THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2015 Aug.; 26(8), 710～717.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2015.26.8.710
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

철도 무선통신을 위한 단일 RF 체인을 사용하는 고이득 빔포밍 패치 ESPAR 안테나 설계 및 분석

Design and Analysis of High Gain Beamforming Patch ESPAR Antenna for Railroad Wireless Communication

최 진 규 · 장 국 한* · 유 흥 균*

Jinkyu Choi · Kukhan Jang* · Heung-Gyoon Ryu*

요 약

본 논문에서는 철도 통신 환경에서 신뢰성 있는 초고속 통신을 위해 3개의 소자로 구성된 패치형 ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) 안테나를 기반으로 한 배열 안테나 구조를 설계하였다. ESPAR 안테나는 단일 RF-체인을 가지는 능동소자와 능동소자를 둘러싼 기생소자들로 구성되며, 기생소자들의 리액턴스를 조절하여 빔포밍이 가능하다. 패치형 ESPAR 안테나 기반의 수직 배열 안테나 구조를 제안하고, 안테나 행간 거리와 안테나 수에 따라 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과, 안테나 행간 거리가 λ일 때 가장 큰 빔의 이득과 지향성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we design an array antenna structure based on a patch ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) antenna with three elements for reliable communication in high-speed railway wireless communication. The ESPAR antenna consists of the active element with a single RF-chain and the parasitic elements surrounding an active element. The ESPAR antenna is capable of beamforming by adjusting the reactance of the parasitic element. We propose a vertical array antenna structure based on the patch ESPAR antenna and simulate it according to the change of the number of antennas and the distance between antenna rows. The simulation results show that we can get the maximum beam gain and highest directivity when the distance between antenna rows is λ.

Key words: ESPAR Antenna, Beamforming, Array Antenna, High-Gain Beam, Single RF-Chain

Ⅰ. 서 론

최근 모바일 기기의 보급과 접속 그리고 사용자의 급격한 증가와 동영상 스트리밍과 같은 다양한 멀티미디어 서비스의 증가로 인하여 전 세계적으로 모바일 데이터 트래픽이 급증하고 있다. 이에 따라 고품질, 광대역 데이터 통신에 대한 사용자들의 요구도 급증하고 있다. 이러한 사용자들의 요구를 충족시키기 위해 5G 이동통신 시스템은 여러 가지 방법들을 제안하고 있다. 5G 이동통신 시스템에서 제안된 기술들로는 빔포밍(beamforming) 및

「이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A2A2A01005849), 그리고 본 연구는 2014년도 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 철도기술연구사업(14RTRP-B088444-01)의 일환으로 수행하였음.」

한국전자통신연구원 스마트무선기술연구팀(Smart Radio Research Team, Electronics and Telecommunications Research Institute)

*충북대학교 전자공학과(Department of Electronics and Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received April 27, 2015 ; Revised August 31, 2015 ; Accepted September 1, 2015. (ID No. 20150427-035)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cbu.ac.kr)

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

Massive MIMO (Multi-Input Multi-Output), Inband Full Duplex, mmWave 대역 개발, small cell 기법 등이 있다.

철도 통신 내에서도 고품질 광대역 통신에 대한 필요성이 증대되고 있다. 철도 사용자들에게 고품질의 통신 서비스를 제공할 수 있어야 하며, 현재 연구 중인 무인 열차 제어 시스템의 경우, 신뢰성 있는 통신을 필요로 하기 때문이다.

철도 통신 환경에서는 열차가 고속으로 이동하기 때문에 기지국과의 무선 통신 채널에서 빠른 페이딩이 발생한다. 또한, 기지국과 열차 사이의 장애물에 의한 왜곡이 발생한다. 이러한 문제를 해결하고, 철도 통신 성능을 증가시키기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 그 중에서도 다수의 안테나를 사용하여 추가적인 주파수 자원의 소모 없이 링크의 품질을 향상시킬 수 있는 다이버시티 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 다이버시티 기술 중 빔포밍 기술은 안테나에서 전파를 원하는 특정 방향으로 방사 또는 수신하는 지향성을 가지는 빔을 생성하는 기술이다. 빔포밍 기술을 철도 무선 통신에 적용함으로써 송신 전력의 크기를 줄이며, 주파수 자원의 효율적인 사용을 가능하게 한다. 또한, 수신 신호 대 잡음비를 증가시켜 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 다이버시티 이득 및 빔포밍의 성능을 향상시킬 수 있는 안테나에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

