

GaN 고출력 증폭기의 초소형 레이다 적용에 관한 연구

이상엽^{*,1)} · 이재웅¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

A Study on the Application of High-Power GaN SSPA for Miniature Radar

Sang_yeop Lee^{*,1)} · Jaewoong Yi¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 December 2015 / Revised 29 June 2016 / Accepted 2 September 2016)

ABSTRACT

Trend on high-power GaN(Gallium Nitride) SSPA(Solid-State Power Amplifier) and its availability in miniature radar systems are presented. There are numerous studies on high-power GaN devices since they have some characteristics of high-breakdown voltage, high power density, and high-temperature stability. Recent scaled GaN technology makes it possible to apply it in SSPAs for W- and G-band applications, with increasing its maximum frequency. In addition, it leads to downsizing and power-efficiency improvement of SSPAs, which means that GaN SSPAs can be available in miniature radar systems. This study also shows radar performance and comparison in the case of using such SSPAs at three frequency bands of Ku, Ka, and W. Finally, we demonstrate prospects of scaled GaN SSPAs in future miniature radar systems.

Key Words : GaN(갈륨 나이트라이드), SSPA(반도체 전력 증폭기), Miniature Radar(초소형 레이다)

1. 서론

레이다는 전자파를 이용하여 표적과의 거리, 속도, 방향 등을 탐지하는 센서다. 주로 군사용, 항공/선박용, 그리고 위성 등에서 사용되던 20세기 중, 후반과는 달리, 차량용 레이다, 속도 측정 장치 등으로도 주위에서 친근하게 볼 수 있는 장치가 되고 있다. 또한 전자파

의 투과, 반사율 등이 기온, 습도, 그리고 구름, 안개 등에 의하여 달라지는 특성을 활용하여 일정 범위 내의 기온, 구름 분포 등의 영상을 얻는 기상 관측용 레이다 등도 널리 사용되고 있다.

일반적으로 레이다는 원거리에서 사용가능토록 전자파를 고출력으로 방사할 필요가 있기 때문에 고출력을 얻을 수 있는 클라이스트론(klystron), 마그네트론(magnetron), 그리고 진행파관(TWT : Traveling Wave Tube) 등 부피가 큰 진공관형 증폭기가 사용되어 왔다. 그러나 앞에서도 언급한 민수용 레이다의 개발 및

* Corresponding author, E-mail: 4ever4u@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

보급이 확산되고 사용하는 주파수가 점차 높아지면서 진공관형 증폭기 개발이 어려워지고 있는 점 등으로 인해, GaAs(Gallium Arsenide), InP(Indium Phosphide), SiGe(Silicon Germanium), 그리고 GaN(Gallium Nitride) 등의 반도체 공정을 이용한 반도체 전력 증폭기(SSPA : Solid-State Power Amplifier) 기술이 연구되고 있다. 특히 과거에 진공관형 증폭기들에 비해서 낮았던 출력 전력, 효율 등이 각 반도체 공정의 스케일링에 따른 소자 특성의 발전, 그리고 전력 결합 기술의 발전에 따라서 개선되고 있다. 또, 다른 RF 파트와의 통합 설계가 보다 용이해지고, 고전압 생성이 불필요하다는 점, 그리고 양산 시 단가를 낮출 수 있다는 점에서 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Table 1. GaN characteristics versus other technologies^[1]

	E_g bandgap (eV)	Power density (W/mm)	Thermal conductivity (W/cm/K)	f_t (GHz)
Si	1.1	0.2	1.5	20
GaAs	1.4	0.5	0.5	150
InP	1.3	-	-	300
SiGe	0.7-1.1	0.3	-	50
GaN	3.4	>30	~2.0	150

그중에서 GaN 소자는 Table 1에서처럼, 높은 에너지 갭(E_g) 특성으로 인해 얻어지는 높은 내압 특성, 그에 따라 같은 면적에서 얻을 수 있는 높은 전력 밀도, 그리고 고온 안정성 등 때문에 고전력용 전력 반도체, 고티력 전력 증폭기 등을 목적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 소자 자체의 스케일링 (scaling)에 따라 소자 자체의 전류 이득이 1이 되는 최대 동작 주파수 f_t (transit frequency), 전력 이득이 1이 되는 최대 동작 주파수 f_{max} (maximum frequency) 등의 주파수 특성이 향상됨에 따라 기존의 10 GHz 미만의 주파수 대역 뿐만 아니라, E, W, 그리고 G밴드 이상의 주파수에서 사용가능한 GaN 소자 증폭기도 발표되고 있다^[2-5].

