

배열 전력 증폭기 그룹별 바이어싱 제어를 이용한 빔포밍 송신기 효율 향상 기법

Efficiency Improvement of Beamforming Transmitter Using Group-Based Biasing Control for Array Power Amplifiers

김 현 우 · 구 현 철*

Hyeon Woo Kim · Hyunchul Ku*

요 약

본 논문은 그룹별 바이어싱 제어 기법을 이용하여 실내에서 운용하는 RF 빔포밍 시스템 송신기의 전력 효율과 복잡성을 개선하고자 하였다. 그룹별 바이어싱 기법은 동적 바이어싱 기법과 그룹 바이어싱 기법을 동시에 적용한 기법을 의미하며, 동적 바이어싱 기법을 이용하여 각 채널별 RF 전력 증폭기의 출력에 적합한 바이어스를 인가하여 저전력 구간의 전력 증폭기 전력 효율을 개선하였고, 그룹 바이어싱 기법을 이용하여 동적 바이어싱 기법 적용 시 발생하는 시스템 복잡도를 개선하였다. 제안한 기법은 단일 전력 증폭기의 출력 특성을 이용한 수식적 모델링을 통해 이론적 검증을 진행하였고, 실측 검증을 위해 4×4 안테나 구조의 디지털 빔포밍 시스템을 구축하여 그룹별 바이어싱 제어 기법을 적용하여 측정을 진행하였다. 측정 조건은 각 그룹 출력 전력의 편차치에 따라 3가지로 나누어 진행하였고, 측정 결과 14.0 %p, 14.1 %p, 10.5 %p의 총 전력 효율 개선을 보여 해당 기법의 유효성을 입증하였다.

Abstract

This study aimed to improve the power efficiency and complexity of an RF beamforming system transmitter operating indoors using a biasing control technique for each group. The group-by-group biasing technique applies both dynamic and group biasing techniques simultaneously. Using the dynamic biasing technique, an appropriate bias was applied to the output of the RF power amplifier for each channel to power the power amplifier in the low-power section. The efficiency was improved, and the system complexity that occurred when applying the dynamic biasing technique was reduced using the group biasing technique. The proposed technique was theoretically verified through mathematical modeling using the output characteristics of a single power amplifier. In addition, for actual measurement, a digital beamforming system with a 4×4 antenna structure was built, and a biasing control technique for each group was applied to the measurement. The measurement conditions were divided into three types according to the deviation of the output power of the group, and the measurement results showed total power efficiency improvements of 14.0 %p, 14.1 %p, and 10.5 %p, proving the validity of the technique.

Key words: Beamforming System, Power Amplifier, Group Biasing, Dynamic Biasing, Drain Efficiency Improvement

□

「이 연구는 한국연구재단(NRF-2017R1A5A1015596, NRF-2020R1F1A1061826), 한국원자력안전재단의 원자력안전연구사업(No.2203026)의 지원을 받아 수행된 연구임.」

건국대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronics, Information & Communication Engineering, Graduate School of Konkuk University)

· Manuscript received July 7, 2023 ; Revised July 26, 2023 ; Accepted August 8, 2023. (ID No. 20230707-002S)

· Corresponding Author: Hyunchul Ku (e-mail: hcku@konkuk.ac.kr)

