THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2018 Aug.; 29(8), 576～582.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.8.576
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

고정형 위상 천이기를 이용한 동일 위상 마이크로파 전력 분배기

Equi-Phase Microwave Power Divider Using Fixed Phase Shifters

김정욱 · 김한솔 · 안보람 · 김수정 · 김찬호 · 윤원상* · 한상민

Jung Ouk Kim · Hansol Kim · Boram An · Sujeong Kim · Chan-Ho Kim · Won-Sang Yoon* · Sang-Min Han

요 약

본 논문에서는 고정형 위상천이기를 이용한 동위상 급전 평면형 전력분배기 회로를 제안하였다. 정교한 빔 조향을 위한 위상배열안테나의 집적도가 높아짐에 따라, 소자 안테나에 동일한 위상 신호를 공급하기 위해 급전 선로의 길이를 조정하는 기존의 방법에는 공간적 제약이 존재하게 된다. 따라서 평면형 위상천이 기능을 갖는 결함접지구조를 이용하여 인위적인 급전선 길이 조정 없이 소자 안테나에 동일 위상 신호를 공급하는 전력분배기를 설계하였다. 결함접지구조는 선로의 삽입손실을 최소화하고, 위상 천이를 조절할 수 있도록 설계되었으며, 안테나 포트간 격리도와 평면형 구현이 가능한 분배기를 설계 제작하였다.

Abstract

In this paper, a planar equi-phase power divider is proposed using fixed phase shifters. As the integrability of a phased array antenna increases for accurate beam steering, a conventional method to excite equi-phase signals to all element antennas, extending the feedline, has spatial limitations. Therefore, the planar equi-phase power divider is designed using a defected ground structure with a planar phase shift function without intentional feedline extension. The defected ground structure has been considered for a low insertion loss and a controllable phase shift, whereas the power divider has been designed and implemented with a port-to-port isolation and a planar configuration.

Key words: Phased Array, Phase Shifter, Power Divider, Defected Ground Structure(DGS)

Ⅰ. 서 론

5G 이동통신 서비스의 요구 사항이 발표된 이후 2020년으로 예정된 3GPP LTE Release 16이 5세대 이동통신 규격으로 확정될 예정이다[1]. 그러나 산업계 연구 속도의 가속화와 시장 선점 경쟁으로 인해 한국, 일본, 중국을 위시한 국가들의 주요 통신 사업자들은 2019년에 사전 규격을 이용한 상용 서비스를 시작하겠다고 선언한 상태이다. 5세대 이동통신의 주요 기술 사항인 Massive MIMO와 Beamforming은 수많은 안테나 소자와 복잡한 급전 회로를 요구하게 되었다[2]. 따라서 각 안테나 소자에 동위상의 신호를 공급하기 위해 좁은 공간 내에 선로의 길이를 맞추는 방식으로 복잡한 급전선을 배치하는 문제가 존재하였으며, 이는 거대 배열안테나에서는 회로의 복잡도 증

「본 연구는 순천향대학교와 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1D1A3A01016567)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2018-2015-0-00403).」

순천향대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University)

*호서대학교 전자디스플레이공학부(School of Electronics and Display Engineering, Hoseo University)

· Manuscript received May 2, 2018 ; Revised May 25, 2018 ; Accepted July 5, 2018. (ID No. 20180502-055)

· Corresponding Author: Sang-Min Han (e-mail: smhan@sch.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

가와 성능 저하를 발생시키는 원인이 될 수 있다.

본 논문에서는 기존 급전 선로의 길이 연장에 의한 동위상 전력분배 방식 대신 회로면의 공간을 점유하지 않으면서 위상을 조절할 수 있는 결함접지구조(defected ground structure: DGS)를 이용한 고정 위상천이 방식의 전력분배기를 설계하였다. 결함접지구조는 저역통과여파기 설계를 위한 공진기 타입으로 최초 제안된 이래 다양한 분야에 응용되어 왔다[3],[4]. 기판 접지면에 설계된 슬롯은 느린 접지전류를 생성하고, 이로 인해 마이크로스트립 선로의 유효 파장을 짧게 만들어 회로의 소형화에 기여해 왔으며[5],[6], 이를 이용한 새로운 마이크로파 회로 설계[4],[6], 회로면의 전류 제어[7], 안테나 간 격리도 향상[8], 평면형 공진기 회로[9],[10] 등의 설계에 응용되어왔다. 본 논문에서는 기존 결함접지구조의 공진 특성을 이용한 응용 예에 더하여 고정형 위상 조절 회로로의 응용을 제안하게 된다. 또한 완전한 평면형 구조의 전압분배기가 출력 포트간 격리도를 갖기 위한 Fork-Type 전력분배기를 적용하여 설계되었다[11],[12].

