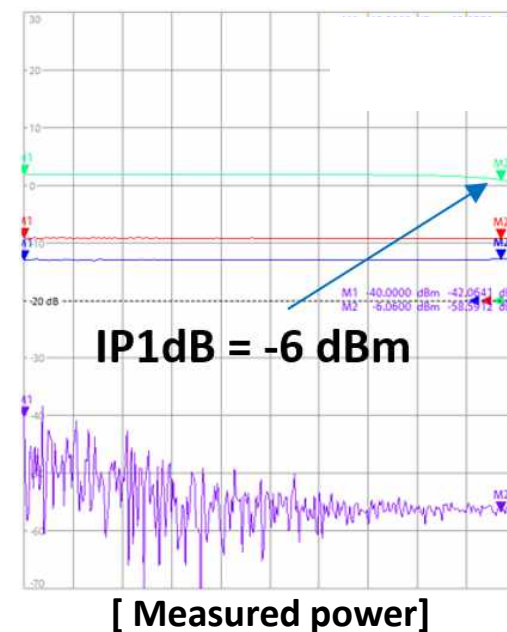
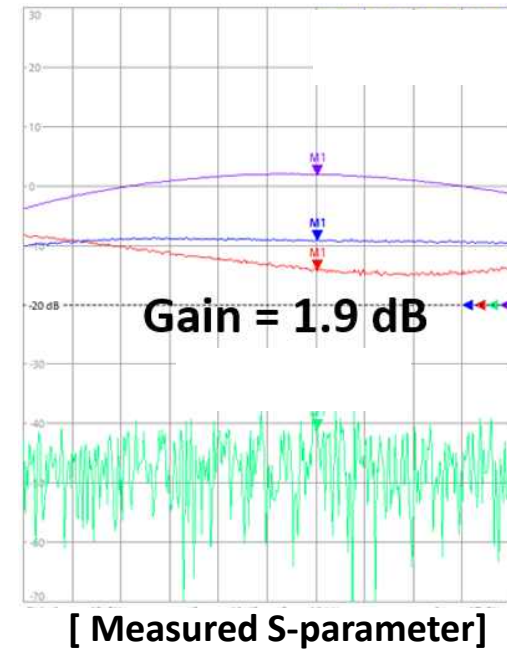
## ■ 4채널 Ku대역 수신 빔포머

- 4채널 수신 빔포밍 IC (CMOS 65nm process) :  
High/Low pass filter 구조(Phase variation을 최소화하기 위해)
- 빔포머/LDO/SPI/PoR/BGR integrated



Parameter	Measurement	Note
Frequency	Ku band	
Gain	1.9 dB	
위상천이 해상도	11.25 deg	
IP1dB	-6 dBm	1 channel
칩크기	4.8mm x 1.7mm	

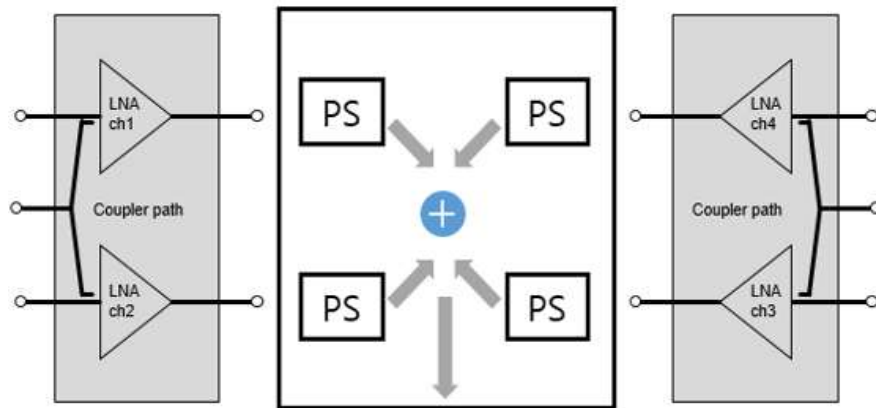
[수신 빔포머 측정결과]



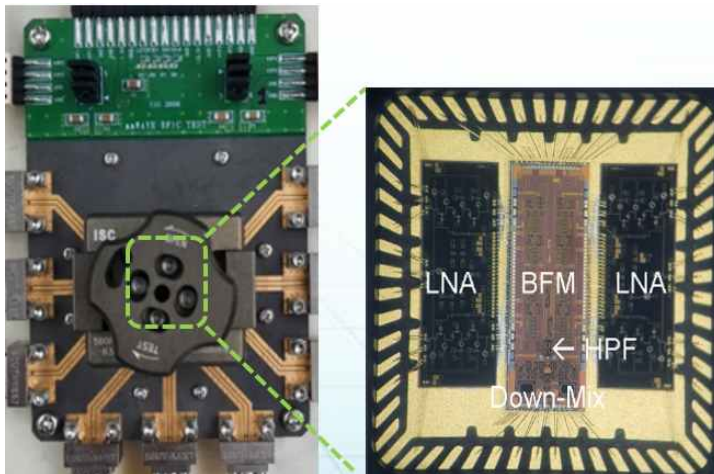


# Ku대역 빔포밍 수신 RFIC 설계

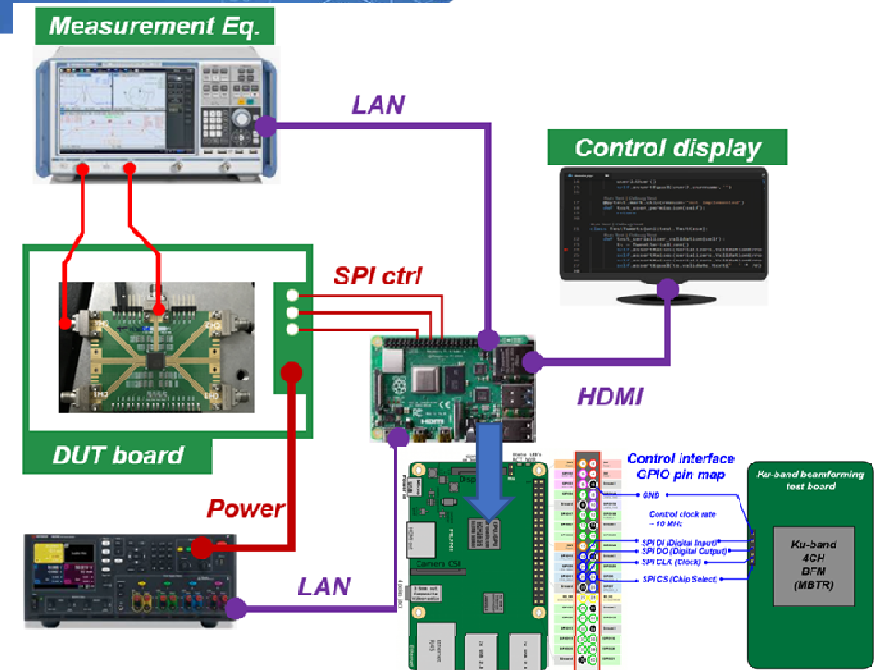
- Ku대역 수신 빔포머 통합 RF모듈 성능 검증 및 시험
  - 4채널 Ku대역 수신 빔포머 RF칩 구현
  - Ku대역 4채널 저잡음증폭기 구현
  - 칩 모니터링을 위한 coupler path 구현



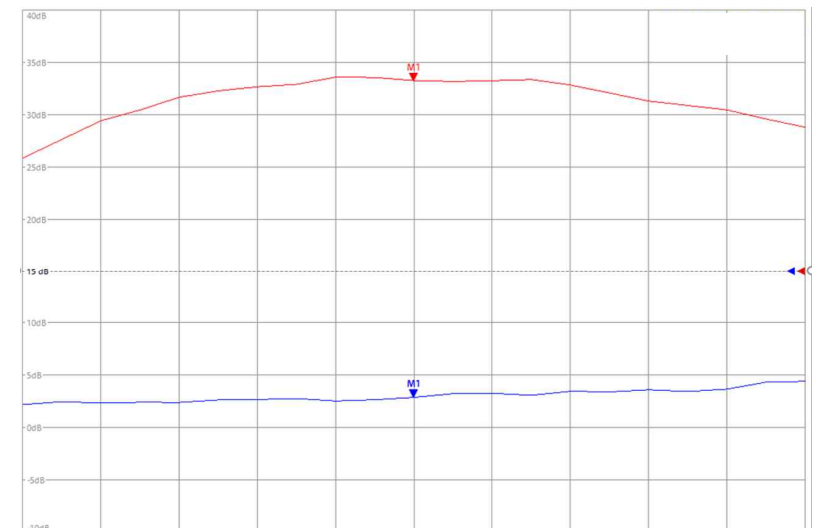
[ 회로도 ]



[ 소켓 검증보드 및 칩 사진 ]



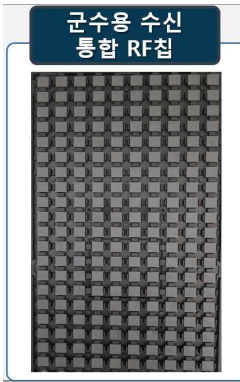
[ 빔포머 통합RF모듈 특성 시험 플랫폼 구성도 ]



[ 수신통합 RF 모듈의 4개 채널 이득과 잡음지수 결과 :  
이득 33.26dB, 잡음지수 2.88dB ]

# Ku대역 빔포밍 수신 RFIC 설계

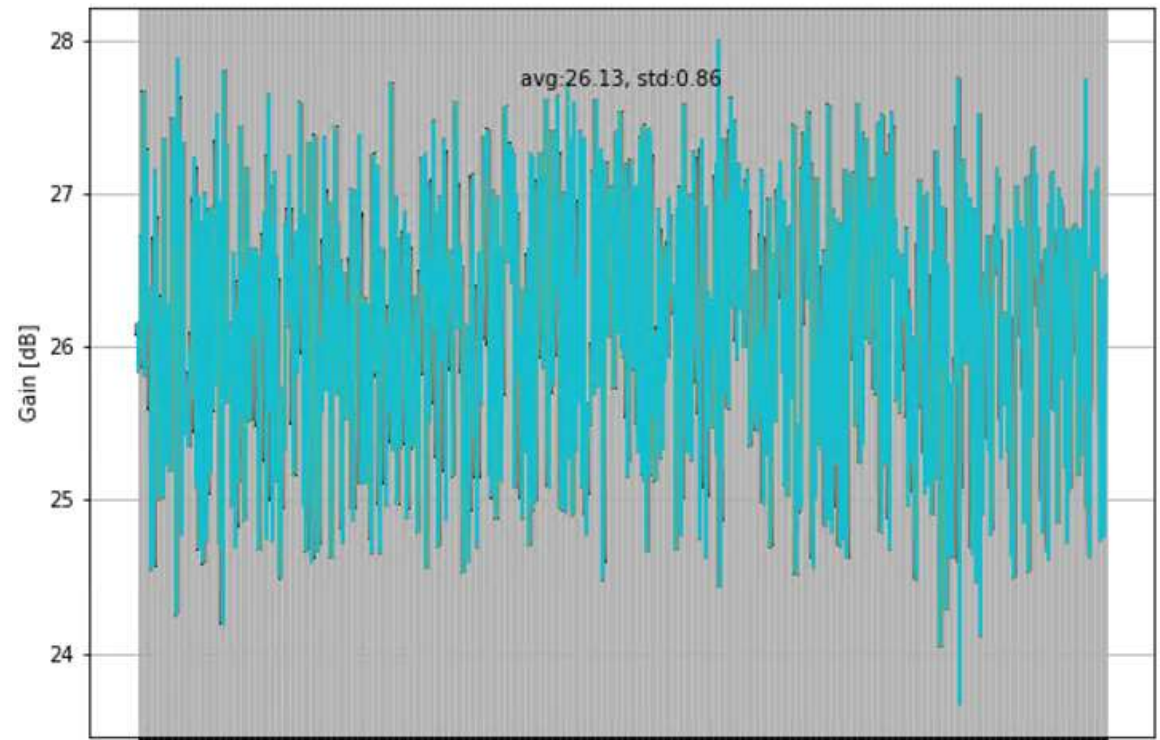
- Ku대역 수신 빔포머 통합 RF모듈 성능 검증 및 시험
  - 세계 최고 저잡음 Ku대역 수신 빔포머
  - 높은 수율과 안정된 동작의 칩 제작