I. 서론

최근 무선전력전송 기술 중 RF 빔포밍 시스템에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 충분한 수신전력을 얻기 위함과 원하는 방향으로의 빔 조정을 위해 어레이 안테나를 활용한다^[1]. RF 빔포밍 중 디지털 빔포밍 기법의 경우에는 각 채널별로 대체로 RF 전력 증폭기를 사용하고 있다. RF 전력 증폭기는 고정된 바이어스값에 대하여 출력 전력의 Back-off가 커지게 되면 전력 효율이 크게 감소한다는 문제점이 있다^{[2],[3]}. 이를 해결하고자 각 채널의 RF 전력 증폭기 출력 전력에 적합한 바이어스값을 인가함으로써 전력 효율을 최대화할 수 있으나, 수십~수천 개의 배열로 이루어진 송신기 모듈의 경우 시스템 구성이 매우 복잡하게 될 수 있다. 이러한 문제는 비슷한 특성을 보여주는 어레이 안테나의 채널들을 그룹화하고, 그룹화한 채널의 RF 전력 증폭기들에 일괄적으로 바이어싱 제어를 해줌으로써 빔포밍 송신기의 전력 효율을 개선함^[4]과 동시에 시스템의 복잡성을 완화할 수 있을 것이다. 이에 본 논문에서는 이러한 그룹별 바이어싱 제어를 이용한 빔포밍 송신기 효율 향상 기법을 제안하고, 이론적인 전계와 실측을 통해 그 유효성을 검증하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I 장 서론 이후 II 장에서는 빔포밍 기술과 실제 사용하는 빔포밍 시스템을 소개한다. III 장에서는 동적 바이어싱 기법^[5]과 그룹 바이어싱 기법을 소개하고, 기법을 적용하는 방법과 적용 시 효율 개선과 전원부의 복잡성 완화에 대한 유효성을 확인

할 것이다. IV 장에서는 동적 바이어싱 기법을 수식적으로 모델링하여 도출한 최적의 드레인 전압값을 적용하여 측정을 진행하고 실제 개선된 전력 효율 정도를 확인할 것이다. 마지막으로 V 장에서는 소개한 실측 결과 비교를 통해 기법의 유효성을 증명하여 논문을 마친다.

II. 빔포밍 시스템

RF 전송 방식은 무선 전력 전송 방식 중 하나이며, 이는 대체로 빔포밍 방식으로 구현된다. 빔포밍 방식은 전송하고자 하는 신호를 전자기파로 변환하여 송신하며, 송신 신호의 세기와 방사 방향의 조절을 위해 다수의 안테나로 이루어진 배열 안테나를 주로 사용한다^[6]. 이러한 안테나 배열은 신호의 대기 감소로 인한 신호 세기 감소를 보완하고, 수신 단의 위치 변화에 따른 전송 효율 저하 문제를 해결하기 위해 각 안테나 신호의 위상을 조정하여 신호의 방향을 수신 단에 향하도록 조정한다. 배열 안테나의 구성이 여러 개의 단일 안테나로 이루어져 있으므로 각 안테나에서 송신하는 신호의 왜곡을 피하기 위해 위상의 조정은 정밀해야 한다. 또한, 각 안테나에서 송신된 신호들이 수신 단에서 상쇄 간섭을 일으키는 경우 단일 안테나를 사용하는 경우보다 신호의 세기가 약해질 수 있으므로, 배열 안테나에 구성된 단일 안테나의 개수가 늘어날수록 유의해야 한다.

그림 1은 4×4 배열 안테나와 빔포밍 시스템의 블록 다이어그램이다. 송신 단은 디지털 신호 생성기와 배열 전

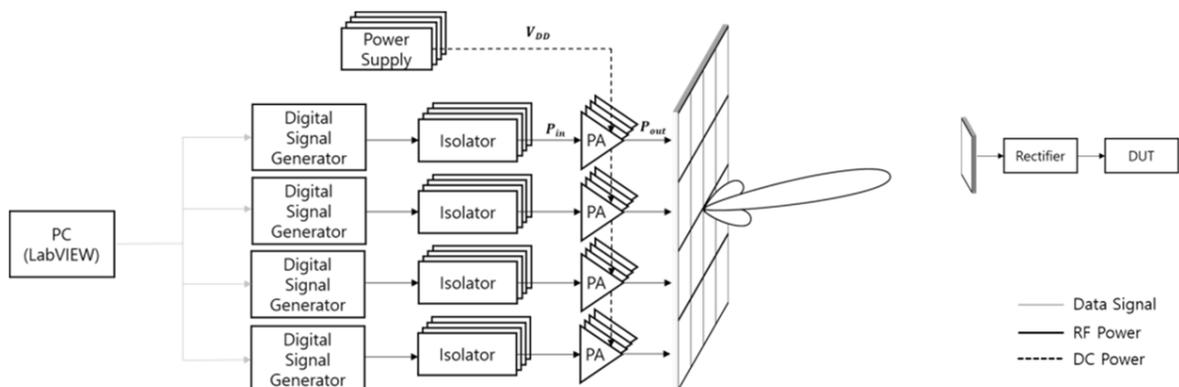


그림 1. 4×4 배열 안테나와 빔포밍 시스템 블록도
Fig. 1. 4×4 array antenna and beamforming system block diagram.