본 논문의 구성은 제1장 서론에 이어 제2장에서 평면형 4분주 Fork-Type 전력분배기를 설계하여, 각 출력 포트간 출력 위상 오차 보상 회로를 제3장에서 설계하였다. 제4장에서는 고정형 위상천이기 회로가 실장된 평면형 전력분배기를 설계 제작하여 측정 결과를 제시하였고, 제5장에서 결론을 맺었다.

Ⅱ. 평면형 4-Way 전력분배기 설계

본 장에서는 평면형 전력분배기를 설계하여 각 출력 포트의 위상차를 비교하였다. 분배기는 공액위상변위(phase conjugation) 방식의 역지향성 배열안테나(retro-directive array)에 공급되는 국부발진기 신호 분배용으로 설계되었다. 따라서 회로는 평면형 구조를 유지하면서 각 포트간의 격리도(isolation)를 갖고, 주파수는 안테나 주파수의 2배인 신호를 분배하게 된다[13]. 출력 포트 간 격리도를 갖는 윌킨슨 전력분배기는 3개 이상의 분배 회로를 위한 아이솔레이션 저항이 3차원적으로 연결되어야 하므로 격리도가 다소 떨어지나, 평면형 구현이 가능한 Fork-Type 전력분배기 구조를 채택하였다. 또한 안테나 주파수를 ISM 대역(2.4～2.485 GHz)으로 가정하여, 설계 대역폭은 4.8～

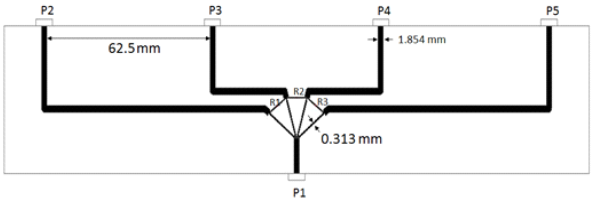


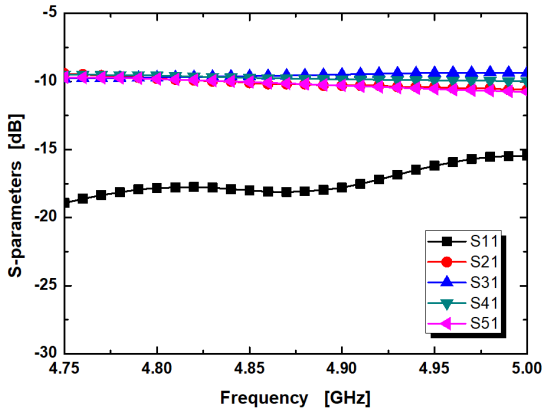
그림 1. 평면형 4분주 전력분배기 구성도
Fig. 1. Configuration of the planar 4-way power divider.