Fig. 1, 2에서 ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)에서 발표하는 GaN 소자의 발전 로드맵을 알 수 있다. GaN 소자의 게이트 길이(gate length)가 축소되는 스케일링이 진행 중에 있으며, 그

에 따라서 최대 동작 주파수 f_{max} 의 증가, 그리고 단위 게이트 폭(gate width)에서의 출력 전력 및 출력 효율이 증가하는 것을 알 수 있다^[6].

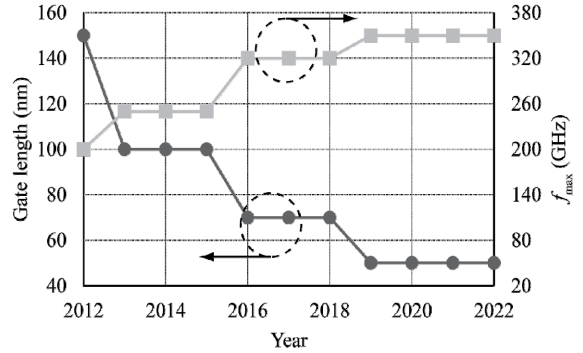


Fig. 1. ITRS targets(gate length, maximum frequency) for power GaN HEMT^[6]

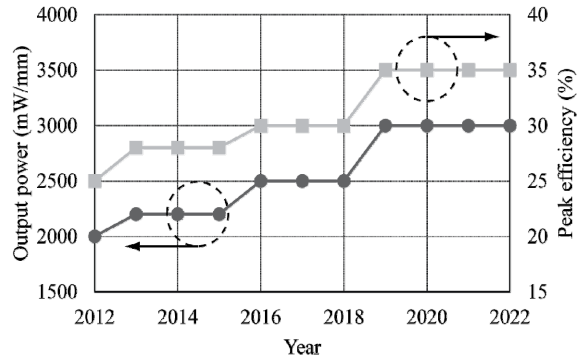


Fig. 2. ITRS targets(output power, peak efficiency) for power GaN HEMT^[6]

GaN 소자의 이러한 발전은 고티력 전력 증폭기의 성능 개선에 적용할 수 있으며, 레이다 개발에도 널리 응용될 수 있다. 민수용만이 아니라 군수/항공/우주 산업 쪽에서도 탐지거리를 어느 정도 확보하면서 성능을 낼 수 있는 초소형 레이다(예 : 부피 100 cc, 무게 0.5 kg 이하)의 개발 필요성이 증대되고 있는 시점에서, 증폭기의 소형화는 필수불가결이며 GaN 전력 증폭기는 좋은 대안이 될 수 있다.

이 논문에서는 GaN 소자의 디바이스, 그리고 증폭기 모듈 레벨에서의 발전 동향으로부터, 그것을 이용한 레이다 시스템의 소형화 및 성능 발전 전망에 대하여 분석하였다.

2. 최신 GaN 전력 증폭기 동향

Table 2. Recent reported GaN SSPAs

제조사	주파수/전력(파형) (W) /효율 (%)	사이즈 (mm×mm×mm)
Fujitsu 2009 ^[7]	C/340(pulse)/53	14×15×N.A.
Fujitsu 2009 ^[7]	X/100(pulse)/53	14×15×N.A.
Toshiba 2008 ^[8]	X/250(pulse)/21	110×120×15
Sumitomo 2014 ^[9]	X/310(pulse)/36	24×17×N.A.
Mitsubishi 2012 ^[10]	Ku/100(CW)/N.A.	20×30×10 이하
Toshiba 2009 ^[11]	Ku/120(CW)/9	70×120×15
Toshiba 2014 ^[12]	Ka/20(pulse)/16	4.0×5.5×N.A.
Qorvo 2015 ^[13]	Ka/120(CW)/25	N.A.
QuinStar 2014 ^[14]	Ka/100(N.A.)/N.A.	N.A.
Raytheon 2012 ^[4]	E/1.6(CW)/25	1.6×0.9×N.A.
QuinStar 2014 ^[14]	W/5(N.A.)/N.A.	51×51×26
QuinStar 2014 ^[14]	W/30(N.A.)/N.A.	210×280×90
QuinStar 2015 ^[15]	W/3.6(pulse)/29	5.4×2.8×N.A.
HDL Lab. 2014 ^[5]	G/0.024(N.A.)/3.5	N.A.

