

# 두 개의 빔 형성 안테나를 위한 Hadamard 행렬 급전 장치

## A Hadamard Matrix Feed Network for a Dual-Beam Forming Array Antenna

김 재 희 · 조 규 영 · 박 위 상

Jae Hee Kim · Gyu Young Jo · Wee Sang Park

### 요 약

본 논문에서는 두 개의 빔 형성을 위한 4×1 배열 안테나에 급전할 수 있는 새로운 4×4 Hadamard 행렬 급전 장치를 제안한다. 만약 배열 안테나의 각 안테나를 Hadamard 행렬의 각 행으로 급전을 하면 두 개의 빔을 형성하게 된다. 두 빔 사이의 각도는 행렬의 적절한 행을 선택함으로써 조절할 수 있다. Hadamard 행렬의 급전 구조는 네 개의 90° 하이브리드, 한 개의 크로스오버, 네 개의 90° 위상 변위기가 사용된다. 마이크로스트립 표면에 Hadamard 행렬을 포함한 배열 안테나를 제작하였으며, 측정된 안테나의 주 빔 방향은 입력 포트의 선택에 따라 각각 0°, ±15°, ±33°, ±45°가 되었다.

### Abstract

We propose a novel 4×4 Hadamard matrix feed network for a 4×1 array antenna to form a dual beam. If each element of the array is excited following the elements in a row of the Hadamard matrix, a two-lobed antenna beam can be obtained. The angle between the two lobes can be controlled. The Hadamard matrix feed network consists of four 90° hybrids, a crossover and four 90° phase shifters. The array, including the Hadamard matrix feed network, was fabricated on a microstrip structure. The measured beam directions of the two lobes are 0°, ±15°, ±33°, ±45° depending on the choice of the input port of the feed network.

Key words : Hadamard Matrix, Beam Forming Antenna, Feed Network, 90° Hybrid, Crossover

### I. 서 론

무선 환경에서 시스템의 성능을 향상시키는 방법 중 한 가지는 안테나의 빔 형성을 통하여 수신단의 방향으로 전파를 강하게 보내어 신호의 수신 강도를 높이는 방법이 있다. 안테나의 빔 형성을 위해서는 배열 안테나를 사용하고, 각 안테나에 신호를 여기시키는 급전 구조가 필요하다. 안테나의 배열 간격과 각 안테나에 여기되는 신호의 크기 및 위상이 안테나의 빔의 모양을 결정한다<sup>[1]</sup>. 안테나의 배열 간격은 처음 안테나 설계시 결정되는 요소이며, 안테나

동작 중에는 변화하기 어렵다. 환경에 따라서 안테나의 빔을 형성하기 위해서는 급전 구조를 조절 가능하게 만드는 것이 필요하다. 급전 구조를 조절하기 위한 방법으로는 배열 안테나의 각 급전 선로에 위상 변위기를 사용하거나<sup>[2]</sup>, 스위치를 이용하여 이미 만들어진 빔을 선택하는 방법이 있다<sup>[3]~[4]</sup>. 위상 변위기를 사용하면 장비의 가격이 비싸지고 손실이 있는 단점이 있고, 스위칭 소자를 사용하면 정해진 방향으로 밖에 빔을 형성할 수 없는 단점이 있다. 스위칭 소자를 사용하면 위상 변위기를 사용하는 것보다 구조가 간단하고 제작이 용이한 장점을 가지기

「이 논문은 2008년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology(POSTECH))

· 논문 번호 : 20080523-175

· 수정완료일자 : 2008년 7월 28일

때문에 안테나 단가가 줄어들어 최근 실내 환경 빔 형성 안테나로 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 스위칭 소자를 이용하여 빔을 형성하는 급전 구조를 제안하고자 한다. 4개의 배열 안테나를 사용하며, 각 안테나에 여기되는 신호는 Hadamard 행렬의 값을 따른다. Hadamard 행렬 급전 구조를 사용하여 두 개의 빔을 동시에 형성할 수 있고, 두 빔 사이의 각을 조절할 수 있는 것을 보일 것이다. II장에서는 안테나에 Hadamard 행렬에 해당하는 신호가 여기되었을 때 이론적으로 형성되는 빔 모양과 Hadamard 행렬에 해당하는 신호를 여기시키기 위한 급전 구조를 살펴보도록 한다. III장에서는 마이크로스트립 구조를 사용하여 안테나 급전 구조를 설계하고, 시뮬레이션 및 측정 결과를 살펴본다. IV장에서는 결론을 내리도록 한다.

