

상용 90도 하이브리드 커플러를 이용한 5.8GHz 대역 4×4 버틀러매트릭스 설계

Design of 5.8GHz Band 4×4 Butler Matrix using Commercial 90° Hybrid Coupler

박 병 훈[†]
(Byeong-Hoon Park)

Abstract - In this paper, 5.8GHz band 4×4 Butler matrix is designed using easily accessible commercial 90° hybrid coupler and semirigid coaxial cable as a transmission line. This Butler matrix is very flexible to changes of antenna system specification like a frequency band because 90° hybrid coupler changing is all to do. The result of design is the distance of 2×2 array antenna element is $\sqrt{2}\lambda/4$, the 4 beam directions are diagonal of array antenna and phase shifter is not necessary. The beam width is roughly 25° narrower because of array antenna geometry and the side lobe is about 10dB higher partially than theoretical beam pattern. But the overall beam pattern is similar with theoretical beam. This Butler matrix can be applied to switching beam antenna of 5.8GHz band Wi-Fi and WAVE system.

Key Words : 4×4 Butler matrix, 2×2 array antenna, Commercial 90° hybrid coupler, Wi-Fi, WAVE

1. 서 론

스마트안테나는 안테나로부터 방사되거나 수신되는 전자파를 특정한 방향으로 집중시키고 또한 전자파 방사 방향을 트래픽 상황이나 통신신호 환경에 따라 조절함으로써 다중 경로 간섭과 동일주파수채널 간섭영향을 효과적으로 감소시켜 무선 네트워크의 수용용량을 확장할 수 있는 가장 효과적인 기술 중의 하나이다[1-2]. 이러한 스마트 안테나 시스템에서 안테나는 배열형태의 안테나를 사용하는데 빔 절환 (switched beam) 시스템은 안테나 배열에 의해 형성되는 다수의 고정된 안테나 빔을 절환해서 해당 빔 방향에 분포된 기기 간 통신 품질을 향상시킨다[2]. 이 시스템은 신호의 강도를 검출하여 가장 큰 강도를 갖는 방향으로 미리 형성된 고정 빔을 선택하며 통신 중인 해당 단말기가 이동하여 수신신호의 강도가 변화되면 다시 수신강도가 높은 방향의 빔을 선택하는 방식이다.

이러한 고정된 다중 빔을 형성하는 방식으로는 버틀러 매트릭스(Butler Matrix)[3], 블라스 매트릭스(Blass Matrix)[4] 그리고 울른웨버 배열(Wullenweber Array)[5] 등 여러 기술이 있는데 이 중에서 버틀러 매트릭스는 다른 기술에 비해서 구현이 비교적 용이하고 필요한 요소들이 적다는 유리한 점을 갖고 있다. 하지만 빔 폭이나 빔형성 각이 주파수에 따라 변하고 차수가 높은 매트릭스를 구현할 때는 구성요소 간 상호 결합이 매우 복잡하다[6].

버틀러 매트릭스로 N개의 고정 빔을 형성하기 위해서는

N×N개의 수동소자 네트워크로 구성되며 그 구성 요소들은 하이브리드 결합기, 위상 천이기, 크로스오버 그리고 전송선로 등이다. 이러 요소들을 구현하는 방법으로는 웨이브가이드, 마이크로스트립, 멀티레이어 마이크로 스트립, CPW기술 등이 있다[7-8]. 그러나 이런 구현 방식은 회로기판의 패턴으로 제작하므로 버틀러 매트릭스의 사양이 바뀌면 새로운 회로기판을 제작하여야 하는 문제가 있다. 따라서 이와 같은 버틀러 매트릭스의 사양의 변화에 따른 문제점을 해소하는 한 방안으로 본 논문에서는 버틀러 매트릭스의 주요 구성요소인 결합기는 상용제품인 90° 하이브리드 결합기를, 전송선로는 주파수 대역폭이 넓은 세미리지드 동축케이블을 적용하는 5.8GHz 대역의 4×4 버틀러 매트릭스 설계제작에 관한 것이다. 즉 이산소자 적용으로 설계사양에 따른 변경이 용이하고, 다중 안테나의 배치와 간격을 조절하여 위상천이기가 필요하지 않은 구조를 단순화한 장점이 있는 802.11a, n, ac 규격의 Wi-Fi 및 차량 간 무선 통신규격인 WAVE통신과 같은 5.8GHz 대역의 통신 시스템의 스위칭 빔 안테나에 적용 가능한 4×4 버틀러 매트릭스를 설계 제작하고 빔 패턴을 측정을 통해 성능을 평가하였다.