[ 측정결과 요약표 ]

Parameter	Measurement	Note
RX Frequency	Ku band	
RX Gain	33.2 dB	4 channel
RX NF	2.88 dB	4 channel
Phase Resolution	5 bit	
RMS phase error	2.7 deg	
LNA Coupling level	-22 dBc	

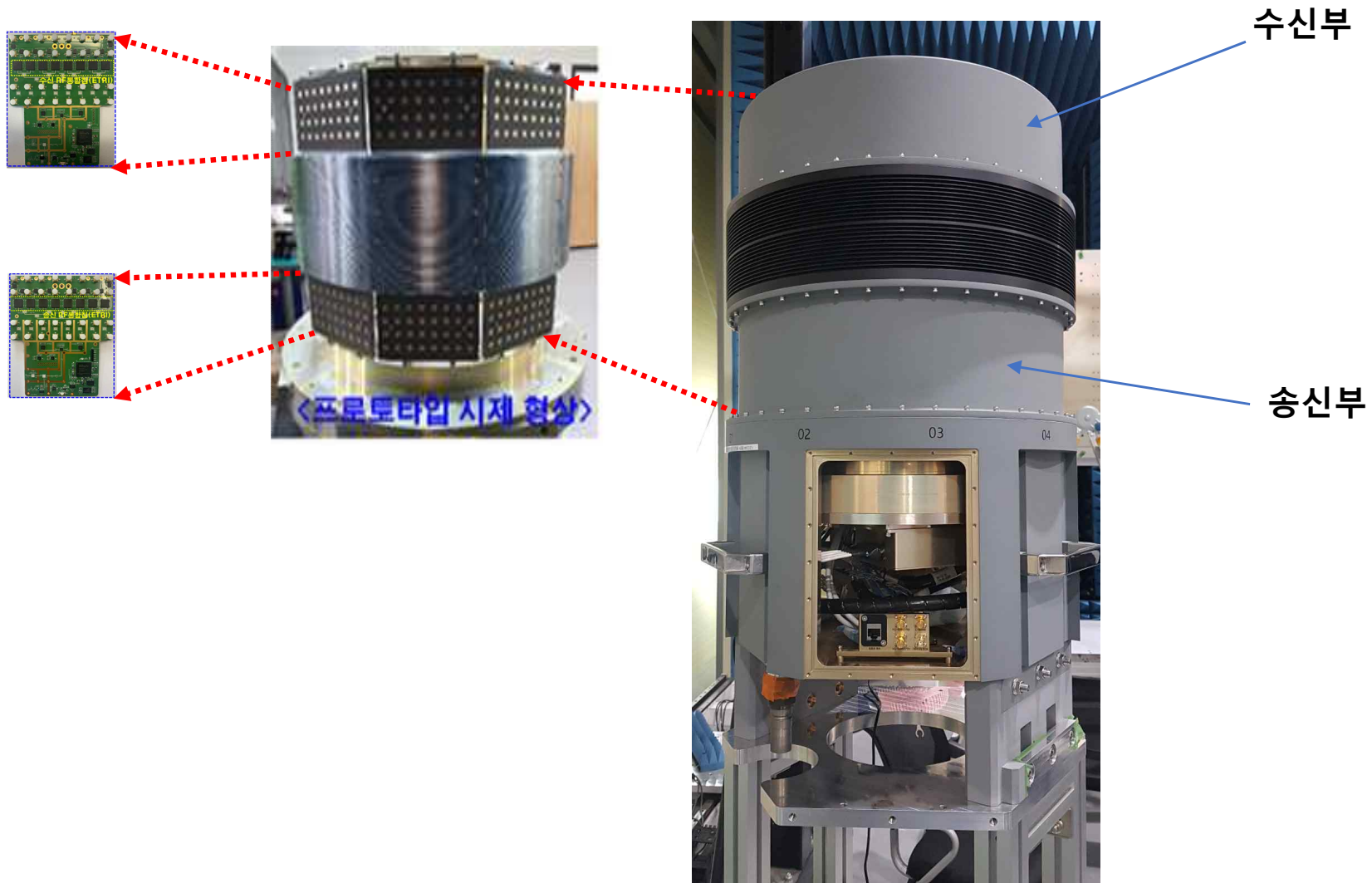
[ 대량시험 결과표 ]



- ◆ 200칩(800개 채널) Conversion Gain 분석
  - 평균 26.13 dB (1 Channel)
  - 표준편차 0.86 dB

# 다중빔 안테나 시스템 구현

- Ku대역 송신, 수신 빔포머 통합 RF모듈이 장착된 공중 중계용 다중빔 안테나 시스템 구현



[ 다중빔 안테나 시스템 ]