4.97 GHz로 설정하였으며, 4개의 분배 전송선로의 길이는 통일하지 않았다.

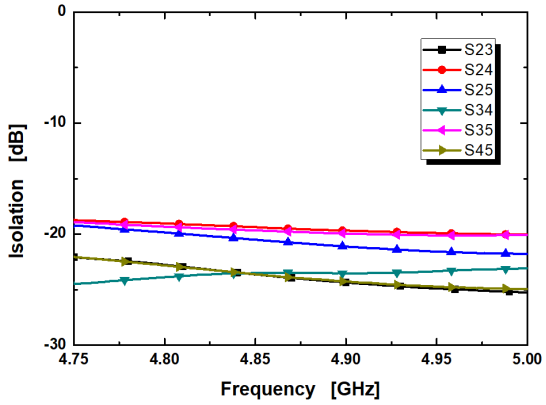
그림 1은 평면형 4분주 전력분배기의 구조를 보이고 있다. 출력 포트 간의 간격은 배열안테나의 안테나 소자 간 간격을 고려하여 2.4 GHz에서 $\lambda_o/2$인 62.5 mm로 설정하였고, 선폭은 급전 선로는 50 Ω인 1.854 mm, 분배기 선로는 $\sqrt{4\times50\times50}=100$ Ω인 0.313 mm로 설계되었다. 문헌상의 이론적 아이솔레이션 저항은 70.7 Ω이나, 각 포트의 균형 유지와 포트별 일정한 아이솔레이션을 가질 수 있는 200 Ω으로 제작되었다. 사용된 기판은 ε_r = 4.3이고, 두께가 1.0 mm인 FR4 기판을 사용하였다. 설계에서 보는 바와 같이 P1으로 부터 P2/P5로의 선로 길이와 P3/P4로의 선로 길이가 상이하기 때문에 이로 인한 위상 지연이 발생하게 된다. P1에서 P2/P5로의 선로 길이는 99.23 mm로 1052°의 전기적 길이를 갖고, P3/P4로의 선로 길이는 39.00 mm로 413°의 전기적 길이를 갖는다. 따라서 P3/P4로의 선로가 P2/P5로의 선로보다 81° 큰 값을 나타낼 것으로 예상된다.

제작된 평면형 분배기의 측정 결과를 그림 2에서 나타내었다. 4개의 출력 포트에서의 일정한 삽입손실을 갖도록 설계되었으며, 측정 결과 약 10 dB의 일정한 삽입손실과 15 dB 이상의 반사손실을 나타내었다. 손실 저항값을 사용하여 삽입손실이 다소 증가한 결과를 나타내었다. 또한 각 출력 포트간의 격리도는 19 dB 이상을 나타내었다.

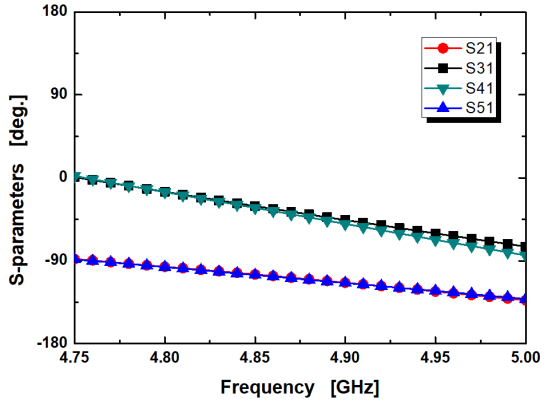
입출력 포트간의 위상차는 4.8 GHz에서 선로 길이의 차이로 인해 4.8 GHz에서 $\angle S_{21}$과 $\angle S_{51}$이 약 −96°로 동일하고, $\angle S_{31}$과 $\angle S_{41}$이 약 −15°로 동일한 특성을 나타내었다. 따라서 두 선로 그룹의 전달 위상은 선로의 길이가 상대적으로 긴 포트 3와 4로의 선로 위상이 포트 2과 5의 위상보다 약 +81° 차이가 남을 알 수 있다. 설계 대역인



(a) 삽입 손실 및 반사손실
(a) Insertion losses and return loss



(b) 격리도
(b) Isolations



(c) 위상
(c) Phases

그림 2. 평면형 4분주 전력분배기의 *S*파라미터 측정값
Fig. 2. Measured *S*-parameters of the planar 4-way power divider.

4.8~4.97 GHz에서의 위상 오차는 최소 52.1°에서 최대 81.7°까지 발생하였으며, 이는 각 선로 전체의 위상속도 차이에 의해 관찰되었다.

Ⅲ. 결함접지구조를 이용한 위상제어 회로 설계

앞장에서 설계한 평면형 4분주 전력분배기는 전송선로의 물리적 길이의 차이로 인해 각 출력 단의 위상차가 발생하였다. 이를 극복하기 위해 결함접지구조 전송선로의 slow-wave 특성의 위상지연 특성을 이용하여 동일 위상 출력을 갖는 전력분배회로를 설계하였다. 따라서 본 장에서는 결함접지구조 전송선로(DGS line)와 일반 마이크로스트립 전송선로(MS line)를 동일한 길이로 설계하고, 이의 위상 지연 특성 차이를 앞서 설계한 전력분배기의 위상차를 조정하는 위상천이 선로로 활용하고자 한다. 설계된 2개의 전송선로를 그림 3에서 보이고 있다.