기존의 빔포밍 기술은 위상 배열 안테나를 이용한 방법과 DBF(Digital Beamforming) 안테나를 이용한 방법, 그리고 ESPAR 안테나를 이용한 방법이 있다. 위상배열 안테나를 이용한 빔포밍 기술은 각 소자 안테나의 급전부 위상을 조정함으로써 빔의 패턴을 만들어 내는 방법이다. 그리고 DBF 안테나는 개별적인 안테나의 능동 배열을 이용하며, 아날로그 단에서 각 안테나로부터 수신된 신호를 처리하지 않고, 아날로그-디지털 변환기를 이용하여 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환한다. 그리고 이 디지털 데이터를 처리하는 방법이다. 위상 배열 안테나와 DBF 안테나는 많은 수의 안테나 소자를 사용하기 때문에 RF-체인의 수가 많은 단점이 있다. RF-체인의 수가 많을수록 소모하는 전력이 커지며, 복잡도가 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 ESPAR 안테나가 제안되었다[1]. ESPAR 안테나는 다수의 RF-체인을 줄이기 위해 제안된 방법으로 단일 RF-체인을 가지는 능동소자와 능동소자를 둘러싼 기생소자로 구성되며, 기생소자의 리액턴스를 조절하여 빔의 지향이 가능하다. RF-체인의 수가 적기 때문에 전력 소모가 적고, 시스템의 복잡도가 작다[2].

본 논문에서는 철도 통신 환경에서 신뢰성 있는 초고속 통신을 위해 3개의 소자를 가지는 패치형 ESPAR 안테나 기반의 배열 안테나 구조를 설계하였다. 본 논문에서 제안하는 구조는 신호의 전력이 각 능동소자의 수만큼 나뉘어져 분배되기 때문에 전력 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 그리고 RF-체인의 수가 적기 때문에 비용 및 하드웨어 복잡도를 줄일 수 있으며, 배열 구조를 사용하여 빔의 이득을 높임으로써 다이버시티 이득을 향상시킬 수 있다.

Ⅰ장의 서론에 이어서 Ⅱ장에서 ESPAR 안테나의 기본 구조를 설명한다. 그리고 Ⅲ장에서는 제안하는 3소자 패치형 ESPAR 안테나 수직 배열 구조에 대해서 설명하고, Ⅳ장에서는 CST MWS 시뮬레이션 툴을 사용하여 설계한 안테나 구조의 시뮬레이션 결과와 성능을 살펴본다. 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 낸다.

Ⅱ. ESPAR 안테나

2-1 모노폴 형태의 ESPAR 안테나

본 장에서는 ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) 안테나에 대해 설명한다. ESPAR 안테나는 RF-체인을 가지는 한 개의 능동소자와 능동소자 주위의 기생소자들로 구성된다. 이 기생소자들의 리액턴스를 조절하여 원하는 방향으로 빔의 지향이 가능하다[2],[3].

ESPAR 안테나는 단 한 개의 RF-체인만을 필요로 한다. 사용하는 RF-체인의 수가 적기 때문에 안테나에서 소모하는 전력이 적고, 안테나의 복잡도와 시스템의 크기를 줄일 수 있다.

그림 1은 3개의 소자를 가지는 모노폴 형태의 ESPAR 안테나 구조이다. 중앙에 RF-체인을 가지는 능동소자가 있고, 양 옆으로 2개의 기생소자로 구성된다[4],[5].

