

무한파장 전파특성을 갖는 CRLH 전송선로 전력 분배기를 이용한 마이크로스트립 패치 배열 안테나의 설계

김 준 형*, 이 홍 민**

Design of a Micro-strip Patch Array Antenna using CRLH Transmission Line Power Divider Supporting Infinite Wavelength

Jung-hyung Kim*, Hong-min Lee**

요 약

본 논문에서는 무한 파장 특성을 나타내는 CRLH 전송선로 구조의 전력분배기를 사용한 3×2 소자의 마이크로스트립 패치 배열 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나의 단위 셀은 인터디지트 형태의 직렬 커패시터와 접지면과 비아를 통하여 연결되어진 미앤더 선로 형태의 병렬 인덕터로 구성되었다. 6개의 포트를 갖으며 총 19개의 셀들로 구성되어진 메타 전송선로 형태의 전력 분배기는 무한파장 특성을 나타내는 주파수에서 각 포트 당 최대 0.73 dB의 진폭의 차이 및 0.52° 의 위상 차이를 나타내었다. 제작된 안테나의 성능을 측정된 결과 중심주파수 2.09 GHz에서 10.98 dBi의 높은 이득을 나타내었다.

ABSTRACT

In this paper, an equally spaced 3×2 microstrip patch array antenna based on the fundamental infinite wavelength supported by the composite right/left-handed (CRLH) transmission line (TL) is proposed. The proposed CRLH TL unit cell consists of an inter-digit capacitor to realize left-handed (LH) series capacitance and non-symmetric shunt meander line with a shorted via to realize LH shunt inductance. At the infinite wavelength frequency of 2.09 GHz a 6-port series power divider consisting of a 19 unit cells shows a maximum magnitude difference of 0.73 dB and a 0.52° maximum phase difference between output ports. The measured resonant frequency and maximum gain of the fabricated array antenna is 2.09 GHz and 10.98 dBi, respectively.

Key Word : CRLH, Infinite wavelength, Power divider, Array antenna, maximum gain

* 경기대학교 전자공학과 석사과정 (junchyong@kyonggi.ac.kr)

** 교신저자 경기대학교 전자공학과 (hmlee@kyonggi.ac.kr)

접수일자 : 2010년 5월 10일, 수정일자 : 2010년 5월 25일, 심사완료일자 : 2010년 6월 11일

I. 서론

마이크로스트립 배열안테나 응용을 위한 안테나 전력분배기 설계에 있어서 주된 관심사는 배열안테나의 크기이다. 일반적으로 주 빔을 브로드사이드한 방향에 나타내기 위하여 안테나들을 등간격으로 배열하여야 하므로 전체 배열안테나의 크기가 증가하게 된다. 동일한 크기의 전력을 방사시키는 안테나 소자들을 등간격으로 배열하기 위하여 하여 기존의 방법에서는 직렬 또는 병렬형 급전선로가 사용되어져 왔다[1]. 이러한 방법들은 각 안테나 소자 사이의 간격이 반파장 길이이고 각 안테나 사이의 위상차가 동위상으로 설계 되어져야 하므로 안테나의 소자수가 증가될수록 전체 안테나의 크기가 증가하게 된다. 특히 기본적으로 세계의 포트 구조를 갖는 병렬형 급전을 사용하는 경우에 사용되는 전력분배기 회로는 직렬형 급전회로에 비하여 그 크기가 증가하게 되며, 임피던스 정합을 위한 분배기 설계가 필수적이다[2]. 이에 반하여 직렬형 전력분배기의 경우에는 사용하는 소자 수의 증가에 따라서 병렬형 급전의 경우보다 더욱 더 분배기 회로의 크기가 증가하게 된다. CRLH 전송선로를 사용한 배열 안테나의 직렬형 전력분배기는 Itoh 그룹에 의하여 처음으로 제시되었다[3-4]. 이러한 분배기 구조를 사용하면 무한 파장 특성을 나타내는 주파수에서 선로 상의 위상의 모두 동위상이 되므로 이러한 특성을 이용하면 초고주파 공진기, 분배기 등의 소자의 구현이 가능하다[5]. 또한 선로의 임의의 위치에 안테나 소자들을 위치시킬 수 있으며 안테나의 크기는 공진특성과 무관하므로 배열안테나의 크기를 줄일 수 있다[6]. 그러나 실제로 이러한 전력분배기 선로 상에 마이크로스트립 패치 안테나 등을 접속시키면 설계에 있어서 안테나 소자들을 이들에 로딩 효과에 의하여 안테나의 입력임피던스가 변화하게 되므로 적절한 정합 구조의 설계가 매우 중요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 무한파장 특성을 나타내는 CRLH 전송선로 상에 3×2 소자의 마이크로스트립 패치 안테나와 효과적으로 정합시켜 배열안테나의 크기를 소형화시키는 동시에 전체 안테나의 이득을 증가시키는 구조를 구현하고자한다. 안테나 설계에는 Ansoft Designer와 CST MWS가 사용되어졌다[7].