단위 결함접지구조의 설계는 식각면의 패턴 크기에 따라 그라운드 전류의 흐름이 길어지므로 위상 지연을 늘리기 위해 가급적 큰 결함접지구조 패턴을 만들어야 한다. 그러나 결함접지구조 자체가 공진기의 특성을 가지고 있으므로 사용 대역인 4.8 GHz 대역에서 공진이 발생할 경우, 큰 위상 변위 값을 얻을 수는 있으나, 삽입 손실이 발생하게 되므로 이를 고려하여 설계하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 결함접지구조의 공진 주파수를 피하면서 원하는 위상 천이 값을 얻기 위해 2단의 결함접지구조를 설계하였다. 설계된 단위 결함접지구조는 덤벨형 구조이며,

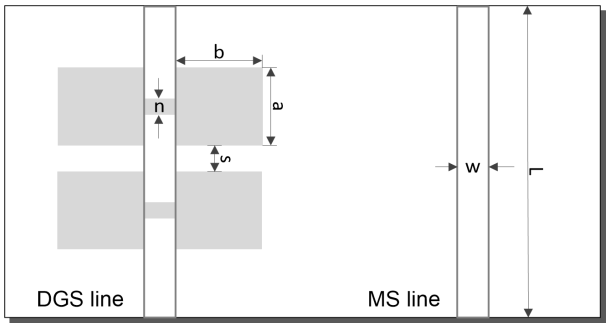
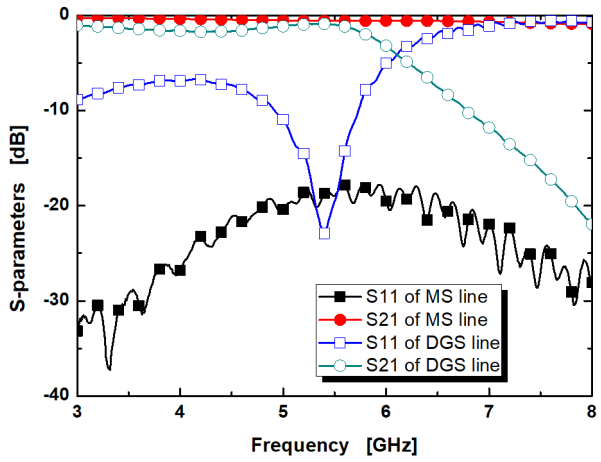


그림 3. 결함접지구조 위상지연 전송선로와 기존 마이크로스트립 전송선로 비교
Fig. 3. Comparison of a DGS phase delay transmission line and a conventional microstrip transmission line.

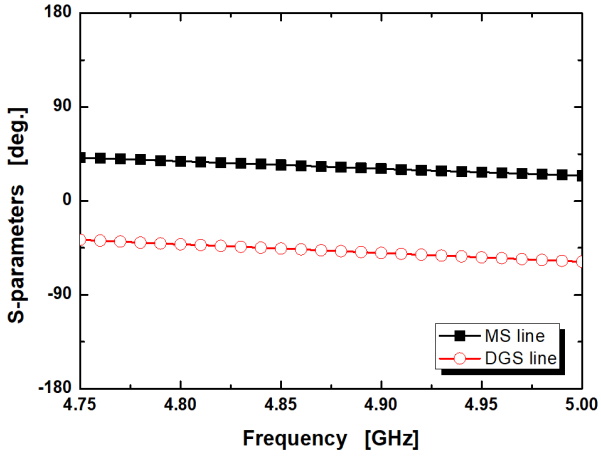
그 크기는 a=3 mm, b=3 mm, n=1 mm이다. 덤벨 양측과 동일 간격인 마이크로스트립 선로의 선폭 w=1.854 mm이고, 실험에 사용한 선로의 길이 L=17.3 mm로 설계되었다. 2단의 결함접지구조 배열을 위해 동일한 크기의 결함접지구조를 직렬로 연결하였으며 두 결함접지구조 간의 간격 s=2 mm로 설계되었다. 측정된 두 전송선로의 특성을 그림 4에 나타내었다.

그림 4 (a)는 두 전송선로의 삽입손실과 반사 손실을



(a) 삽입 손실 및 반사손실

(a) Insertion losses and return loss



(b) 위상

(b) Phases

그림 4. 결함접지구조 유무에 따른 전송선로의 측정 결과

Fig. 4. Measured results of the transmission lines with/ without a DGS.