2. 배열 안테나의 기하학적 구조 해석

안테나의 배열은 많은 기하학적 구조가 있는데 가장 기본적인 것은 배열 소자 중심들이 직선을 따라 놓이는 선형 배열의 구조와 배열 소자의 중심들이 평면에 위치하는 평면 배열이 있다. 다시 평면 배열은 소자의 중심이 각각 원형 또는 직사각형 영역 안에 포함된 원형배열과 직사각형 배열이 있다.

그림 1은 이와 같은 평면 배열 안테나의 기하학적인 해석을 위한 그림이다. 그림1에서와 같이 가로축(x축)에 K개, 세로 축(y축)에 L개의 안테나 등 총 K·L개의 안테나가 평면

[†] Corresponding Author : Dept. of Computer and Electronics, Induk University, Korea

E-mail : bhpark@induk.ac.kr

접수일자 : 2014년 5월 14일

수정일자 : 2014년 8월 1일

최종완료 : 2014년 8월 5일

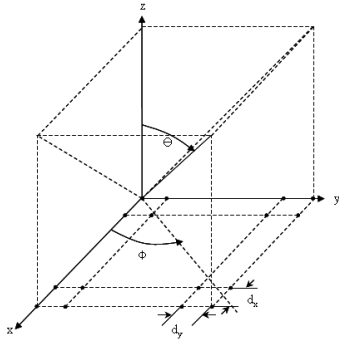


그림 1 평면배열 안테나의 구조도
Fig. 1 Geometry of planar array antenna

으로 배열되고, 가로축의 안테나 간격은 d_x , 세로축의 안테나 간격은 d_y 라 하고, 평면파 신호가 그림에서와 같이 z축을 기준으로 θ 방향, 가로 축을 기준으로 ψ 방향에서 수신된다고 가정하면, 그림 2(a)에서 보이는 바와 같이 x-y 평면에서의 평면파 신호의 지연은 $\sin\theta$ 가 된다.

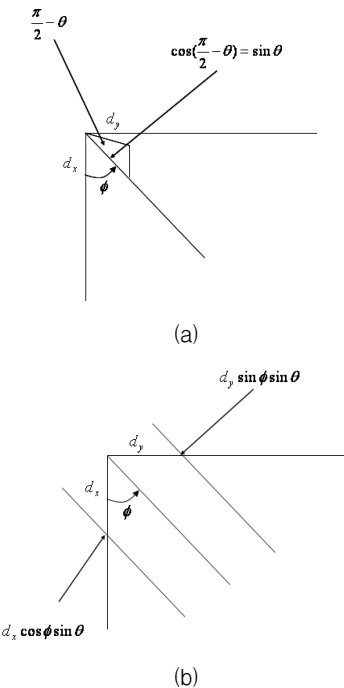


그림 2 평면배열안테나의 가중치 벡터
Fig. 2 Weighting vector of planar array antenna

그리고 d_x 만큼 이격된 x축 안테나에서의 시간 지연은 그림 2(b)에서 보이는 바와 같이 $d_x \cos\psi \sin\theta$ 가 되며, d_y 만큼의 거리가 이격된 y축 안테나에서의 시간 지연은 $d_y \sin\psi \sin\theta$ 가 된다. 따라서 x축 관점에서 수신되는 평면파 신호의 가중치 벡터를 $W_{x,k} = A_k e^{jk\alpha}$ 라 하면, x축에 대한 배열계수(array factor) $AF_x(\theta, \psi)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$AF_x(\theta, \psi) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(k-1)d_x \sin\theta \cos\psi + k\alpha\right)} \quad (1)$$