# 목차

**I** 다채널 빔포밍 RFIC 응용

**II** Ku대역 빔포밍 RFIC 설계

**III** K대역 빔포밍 RFIC 설계

**IV** 맺음말





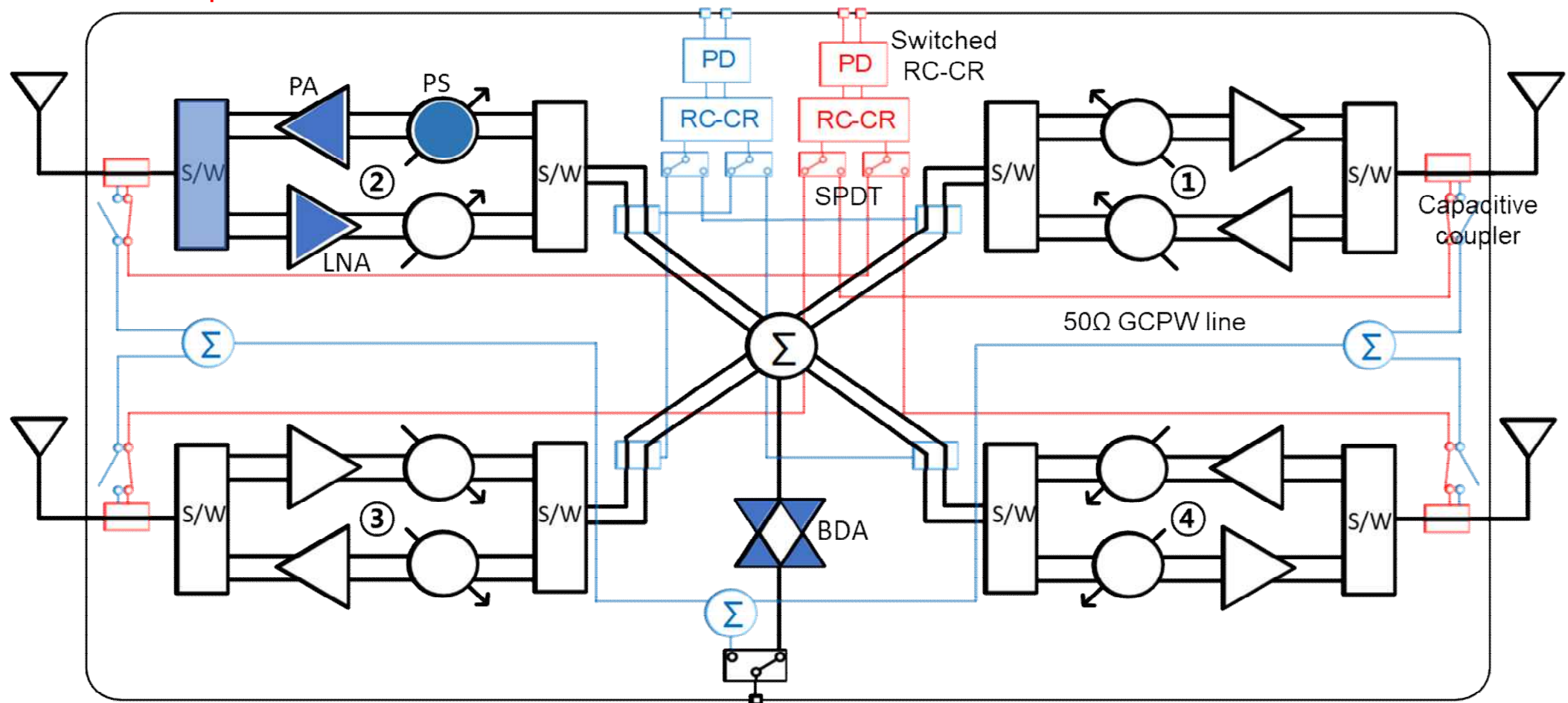
# 다채널 K대역 빔포밍 RFIC 구조도

## ■ 다채널 K대역 빔포밍 RFIC 구조설계

- 채널 수 : 4개
- Active phase shifter architecture

RX cal. path

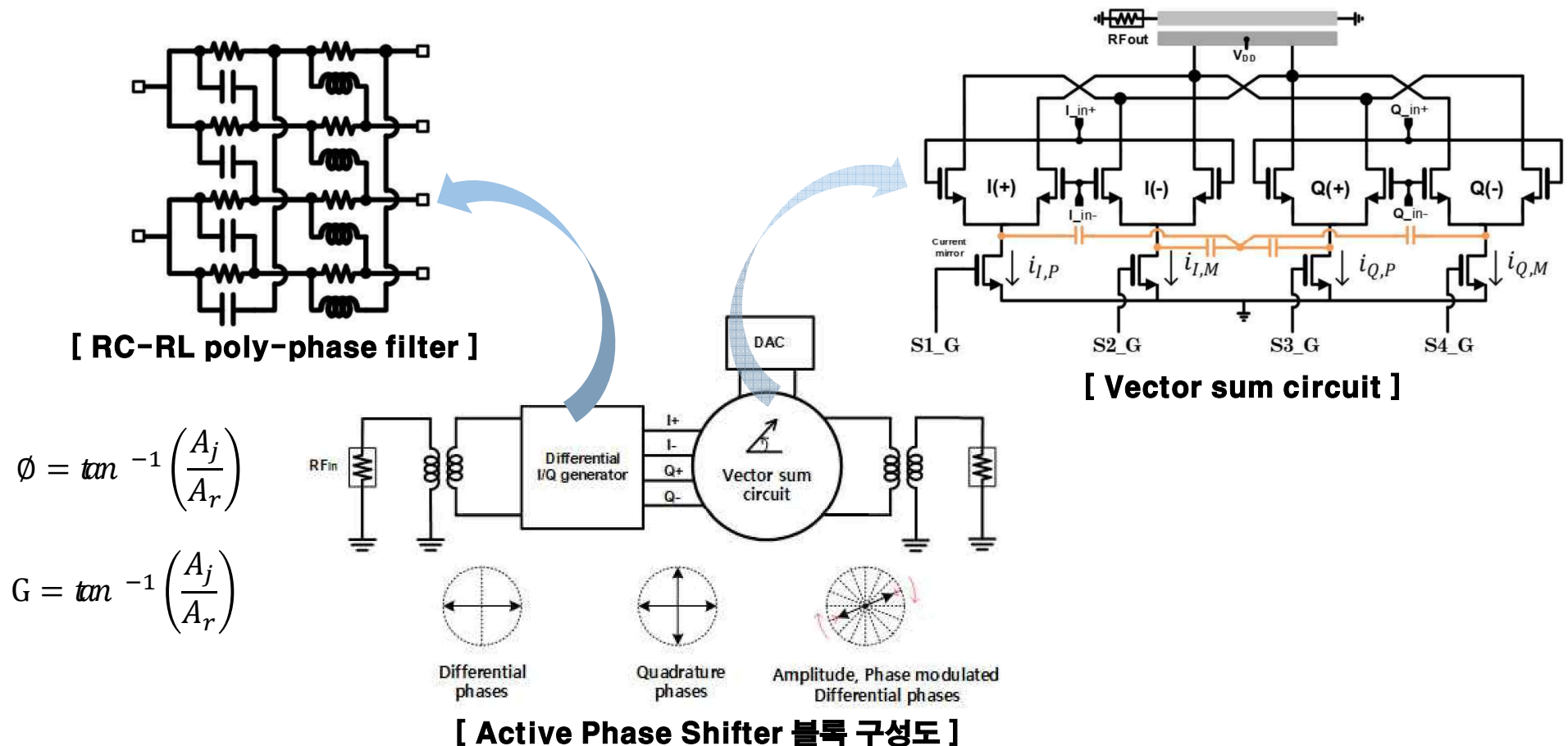
TX cal. path



# K대역 Active phase shifter 설계

## ■ K대역 Active phase shifter 구조 설계

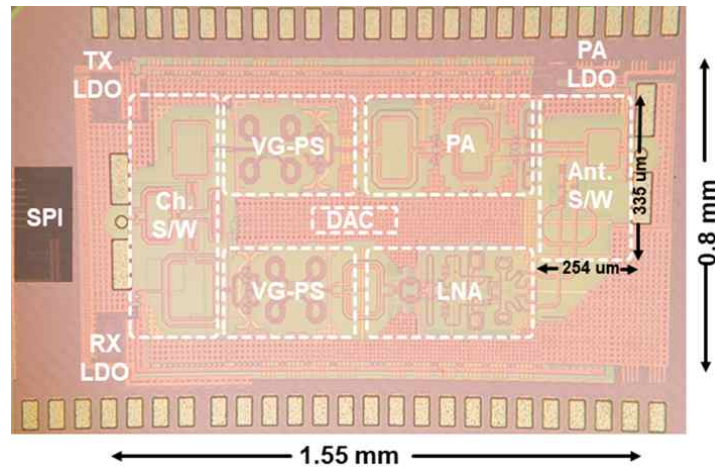
- 하나의 블록으로 phase shift 와 gain control을 동시에 독립적으로 수행함 : 칩 사이즈를 줄이고 phase, gain 조절 시 오차를 줄이는 장점
- RC-RL 2단 poly-phase filter 타입의 IQ generator : Insertion loss를 감소
- Gilbert-cell 기반의 Vector sum circuit : Harmonic 성분 상쇄를 위해서 가상 접지 Capacitor 사용



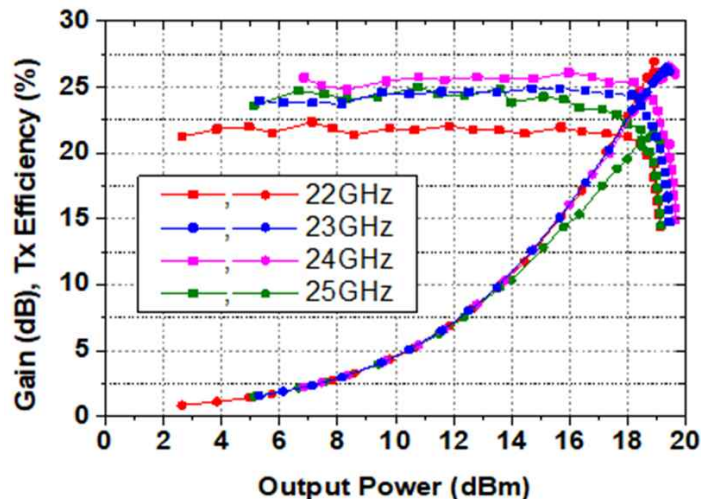
# K대역 송신 단일채널 설계 및 시험

## ■ K대역 1-Channel 송신단 구조 설계

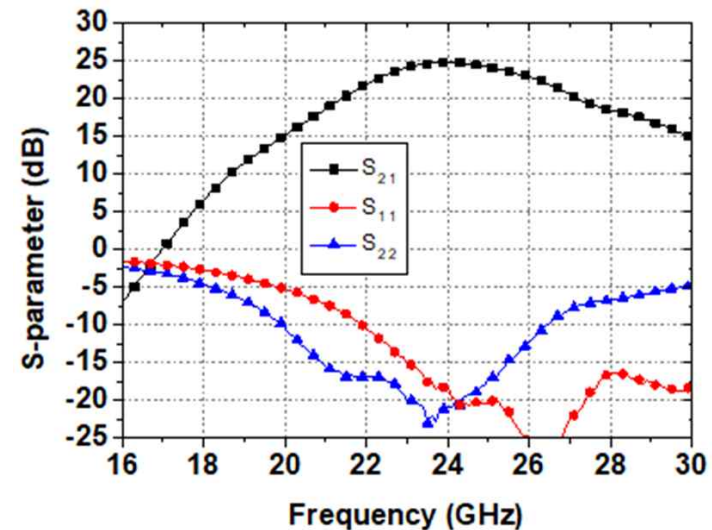
- 1-Channel 송신단 : Power amplifier, Phase shifter로 구성됨



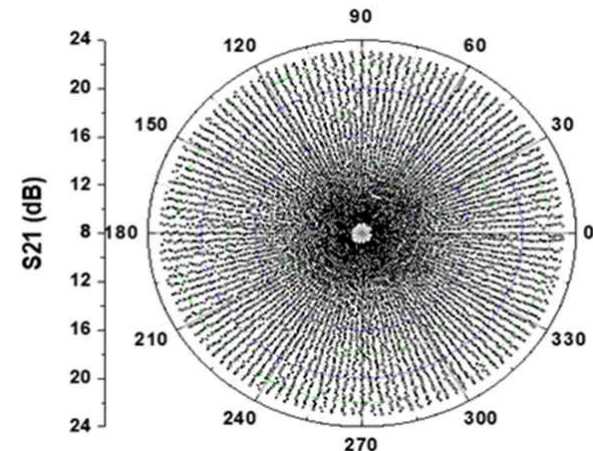
[ 단일채널 빔포밍 칩 사진 : 송신단은 위쪽 ]



[ 단일채널 빔포밍 칩 출력전력 특성 :  
OP1dB 18.6dBm@23GHz ]



[ 단일채널 빔포밍 칩 송신 S-parameter 특성 ]



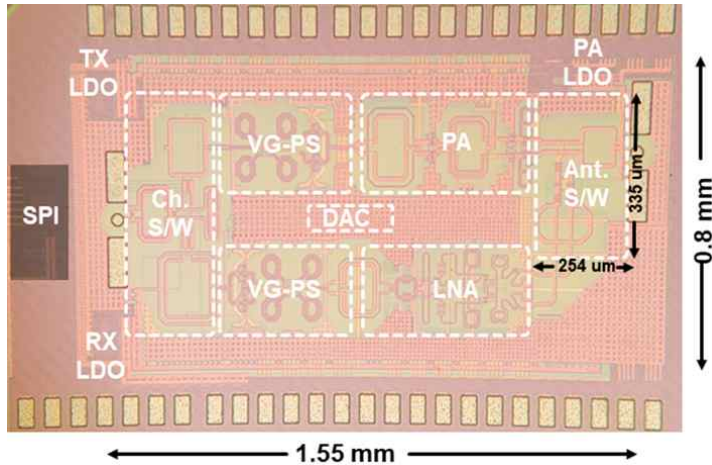
[ 단일채널 빔포밍 칩 송신모드 위상천이 특성 ]