II. 무한파장 CRLH 전송선로의 설계

이상적인 LH 전송선로는 실제적으로는 구현할 수 없으므로 자연히 RH 선로 특성이 포함되어지게 되어져 CRLH 메타 전송선로 형태가 된다. 그림 1에 제안된 CRLH 전송선로 단위 셀 구조 및 등가회로를 나타내었다. 이 CRLH 전송선로는 NH9348(비 유전율 = 3.48, 두께 = 1.524 mm)를 사용하여 설계 되었다. 평행회로의 경우에 이 CRLH 전송선로의 천이주파수 ω_0 는 다음과 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt[4]{L_R C_R L_L C_L}} = \sqrt{\omega_R \omega_L} = \sqrt{\omega_{se} \omega_{sh}}, \quad (1)$$

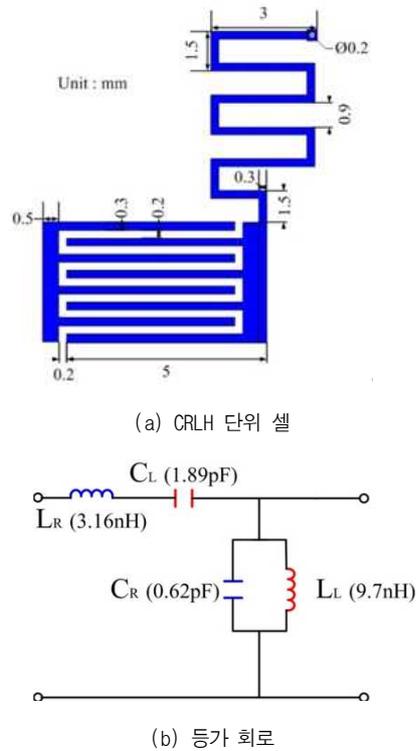


그림 1. CRLH 전송선로 단위셀 및 등가회로
Fig. 1. CRLH TL unit cell and equivalent circuit

여기서, $\omega_{se} = 1/(C_L L_R)^{1/2} = \omega_{sh} = 1/(C_R L_L)^{1/2}$,

$$\omega_R = 1/(C_R L_R)^{1/2}, \quad \omega_L = 1/(C_L L_L)^{1/2} \text{ 이다.}$$

이러한 CRLH 단위 셀들이 무한개 연결되어졌을 경우에 선로의 입력 임피던스 Z_{in} 은 다음과 같다.

$$Z_{in} \approx \sqrt{L_R / C_R} = \sqrt{L_L / C_L} \quad (2)$$

그림 1(b)에 나타난 단위 셀 구조의 파라미터 L_R, C_L, L_L, C_R 에 대한 실제 구현은 분산소자의 구조에 근거하여 도출되어진 경험적인 수식들 사용하여 이루어졌다[8]. 주기경계 조건을 적용하면 CRLH 전송선로에 대한 분산 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\beta d = \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{\omega_R^2} - \left(\frac{\omega_{sh}^2}{\omega_R^2} + \frac{\omega_{se}^2}{\omega_R^2} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

위 식(3)을 사용하여 제안된 CRLH 전송선로에 대한 분산 곡선을 그림 3에 나타내었다. 2.05 GHz를 중심으로 LH ($\beta < 0$) 통과대역과 RH ($\beta > 0$) 통과대역 특성이 나타났다. LH 차단 주파수 (f_{cL})는 0.5 GHz, RH 차단 주파수 (f_{cR})는 8.81 GHz이며 천이 주파수는 2.05 GHz이다. 평형 CRLH 전송선로는 무한파장 특성을 나타내는 주파수($\beta = 0$)는 천이주파수인 2.05 GHz이다.