력 증폭기, 그리고 배열 안테나로 이루어져 있다. PC에서 송신하고자 하는 신호의 정보를 디지털 신호 생성기에 전달하게 되면, 이 정보를 토대로 디지털 신호 생성기에서 신호를 생성하여 전력 증폭기로 전달한다. 수신 단에 충분한 크기의 신호를 송신할 수 있게끔 배열 전력 증폭기 단에서 해당 신호를 증폭하여 송신 안테나로 전송한 후, 배열 안테나에서 수신 단을 향해 신호를 방사한다. 수신 단에서는 수신한 신호를 정류기를 통해 RF 신호에서 DC 신호로 변환하고, 해당 DC 전력을 사용할 DUT에 전달하게 된다.

본 논문에서 개선하고자 하는 부분은 4x4로 배열된 전력 증폭기 단이다. 그림 1에 표시된 V_{DD} 는 power supply로부터 전력 증폭기에 인가되는 드레인 전압이며, P_{in} 은 전력 증폭기의 입력 RF 전력, P_{out} 은 출력 RF 전력이다. 같은 RF 전력을 출력할 경우, 배열 전력 증폭기에 연결된 power supply의 드레인 전압값(V_{DD})을 변경함으로써 배열 증폭기에서 사용되는 DC 전력량을 줄여 전력 효율을 개선하고자 하였다. 기법의 자세한 내용은 III장에서 다루고자 한다.

III. 동적 바이어싱 및 그룹 바이어싱 기법

전력 증폭기에서 소모하는 DC 전력을 조정하여 동일한 출력 전력에서 전력 효율을 높이는 방법을 동적 바이어싱 기법이라고 한다. 식 (1)은 단일 전력 증폭기의 전력 효율 공식이며, 출력 전력이 동일할 경우 DC 소모 전력의 감소가 전력 효율을 향상시킴을 보여준다.

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} = \frac{P_{out} - P_{in}}{V_{DD} \times I_D} \quad (1)$$

그림 2는 드레인 전압값을 기준보다 낮추어 측정하였을 경우 전력 효율이 증가함을 확인할 수 있는 그래프이다. 그림 2의 검은색 그래프는 드레인 전압을 25 V로, 회색 그래프는 15 V로 하향 조정하여 측정한 결과이다. 드레인 전압을 하향 조정하여 측정한 경우 27 dBm 출력 기준으로 약 15.1 %의 전력 효율 향상을 보임으로써 동적 바이어싱 기법이 back-off 전력 기준으로 단일 전력 증폭기에서의 전력 효율 개선에 유효하다는 점을 확인하였다. 그림 3은 원하는 출력 전력에서의 최적의 드레인 전압값

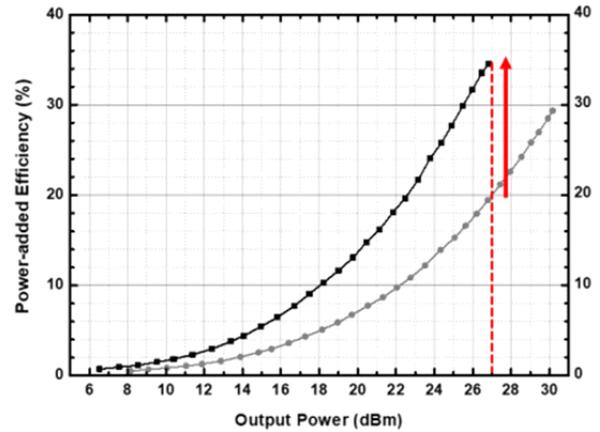


그림 2. 드레인 전압 변화 시 전력 효율 변화
Fig. 2. Change in power efficiency as drain voltage changes.