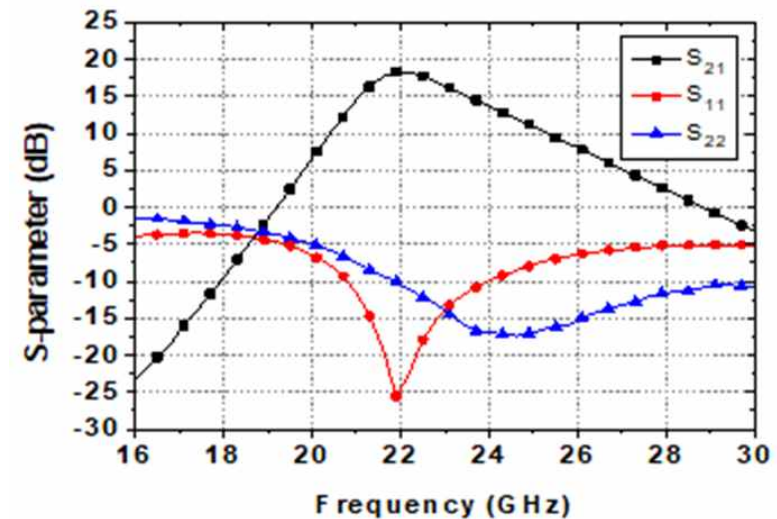
# K대역 수신 단일채널 설계 및 시험

## ■ K대역 1-Channel 수신단 구조 설계

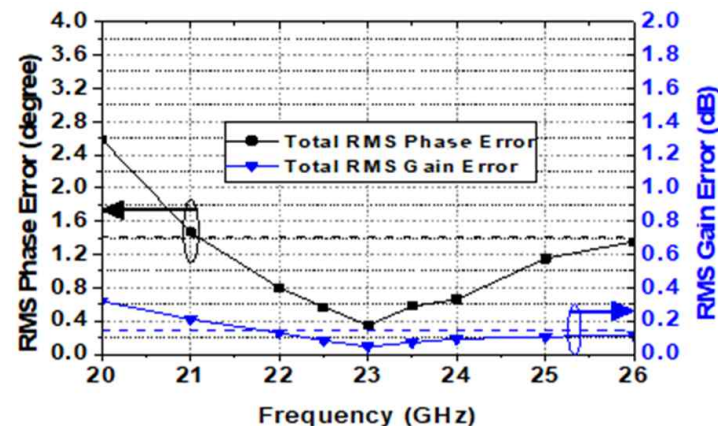
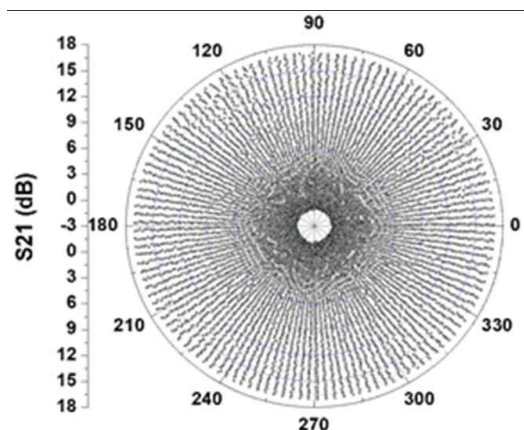
- 1-Channel 수신단 : Low noise amplifier, Phase shifter로 구성됨



[ 단일채널 빔포밍 칩 사진 : 수신단은 아래쪽 ]



[ 단일채널 빔포밍 수신 S-parameter 특성 ]



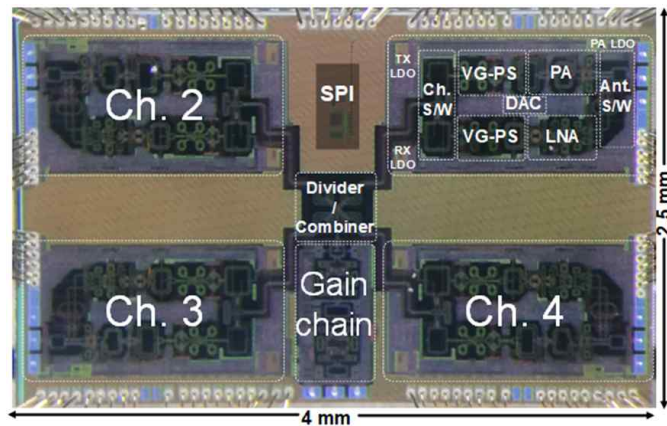
[ 단일채널 빔포밍 칩 수신모드 : RMS 위상오차 0.348도, RMS 이득오차 0.046dB @23GHz ]



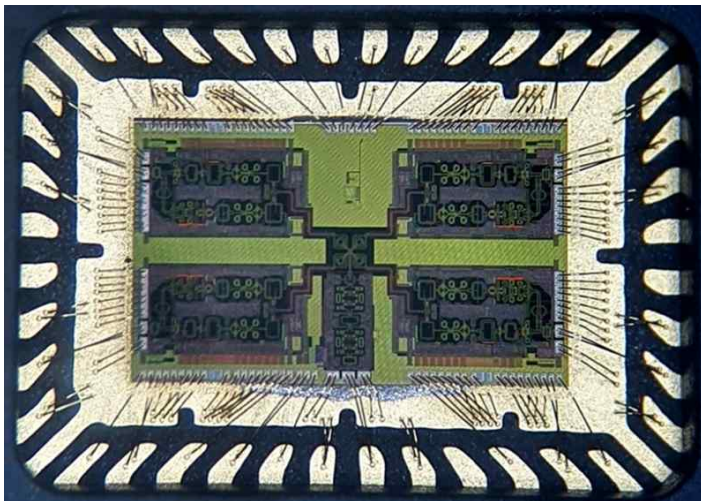
# 다채널 K대역 빔포밍 RF칩 설계 및 제작

## ■ 4채널 K대역 빔포밍 RF칩 설계 및 제작

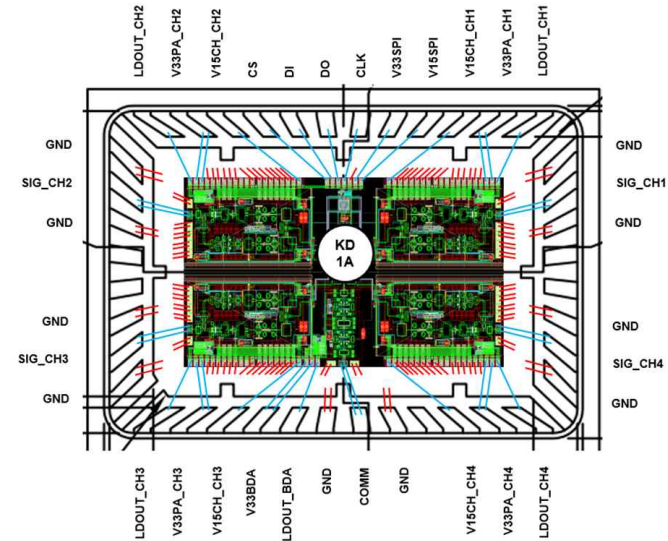
- QFN 40pin package, Body size : 5mm X 7mm



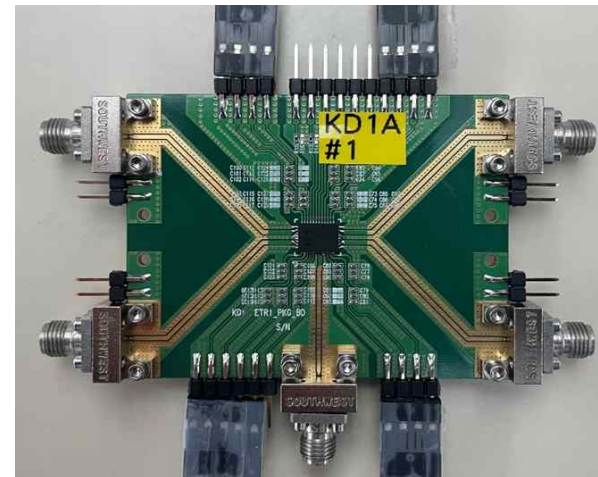
[ K대역 4채널 빔포밍칩 사진 ]



[ K대역 4채널 빔포밍칩 패키지 사진 ]



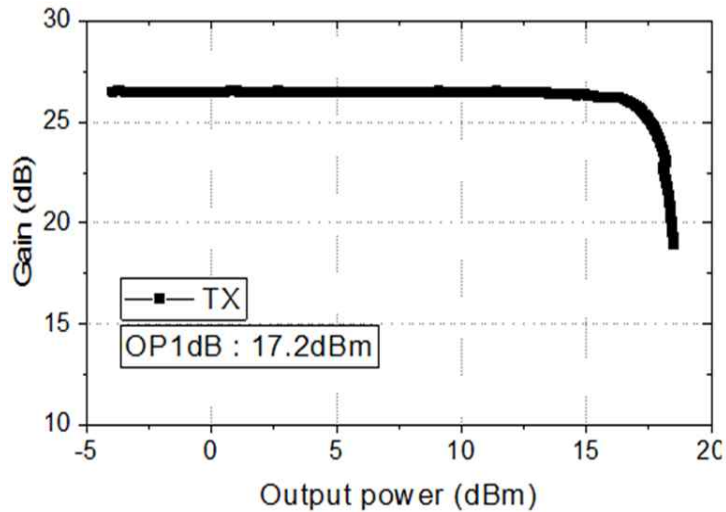
[ K대역 4채널 빔포밍칩 패키지 다이어그램 ]



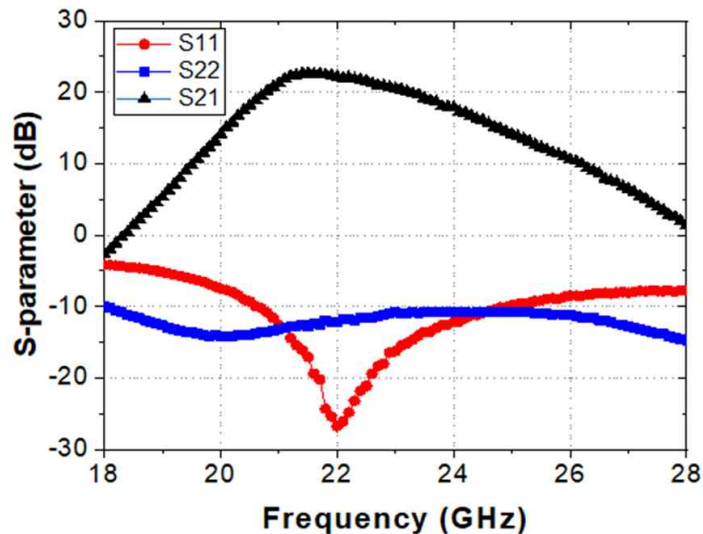
[ K대역 4채널 빔포밍칩 측정용 보드 ]

# 다채널 K대역 빔포밍 RF칩 설계 및 제작

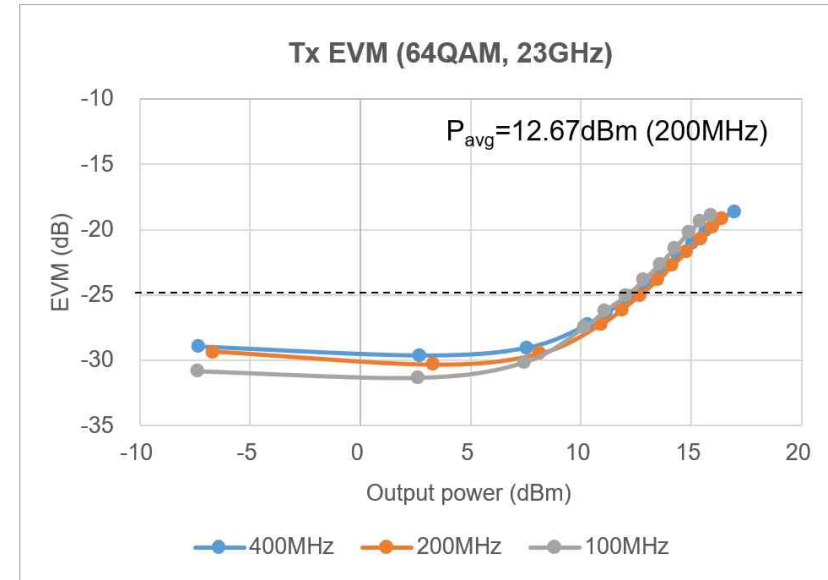
## 4채널 K대역 빔포밍 RF칩 측정결과



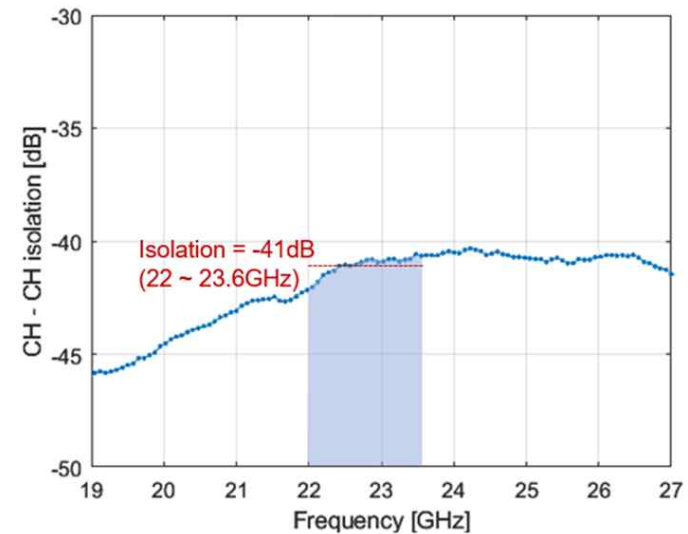
[ K대역 4채널 송신 출력 전력 측정결과 @23GHz ]