그림 1과 같은 3개의 소자를 가지는 모노폴 ESPAR 안테나의 경우, 빔 패턴은 아래와 같이 나타낸다[6].

$$G(\theta) = \boldsymbol{i}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{s}(\theta) \quad (1)$$

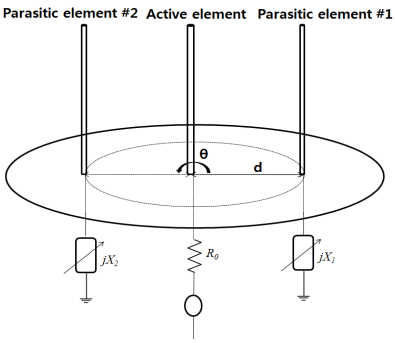


그림 1. 3소자 모노폴 ESPAR 안테나
Fig. 1. 3-element monopole ESPAR antenna.

$$\boldsymbol{i}=[i_0\ i_1\ i_2]^T \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{s}(\theta)&=[s_0(\theta)\ s_1(\theta)\ s_2(\theta)]^T\\&=[1\ \ e^{ja\cos(\theta)}\ e^{ja\cos(\theta-\pi)}]^T\end{aligned} \tag{3}$$

식 (1)의 $G(\theta)$는 ESPAR 안테나에서 방사되는 빔의 패턴을 의미한다. 그리고 식 (3)의 $\boldsymbol{s}(\theta)$는 ESPAR 안테나의 조향 벡터를 나타내며, 식 (2)의 $\boldsymbol{i}$는 안테나의 각 소자에 흐르는 유도전류 벡터를 나타낸다. ESPAR 안테나에 흐르는 유도 전류는 아래와 같이 정의된다[7-8].

$$\boldsymbol{i}=v_s(\boldsymbol{Z}+\boldsymbol{X})^{-1}u_0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}Z_{00}\ Z_{01}\ Z_{02}\\Z_{10}\ Z_{11}\ Z_{12}\\Z_{20}\ Z_{21}\ Z_{22}\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{X}=diag[Z_0\ jX_1\ jX_2] \tag{6}$$

$$u_0=[0\ 0\ 1]^T \tag{7}$$

식 (4)에서v_s는 능동소자에 급전되는 전압을 의미하며, 식 (5)의 $\boldsymbol{Z}$는 능동소자와 기생소자 간의 상호 임피던스 행렬을 의미한다. 식 (6)의 $\boldsymbol{X}$는 안테나 각 소자의 리액턴스 값을 나타내며, Z_0는 50Ω의 특성 임피던스이다.

2-2 패치 형태의 ESPAR 안테나

본 절에서는 기존의 모노폴 형태의 ESPAR 안테나 구조와는 다른 패치형 ESPAR 안테나를 설계한다. 패치형 ESPAR 안테나는 기존의 모노폴 형태의 ESPAR 안테나에 비해 높은 빔 이득을 얻을 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안하는 ESPAR 안테나 구조 기반의 배열 안테나를 설계할 때, 모노폴 형태의 ESPAR 안테나 구조보다는 패치형 ESPAR 안테나 구조가 확장이 용이하다. 이에 본 절에서는 패치형 ESPAR 안테나 구조를 설계한다.

중앙에 RF-체인을 가지는 능동소자가 있으며, 양 옆으로 2개의 기생소자를 구성하였다. ESPAR 안테나 구조의 기생소자의 리액턴스를 조절하여 빔의 조향이 가능하며, 리액턴스는 버랙터 다이오드를 이용하여 조절이 가능하다. 버랙터 다이오드는 전압에 따라 커패시턴스를 변화시킬 수 있는 가변 용량 다이오드를 말한다. 안테나의 급전은 동축선 급전 방식을 사용하였다. 안테나의 동작 주파수 대역의 중심을 2.45 GHz에 맞추어 설계를 하였고, 파장의 길이(λ)는 122.36 mm이다. 그림 2는 3개의 소자를 가지는 패치형 ESPAR 안테나의 구조를 나타낸다. 안테나의 기판은 FR-4로 유전상수(ε_r)는 4.3이고, loss tangent는 0.025이다. 안테나 기판의 두께는 4 mm이며, 프로브 급전방식을 사용한다. 그림 2의 중앙의 능동 패치 소자의 면에 표시된 점은 동축선 급전점을 나타내며, 양쪽의 기생 패치 소자의 면에 표시된 점은 임피던스 소자 연결점을 나타낸다. 그리고 능동소자와 기생소자의 간격을 반파장으로 선택한 이유는 이론적으로 배열 안테나의 경우, 안테나 사이의 mutual coupling을 최소화하기 위해서는 각 안테나 사이의 간격이 반파장 이상이어야 하기 때문이다. 또한, 능동소자와 기생소자 사이의 간격을 변화시켜 시뮬레이션 했을 때, S_{11} 시뮬레이션 결과가 최소 반파장 이상의 간격일 때 안정적임을 확인하였다.