## II. Hadamard 행렬 급전 장치 및 빔 형성 모양

Hadamard 행렬은 정사각 행렬로 모든 원소가 1 혹은 -1의 값을 가지고 각 행과 열에 대해서 서로 orthogonal한 특성을 가지는 행렬을 말한다. Hadamard 행렬을 일반적으로 표현하면 아래와 같다.

$$H_1 = [1], \tag{1}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$H_{2^k} = \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

위의 Hadamard 행렬의 임의의 두 행이나 열을 추출하여 내적을 취하면 0이 된다. 2x2 Hadamard 행렬과 4x4 Hadamard 행렬에 대해서 안테나의 방사 패턴이 어떤 특징을 가지는지 살펴보았다. 배열 안테나의 간격은 그림 1에서 보는 바와 같이 반 파장으로 두었고, 각 안테나에 여기시키는 신호를 Hadamard 행렬의 각 행에 해당하는 값으로 하였다. 그림 1의 (a)는 2개의 배열 안테나를 사용한 것이고, (b)는 4개의 배열 안테나를 사용한 것이다. 원으로 표시한 것이 안테나를 의미하며, 원 위의 숫자가 각 안테나에 여기시키는 신호를 의미한다. 1 과 -1은 같은 크기를 가지고 위상이 180° 차이가 나는 것을 의미한다. 그리고 안테나는 무지향성 방사 패턴을 갖고, 안테나는

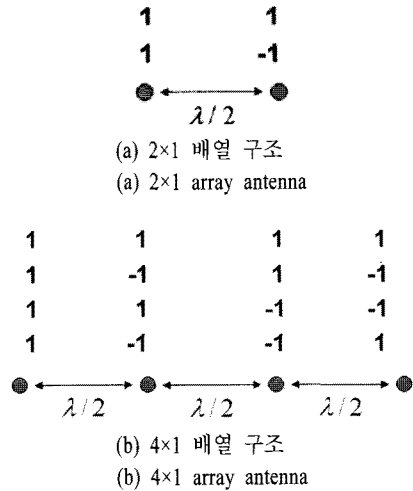


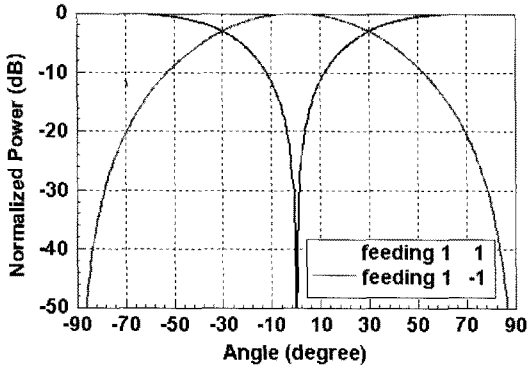
그림 1. 배열 안테나 간격 및 여기 조건  
Fig. 1. The antenna space and the exciting conditions.

상반구로만 방사가 일어나고, 하반구로는 방사가 전혀 일어나지 않는다고 가정하였다. 배열 안테나의 방사 패턴은 이상적으로 Array Factor(AF)에 의해서 계산이 된다<sup>[1]</sup>. AF는 다음의 수식으로 표현이 된다.