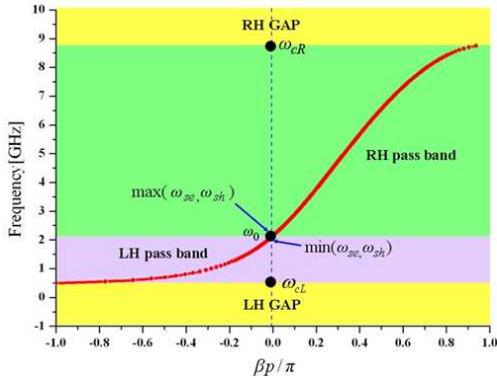


그림 2. CRLH 전송선로의 분산 곡선
Fig. 2. Dispersion diagram of a CRLH TL unit cell

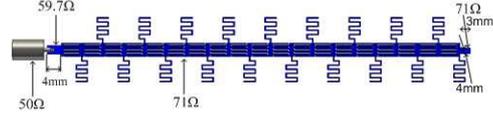
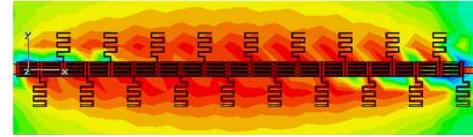
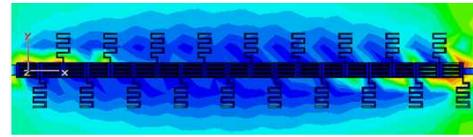


그림 3. 19개의 단위 셀들로 구성된 CRLH 전송선로
Fig. 3. CRLH TL unit cell with 19 unit cells



(a) 0°

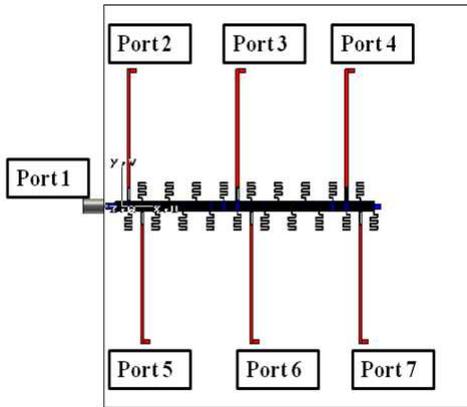


(b) 180°

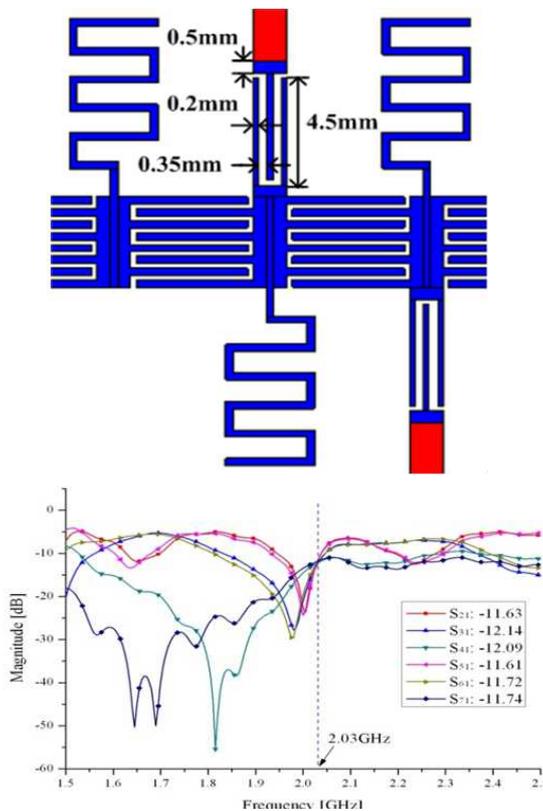
그림 4. 전계 분포 (2.05 GHz)
Fig. 4. E-field distribution (2.05 GHz)

배열 안테나의 급전선로로 사용하기 위하여 19개의 단위 셀들로 구성되어진 평형 CRLH 전송선로의 구조를 그림 4에 나타내었다. CRLH 전송선로의 영차 공진모드는 선로의 종단을 단락 또는 개방시키면 가능하며, 설계에서는 단락 비아를 사용하였다. 제안된 선로에 대한 전계분포를 그림 4에 나타내었다. 무한파장 특성을 나타내는 천이 주파수인 2.05 GHz에서 전체 선로 상의 전계분포가 일정하게 나타남을 확인 하였다. 따라서 이 주파수에서 선로 상의 모든 점은 동위상으로 나타나므로 이러한 선로를 안테나 위의 전력 분배기로 사용할 경우에 안테나의 위치를 선로 상의 임의의 점에 위치시킬 수 있으므로 안테나 사이의 간격을 줄일 수 있다. 이는 일반적인 전송선로의 경우에는 두 안테나 사이에 공급되는 전력의 위상을 동일하게 취하기 위하여 두 안테나 사이 간격을 반 파장으로 배치하여야 하는데 비하여, 다수의 안테나를 배열시키는 경우에 이 들 안테나 사이의 간격을 반파장 이하로 배치시킬 수 있으므로 전체

배열 안테나의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다.