그림 3은 기생소자의 리액턴스를 인가하지 않은 경우, 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 S_{11}를 나타낸 그림이다.

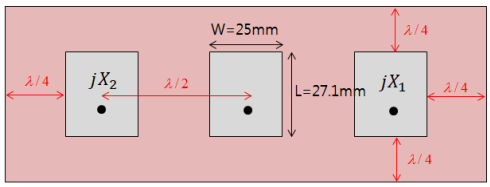


그림 2. 3소자 패치형 ESPAR 안테나
Fig. 2. 3-element patch ESPAR antenna.

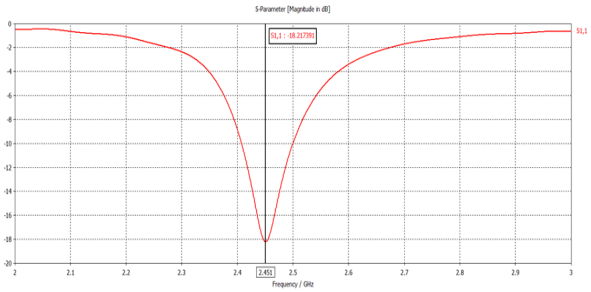
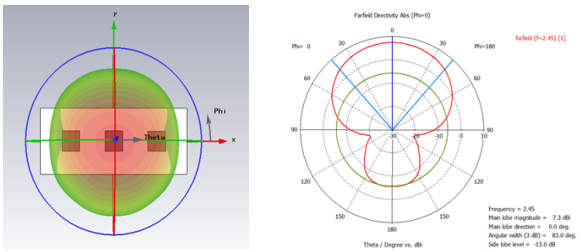


그림 3. 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 S_{11}
Fig. 3. S_{11} of 3-element patch ESPAR antenna.

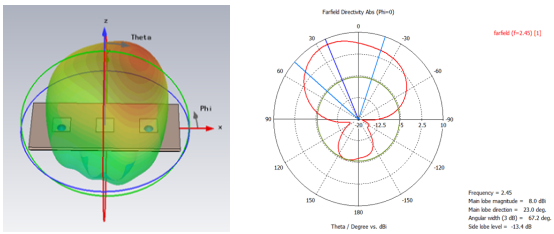
2.45 GHz에서 약 −18.22 dB의 값을 가지며, 동작 대역폭은 약 93 MHz이다.

그림 4는 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 빔 패턴을 나타낸다. 기생소자의 리액턴스를 인가하지 않았기 때문에 단일 패치 안테나처럼 빔이 방사된다. 빔의 이득은 약 7.3 dBi이다.



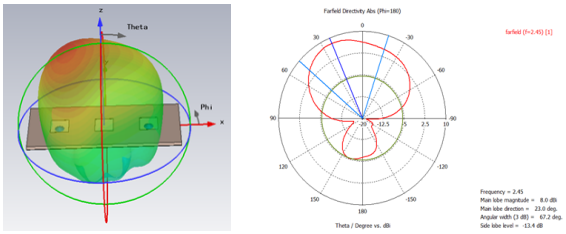
(a) 빔패턴 - 3D (b) 빔패턴 - polar
(a) Beam pattern - 3D (b) Beam pattern - polar

그림 4. 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 빔 패턴
Fig. 4. Beam pattern of 3-element patch ESPAR antenna.