또한, y축 관점에서 수신되는 평면파 신호의 가중치 벡터를 $W_{y,l} = B_l e^{j\beta}$ 라 하면, y축에 대한 배열계수 $AF_y(\theta, \psi)$ 는 다음 식과 같다.

$$AF_y(\theta, \psi) = \sum_{l=1}^L B_l e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(l-1)d_y \sin\theta \sin\psi + l\beta\right)} \quad (2)$$

그리고 패턴 곱(pattern multiplication)의 원리에 의해 평면 배열 안테나에서의 전체적인 배열계수는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$AF(\theta, \psi) = AF_x(\theta, \psi) AF_y(\theta, \psi) \quad (3)$$

3. 배열과 버틀러 매트릭스 설계

본 연구에서는 2×2 평면배열 안테나 어레이를 적용하여 360° 전 방향을 90° 간격으로 네 개의 빔을 형성할 수 있는 4×4 버틀러 매트릭스를 설계한다. 이 버틀러 매트릭스를 구성하는 위상 천이기는 상용제품으로서 사용가능한 하이브리드 결합기의 위상천이 값은 90° 이므로 90° 하이브리드 결합기를 적용할 수 있도록 설계한다.

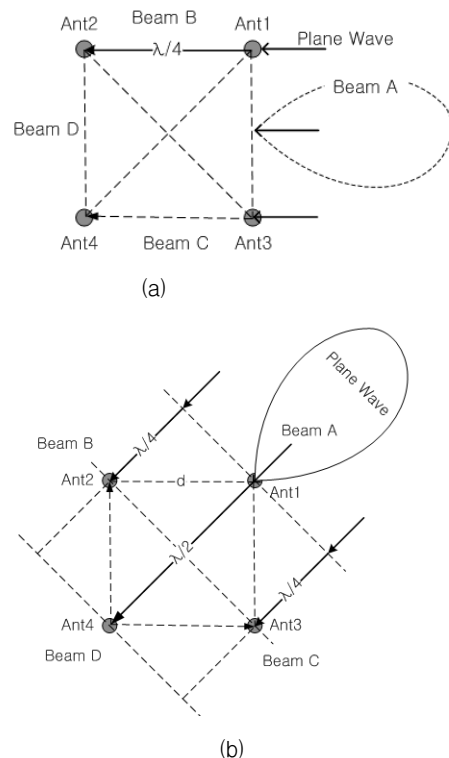


그림 3 2×2 평면 배열 안테나의 빔형성 방향
Fig. 3 Beamforming direction of 2×2 planar array antenna

식(3)의 평면 배열 안테나의 배열계수는 closed form으로 표현 가능해서, 형성되는 각 빔들의 방향각과 이에 따른 버틀러 매트릭스의 신호경로들의 위상천이를 배열계수로부터 구할 수 있지만, 평면배열 안테나의 기하학적 구조를 분석하여 버틀러 매트릭스의 각 신호 경로에 필요한 위상 천이

값을 얻을 수 있다.

2x2 사각형 평면배열에서 빔형성 방향은 그림 3과 같이 두 가지 방법을 고려할 수 있다. 그림 3(a)은 식 (1)과 식 (2)에서 $\theta = \pi/2$ 이고 $\psi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 인 경우로서 평면과가 안테나 1과 3의 연장선에 각각의 빔이 형성되므로 이 빔 방향과 반대편의 두 안테나 2와 4에는 빔형성이 되는 쪽의 안테나 1과 3과는 안테나 간격 d 만큼의 위상차가 있다. 90° 하이브리드 결합기를 적용하려면 이 안테나 간격은 $d = \lambda/4$ 이어야 하고 버틀러 매트릭스의 위상 천이기의 조합은 $(0, 0, -\pi/2, -\pi/2)$, $(0, -\pi/2, -\pi/2, 0)$, $(-\pi/2, 0, 0, -\pi/2)$, $(-\pi/2, -\pi/2, 0, 0)$ 이다. 그러나 이런 위상천이 조합의 버틀러 매트릭스 구현이 매우 복잡해서 구현이 난해하다.