비교한 것으로 사용 대역인 4.8~4.97 GHz에서 결함접지구조의 삽입손실을 피하여 설계되었음을 알 수 있다. 두 선로 모두 1 dB 이내의 삽입손실을 나타내며, 반사손실은 결함접지구조 전송선로는 10 dB 내외, 기존 마이크로스트립 전송선로는 20 dB 내외를 나타내고 있다. 그림 4 (b)는 두 선로의 사용 대역에서의 전송 위상을 비교한 결과이며, 4.8 GHz에서 결함접지구조 전송선로의 위상은 약 −41.5°, 마이크로스트립 전송선로의 위상은 약 38°를 나타내어 두 전송선로의 위상차가 약 79.5°의 차이가 생기는 것을 확인하였고, 이는 앞서 설계된 평면형 4분주 전력분배기 출력단의 위상차인 약 81°를 상쇄할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 위상 지연 선로로 제작되었다. 고정 위상 천이기 전체 대역에서의 위상은 79.5°에서 81.5°로 거의 일정한 위상을 나타내었다.

Ⅳ. 결함접지구조 위상 조절 회로가 적용된 평면형 4-Way 전력분배기 제작 및 측정

본 장에서는 앞서 설계된 평면형 4분주 전력분배기의 출력단 위상차를 극복하기 위해 결함접지구조 전송선로를 이용한 위상 천이기를 실장하여 동위상을 갖는 평면형 4분주 전력분배기를 제작하였다. 설계된 전력분배기의 구조는 그림 5에 보이는 바와 같으며, 앞서 그림 1에서 설계된 전력분배기와 동일한 설계에 위상지연 선로만 추가되었다. 또한 전면부는 동일한 패턴과 레이아웃을 가지고 있으면 다만 후면 접지부에 결함접지구조를 실장한 점만 구조상 차이를 가지고 있다.

그림 6은 결함접지구조 위상천이기를 실장한 평면형 4

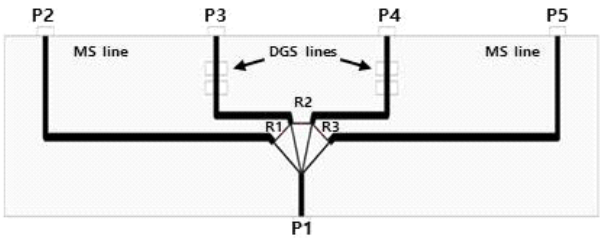
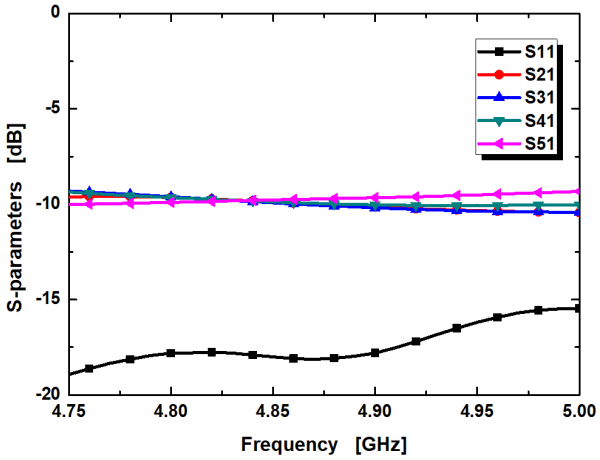


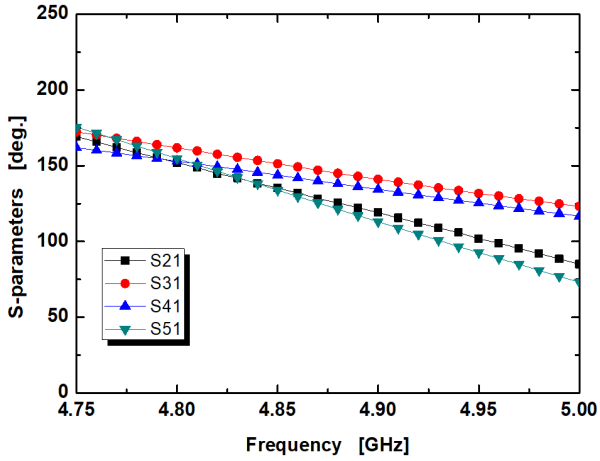
그림 5. 결함접지구조 위상천이기를 탑재한 평면형 4분주 전력분배기 구조

Fig. 5. Configuration of the 4-way power divider with DGS phase shifters.