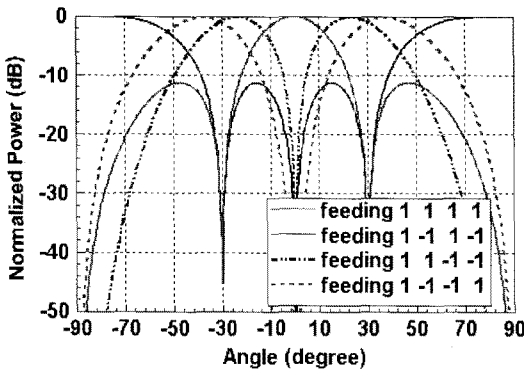
$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{in\beta d \cos \theta} \tag{4}$$

여기서  $N$ 은 배열 안테나의 수,  $d$ 는 안테나 사이의 간격,  $I_n$ 은 각 안테나 단에 여기되는 복소 신호,  $\beta$ 는 전파상수,  $\theta$ 는 배열 방향과 패턴의 관측 지점 사이의 각도에 해당한다. 배열 안테나의 각 요소에 Hadamard 행렬의 각 행을 여기시켰을 때의 방사 패턴을 그림 2에 나타내었다. (a)는 2개의 배열 구조를 사용하였을 때 방사 패턴이며, (b)는 4개의 배열 구조를 사용하였을 때 방사 패턴이다. (a)에서는 안테나의 빔이 broadside 방향과 endfire 방향으로 형성이 되는 것을 확인할 수 있고, (b)에서는 두 개의 빔이 형성이 되며, 여기되는 신호에 따라서 두 빔 사이의 각도가 변화하는 것을 알 수 있다. 급전하는 Hadamard 행렬의 행에 따라서 안테나의 주 빔은 각각 0°, ±23°, ±37°, ±90°에 형성이 된다. 따라서 안테나의 빔은 -90°에서 90° 사이의 영역을 커버한다.

Hadamard 행렬의 행에 해당하는 값을 각 배열 안테나 요소에 급전하기 위해서는 급전 구조가 필요하다. 2x2 Hadamard 행렬과 4x4 Hadamard 행렬의 급전 구조를 그림 3에 도시하였다. 두 개의 배열 안테나를



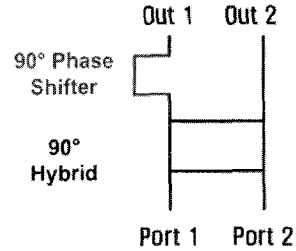
(a) 2×1 배열 구조  
(a) 2×1 array antenna



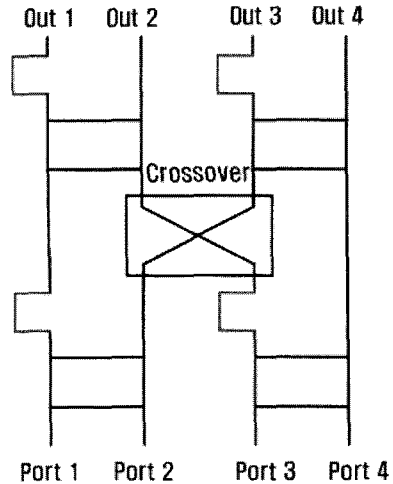
(b) 4×1 배열 구조  
(b) 4×1 array antenna

그림 2. Hadamard 행렬의 이론적인 방사 패턴  
Fig. 2. The ideal radiation patterns.

사용할 경우, 급전을 1, 1 혹은 1, -1을 하면 되기 때문에 단순히 180° 하이브리드 하나를 이용하면 구현할 수 있다. 180° 하이브리드는 그림 3의 (a)에서 보는 바와 같이 90° 하이브리드 하나와 90° 지연선 (phase shifter)을 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. (b)는 4×4 Hadamard 행렬을 위한 급전 구조이다. 4개의 90° 하이브리드와 하나의 크로스오버를 사용하였다. 90° 하이브리드 왼쪽 상단에는 90° 지연선이 연결되어 있다. 크로스오버는 입력된 신호가 교차하여 반대 출력으로 나오게 하는 역할을 한다. 4×4 Hadamard 행렬 급전 구조의 포트 1(port 1)에 신호가 여기 되면 90° 하이브리드와 지연선을 통과하여 각 선의 신호가 동 위상을 가지게 된다. 지연선과 90° 하이브리드를 통과한 왼쪽 선은 다음의 90° 하이브리드로 여기가 되고, 오른쪽 선의 신호는 크로스오버를



(a) 2×2 배열 구조  
(a) 2×2 Hadamard matrix



(b) 4×4 배열 구조  
(b) 4×4 Hadamard matrix

그림 3. Hadamard 행렬 급전 구조  
Fig. 3. Feed network structure.