따라서 본 논문에서는 보다 간단한 구조를 갖는 버틀러 매트릭스를 구현하기 위해서 그림 3(b)와 같이 사각형 구조의 배열에서 대각선 방향으로 빔 성형이 되는 경우를 고려한다. 이 경우는 식 (1)과 식 (2)에서 $\theta = \pi/2$ 이며, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 A방향의 빔 방향과 안테나 간격을 $d = \lambda/4$ 로 하면 필요한 위상천이 조합에 $\sqrt{2}\pi/2$ 이 포함되므로 90° 하이브리드 결합기를 사용할 수 없다. 그러나 안테나 간격 $d = \sqrt{2}\lambda/4$ 로 하면, 안테나2와 3 그리고 안테나 4는 안테나 1을 기준으로 경로차가 $\lambda/4$ 이므로 각 안테나의 위상차는 앞서 설명한 그림 3(a)의 경우와 같이 90°이다. 이 때 위상천이 조합은 $(0, -\pi/2, -\pi/2, \pi)$, $(-\pi/2, \pi, 0, -\pi/2)$, $(-\pi/2, 0, \pi, -\pi/2)$, $(\pi, -\pi/2, -\pi/2, 0)$ 이 된다. 이와 같은 위상천이 조합은 표 1에 나타나 있으며 이를 근거로 해서 버틀러 매트릭스를 설계하면 그림 4와 같이 전송선로에 더 이상의 위상천이기가 필요 없는 구조가 된다.

표 1 버틀러 매트릭스의 위상천이 값

Table 1 Phase shift value of Butler Matrix

빔 방향	Ant 1	Ant 2	Ant 3	Ant 4	출력 포트
A	$-\pi$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	P4
B	$-\pi/2$	$-\pi$	0°	$-\pi/2$	P2
C	$-\pi/2$	0°	$-\pi$	$-\pi/2$	P3
D	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi$	P1

본 논문에서 설계한 버틀러 매트릭스는 필요한 위상천이 값은 그림 4에 나타난 바와 같이 0, $-\pi/2$, $-\pi$ 일 뿐, 다른 위상 천이가 필요하지 않으므로 90° 하이브리드 커플러와 전송선로만으로 버틀러 매트릭스를 구현할 수 있으며, 출력 포트 P1, P2, P3, P4에서 각 안테나의 위상관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 P1 &= Ant1 \angle 0^\circ + Ant2 \angle -90^\circ + Ant3 \angle -90^\circ + Ant4 \angle -180^\circ \\
 P2 &= Ant1 \angle -90^\circ + Ant2 \angle -180^\circ + Ant3 \angle 0^\circ + Ant4 \angle -90^\circ \\
 P3 &= Ant1 \angle -90^\circ + Ant2 \angle 0^\circ + Ant3 \angle -180^\circ + Ant4 \angle -90^\circ \\
 P4 &= Ant1 \angle -180^\circ + Ant2 \angle -90^\circ + Ant3 \angle -90^\circ + Ant4 \angle 0^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그림 5는 이상적인 2x2평면 배열 안테나와 표 1의 위상천이 값에 대해 $\theta = 2/\pi$ 일 때 식(3)를 이용하여 2차원 빔 패

턴을 구한 결과로서 빔의 메인로브 대 사이드로브의 비는 대략 7dB정도를 갖는다.