분주 전력분배기의 측정 결과를 나타내고 있다. 사용 전 대역에서 15 dB 이상의 반사손실과 전 대역 거의 일정하게 10 dB 이하의 삽입손실을 나타내었다. 이는 결함접지구조 전송선로가 삽입된 포트 3과 4에도 동일한 특성을 나타내었다. 그림 6(b)에서 각 포트로의 위상 측정 결과를 나타내고 있다. 평면형 전력분배기의 선로 길이 차에 의한 위상 오차를 결함접지구조 위상 천이기에 의해 보정하였



(a) 삽입 손실 및 반사손실
(a) Insertion losses and return loss

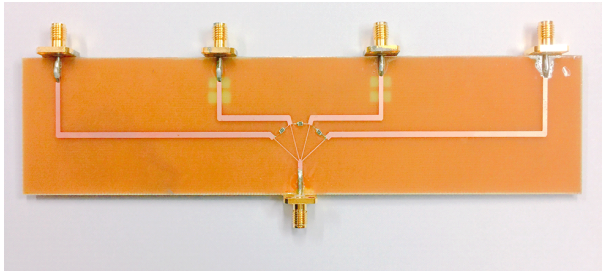


(b) 위상
(b) Phases

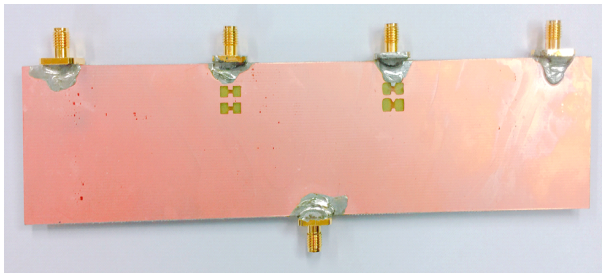
그림 6. 결함접지구조 위상천이기를 탑재한 평면형 4분주 전력분배기 측정 결과
Fig. 6. Measured results of the 4-way power divider with DGS phase shifters.

으며, 위상지연 전송선로를 4.8 GHz에서 설계하여 동일한 위상 특성을 얻을 수 있었다. 반면 4.97 GHz에서는 최대 43.2°의 위상 오차가 발생하였다. 이는 결함접지구조 위상천이기는 주파수 대역내 위상 편차가 거의 없는데 반해, 그림 2(c)에 보인 전력분배기는 주파수에 따른 포트 간 위상 차이가 최대 30°가 존재한다. 즉, 그림 2(c)에서 발생한 P2/P5와 P3/P4의 위상 차이를 그림 4(b)의 DGS 위상천이기로 보상한 결과, 주파수에 따른 오차가 남아있는 것이다. 또한 설계 주파수에서 1 mm의 제작 공정 및 측정 오차가 10.9°의 위상 오차를 발생시키는 점을 고려하면 실험 결과 양호한 위상 보정 성능을 얻을 수 있었다.

제작된 결함접지구조 위상천이기를 갖는 동위상 평면형 전력분배기 회로 사진을 그림 7에서 보이고 있다. 전면부의 회로는 일반 마이크로스트립 전력분배기와 동일한 회로 구조를 보이고 있으며, 후면부에 결함접지구조 식각면이 존재하는 차이점을 보이고 있다.



(a) 앞면
(a) Front view



(b) 뒷면
(b) Rear view

그림 7. 제작된 DGS 위상천이기를 탑재한 평면형 4분주 전력분배기 사진
Fig. 7. Photographs of the implemented 4-way power divider with DGS phase shifters.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 4.8 GHz의 대역의 결함접지구조를 이용한 동위상의 출력단을 갖는 평면형 4분주 RF 전력분배기를 제안하였으며, 기존 결함접지구조의 위상천이기로의 새로운 활용 방안을 제시하였다. 배열 안테나의 급전회로와 같이 동일 위상을 출력단에 공급해야 하는 전송선로 방식의 분배기는 선로의 길이를 조절하는 방식으로 인위적인 연장선로를 이용하여 왔다. 본 논문에서 제안하는 결함접지구조 방식의 위상천이기를 이용할 경우 회로면의 인위적 회로 배치를 피하고, 기판 후면의 접지면 식각만으로 선로의 위상을 동일하게 조절할 수 있다. 또한 주파수 오차에 대한 추가적인 연구가 보완되면 완벽한 동위상 회로를 구현할 수 있을 것으로 사료된다. 제시된 평면형 4분주 전력분배기는 동위상 신호를 출력단에 공급하면서 삽입손실과 반사손실에 성능 열화없이 설계가 가능함을 보였으며, 이를 통해 새로운 마이크로파 회로 설계의 자유도를 높일 수 있을 것이다.