[ K대역 4채널 수신 S-parameter 측정결과 ]



[ K대역 4채널 송신 EVM 측정결과 ]

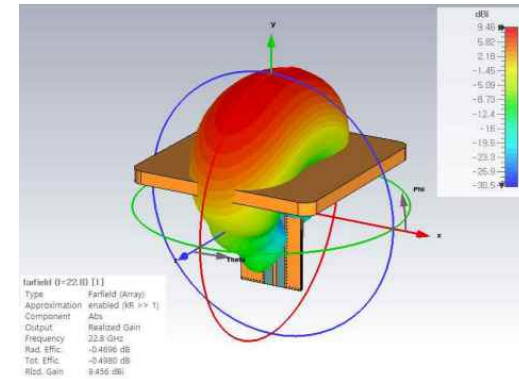
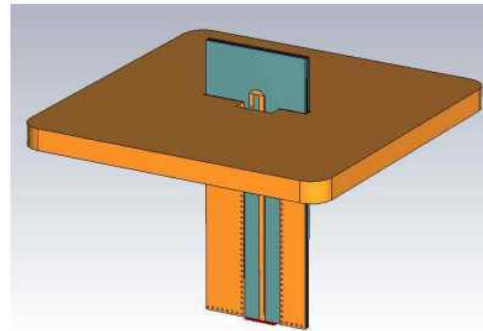
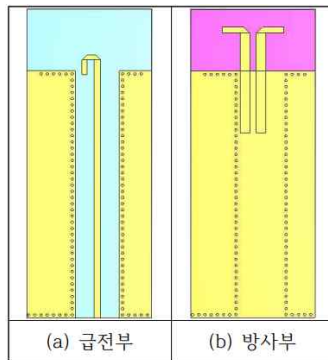


[ K대역 4채널 빔포밍칩 isolation 측정결과 ]

# K대역 Printed dipole antenna 설계 및 제작

## ■ Dipole antenna element 설계

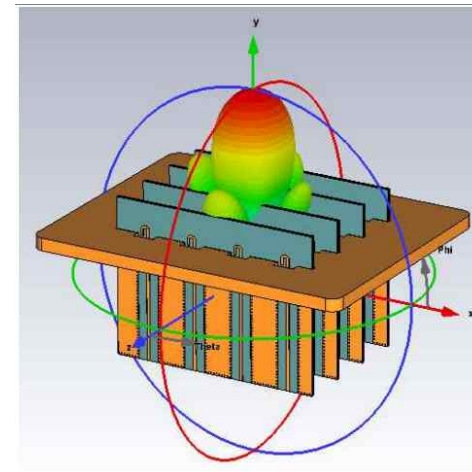
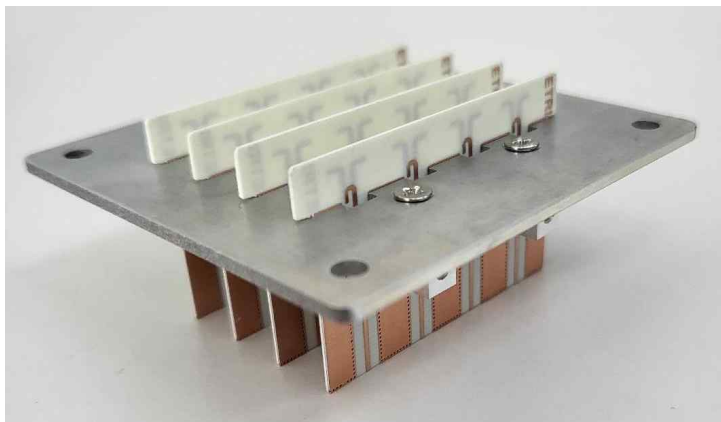
- RO4350B 10mil 기판 이용, Size : 6 mm X 3.6 mm (급전부 제외)



[ Dipole antenna element : 구조, 3D 구조, 3D 패턴]

## ■ 4X4 배열 안테나 설계

- RO4350B 10mil 기판 이용, Size : 37 mm X 31 mm X 3.6 mm (L X W X H)



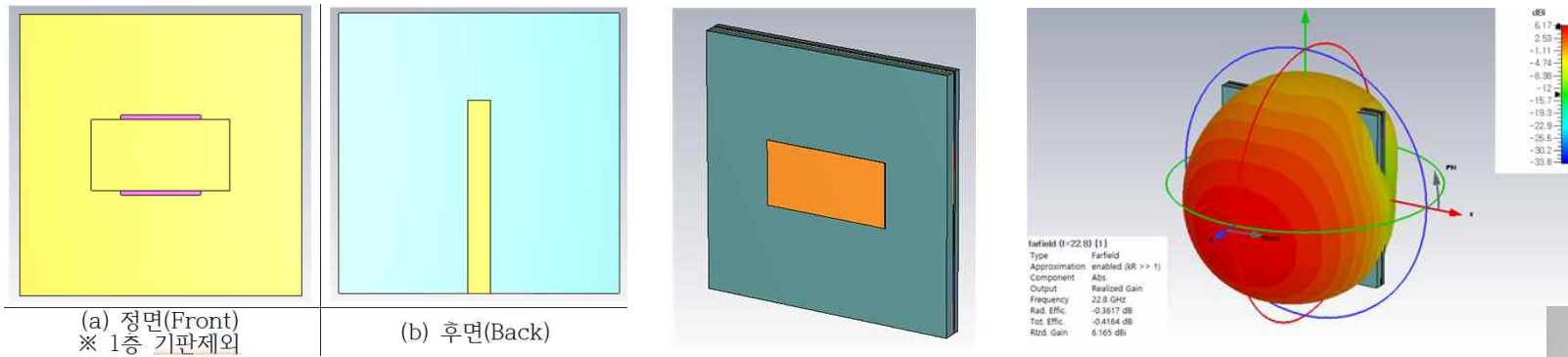
[ 4x4 배열 안테나 : 실물 형상, 3D 빔 패턴]



# K대역 Planar aperture coupled antenna 설계 및 제작

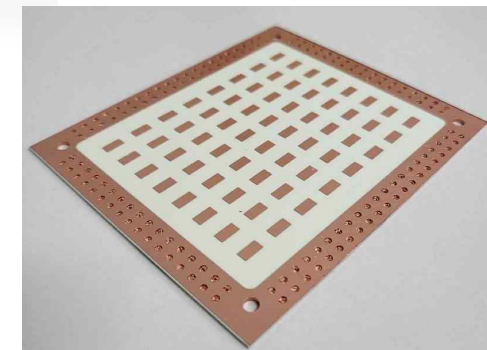
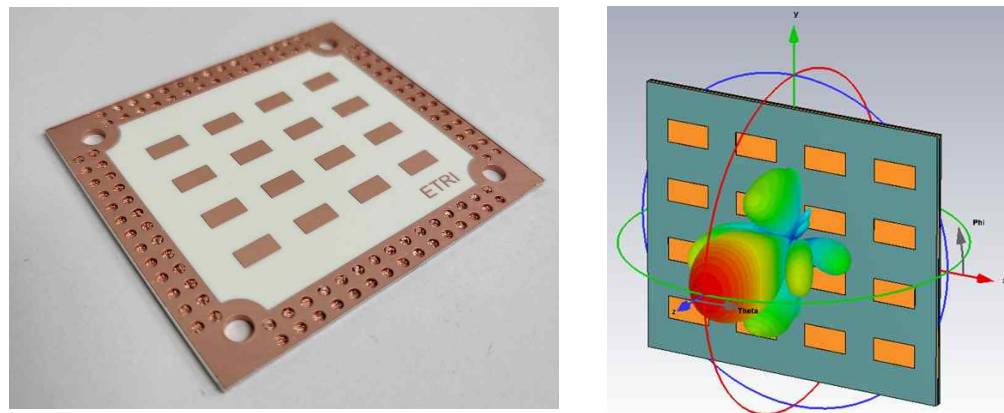
## ■ Dipole antenna element 설계

- RO4350B 10mil 기판 이용, Size : 10.6 mm X 10.6 mm X 0.881 mm (L X W X H)



## ■ 4X4 배열 안테나 설계

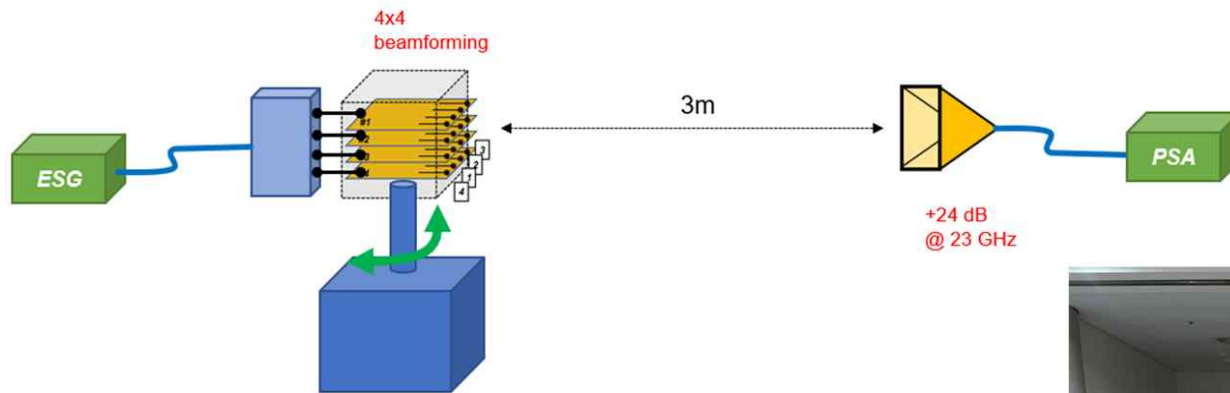
- RO4350B 10mil 기판 이용, Size : 37 mm X 31.6 mm X 0.881 mm (L X W X H)