Table 2에서 2009년 이후, 논문이나 제품에서 발표된 C밴드에서 G밴드에 이르는 GaN 전력 증폭기의 동향을 알 수 있다^[5,7-15]. 미국, 일본 등을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 작은 사이즈로 Ku밴드 기준 100 W 이상의 고출력이 가능하게 되었고^[10], 여러 증폭기 단일 소자를 90 %가 넘는 효율로 전력 결합하여 보다 높은 출력을 달성한 사례도 여러 건 발표되고 있다. 효율도 과거와 비교하여 점진적으로 상승하여 X밴드 기준으로 50 %가 넘는 효율을 달성하였으며^[7], W

밴드 기준으로도 30 %에 육박하는 효율을 가진 증폭기가 발표되고 있다^[15].

이러한 연구들은 앞에서 언급한 GaN 소자의 스케일링에 따라서, 단일 소자의 면적이 축소되는 점, f_{max} 의 증가로 인해 보다 높은 주파수의 신호를 증폭가능한 점, 그리고 같은 주파수에서 보다 높은 전력 이득을 얻을 수 있는 점에서 가능해졌으며, 최근에는 고효율 전력 증폭기에 관한 연구가 활발해지고 있는 경향을 보인다.

3. GaN 전력 증폭기 적용 초소형 레이더

기존의 레이더의 사이즈를 제한하는 요인으로는 1) 안테나의 사이즈와, 2)클라이스트론, 마그네트론, TWT 등을 이용한 송신기의 사이즈를 생각할 수 있다. 바꿔 말하면, 레이더의 소형화를 위해서는 필요한 안테나 이득을 확보하면서 최대한 안테나 사이즈를 줄여야 하고, 송신기를 소형화해야 함을 알 수 있다. 또한, 레이더를 소형화 했을 때 고려해야 할 점으로는 크게 1)목표 성능을 만족하는 탐지 거리 확보, 그리고 2)정해진 사이즈 내에서의 열 방열 문제 등을 들 수 있다.

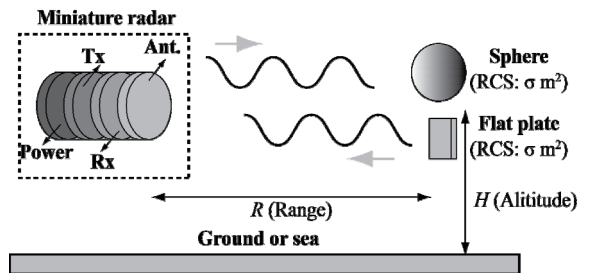


Fig. 3. Concept of a miniature radar

Fig. 3은 Table 2에서 언급된 GaN 전력 증폭기를 사용했을 때의 초소형 레이더 콘셉트를 나타낸다. 안테나(Ant.), 송신기(Tx), 수신기 및 신호처리기(Rx), 그리고 배터리를 포함한 전력 모듈(Power)로 구성된 경우다. GaN 전력 증폭기의 사이즈를 기반으로 안테나의 사이즈가 결정되고, 또 수신기, 신호처리기 및 전력 모듈 각각의 사이즈 및 소모 전력이 집적회로 기술 발달로 GaN 전력 증폭기에 비해서 무시할 수 있을 정도로 축소 가능하다고 가정하였고, 레이더 및 표적이 동일 고도 상에 위치하였을 때를 기준으로 하고 있다.

3.1 안테나 사이즈, 사용 주파수 및 이득 관계

Table 2에서 언급된 GaN 전력 증폭기의 사이즈를 기준으로 안테나 직경을 결정하여 초소형 레이다를 설계한다고 할 때, 각 안테나 사이즈에 따른 안테나 이득의 변화는 원형 카세그레인 안테나(Cassegrain antenna)를 기준으로 다음 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 이 때, G_t 는 송신 안테나 이득, G_r 은 수신 안테나 이득, l 는 안테나 직경이며, 안테나 효율 e_a (aperture efficiency)를 0.5로 가정하고 Ku, Ka, W밴드에 관하여 계산한 결과가 Fig. 4와 같다.

$$G_{t,r} = 10\log\left(\frac{4\pi^2 l^2 e_a}{\lambda^2}\right) \quad (1)$$

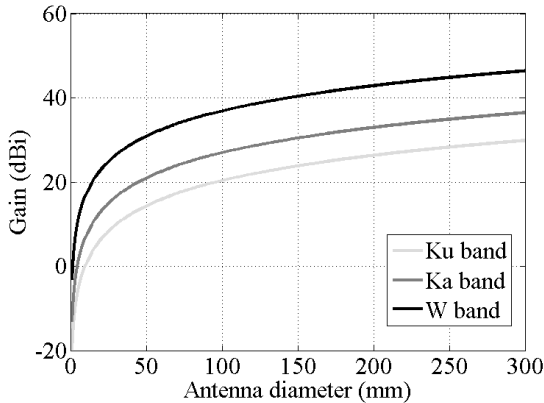


Fig. 4. Antenna gain versus antenna diameter

Fig. 4에서처럼, 안테나의 직경이 커질수록 안테나 이득은 증가하게 되며, 주파수가 높을수록 더 큰 이득을 가지게 된다. Table 2의 GaN 전력 증폭기 중, W밴드 전력 증폭기^[14]의 사이즈를 기준으로 안테나 직경을 50 mm로 정했을 때, 각 주파수 대역(Ku, Ka, W)에서의 안테나 이득은 14 dBi, 21 dBi, 31 dBi가 된다.