지나 다시 90° 하이브리드로 여기가 된다. 상단의 90° 하이브리드를 통과하고 지연선을 통해 나온 출력은 모든 출력 포트에서 동일한 크기와 위상을 가지어 출력 신호가 출력 포트(out) 1~ 4까지 모든 값이 1이 된다. 이와 같이 각 포트에 신호를 여기시켜 출력 신호를 확인해 보면 Hadamard 행렬의 각 행에 해당하는 값이 되는 것을 확인해 볼 수 있다. 표 1과 표 2에 각각 2×2 Hadamard 행렬 급전 구조의 입력 포트에 따른 출력 값과 4×4 Hadamard 행렬 급전 구조의 입력 포트에 따른 출력 값을 나타내었다. 표 2에서 Hadamard 행렬과 정확히 같은 배열을 가지기 위해서는 포트 2와 포트 3의 행을 바꾸면 된다고 하지만, 포트의 위치를 바꾸는 것은 추가적인 크로스오버를 필요로 하기 때문에 급전 구조의 복잡성을 생각한다면 타당하지 않다.

표 1. 2x2 Hadamard 행렬 급전 구조의 출력 값  
Table 1. Outputs for the 2x2 Hadamard matrix feed network.

2x2	Out 1	Out 2
Port 1	1	1
Port 2	1	-1

표 2. 4x4 Hadamard 행렬 급전 구조의 출력 값  
Table 2. Outputs for the 4x4 Hadamard matrix feed network.

4x4	Out 1	Out 2	Out 3	Out 4
Port 1	1	1	1	1
Port 2	1	1	-1	-1
Port 3	1	-1	1	-1
Port 4	1	-1	-1	1

### III. Hadamard 행렬 급전 구조 설계 및 안테나 제작, 측정

Hadamard 행렬 급전 구조를 마이크로스트립 선로를 이용하여 설계하고 제작하였다. 설계에 사용한 기판은 유전율 2.2, 손실 탄젠트 0.0009, 두께 10 mil 을 갖는 Duroid 5880이다. 설계 주파수는 10 GHz로 하였으며, 빔 형성을 확인하기 위하여 급전 구조의 출력부에 패치 안테나를 동시에 설계하였다. 90° 하이브리드는 입력 포트 방향으로 고립되며, 2개의 출력 포트로는 동일한 크기를 가지며 위상이 90° 차이가 나는 브랜치 라인 커플러(branch-line coupler)를 사용하였다<sup>[5]</sup>. 크로스오버는 50옴 선로를 이용하여 사다리 모양으로 파장/4의 간격으로 배열한 구조를 사용하였다<sup>[6]</sup>. 90° 지연선은 급전 선로 설계시 브랜치 라인 커플러의 출력 부분의 길이를 다르게 하여 위상 지연의 효과를 얻었다. 실제 설계된 안테나의 layout은 그림 4에 도시하였다. 마이크로스트립 패치 안테나는 급전부 매칭시 선폭이 너무 얇아지는 것을 고려하여 inset 급전을 사용하였다. 안테나간의 간격은 공기 중에서 반파장에 해당하는 15 mm로 하였다. 급전 선로 설계시 위상 특성이나 급전 선로에서 반사 특성을 좋게 하기 위하여 각 포트에서 여기되는 신호가 출력 포트로 갈 때 선로에서 꺾이는 횟수를 모두 동일하게 하였다. 제작한 마이크로스트립