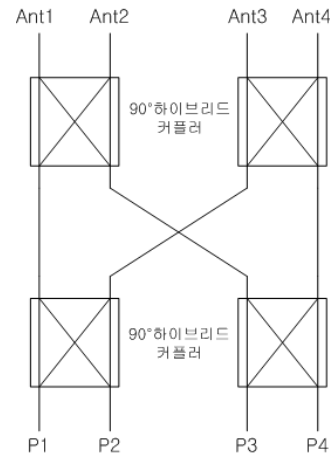


그림 4 버틀러 매트릭스의 블럭도
Fig. 4 Block diagram of Butler Matrix

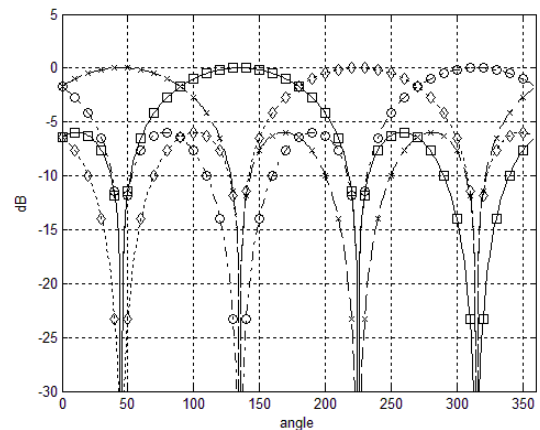


그림 5 설계한 버틀러 매트릭스와 이상적인 2x2 평면 배열 안테나를 이용한 빔 패턴
Fig. 5 Beam patterns of combined Butler Matrix and ideal 2x2 planar array antenna

4. 버틀러 매트릭스 제작

본 연구에서 적용한 2x2 평면 배열 안테나를 구성하는 단일 평판형 전방향 안테나의 형상은 그림 6과 같으며 안테나 규격은 표 2에 나타나 있다. 이 때 5.86GHz에서 실험하기 위해 안테나 간격은 $d = \lambda/2\sqrt{2} = 1.81cm$ 로 하였다.

그림 7은 이 배열된 상태에서 단일 안테나의 2D 빔 패턴을 보여주고 있다. 측정방법은 한 안테나의 빔 패턴을 측정할 때 나머지 세 개의 안테나 포트는 50Ω으로 단락하고 무반사 챔버에서 배열 안테나를 수평으로 360° 회전하면서 수신 전력을 측정하였다. 배열상태가 아닌 단일 안테나를 측정하면 전 방향에서 거의 균일한 빔 패턴을 갖지만 배열 후에는 그림 7의 결과와 같이 1.81cm라는 근거리 배열된 나머지 3개의 안테나에 의해 패턴이 방해받고 있음이 보여진다.

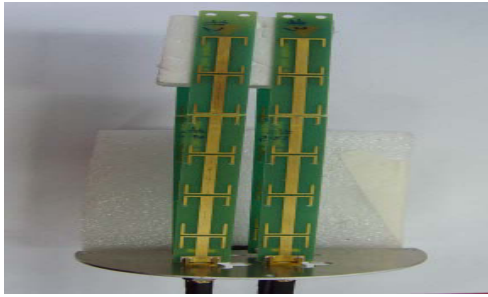


그림 6 전방향 안테나를 이용한 2x2 평판형 배열 안테나
 Fig. 6 2x2 planar array antenna using omni directional antennas