(a) 빔패턴 - 3D (b) 빔패턴 - polar
(a) Beam pattern - 3D (b) Beam pattern - polar

그림 5. 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 빔 패턴
$(jX_1 = +j8, jX_2 = -j217)$
Fig. 5. Beam pattern of 3-element patch ESPAR antenna.
$(jX_1 = +j8, jX_2 = -j217)$.



(a) 빔패턴 - 3D (b) 빔패턴 - polar
(a) Beam pattern - 3D (b) Beam pattern - polar

그림 6. 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 빔 패턴
$(jX_1 = -j217, jX_2 = +j8)$
Fig. 6. Beam pattern of 3-element patch ESPAR antenna.
$(jX_1 = -j217, jX_2 = +j8)$.

그림 5와 그림 6은 3소자 패치형 ESPAR 안테나의 지향된 빔 패턴을 나타낸 것이다. 그림 5는 jX_1 방향으로 빔이 지향되었고, 그림 6은 jX_2 방향으로 빔이 지향되었다. 리액턴스를 인가해 주지 않았을 때 빔은 θ=0°인 방향으로 빔이 지향이 되었다면 그림 5에서는 phi=180°을 기준으로 23°, 그림 6에서는 phi=0°를 기준으로 θ가 23° 기울어져서 빔이 방사된다. 이처럼 기생소자에 적절한 리액턴스를 변화시켜 빔의 지향이 가능하다. 또한, 빔의 이득이 약 7.3 dBi에서 약 8.0 dBi로 증가한 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조

3장에서는 2장에서 설계한 3소자 패치형 ESPAR 안테나를 배열 구조로 구성한다. 그림 7 및 그림 8과 같이 3소자 패치형 ESPAR 안테나를 2행 그리고 4행으로 구성한다. 각 행을 구성하는 3소자 패치형 ESPAR 안테나는 2장

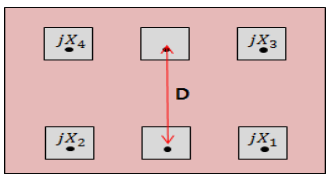


그림 7. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조(2행)
Fig. 7. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(2 row).

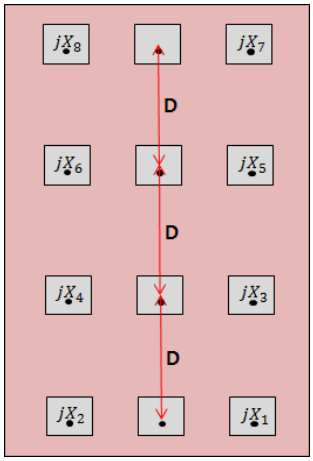


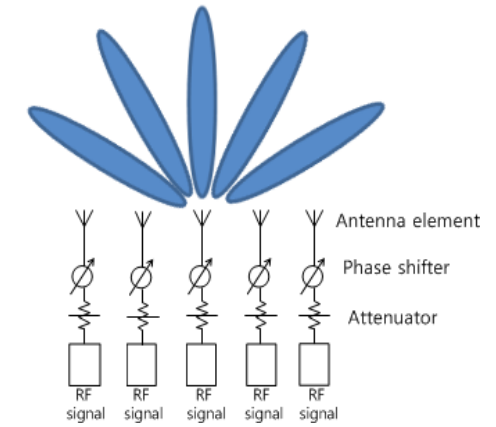
그림 8. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조(4행)
Fig. 8. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(4 row).

에서 설계한 안테나와 동일하다. 그림 7과 그림 8에서 D는 안테나의 행간 거리를 의미한다.