3.2 사용 주파수에 따른 탐지거리 특성 변화

위에서 구한 안테나 이득과 Table 2에서 Ku, Ka, 그리고 W밴드의 GaN 전력 증폭기^[10,12,14](출력전력 : 100 W, 20 W, 5 W) 및 펄스를 이용한 레이다를 설계했을 경우의 레이다 방정식(식 (2)), 그리고 Table 3에서 제시하는 입력 파라미터를 이용하여 레이다 성능을 나타내는 기본 지표인 신호 대 잡음 비(SNR : Signal to Noise Ratio)를 거리에 대하여 나타낼 수 있다.

$$SNR = 10\log\left\{\frac{P_t d_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B_d d_r R^4}\right\} + G_t + G_r - L_s - F - L_a R/1000 \quad (2)$$

Table 3. Input radar parameters

입력 파라미터	Ku	Ka	W
송신 침투 전력 P_t (W)	100	20	5
안테나 이득 G_{tr} (dBi)	14	21	31
잡음지수 $F^{[16]}$ (dB)	3.5	5	6
시스템 손실 L_s (dB)	2	2	2
대기감쇠 $L_a^{[17]}$ (dB/km) (2 way, sea-level)	0.14	0.26	1.1
대기감쇠 $L_a^{[18]}$ (dB/km) (2 way, sea-level, 2.5 mm/hr)	0.4	1.4	4.8
대기감쇠 $L_a^{[18]}$ (dB/km) (2 way, sea-level, 12.5 mm/hr)	1.6	6	15
볼츠만 상수 (J/K)	1.38×10^{-23}		
절대온도 T_0 (K)	300		
도플러 대역폭 B_d (Hz)	1000		
수신 duty비 d_r (%)	80		
송신 duty비 d_t (%)	10		
NCI(Non-Coherent Integration)	20		
레이다 단면적 RCS σ (m ²)	10		

Table 4. Rainfall intensity accumulated for 1 min. in Korea^[19]

연 시간율	강우강도 (mm/hr)		
	0.10 %	0.50 %	1.00 %
서울	33.6	10.8	6.37
대전	28.7	13.4	6.25
부산	29.9	10.7	6.46

이 경우, 목표물은 구형(sphere), 출력전력은 펄스 침투전력 기준으로 가정하였으며, 주파수 대역 별 잡음지수는 시판되는 부품 중 위스트 케이스 기준으로 임의로 설정하였다^[16]. 또한, 시스템 손실은 각각의 주파

수 대역에서 2 dB로 동일하다고 가정하였다. 비오는 경우의 대기감쇠에 관해서는, Table 4에서의 국내 주요 도시의 연 시간율에 따른 강우강도를 바탕으로 1년 중 하루 이상의 강우 확률을 보이는 연 시간율 0.50 %, 1.00 %의 경우를 고려하여 2.5 mm/hr(light rain) 및 12.5 mm/hr(medium rain)의 강우강도일 경우의 감쇠지수에 관하여 계산하였다^[18,19].

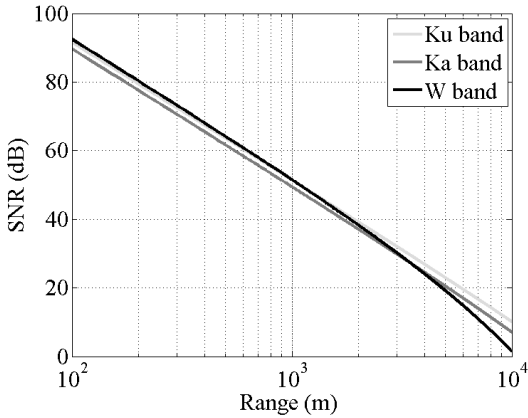


Fig. 5. Signal to noise ratio versus range(sunny day)