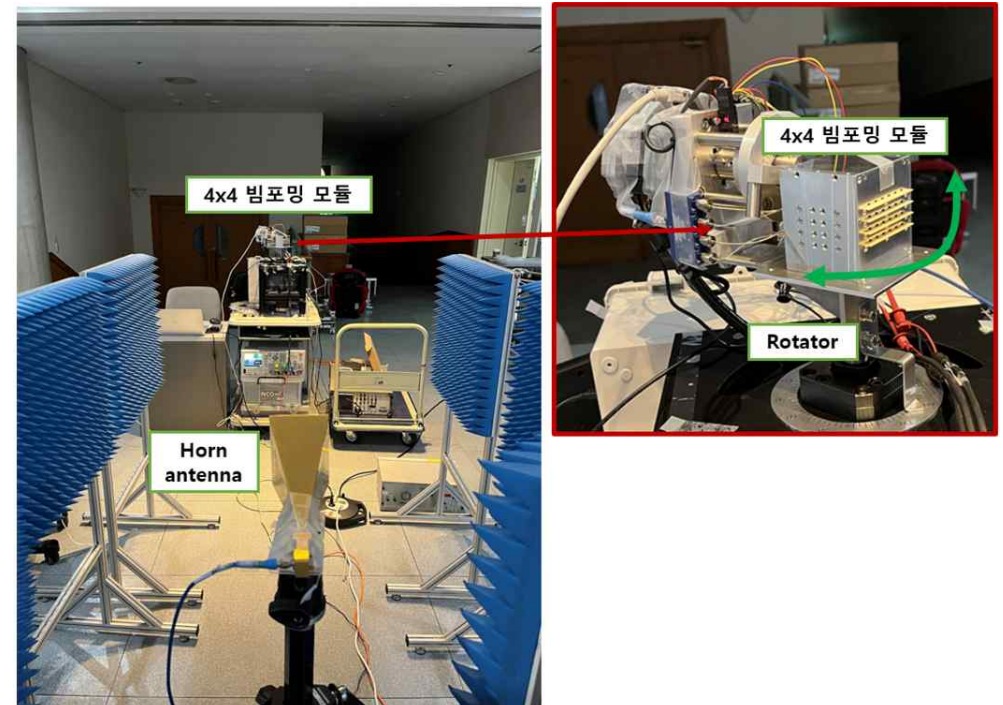


# 다채널 K대역 빔포밍 시험장치 성능평가(송신 시험)

- K대역 16채널 빔포밍 OTA(Over-The-Air) 시험
- 송신은 rotator를 이용하여 회전함
- 수신은 standard gain horn antenna를 이용하여 고정함



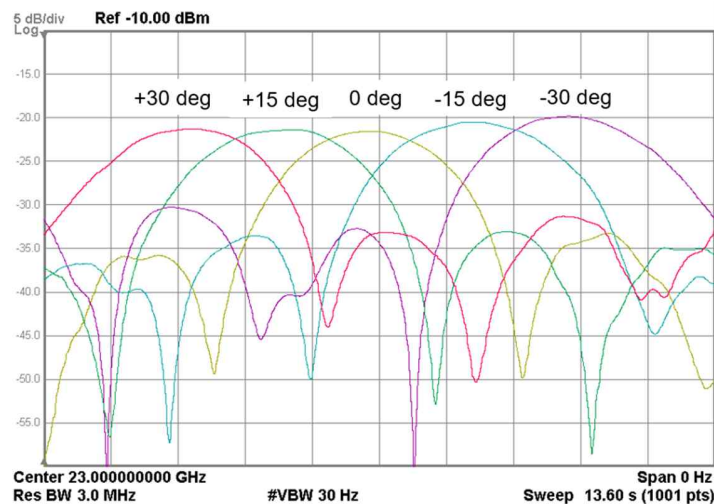
[ K대역 빔포밍 4X4채널 모듈 송신 측정 환경 구성도 ]



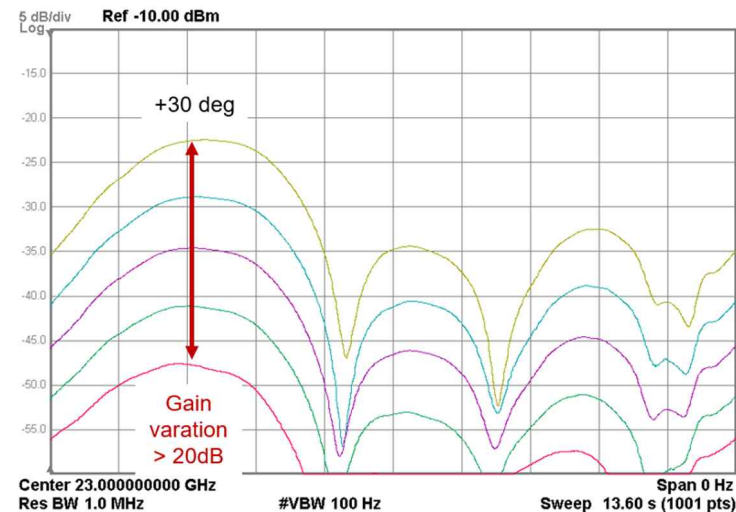
[ K대역 빔포밍 4X4 모듈 송신 측정 환경 ]

# 다채널 K대역 빖포밍 시험장치 성능평가(송신 시험)

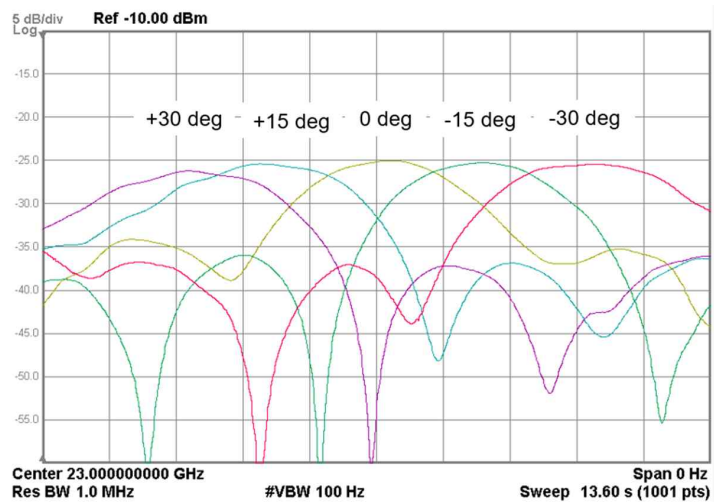
## ■ 송신 Azimuth 빖조향 측정, Elevation 빖조향 측정



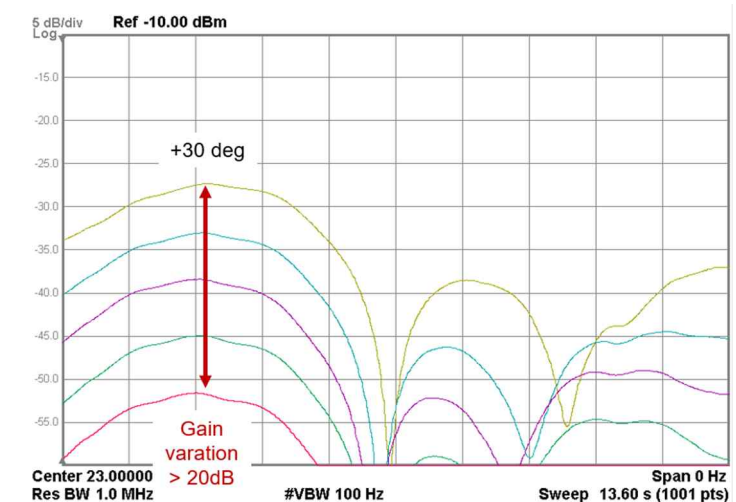
[ 송신 Azimuth 빖조향 측정결과 : Sidelobe < 12dB ]



[ 송신 Azimuth +30deg 방향 빖 이득제어 측정결과 ]



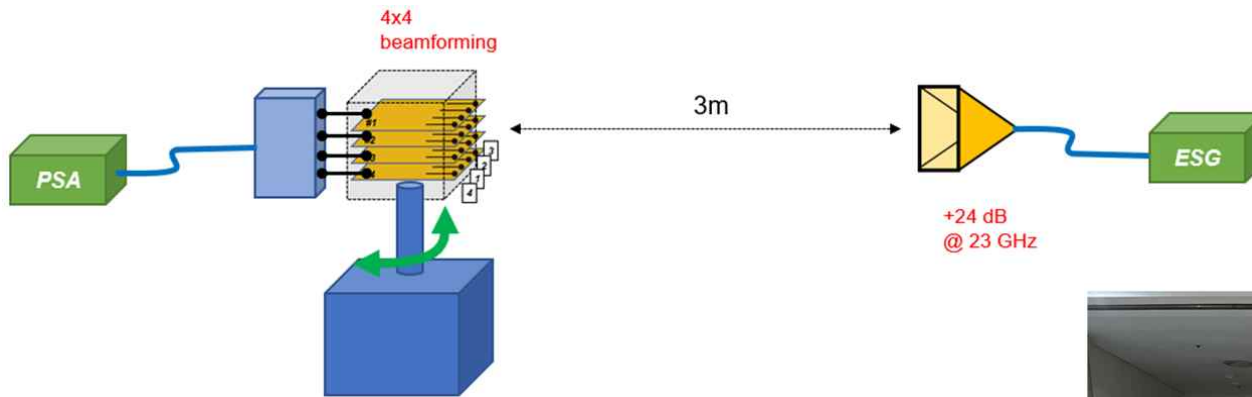
[ 송신 Elevation 빖조향 측정결과 : Sidelobe < 9dB ]