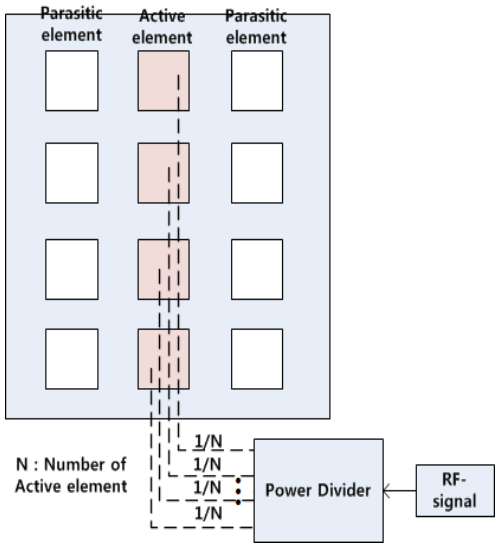
그림 9는 기존의 배열 안테나의 시스템 구성과 단일 RF-체인을 사용하는 패치형 ESPAR 안테나 배열 시스템 구성을 보여준다. 기존의 배열 안테나를 이용한 빔포밍은 다수의 RF-체인을 사용한다. 각 안테나 소자마다 RF-체인이 필요하며, RF-체인이 많아지기 때문에 안테나에서 소모하는 전력이 크고, 시스템이 복잡해진다. 하지만 설계한 ESPAR 안테나를 이용한 배열 구조는 단일 RF-체인을 사용하며, 전력 분배기를 이용해 전력을 능동소자의 수만큼 나누어 분배해준다. 따라서 전력소모와 시스템의 복잡도를 줄일 수 있다.

Ⅳ. 시뮬레이션 및 결과

4장에서는 3장에서 설계한 3개의 소자를 가지는 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조를 시뮬레이션하고, 빔 패턴과 성능을 살펴본다. 시뮬레이션에서 ESPAR 안테나의 리액턴스는 $jX_{odd} = +j8$, $jX_{even} = -j217$로 똑같이 인가해 주었다. 그리고 표 1은 배열의 수와 안테나의 행간 거리에 따라 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 λ= 122.36 mm이고, 지향각(θ)은 phi=0일 때, 빔의 조향 각도를 나타낸다. 그리고 그림 10에서 그림 13번까지는 안테나의 3D 빔 패턴을 나타낸다.



(a) 기존 배열 안테나 시스템의 블록도
(a) Conventional array antenna system block diagram



(b) ESPAR 배열 안테나 시스템의 블록도
(b) ESPAR array antenna system block diagram

그림 9. 기존 배열 안테나 시스템 구성도와 패치형 ESPAR 배열 안테나 시스템 구성도
Fig. 9. Conventional array antenna system block diagram and ESPAR array antenna system block diagram.

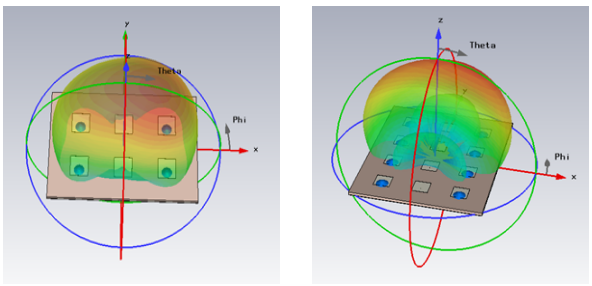
표 1의 결과에서, 패치형 ESPAR 안테나가 하나 있을 때보다 배열 구조로 구성한 경우, 모두 빔의 이득이 증가한 것을 확인할 수 있다. 2행 구조에서 하나의 패치 ESPAR 안테나를 사용할 때보다 안테나 행간 거리에 따라서 최소 약 1.75 dBi에서 최대 약 2.83 dBi까지 빔의 이득이 증가하였다. 4행 구조에서는 안테나 행간 거리에 따라서

표 1. 시뮬레이션 결과
Table 1. Simulation result.