References

[1] M. Shafi *et al.*, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, Jun. 2017.

[2] A. Nordrum, "Everything you need to know about 5G," *IEEE Spectrum*. Available: https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g.

[3] C.-S. Kim, J.-S. Park, D. Ahn, and J.-B. Lim, "A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 131-133, Apr. 2000.

[4] D. Ahn, J.-S. Park, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2001.

[5] S. Y. Zheng, S. H. Yeung, W. S. Chan, K. F. Man, and S. H. Leung, "Size-reduced rectangular patch hybrid coupler using patterned ground plane," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 1, pp. 180-188, Jan. 2009.

[6] J. Lim, J.-S. Park, Y.-T. Lee, D. Ahn, and S. Nam, "Application of defected ground structure in reducing the size of amplifiers," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 261-263, Jul. 2002.

[7] S.-J. Lee, H.-J. Lee, W.-S. Yoon, S.-J. Park, J. Lim, D. Ahn, and S.-M. Han, "Circular polarized antenna with controlled current distribution by defected ground structures," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Macau, Nov. 2010, pp. 856-859.

[8] S. Xiao, M.-C. Tang, Y.-Y. Bai, S. Gao, and B.-Z. Wang, "Mutual coupling suppression in microstrip array using defected ground structure," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 5, no. 12, pp. 1488-1494, Oct. 2011.

[9] S. M. Han, C.-S. Kim, D. Ahn, and T. Itoh, "Phase shifter with high phase shifts using defected ground structures," *Electronics Letters*, vol. 41, no. 4, pp. 45-46, Apr. 2005.

[10] S.-J. Lee, J. Lim, D. Ahn, and S.-M. Han, "Flexible microwave tag system based on DGS multiple resonators," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, Article ID 415607, 2013.

[11] A. A. M. Saleh, "Planar electrically symmetric n-way hybrid power dividers/combiners," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 28, no. 6, pp. 555-563, Jun. 1980.

[12] H.-S. Kim, B. Ahn, S. Kim, C. Kim, J. O. Kim, and S.-M. Han, "Equi-phase RF power divider using fixed phase shift," in *Proceedings of KIEES Conference*, Nov. 2017, vol. 27, no. 1, p. 79.

[13] R. Y. Miyamoto, T. Itoh, "Retrodirective arrays for wireless communications," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 71-79, Mar. 2002.

김 정 욱

2017년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
2017년 3월～현재: 순천향대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] RF transceivers, Reconfigurable antenna systems, RF

김 한 솔

2018년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF Systems

안 보 람

2018년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF Systems

김 수 정

2018년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF Systems

김 찬 호

2013년 3월～현재: 순천향대학교 정보통신공학과 재학 중
[주 관심분야] RF Transceivers, Reconfigurable Antenna Systems, RF

윤 원 상

1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 고려대학교 통신시스템공학과 (공학석사)
2010년 8월: 고려대대학교 컴퓨터・전파통신공학과 (공학박사)
1999년 3월～2015년 8월: 한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 전문연구원
2015년 9월～현재: 호서대학교 전자디스플레이공학부 조교수
[주 관심분야] RF transceivers, Reconfigurable Antenna Systems, RF Sensor Systems 등

한 상 민

1996년: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
1998년: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
2003년 : 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
2003년 10월～2004년 11월: 미국 University of California, Los Angeles (UCLA), Post-Doc. Research Fellow
2005년 1월～2007년 8월: 삼성종합기술원 전문연구원
2013년 8월～2014년 7월: 미국 Georgia Institute of Technology, Research Faculty
2007년 9월～현재: 순천향대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] RF System Architectures, Smart Dust, Active Integrated Antennas