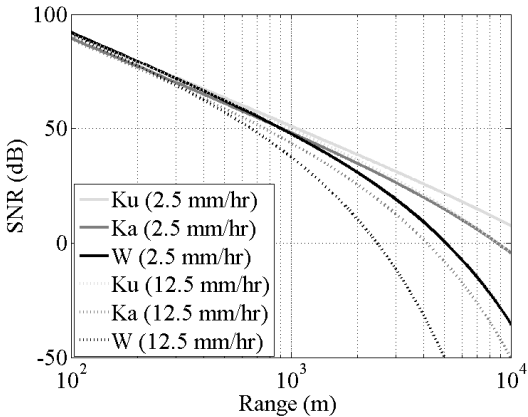


Fig. 6. Signal to noise ratio versus range(rainy day)

Fig. 5는 맑은 날 기준으로 대기감쇠를 고려할 경우의 SNR을 거리에 대해서 나타낸 그래프다. 이때, 대기감쇠지수는 성능이 가장 저하되는 경우인 해수면을 기준으로 계산했다. Ku밴드에서 가장 좋은 SNR 특성을 보이며, 거리가 멀어질수록 W밴드의 경우 SNR의 열화가 커지는 것을 알 수 있다. SNR = 10 dB(오경보 확률 : 10⁻⁹, 탐지확률 : 90 %, Swerling III^[20])를 기준으로 최

대탐지거리를 정한다고 가정하면 최대탐지거리는 각각의 주파수 대역(Ku, Ka, W)에서 10 km, 8.6 km, 7.3 km가 된다.

Fig. 6은 비오는 날(2.5 mm/hr, 12.5 mm/hr) 기준으로 대기감쇠를 고려할 경우의 SNR을 거리에 대해서 나타낸 그래프다. 마찬가지로 Ku밴드에서 가장 좋은 SNR 특성을 보이며, 거리가 멀어질수록 W밴드의 경우 SNR의 열화가 더욱더 커지는 것을 알 수 있다. 최대탐지거리는 강우강도 2.5 mm/hr일 경우, 각각의 주파수 대역(Ku, Ka, W)에서 8.9 km, 6.0 km, 3.9 km, 강우강도 12.5 mm/hr일 경우 6.2 km, 3.2 km, 2.0 km가 된다.

Table 5에서는 주파수 대역 및 날씨에 따른 최대탐지거리를 W밴드(맑은 날)의 최대탐지거리를 기준으로 규격화(normalized) 하였다. 주파수가 낮을수록 최대탐지거리가 날씨에 덜 의존하는 것을 알 수 있으며, W밴드의 경우 12.5 mm/hr의 강우강도일 때, 맑은 날 대비 27 %로 탐지거리가 줄어들음을 알 수 있다.

Table 5. Performance summary and comparison

레이다 성능(주파수 대역별)	Ku	Ka	W
최대탐지거리(맑음)	1.4	1.2	1
최대탐지거리(비, 2.5 mm/hr)	1.2	0.82	0.53
최대탐지거리(비, 12.5 mm/hr)	0.85	0.44	0.27

한편, 출력전력이 식 (3)처럼 과장의 제공에 비례한다고 했을 때^[15](a : 비례상수),

$$P_t = a\lambda^2 \tag{3}$$

SNR을 식 (4)와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$SNR = A - L_s - F - L_a R / 1000 \tag{4}$$

$$A = 10\log\left\{\frac{\pi d_t^2 \sigma_l^2 e_a^2}{4kT_0 B_d d_r R^4}\right\} + 10\log(a) \tag{5}$$

여기에서 A는 주파수에는 관계없이, 다른 입력 파라미터에 의해서 결정되는 거리(R)의 함수가 되기 때문에, SNR은 잡음지수 및 시스템 손실, 그리고 대기감쇠지수에 의해서 결정되는 것을 알 수 있다. 단, 목표물이 구형일 경우 레이더 단면적 σ는 주파수에 상관없이

일정하지만, 실린더(cylinder) 형태의 경우에는 파장에 반비례하게 되고, 평면(flat plate)일 경우, 파장의 제곱에 반비례하게 된다^[20]. 단, 실제 목표물은 복잡한 형태를 가지고 각도에 따라 그 형태 등이 다르기 때문에 RCS 계산이 어려우나, 주파수에 의존하여 주파수에 따라 커지는 경향이 있다^[21]. 다시 말해서, A는 주파수가 높아질수록 동등, 혹은 향상되는 거리(R)의 함수가 됨을 알 수 있다.