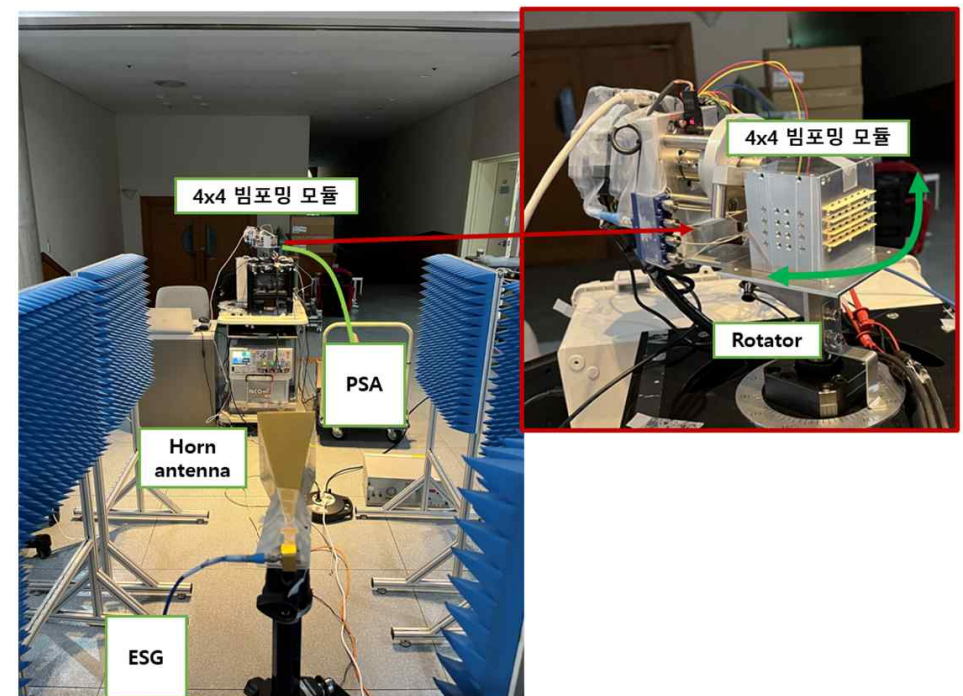
[ 송신 Elevation +30deg 방향 빖 이득제어 측정결과 ]

# 다채널 K대역 빔포밍 시험장치 성능평가(수신 시험)

- K대역 16채널 빔포밍 OTA(Over-The-Air) 시험
- 수신은 rotator를 이용하여 회전함
- 송신은 standard gain horn antenna를 이용하여 고정함



[ K대역 빔포밍 4X4채널 모듈 수신 측정 환경 구성도 ]

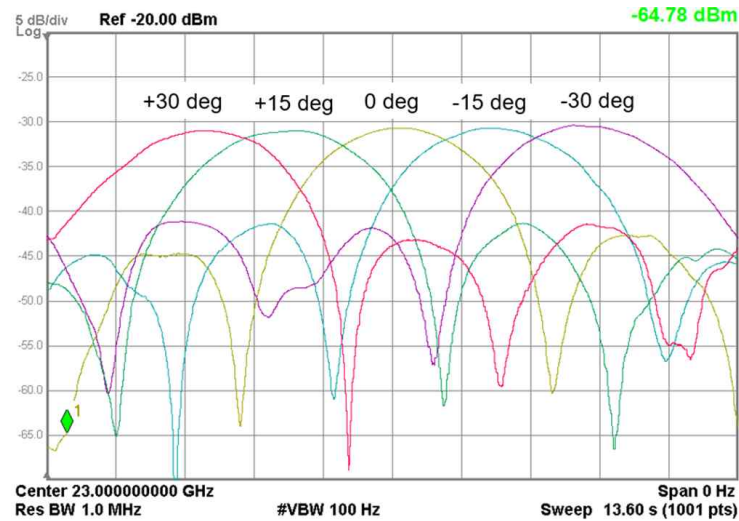


[ K대역 빔포밍 4X4 모듈 수신 측정 환경 ]

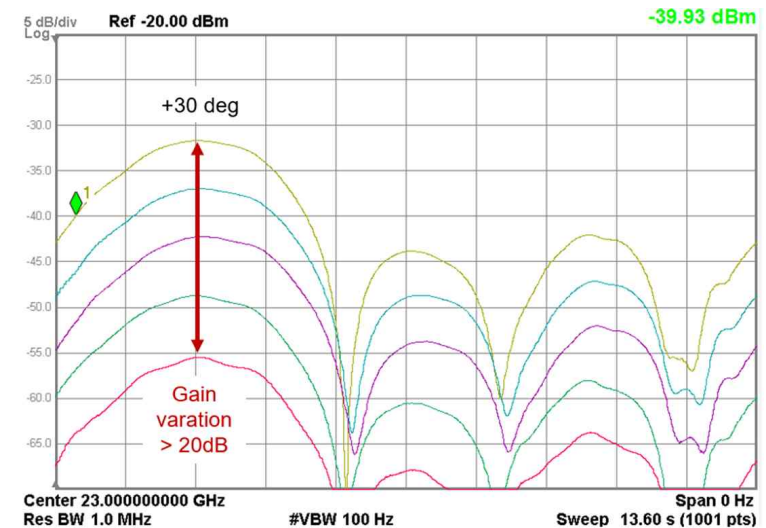


# 다채널 K대역 빖포밍 시험장치 성능평가(수신 시험)

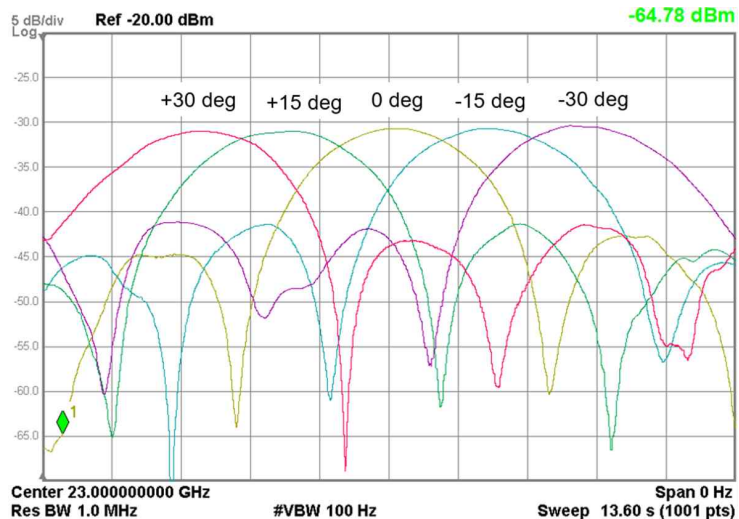
## ■ 수신 Azimuth 빖조향 측정, Elevation 빖조향 측정



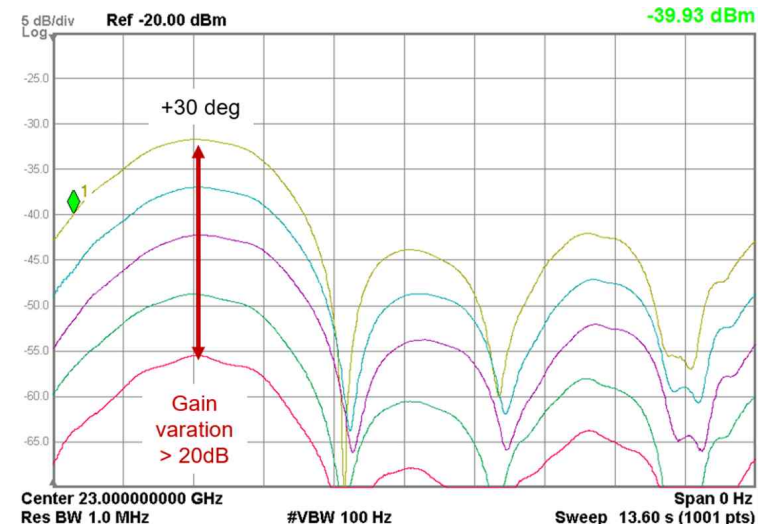
[ 수신 Azimuth 빖조향 측정결과 : Sidelobe < 10dB ]



[ 수신 Azimuth +30deg 방향 빖 이득제어 측정결과 ]



[ 수신 Elevation 빖조향 측정결과 : Sidelobe < 9dB ]

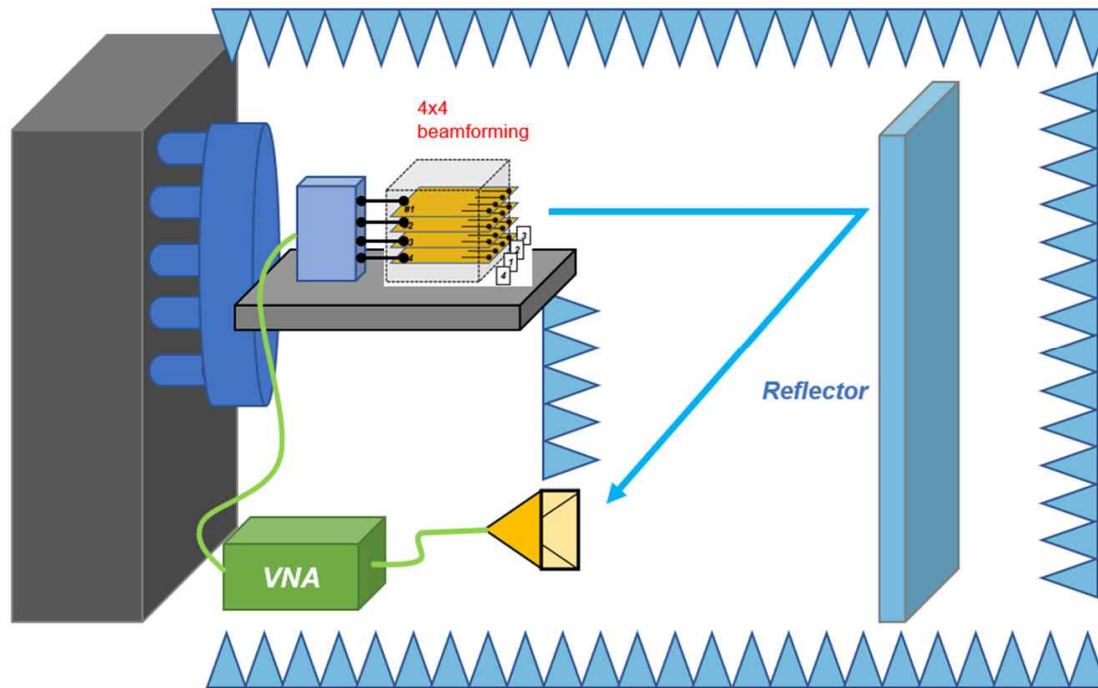


[ 수신 Elevation +30deg 방향 빖 이득제어 측정결과 ]



# 다채널 K대역 빔포밍 시험장치 성능평가(송신 챔버 시험)

- K대역 4X4 빔포밍 모듈 송신 성능 시험



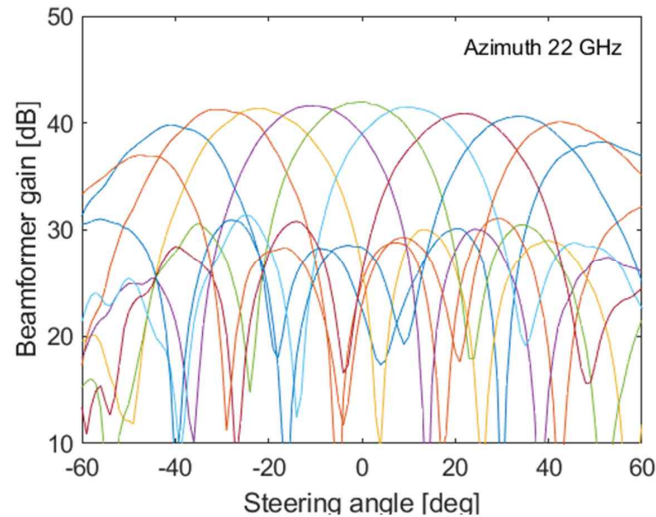
[ K대역 빔포밍 4X4채널 모듈 챔버 측정 환경 구성도 ]