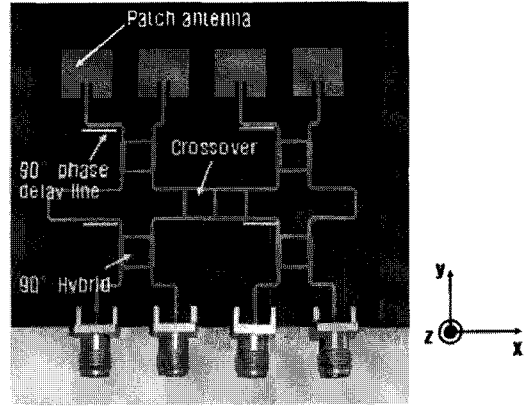


그림 4. 제작된 Hadamard 행렬 급전 구조를 사용한 마이크로스트립 배열 안테나

Fig. 4. Fabricated a microstrip array antenna including the Hadamard matrix feed network for the 10 GHz, where the antenna elements is spaced by 0.5λ and its length is 9.7 mm and its width is 10 mm.

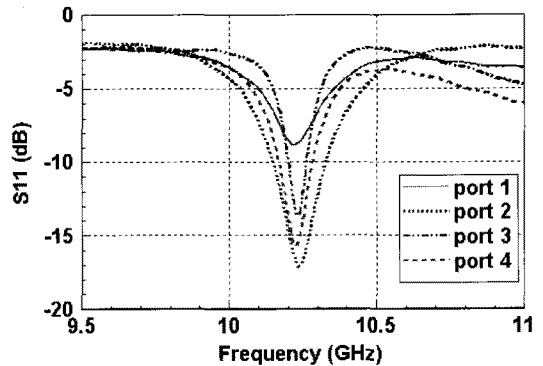


그림 5. 각 입력 포트에 따라 측정된 S<sub>11</sub>  
Fig. 5. Measured S<sub>11</sub> of the fabricated array antenna at the four input ports.

배열 안테나를 바탕으로 하여 안테나의 반사 특성을 측정하였다. 안테나의 각 포트별로 측정된 S<sub>11</sub>은 그림 5에 도시하였다. 각 포트별 S<sub>11</sub> 측정시, 측정 외에 사용된 입력 포트는 포트에서의 반사를 최소화하기 위하여 모두 50옴으로 연결하였다. 그림을 보면 안테나의 공진이 10.23 GHz에서 일어나며 전형적인 마이크로스트립 패치 안테나의 협대역 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

배열 안테나의 방사 특성은 그림 6에 도시하였다. 방사 패턴은 x-z평면에 대해서 시뮬레이션과 측정을

면 전류에 의한 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 두 개의 빔을 형성하고 두 빔 사이의 각도를 조절할 수 있는 새로운 급전 구조를 제시하였다. 각 배열 안테나에 여기되는 신호는 Hadamard 행렬의 행의 원소에 따르며, 이를 구현하기 위하여 90° 하이브리드 4개와 하나의 크로스오버를 사용한 급전 구조를 설계하였다. 마이크로스트립 선로를 이용하여 급전 구조를 설계하였으며, 각 포트에 따른 빔 형성을 검증하기 위하여 4개의 패치 안테나를 급전 구조 출력 부분에 연결하였다. 급전 구조를 포함한 배열 안테나를 제작하였으며, 방사 패턴 측정을 통하여 Hadamard 행렬 급전 구조의 타당성을 검증하였다. 측정된 배열 안테나의 주 빔은 입력 포트에 따라서 0°, ±15°, ±33°, ±45°에서 형성이 되었다.

급전 구조의 대역폭을 넓히기 위해서 광대역 90° 하이브리드와 크로스오버를 사용할 수 있으며, 적층 구조의 마이크로스트립 패치 안테나를 사용할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory 3rd Ed.*, Wiley, 2005.
- [2] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook 2nd Ed.*, Artech House, 2005.
- [3] J. Butler, R. Lowe, "Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas", *Electron. Des.*, vol. 9, pp. 170-173, Apr. 1961.
- [4] M. A. Hiranandani, A. A. Kishk, "Widening Butler matrix bandwidth within the X-band", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4A, pp. 321-324, Jul. 2005.
- [5] David M. Pozar, *Microwave Engineering 3<sup>rd</sup> Ed.*, Wiley, 2005.
- [6] J. Reed, G. J. Wheeler, "A method of analysis of symmetrical four-port networks", *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 4, no. 4, pp. 246-252, Oct. 1956.