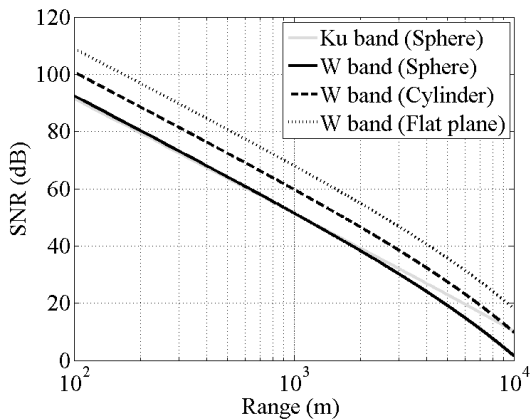


Fig. 7. Signal to noise ratio versus range(sunny day)

Table 3에서의 레이더 단면적 σ 를 Ku밴드 기준이라고 하고 각각 목표가 구, 실린더, 평면일 경우, W밴드를 사용할 때의 최대탐지거리를 계산하면 Fig 7과 같다. 구일 경우의 각각 주파수 밴드(Ku, W)에서의 최대 탐지거리 10 km, 7.3 km에 대하여, 레이더 단면적이 파장에 따라 변하는 실린더형, 평면형에서는 최대탐지거리가 W밴드를 사용하여도 10 km, 13 km로 Ku밴드를 사용할 때보다도 동등, 혹은 향상된 결과를 얻을 수 있다.

3.3 열 방출량 및 기타 성능

앞서 서술한대로 레이더의 소형화에 따라, 정해진 사이즈(체적, 무게)에서의 열 방열을 고려해야한다. 일반적으로 전자부품들은 산업용(industry)이 최대 85 °C, 군사용(military)이 최대 125 °C를 견딜 수 있으나, 방열이 제대로 이루어지지 않는 환경에서는 그 이상의 온도로 상승하여 레이더가 동작하지 않을 수도 있다.

레이더 자체가 움직이지 않고 고정이라고 가정하면, 레이더의 온도 상승 요인은 자체적으로 발생하는 열이 될 것이며 그 열 방출량(H_d)은 다음 식 (6)로 정의할

수 있다. 이때, $P_{cons,tx}$, $P_{cons,rx}$, $P_{cons,pow}$ 는 각각 송신기, 수신기(신호처리 포함), 전력 모듈의 소모 전력을 나타낸다. 앞에서처럼 송신기 소모 전력이 나머지 파트의 소모 전력을 무시할 수 있다고 크다고 가정하면 식 (7)처럼 열 방출량을 송신전력(P_t)와 출력전력 효율(e_t)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$H_d = P_{cons,tx} - P_t + P_{cons,rx} + P_{cons,pow} \tag{6}$$

$$H_d \approx P_{cons,tx} - P_t = \frac{P_t(1 - e_t)}{e_t} \tag{7}$$

각각의 주파수 밴드(Ku, Ka, W)의 레이더에 관하여 효율을 30 %, 16 %, 10 %로 가정하면 열 방출량은 Table 3의 첨두전력 및 송신 duty비를 기준으로 각각 23 W, 11 W, 4.5 W가 되며, 이것을 W밴드의 열 방출량을 기준으로 규격화하면 Table 6과 같이 나타낼 수 있다.

뿐만 아니라, Table 6에 레이더 거리 해상도를 결정하는 주파수 대역폭, 각도 해상도를 나타내는 안테나 빔폭(식 (8))을 W밴드 기준으로 규격화하였다. 이때, 레이더 시스템의 주파수 대역폭을 결정하는 수동 소자인 여파기(filter)의 Q인자(Quality factor, 식 (9))가 재료에 따라 주파수에 관계없이 어느 정도 일정한 범위 안에 있음을 고려하여, 대역폭은 사용 주파수에 비례하여 확보 가능하다고 가정하였다. 안테나 빔폭은 좁을수록 각도 해상도가 향상되며, 주파수 대역폭은 넓을수록 거리 해상도를 향상시킬 수 있으므로, 주파수 대역을 높일수록 성능이 좋아진다고 할 수 있다.

Table 6. Performance summary and comparison

레이더 성능 (주파수 대역별)	Ku	Ka	W
열 방출량(효율, 가정)	5.2(30 %)	2.3(16 %)	1(10 %)
안테나 빔폭	6.7	3.1	1
주파수 대역폭	0.15	0.32	1

$$\theta_{beam} = \frac{4\lambda}{\pi l} \tag{8}$$

$$Q = \frac{Center\ freq.}{3_{dB}\ bandwidth} \tag{9}$$

4. GaN 전력 증폭기 적용 초소형 레이다 전망

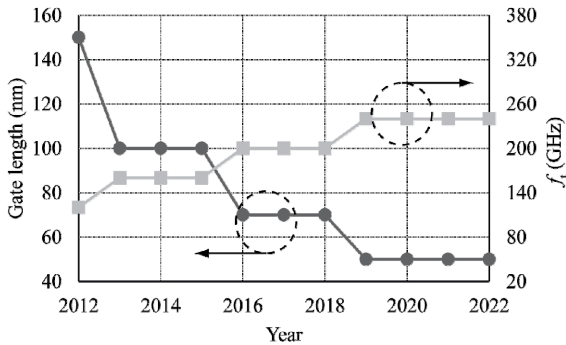


Fig. 8. ITRS targets (gate length and transit frequency) for low-noise GaN HEMT^[6]