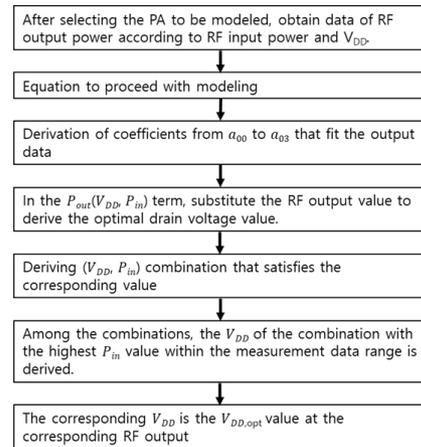


그림 3. 동적 바이어싱 기법 적용 방법 순서도
Fig. 3. Method of applying the dynamic biasing technique.

을 구하는 방법에 대한 순서도이고, 식 (2)는 순서도에서 설명하는 다항식 모델링 수식으로 최적의 드레인값 도출에 사용하기 위해 커브 피팅 방식으로 얻어낸 수식이다^[7].

$$P_{out}(V_{DD}, P_{in}) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{ij} V_{DD}^i P_{in}^j \quad (2)$$

그림 4는 그림 3을 통해 얻어낸 모델링 수식을 입체 그래프로 가시화한 것이며, 그림 5는 그림 4에 20.0 dBm의 출력 전력을 나타내는 빨간 계곡 기준, 드레인 전압에 변화에 따른 전력 효율을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 5를 통해 동일한 전력을 출력하는 경우, 드레인 전압이 낮

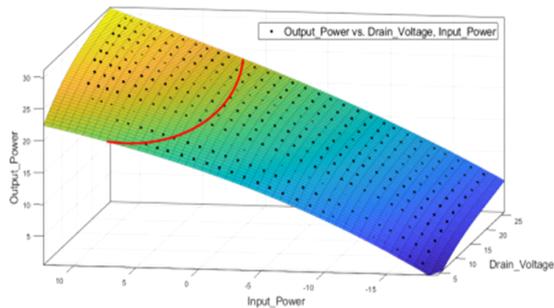


그림 4. 모델링 수식을 도식화한 입체 그래프
Fig. 4. A 3-D graph that schematizes formulas.

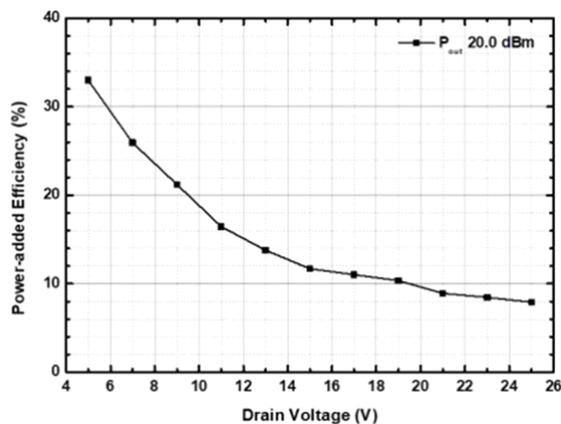


그림 5. 동일 전력에서의 드레인 전압에 따른 효율 변화 그래프
Fig. 5. Efficiency change graph according to drain voltage at the same power.

을수록 전력 효율이 높아짐을 추가로 확인할 수 있다.

동적 바이어싱 기법은 출력 전력이 변화하거나 다수의 전력 증폭기에서 상이한 전력을 출력할 때 높은 효율을 보이기에, 사이드로브 억제 기법이 적용된 빔포밍 시스템이 동적 바이어싱 기법 적용에 유효할 것을 확인하였다. 다음 표 1은 25 V로 고정된 바이어스 환경에서 사이드로브 억제 기법을 사용할 때 각 안테나에서 출력되는 전력과 전력 효율을 나타낸다. 사이드로브 억제 기법을 적용하지 않은 Case 1부터 가장 강하게 적용한 Case 3까지 3가지 조건으로 나누어 연구를 진행하였다. 표 1은 각 m 행, n열에 분포된 안테나의 전력과 효율을 Case 1, 2, 3 조건에 따라 실험하여 / 표기를 이용하여 분류한 표이다.