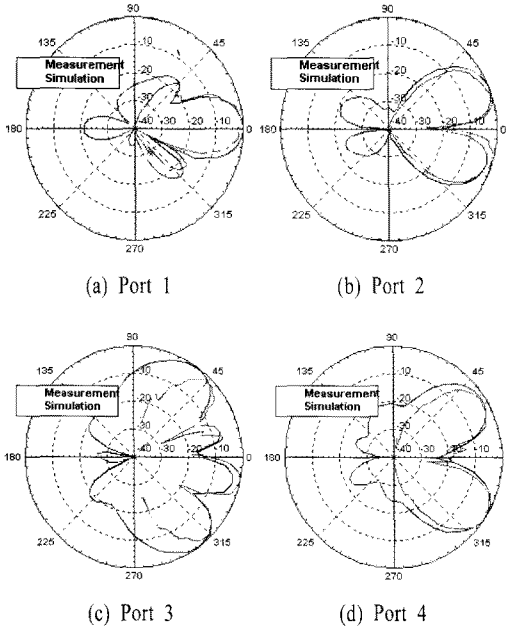
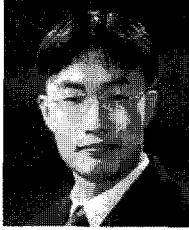


그림 6. 각 입력 포트에 따라 측정된 주 편파 방사 패턴

Fig. 6. Simulated and measured radiation patterns of the fabricated array antenna in the H-plane(x-z plane) at the four input ports.

하였으며, 시뮬레이션은 CST 2006b를 사용하였고, 측정은 z 축을 기준으로 하여 ±60°까지 하였다. 포트 1에 신호가 여기되었을 때는 안테나의 수직한 방향으로 주 빔이 하나만 형성이 되며, 나머지 포트에 신호를 여기하면 두 개의 빔이 형성되고 입력 포트에 따라 두 빔 사이의 각도가 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 주 빔은 포트에 따라서 0°, ±15°, ±33°, ±45°에서 형성이 된다. 시뮬레이션과 측정은 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 그림 6에서 측정된 결과를 보면 포트 3에 신호를 인가하였을 때 부엽이 가장 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 배열 안테나의 빔 패턴을 합성하였을 때 0도 주변에 부엽이 있기 때문에 생긴 것이며, 패치 안테나의 경우 브로드 사이드 방향으로 주 빔이 형성되기 때문에 배열 합성과 안테나 패턴 합성을 하면 0도 주변의 부엽의 영향이 커져 방사 패턴이 일그러진 것이다. 그 밖에 안테나의 패턴이 일그러지는 원인은 급전 구조에서의 낮은 유전율에 의한 방사가 생기거나, 유전체의 표

김 재 희



2004년 8월: 고려대학교 전기전자  
전파공학부 (공학사)  
2005년 3월~현재: 포항공과대학교  
전자전기공학과 석·박사 통합과  
정  
[주 관심분야] 밀리미터파 빔 형성  
안테나, 소형안테나, Metamaterials

박 위 상



1974년 2월: 서울대학교 전자공학  
과 (공학사)  
1982년 6월: University of Wisconsin  
Madison 전자공학과 (공학석사)  
1986년 8월: University of Wisconsin  
Madison 전자공학과 (공학박사)  
1976년 7월~1978년 11월: 삼성전자  
공업주식회사  
1984년 1월~1986년 8월: University of Wisconsin-Madison,  
TA 및 RA  
1986년 8월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수  
[주 관심분야] Design of Microstrip Antennas, Full-Wave  
Analysis of Microstrip Structures, Design of Passive Micro-  
strip Devices by Network Modeling, Measurement and  
Simulation of EMI/EMC for Cellular Phones

조 규 영



2008년 2월: 경북대학교 전자전기  
컴퓨터학부 (공학사)  
2008년 2월~현재: 포항공과대학교  
전자전기공학과 석사과정  
[주 관심분야] 마이크로스트립 안  
테나, UTP 케이블의 누화특성 해  
석, 무선 전력전송