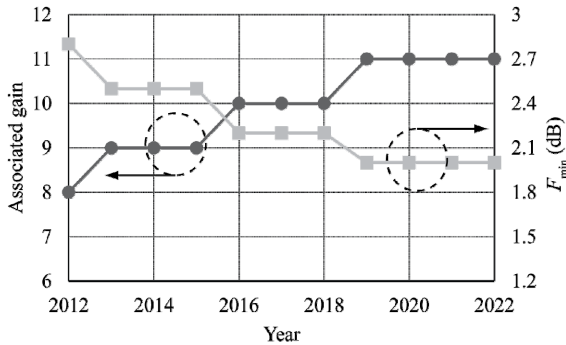


Fig. 9. ITRS targets (associated gain and F_{min}) for low-noise GaN HEMT^[6]

식 (4)의 레이다 방정식에서 잡음지수는 소자의 스케일링에 의해서 개선되게 된다^[6]. Fig. 8에서는 GaN 소자의 스케일링에 따른 게이트 길이의 축소에 의해서 최대 동작 주파수인 f_t 가 증가함을 나타내고 있다. 그에 따라 Fig. 9에서는 f_t 이하의 주파수에서 전류 이득이 증가하는 점에서 전체적인 이득이 증가함을 나타내고 있으며, 잡음지수(F_{min}) 역시 감소하는 경향을 알 수 있다. 뿐만 아니라 수신기의 LNA(Low Noise Amplifier) 단에 주로 사용되는 GaAs, InP 등의 반도체 공정에서도 스케일링에 따라서 잡음지수가 개선되어 감을 고려하게 된다면, 식 (4)에서 SNR은 높은 주파수 대역에서도 개선되어 갈 것이다.

한편, Fig. 2에서처럼 칩(chip) 레벨에서 단위 게이트 폭 당 출력전력은 프로세스 스케일링에 따라 증가해 가는 것을 고려할 때, 게이트 폭을 유지하면서 게이트

길이를 스케일링해 나간다면, 단위 면적당 출력전력은 높아질 수 있다. 그리고 f_{max} 의 증가는, f_{max} 보다 낮은 특정 주파수 대역에서의 전력 이득의 증가를 의미한다고 할 때, 필요 전력을 얻기 위한 증폭기 단 수를 줄일 수 있으리라 예상할 수 있다. 또 높은 주파수에서는 파장이 감소하게 되고, 그것이 소자 사이의 전송선로 등의 사이즈를 결정하는 점을 고려할 때, 결국 사용 주파수가 높아질수록 동일 사이즈에서 전력결합 기술을 활용한 집적도는 높아지게 되고, 식 (5)에서의 A는 주파수에 따라서 증가해 가리라 예측할 수 있다.

그러한 경우 W밴드의 레이다 성능을 예측해 본 것이 Table 7이다(Table 5, 6의 W밴드 성능 기준 규격화). 스케일링에 의해서 잡음지수가 6 dB에서 현재의 Ku, Ka밴드용 증폭기와 비슷한 4 dB로 줄어들고, 출력 역시 Fig. 2에서 제시된 것처럼 스케일링에 의해 향상될 것으로 가정하였다. 효율 35%, 첨두전력 7.5 W인 경우, 최대탐지거리는 각각 8.4 km로 Table 5에서의 성능 대비 약 15% 증가하게 됨을 알 수 있다. 비오는 날에도 약간 증가된 최대탐지거리를 보이며, 무엇보다 효율의 35%로 증가하게 되면 열 방출량이 Table 6에서의 성능 대비 31%로 줄어서 방열설계가 간편해지리라 예측할 수 있다.