	D (mm)	*S*-parameter (약 dB)	대역폭 (MHz)	이득 (dBi)	지향각 (°)
1 row	-	−17	88	7.94	23
2 row	$\lambda/2$	−14	80	9.69	18
	λ	−18	91	10.77	26
	1.5λ	−15	81	9.73	21
	2λ	−18	93	10.57	25
4 row	$\lambda/2$	−13	80	12.58	19
	λ	−18	91	13.48	28
	1.5λ	−14	83	12.6	20
	2λ	−15	80	13.2	26

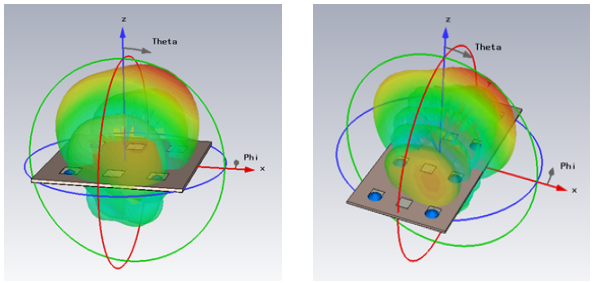
최소 약 4.64 dBi에서 최대 5.54 dBi까지 빔의 이득이 증가하였다. 일반적으로 배열 안테나의 경우, 안테나 소자 간 거리가 $\lambda/2$일 때 가장 성능이 좋다. 하지만 패치형 ESPAR 안테나를 이용한 배열 구조에서는 안테나 행간 거리가 λ일 때 빔의 이득과 지향성이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 안테나 행간 거리가 λ일 때, 2행으로 구성한 경우, 빔의 이득은 약 2.83 dBi 증가하였고, 지향각도는 26°이며, 4행인 경우 빔의 이득은 약 5.54 dBi 증가하였으며 지향각도는 28°이다.

그림 10에서 그림 13까지는 2행과 4행으로 구성된 패치형 ESPAR 안테나 배열의 안테나 행간 거리에 따른 빔 패턴을 나타낸 것이다. 그림 10에서 그림 13의 빔 패턴을



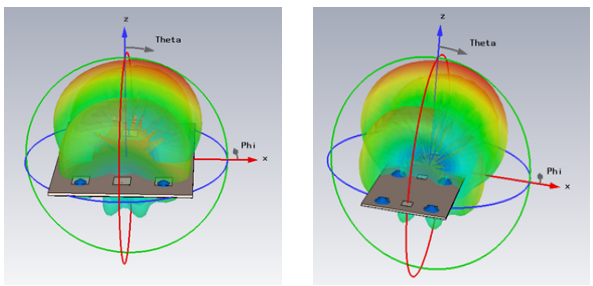
(a) 2 row (b) 4 row

그림 10. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조의 빔 패턴(D=$\lambda/2$)
Fig. 10. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(D=$\lambda/2$).



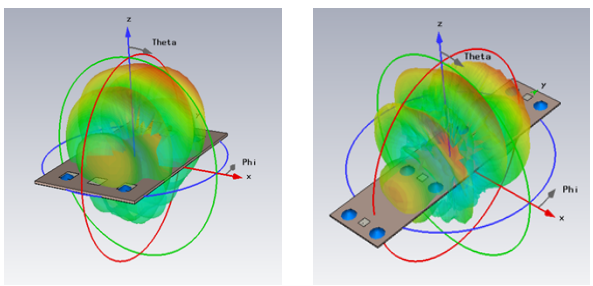
(a) 2 row (b) 4 row

그림 11. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조의 빔 패턴(D=λ)
Fig. 11. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(D=λ).



(a) 2 row (b) 4 row

그림 12. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조의 빔 패턴(D=1.5 λ)
Fig. 12. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(D=1.5 λ).



(a) 2 row (b) 4 row

그림 13. 3소자 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조의 빔 패턴(D=2λ)
Fig. 13. Array structure based on 3 elements patch ESPAR antenna(D=2λ).

살펴보면 안테나 행의 개수가 많아질수록, 행간 간격이 커질수록 부엽의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 특

히 그림 12와 그림 13의 안테나 행간 간격이 1.5 λ, 2 λ인 경우, 빔 패턴을 보면 부엽의 크기가 매우 커지는 문제를 확인할 수 있다. 빔 패턴 결과를 통해 부엽의 크기가 작으면서 빔의 이득과 지향성이 가장 높은 안테나 행간 간격은 λ일 때임을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 먼저 3소자 패치형 ESPAR 안테나를 설계하였다. 그리고 설계한 3소자 패치형 ESPAR 안테나를 기반으로 배열 안테나를 구성하였다. 각각의 안테나의 능동소자에는 능동소자의 수만큼 전력을 나누어 분배해 주었다. 이와 같은 구조는 기존의 다수의 RF-체인을 사용하는 배열안테나에 비해 전력 소모를 크게 줄일 수 있다.