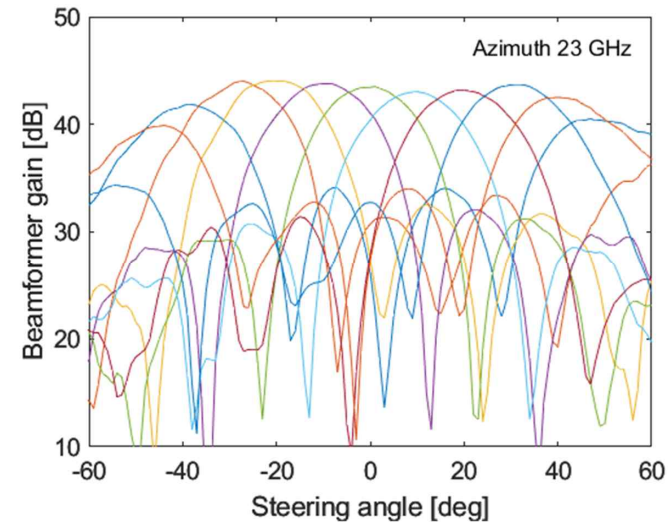
[ K대역 빔포밍 4X4채널 모듈 송신 측정 환경 ]

# 다채널 K대역 빔포밍 시험장치 성능평가(챔버 시험)

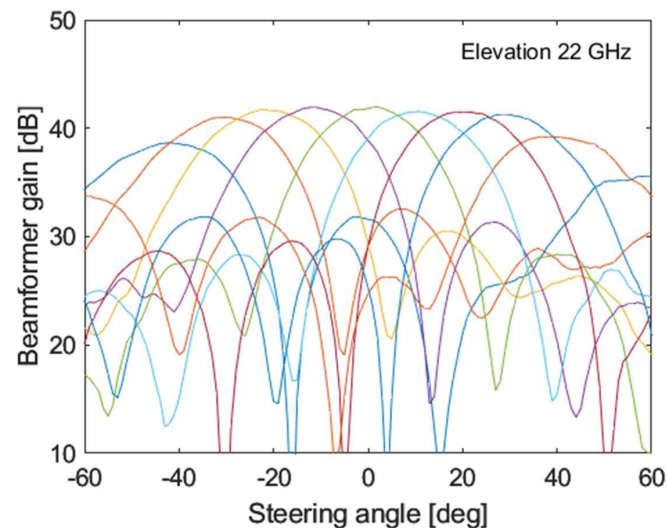
## ■ K대역 4X4 빔포밍 모듈 송신 성능 측정 결과



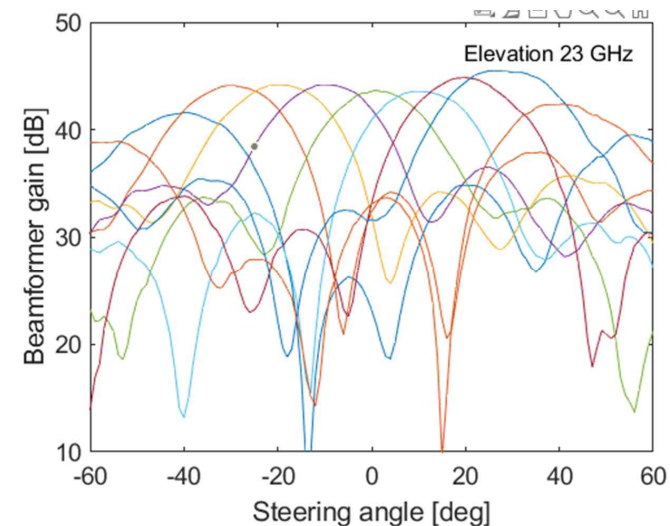
[ 송신 Azimuth 빔조향 측정 : 22GHz ]



[ 송신 Azimuth 빔조향 측정 : 23GHz ]



[ 송신 Elevation 빔조향 측정 : 22GHz ]



[ 송신 Elevation 빔조향 측정 : 23GHz ]

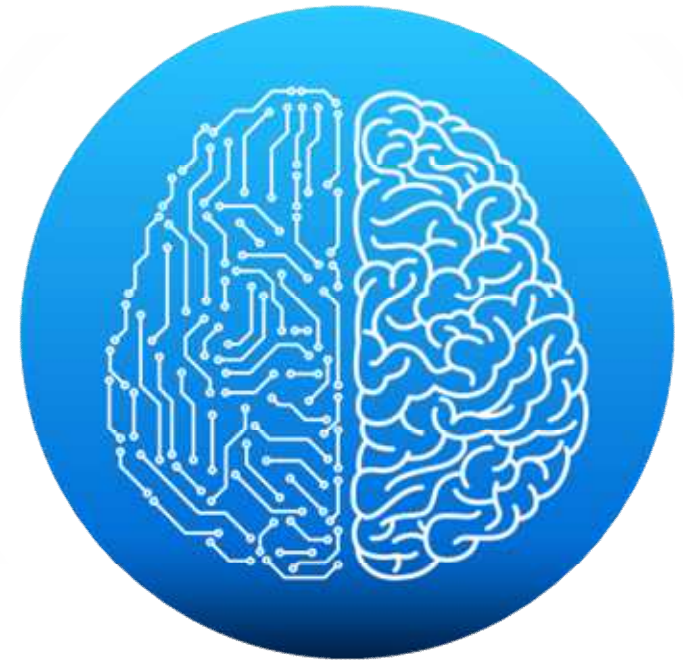
# 목차

I 다채널 빔포밍 RFIC 응용

II Ku대역 빔포밍 RFIC 설계

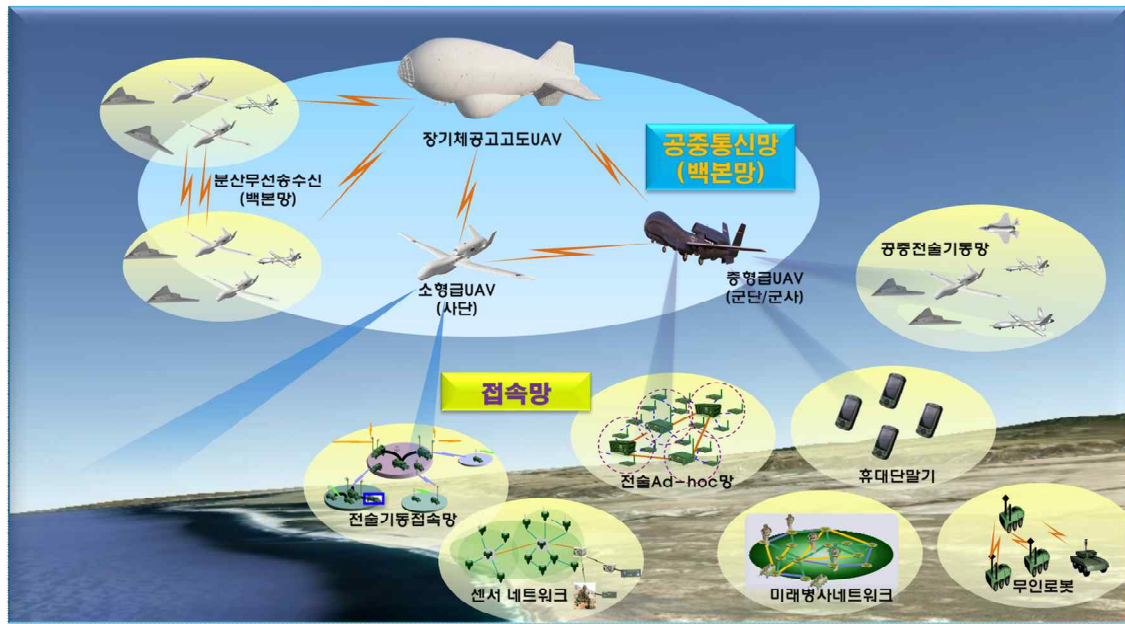
III K대역 빔포밍 RFIC 설계

IV 맺음말

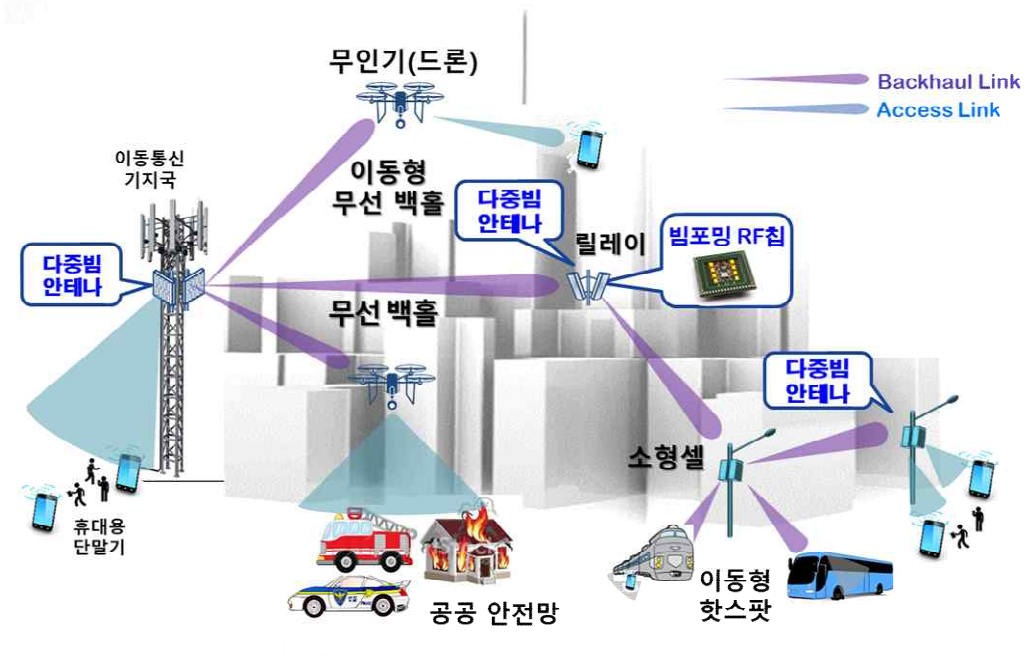




- 국방 통신 활용
  - 다중빔 안테나를 활용한 공중 통신 네트워크 구축에 활용
- 이동 통신 활용
  - 초고속 백홀망 구축에 활용
  - 5G Adv. 액세스망 구축을 위한 기지국, 단말에 활용



[ 국방통신 : 공중 통신 네트워크 활용 ]



[ 이동통신 활용 ]



Thank you