고정된 드레인 전압을 인가할 경우 1개의 전원부로도 16개의 전력 증폭기에 일괄적으로 전압을 인가할 수 있던 경우에 비해, 동적 바이어싱 기법을 적용하는 경우 각기 다른 출력 전력으로 인해 16개의 전원부가 필요하게 된다. 전원부의 복잡성과 필요 개수를 줄이기 위한 방법으로 그룹 바이어싱 기법을 사용하였다. 표 1의 Case 2와 3에서 각 4개의 전력 증폭기끼리 동일한 전력을 출력한다는 점을 토대로 동일한 전력을 출력하는 전력 증폭기끼리 묶어 일괄적으로 전압을 인가함으로써 전원부를 16개에서 4개까지 줄일 수 있었다.

그림 6의 왼쪽 그림은 실제 구현된 배열 안테나의 사진이고, 오른쪽 그림은 배열 안테나를 동일한 전력을 출력하는 안테나끼리 G1, G2, G3, G4로 그룹을 나누어놓은 그

표 1. 사이드로브 억제 기법 가중치에 따른 각 안테나의 출력 전력과 효율

Table 1. Output power and efficiency of each antenna according to the weight of the side lobe suppression technique.

Case 1/2/3		n				
		1	2	3	4	
m	1	Power (W)	0.468/0.211/0.126	0.468/0.425/0.363	0.468/0.425/0.363	0.468/0.211/0.126
		Efficiency (%)	19.4/12.2/8.7	19.4/17.9/16.6	19.4/17.9/16.6	19.4/12.2/8.7
	2	Power (W)	0.468/0.412/0.357	0.468/0.827/1.03	0.468/0.827/1.03	0.468/0.412/0.357
		Efficiency (%)	19.4/17.9/16.6	19.4/25.8/29.4	19.4/25.8/29.4	19.4/17.9/16.6
	3	Power (W)	0.468/0.412/0.357	0.468/0.827/1.03	0.468/0.827/1.03	0.468/0.412/0.357
		Efficiency (%)	19.4/17.9/16.6	19.4/25.8/29.4	19.4/25.8/29.4	19.4/17.9/16.6
	4	Power (W)	0.468/0.211/0.126	0.468/0.425/0.363	0.468/0.425/0.363	0.468/0.211/0.126
		Efficiency (%)	19.4/12.2/8.7	19.4/17.9/16.6	19.4/17.9/16.6	19.4/12.2/8.7

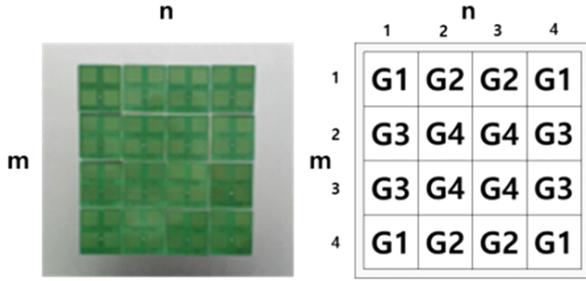


그림 6. 구현된 배열 안테나와 그룹화된 배열 안테나
Fig. 6. Implemented array antennas and grouped array antennas.

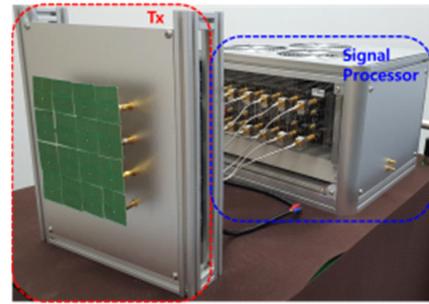
림이다. G1 그룹은 가장 낮은 전력과 전압이, G2와 G3 그룹은 G1보다 높은 전력과 전압을, G4 그룹은 가장 높은 전력과 전압이 필요하다. 해당 그룹 바이어싱 기법을 적용하여 계산한 Case 별 전력 효율은 식 (3)에서 확인할 수 있다.

$$\eta_{group} = \frac{P_{out,group} - P_{in,group}}{P_{DC,group}} = \frac{\sum_{n=1}^4 P_{out,n} - \sum_{n=1}^4 P_{in,n}}{\sum_{n=1}^4 P_{DC,n}} \quad (3)$$