표 2 전방향 평판형 안테나 규격

Table 2 Specification of omni directional planar antenna

항목	특성
주파수	5.75~5.9GHz
VSWR	2:1
이득	8dBi
편파	수직

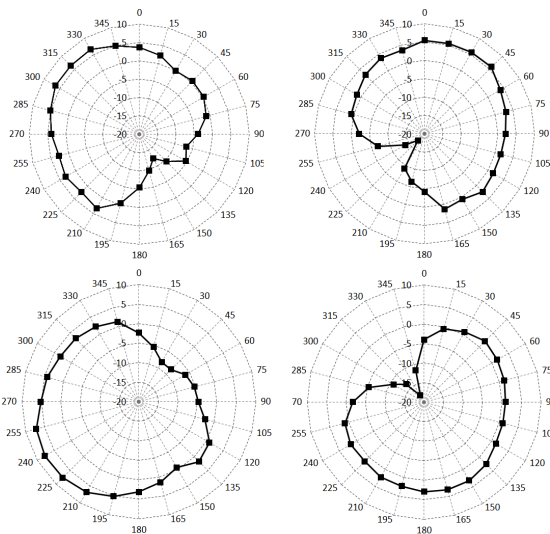


그림 7 2x2 배열 각 안테나 소자의 빔 패턴
 Fig. 7 Beam Patterns of 2x2 array antenna elements

버틀러 매트릭스는 이산소자를 사용하여 제작하였다. 90° 하이브리드 커플러는 Anaren사의 1M803S를 사용하였으며 상세한 규격은 표 3에 나타나 있다. 90° 하이브리드 커플러 입출력 단자와 sma 커넥터 사이는 50Ω 마이크로 스트립으로 그리고 90° 하이브리드 커플러 사이의 RF신호 경로는 마이크로 스트립 cross over를 적용하지 않고 신호경로를 세미리지드 동축케이블 RG401을 이용하여 연결하였다. 이때 RF경로에 필요한 4개 동축케이블의 모든 규격은 최대한 균일하게 제작하였고 반사손실을 최소화하기 위해 보드와의 결합에 주의하여 제작하였다. 그리고 기판은 비유전율 4.3 두께 1.8mm의 FR4를 사용하였다. 한편 각 RF 경로사이에 커플링을 최소화하기 위해 알루미늄 케이스를 이용한 격벽

을 사용하여 차폐하였다. 제작된 4x4 버틀러 매트릭스는 그림 8에 보여주고 있다.

표 3 90° 하이브리드 커플러 규격

Table 3 Specification of 90° hybrid coupler

항목	특성
주파수	5~6GHz
Isolation	20dB min
삽입손실	0.25dBmax
VSWR	1.21:1
진폭균형	±0.3dBmax
위상균형	±3도

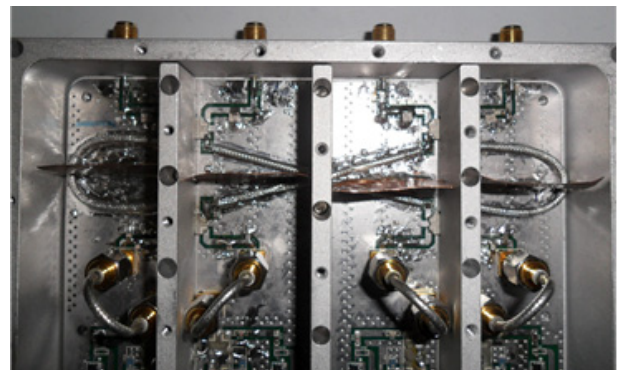


그림 8 제작한 버틀러 매트릭스
 Fig. 8 Picture of Butler Matrix

5. 버틀러 매트릭스 측정 결과

버틀러 매트릭스를 4개 제작하여 삽입손실보다는 각 RF 경로에서 요구되는 위상 값을 우선으로 임피던스 매칭을 한 후, 위상 및 이득 특성을 측정하였다. 측정결과 삽입손실은 18~23dB의 분포를 갖았으며 위상은 -90° 위상천이를 갖도록 제작한 경로에서는 68~110°, -180° 위상천이를 갖도록 제작한 경로에서는 156~200°로서 사용주파수가 5.86GHz로 상당히 높아 파장이 짧아서 조그만 전송선로 조건에 따라 비교적 큰 위상천이 오차를 보였다. 표 4는 한 샘플의 측정결과 표이다. 이 제작된 샘플은 삽입손실이 -20 ~ -23dB 그리고 위상천이 오차는 ant1의 출력포트 P1에서 최대 오차가 19°이었다.