Table 7. Performance summary and comparison at the frequency band of W

레이다 성능 (출력, 잡음지수 별)	$P_t = 5 \text{ W}$ $F = 6 \text{ dB}$	$P_t = 7.5 \text{ W}$ $F = 4 \text{ dB}$
최대탐지거리(맑음)	1	1.2
최대탐지거리 (비, 2.5 mm/hr)	0.53	0.59
최대탐지거리 (비, 12.5 mm/hr)	0.27	0.30
열 방출량 (효율, 가정)	1 (10%)	0.31 (35%)

5. 결론

GaN 소자의 스케일링에 따라 GaN 기반 전력 증폭기 모듈 사이즈 축소, G밴드에 이르는 고주파화, 그리고 고출력, 고효율화가 진행되고 있다. 현재까지 발표

된 GaN 전력 증폭기를 사용하였을 경우, Ku, Ka, 그리고 W밴드에 관하여 초소형 레이다의 성능을 분석하였으며, 주파수 대역이 높아질수록 각도 및 거리 해상도가 좋아지고 방열 설계도 용이해지나, 탐지거리가 짧고 날씨의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 한편, 레이다 단면적의 주파수 의존성 및 GaN 전력 증폭기의 성능개선을 고려하면 W밴드 주파수에서도 특정 환경 하에서는 Ku밴드와 동등 혹은 그 이상의 탐지거리 성능을 기대할 수 있을 것이다. 또한, 특정 사이즈 범위 내에서 이중 주파수 대역을 활용하여, 원거리에서는 낮은 주파수, 근거리에서는 높은 주파수 대역을 사용하여 레이다의 탐지 및 추적 성능을 높이는 연구도 가능하리라 예상된다.

References

- [1] E. Higham, "Future RF Market Opportunities", IEEE International Microwave Symposium Panel Session, 2012.
- [2] K. Shinohara et. al., "Device Scaling Technologies for Ultra-high-speed GaN-HEMTs," Device Research Conference, pp. 275-278, 2011.
- [3] M. J. W. Rodwell, "Sub-mm-wave Technologies: Systems, ICs, THz Transistors," IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 509-511, 2013.
- [4] A. Brown et. al., "High Power, High Efficiency E-band GaN Amplifier MMICs," IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, pp. 1-4, 2012.
- [5] A. Margomenos et. al., "GaN Technology for E, W and G-band Applications," IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp. 1-4, 2014.
- [6] ITRS 2012 Update, "International Technology Roadmap for Semiconductors 2012 Update," in <http://www.itrs.net>, 2012.
- [7] H. Shigematsu et. al., "C-band 340-W and X-band 100-W GaN Power Amplifiers with over 50-% PAE," IEEE International Microwave Symposium, pp. 1265-1268, 2009.
- [8] K. Kanto et. al., "An X-band 250 W Solid-State Power Amplifier using GaN Power HEMTs," IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 77-80, 2008.
- [9] K. Kikuchi et. al., "A 65 V Operation High Power X-band GaN HEMT Amplifier," IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 585-587, 2014.
- [10] Mitsubishi Electric, "Mitsubishi Electric Develops 14 GHz Power Amplifier with World's Highest Output Power for Satellite Communications," in <http://www.MitsubishiElectric.com/news/>, 2012.
- [11] C. Y. Ng et. al., "Ku-band, 120-W Power Amplifier using Gallium Nitride FETs," IEEE International Microwave Symposium, pp. 404-407, 2014.
- [12] H. Sumi et. al., "A 20-watt Ka-band GaN High Power Amplifier MMIC," IEEE European Microwave Conference, pp. 1389-1392, 2009.
- [13] P. G. Courtney et. al., "120 W Ka Band Power Amplifier Utilizing GaN MMICs and Coaxial Waveguide Spatial Power Combining," IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp. 1-4, 2015.
- [14] M. Koker et. al., "High Power Solid-State Power Amplifiers for Airborne and Space Applications in Remote Sensing and Communications," IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 579-581, 2014.
- [15] J. M. Schellenberg, "A 2-W W-band GaN Traveling-Wave Amplifier with 25-GHz Bandwidth," IEEE Transactions on Microwave and Techniques, Vol. 63, No. 9, pp. 2833-2840, 2015.
- [16] Millitech, "Series LNA," in www.millitech.com.
- [17] ITU-R P.676-10, "Attenuation by Atmospheric Gases," in <http://www.itu.int>, 2013.
- [18] ITU-R P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for use in Prediction Methods," in <http://www.itu.int>, 2005.
- [19] J. Lee, "Rain Attenuation Analysis for Designing UAV Data Link on Ku-band," The Journal of Korean Institute of Communication and Information Sciences, Vol. 40, No. 07, pp. 1248-1256, 2015.
- [20] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design using MATLAB," CRC Press, pp. 480-481, 494-512, 2012.
- [21] Y. S. Chesnokov et. al., "Bistatic RCS of Aircrafts at the Forward Scattering," CIE International Conference of Radar, pp. 156-159, 1996.