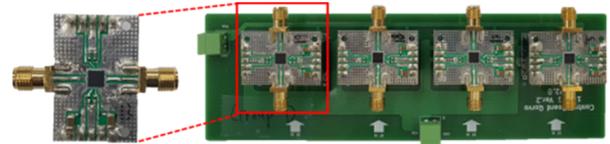
$$\eta_{total} = \frac{\sum P_{out} - \sum P_{in}}{\sum P_{DC}} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{out,G_i} - \sum_{i=1}^4 P_{in,G_i}}{\sum_{i=1}^4 P_{DC,G_i}} \quad (4)$$

IV. 구현 및 실측

그림 7(a)는 그림 1을 실제로 구현한 모습을 보여준다. 송신 안테나와 전력 증폭기가 배치된 송신부는 빨간색 점선으로 표시되어 있으며, 안테나 부는 4x4의 배열 안테나로 이루어져 있다. 각 안테나당 1개의 전력 증폭기와 체결되어 있다. 파란색 점선으로 표시되어 있는 금속 상자는 그림 1의 디지털 신호 생성부로 baseband processor와 clock으로 이루어져 있다. 그림 7(b) 왼쪽 사진인 전력 증폭기는 Qorvo사의 TGA-2599-SM 모델을 사용하였으며, 최대 1 W의 출력을 갖는다. 같은 그룹 내의 전력 증폭기 들은 일괄적인 전압 인가를 위해 그림 7(b) 오른쪽 사진과 같이 동일한 제어 보드위에 위치시켜 작동된다. 그림 8은 그림 7(b)인 전력 증폭기의 실제 측정 특성 결과이다.



(a) 구현된 송신부와 신호 생성부
(a) Implemented transmitter and signal generator



(b) 구현된 전력 증폭기와 제어 보드
(b) Implemented power amplifier and control board

그림 7. 구현된 빔포밍 시스템
Fig. 7. Implemented beamforming system.

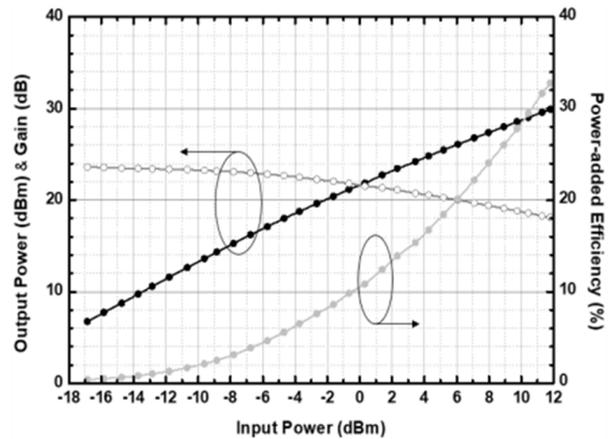


그림 8. 전력 증폭기의 특성
Fig. 8. Power amplifier characteristic.

5.8 GHz 동작 주파수에서 드레인 전압이 25 V 인가된 기준으로 최대 출력이 1 W인 지점에서, 32.8 %의 전력 효율과 18.1 dB의 이득을 갖는다.

구현된 빔포밍 시스템을 이용하여 송신부의 배열 전력 증폭기의 전력 효율도 동적 바이어싱을 적용함으로써 앞서 적용한 단일 전력 증폭기에서와 같은 효율 개선을 이

루고자 하였다. 그림 3의 3번째 과정을 통해 구한 다항식의 계수는 표 2에 정리하였다. 그림 3의 남은 과정을 통해서 각 Case별로 도출된 최적의 드레인 전압값은 표 3에 정리하였다. 표 3의 결과를 전력 증폭기에 대입하여 측정된 데이터를 식 (3)을 이용하여 비교한 결과, 각 그룹별로 표 4와 같이 효율이 개선됨을 확인할 수 있었다. 표 1에서도 확인할 수 있듯이 그룹 G2와 G3은 필요 출력 전력의 차이가 근소하여 동일한 전압을 인가하였다. 복수 바이어싱 기법 전과 후의 총 전력 효율 비교 수치는 식 (4)를 이용하여 표 5에 정리하여 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내에서 사용하는 빔포밍 시스템의 송

표 2. 모델링 수식 각 항의 계수

Table 2. Coefficient of each term in modeling formula.

a_{ij}		j			
		0	1	2	3
i	0	13.1	0.8736	-0.03102	0.0004
	1	0.5758	0.01237	-0.00023	0
	2	-0.01143	0.000249	0	0
	3	0.000108	0	0	0

표 3. 각 Case별 도출된 최적은 드레인 전압

Table 3. Optimal drain voltage derived for each case.