다음은 그림 6의 2x2 평면배열 안테나와 표 4의 특성을 갖는 버틀러 매트릭스를 결합하여 2차원 빔 패턴을 측정하였다. 그림 9의 실측한 버틀러 매트릭스의 빔 패턴과 함께 이상적인 전 방향 안테나와 본 연구에서 설계한 버틀러 매트릭스에서 삽입 손실 및 위상천이 오차가 없는 이상적인 버틀러 매트릭스의 빔 패턴이 나타나 있다. 이 결과는 표 4에 나타난 버틀러 매트릭스 신호경로의 삽입손실 -20 ~ -23dB과 표 2에 나타난 2x2 평면 배열안테나 이득 8dBi를 반영하여 각 빔 패턴방향에 따라 12dB에서 15dB를 보상하여 이론적인 빔 패턴과 삽입손실을 동일하게 균등화하였다. 이 결과에 따르면 네 방향의 실측 빔 패턴은 모두 이론적인 빔 패턴에 비해 사이드로브는 더 크게 나타났으며, 빔 폭은

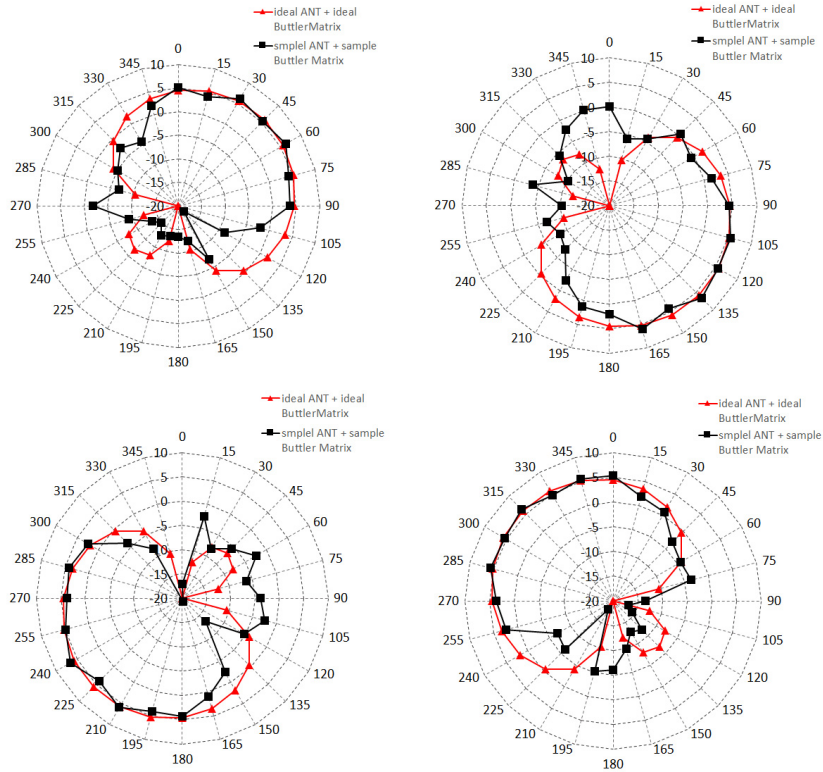


그림 9 제작한 버틀러 매트릭스의 빔 패턴
Fig. 9 Beam patterns of Buttler Matrix

약 25도 정도 좁게 나타났지만 대체로 이론적인 빔 패턴에 근사한 형태로 나타났다. 빔 폭이 좁게 나타난 것은 배열 안테나의 각 안테나 포트에서 측정된 그림 7에 나타난 바와 같이 요소 안테나 간 간격이 작아서 공간상의 위치에 따라서 전자파의 장애물 역할하기 때문으로 판단된다.