각 안테나의 기생소자에 같은 리액턴스를 인가해 주고 행간 거리에 따라 빔의 이득과 지향성을 비교해본 결과, 안테나 행간 거리가 λ일 때 빔의 이득과 지향성이 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 2행의 배열의 경우, 안테나 행간 거리가 λ일 때 이득이 약 2.83 dBi 증가하였고, 지향각도는 26°이었다. 4행의 배열의 경우 안테나 행간 거리가 λ일 때 약 5.54 dBi 정도 증가하였으며, 지향 각도는 28°이었다.

본 논문에서는 패치 ESPAR 안테나 배열 구조를 이용해 이득과 지향성이 높은 빔을 생성할 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 구조는 좌우의 방향으로의 빔의 조향이 가능한 제한적인 빔포밍이다. 철도 무선 통신환경에서 선로변에 기지국이 존재한다고 가정한다면 직선적인 선로의 특성상 본 논문에서 제안하는 패치형 ESPAR 안테나 배열 구조를 이용한 좌우 방향의 고이득 빔포밍이 적용 가능하다고 본다. 이에 제안하는 안테나 구조를 철도 무선통신에 적용하여, 고이득 빔포밍을 이용한 고품질, 신뢰성 있는 철도 통신을 기대해본다. 향후 ESPAR 안테나의 빔의 이득과 지향성을 더 향상시킬 수 있는 패치 안테나의 구조의 연구가 필요하며, ESPAR 안테나 배열 구조에서 생기는 부엽의 크기를 줄일 수 있는 구조에 대한 연구도 필요하다.

References

[1] T. Ohira, K. Iigusa, "Electronically steerable parasitic array radiator antenna", *Electronics and Communications in Japan*, vol. 87, pp. 25-45, 2004.

[2] C. Sun, A. Hirata, T. Ohira, and N. C. Karmakar, "Fast beamforming of electrically steerable parasitic array radiator antennas: theory and experiment", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 7, pp. 1819-1832, Jul. 2004.

[3] R. F. Harrington, "Reactively controlled directive arrays", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. AP-26, no. 3, May 1978.

[4] Bong-Jun Kim, Heung-Gyoon Ryu, "Beamspace MIMO system with different elements distances in ESPAR array antenna", *Information Networking (ICOIN), 2014 International Conference on*, pp. 97-101, Feb. 2014.

[5] Alrabadi, O., *MIMO Communication Using Single Feed Antenna Arrays*, Aalborg Universitet, pp. 27-29, 2011.

[6] E. P. Tsakalaki, D. Wilcox, E. de Carvalho, C. B. Papadias, and T. Ratnarajah, "Spectrum sensing using single-radio switched-beam antenna systems", *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2012 7th International ICST Conference on*, pp. 118-123, Jun. 2012.

[7] 금홍식, 안창영, 유흥균 "패치안테나를 이용한 ESPAR 안테나 설계와 MIMO 통신 성능 분석", 한국통신학회 논문지, 39(10), pp. 579-584, 2014년 10월.

[8] 이준현, 이동형, 금홍식, 유흥균, "ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템을 위한 리액턴스 조합과 성능 평가", 한국전자파학회논문지, 25(7), pp. 737-746, 2014년 7월.

최 진 규

1999년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학석사)
2001년 1월～현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
[주 관심분야] MIMO-OFDM, 3GPP LTE, SDR, e-Navigation, LTE-R

장 국 한

2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
2015년 3월～현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 이동통신시스템, 신호처리

유 흥 균

1988년～현재: 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월～2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
1996년～현재: IEEE, IET 논문 심사위원
2002년: 한국전자파학회 학술상 수상
2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award' 수상
2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
[주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리