$V_{DD,opt}$		Group		
		G1	G2, G3	G4
Case	1	13.9 V	13.9 V	13.9 V
	2	7.9 V	12.8 V	21.3 V
	3	5.1 V	9.9 V	25.0 V

표 4. 바이어싱 기법 적용 전/후의 각 Case별 그룹 전력 증폭기 효율 변경 수치

Table 4. Group power amplifier efficiency change value for each case before and after applying the biasing technique.

Case 1/2/3	G1	G2, G3	G4
Before (%)	19.4/12.2/8.7	19.4/17.9/16.6	19.4/25.8/29.4
After (%)	34.5/31.3/31.9	34.5/35.1/34.3	34.5/32.6/31.3
Improvement (%p)	15.1/19.1/23.2	15.1/17.2/17.7	15.1/6.8/1.9

표 5. 각 Case별 총 전력 효율 변경 수치

Table 5. Total power efficiency change value for each case.

Total power efficiency			
Case	1	2	3
Before (%)	19.4	19.5	19.5
After (%)	33.4	33.6	31.1
Improvement (%p)	14.0	14.1	10.5

신 단 전력 효율을 동적 바이어싱 및 그룹 바이어싱 기법을 적용하여 개선하고자 하였다. 각 안테나의 전력 효율을 개선하기 위해 모델링 수식을 통해 해당 안테나의 출력 전력에서 최대의 효율을 얻는 드레인 전압값을 도출하였다. 해당 바이어싱 기법의 유효성을 검증하고자 각 안테나의 출력 전력이 상이한 사이드로브 억제 기법에 적용하였고, 사이드로브 억제 기법이 적용된 정도에 따라 나뉘어진 Case 1, 2, 3에서 제안한 기법 적용 전보다 총 전력 효율이 14.0 %p, 14.1 %p, 10.5 %p 향상됨을 확인하였다.

References

- [1] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin, and N. F. Abdulah, "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: Overview, classification, and trends for future research," *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 18, pp. 753-772, Jun. 2017.
- [2] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, London, Artech House, 2002.
- [3] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Norwood, MA, Artech House, 2006.
- [4] N. Wang, V. Yousefzadeh, D. Maksimovic, S. Pajic, and Z. B. Popovic, "60% efficient 10-GHz power amplifier with dynamic drain bias control," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 1077-1081, Mar. 2004.
- [5] N. Deltimple, L. Leyssenne, E. Kerhervé, Y. Deval, and D. Belot, "Dynamic biasing techniques for RF power amplifier linearity and efficiency improvement," in *2010 IEEE International Conference on Integrated Circuit*

Design and Technology, Grenoble, Jun. 2010, pp. 232-235.

- [6] P. S. Yedavalli, T. Riihonen, X. Wang, and J. M. Rabaey, "Far-field RF wireless power transfer with blind adaptive beamforming for Internet of things devices," *IEEE*

Access, vol. 5, pp. 1743-1752, Feb. 2017.

- [7] H. Akima, "A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures," *Journal of the ACM*, vol. 17, no. 4, pp. 589-602, Oct. 1970.

김 현 우 [건국대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-8757-8870>



2020년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)

2021년 3월~현재: 건국대학교 전자정보통신공학과 석사과정

[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, WPT 등

구 현 철 [건국대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1961-5166>



1995년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1997년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

2003년 12월: 미국 Georgia Institute of Technology University 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

2005년 3월~현재: 건국대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] RF Power Amplifier, Digital RF, RF Front-End Design, Wireless Power Transfer System 등