표 4 제작한 버틀러 매트릭스 특성 측정 결과(괄호 안은 설계값 대비 오차)

Table 4 Test result of Buttler Matrix(the values in the brackets mean error)

입력포트		출력포트			
		P1	P2	P3	P4
Ant1	위상(도)	-199(19)	-98(18)	-71(9)	0
	이득(dB)	-20.1	-22	-22.2	-21.2
Ant2	위상(도)	-106(16)	-195(15)	0	-98(8)
	이득(dB)	-23.1	-23.3	-20.9	-20.9
Ant3	위상(도)	-105(15)	0	-176(4)	-86(4)
	이득(dB)	-21	-20.7	-22.3	-20.5
Ant4	위상(도)	0	-80(10)	-87(3)	-171(9)
	이득(dB)	-22.5	-22.9	-22	-20.7

6. 결 론

본 논문에서는 마이크로 스트립 평면 패턴으로 버틀러 매트릭스를 제작할 경우 사양의 변화에 따라 새로운 회로기판

을 제작하여야 하는 문제를 해소하기 위한 한 방안으로 상용 제품인 90° 하이브리드 결합기를 적용하고, 전송선로는 주파수 대역폭이 넓은 세미 리지드 동축케이블을 사용하여 안테나의 배치방법, 안테나 간격을 변경하여 위상천이기가 필요하지 않은 간단한 구조의 5.8GHz 대역의 4×4 버틀러 매트릭스를 설계하고 그 성능을 평가하였다.

설계 결과는 90° 하이브리드 결합기를 적용하기 위해서는 배열 안테나의 요소 안테나 간격은 $\sqrt{2}\lambda/4$ 이었으며, 평면 배열 모서리 방향의 빔을 성형하여야 했으며 버틀러 매트릭스의 전송선로에는 위상천이기가 필요하지 않았다. 제작한 시료의 측정결과는 배열 안테나의 안테나 요소 간 간격이 좁아 서로 빔 형성에 방해가 되는 효과가 있어서 이론적인 빔 패턴에 비해 빔폭이 약 25° 좁게 나타났으며, 빔 방향의 반대 방향의 사이드로브가 부분적으로 최대 10dB정도 높지만 빔 성형 방향이나 빔 패턴의 전체적인 빔 패턴은 이론적인 것과 거의 일치하였다. 따라서 본 논문에서 설계 제작한 버틀러 매트릭스는 5.8GHz 대역의 Wi-Fi 및 WAVE통신에서 스위칭 빔 안테나 시스템에 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 인덕대학교 교내학술연구비의 일부 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Chia-Chan Chang; Ruey-Hsuan Lee; Ting-Yen Shih, "Design of a Beam Switching Steering Butler Matrix for Phased Array System" Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Vol. 58 , Issue: 2, 2010, pp.367 - 374
- [2] Cetinoneri, B.; Atesal, Y.A.; Rebeiz, G.M, "An 8×8 Butler Matrix in 0.13 um CMOS for 5 - 6GHz Multibeam Applications "Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Vol. 59 , Issue: 2, 2011 , pp.295 - 301
- [3] J. Butler and R. Lowe, "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas," Electronic Design, pp.170-173, April 12, 1961.
- [4] J. Blass, "Multidirectional Antenna: A New Approach to Stacked Beams," IRE International Conference Record, Vol. 8, Part 1, 1960.
- [5] A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Olver and P. Knight, The Handbook of Antenna Design, Vol. 2, Peter Peregrinus, London pp.323-328, 1983.
- [6] T. A. Denidni and T. E. Libar, "Wide band four-port Butler matrix for switched multibeam antenna arrays," in Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '03), vol. 3, pp. 2461 - 2464, Beijing, China, September 2003.
- [7] Pozar D.M: "Microwave Engineering", Third edition, Wiley, 2005.
- [8] Fooks, E. H. Microwave engineering using microstrip circuits, Prentice Hall New York 1990

저 자 소 개



박 병 훈 (朴 炳 勳)

1986년 연세대학교 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1986). 동 대학원 컴퓨터전자과 박사(1999). 1986 - 1992 삼성종합기술원 선임연구원. 2000-현재 인덕대학교 컴퓨터전자과 교수

E-mail : bhpark@induk.ac.kr