(a) 6개의 방사 포트를 갖는 CRLH 선로



(b) 급전 포트의 결합도

그림 5. 6개의 방사 포트를 갖는 CRLH 전송선로

Fig. 5. CRLH TL with six radiating port

6개의 방사 포트를 갖는 CRLH 전송선로의 그림을 그림 5에 나타내었다. 포트 1은 입력포트이며 포트 2에서 포트 7까지의 6개의 포트는 안테나 배열을 위한 접속포트이다. 각각의 포트는 인터디지트 형태의 구조를 사용하여 이 들 포트들에 접속되어질 마이크로스트립 패치 안테나와 용량성 결합 시키었다. 출력 포트의 급전선 폭은 CRLH 전송선로의 특성임피던스($\approx 71\Omega$)하도록 결정하였으며 마이크로스트립 패치안테나의 급전선 길이는 무한 파장 특성을 지니도록 최적화 설계 하였다.

연구에서 설계된 inset 급전형 단일 마이크로스트립 패치 안테나의 크기는 $37.8\text{ mm} \times 37.8\text{ mm}$ 이며 인접되어진 두 안테나 사이의 간격은 기존의 선형 패치 배열안테나의 경우에 반 파장 길이를 사용하는 것과는 다르게 $10.2\text{ mm} (\approx \lambda_g/8)$ 로 최적화하였다. 설계 파라미터의 최적화 결과 CRLH 전송선로 상에 설계되어진 3×2 소자의 마이크로스트립 패치 안테나의 전체 크기는 $162\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 이며 설계된 안테나의 구조를 그림 6에 나타내었다.

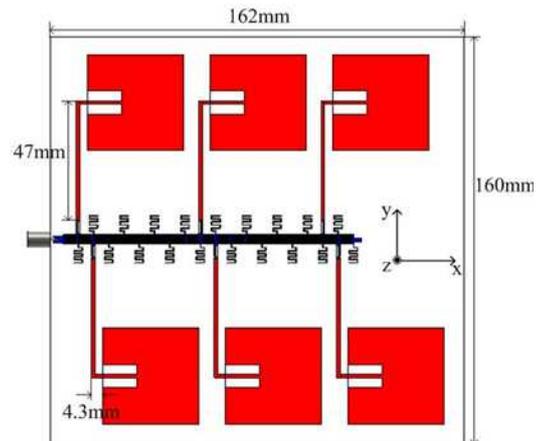
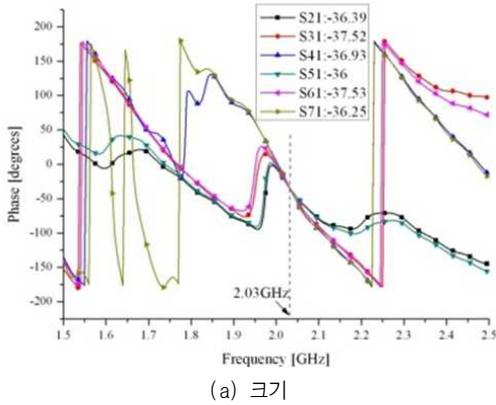
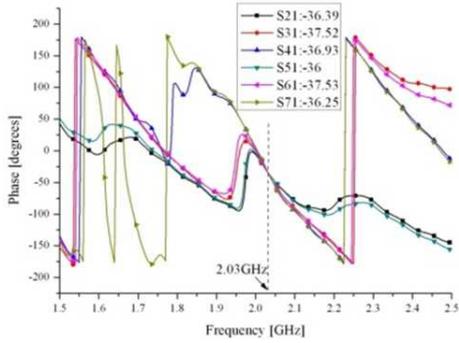


그림 6. 3×2 마이크로스트립 패치배열 안테나

Fig. 6. 3 by 2 microstrip patch array antenna



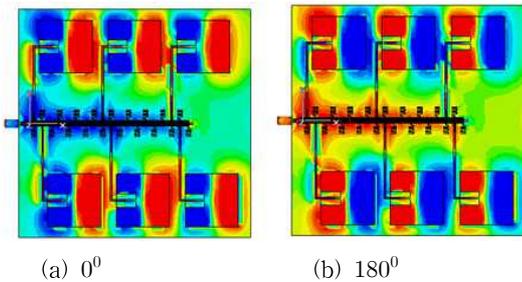
(a) 크기



(b) 위상

그림 7. 모의실험된 출력 포트 응답 특성
Fig. 7. Simulated out port response

각각의 포트들에 대한 전력 레벨의 크기는 거의 동일하였으며 ($|S_{21}| = -11.63$ dB, $|S_{31}| = -12.14$ dB, $|S_{41}| = -12.09$ dB, $|S_{51}| = -11.61$ dB, $|S_{61}| = -11.72$ dB, $|S_{71}| = -11.74$ dB), 이 들 포트들의 위상도 거의 동일하게 나타났다 ($S_{21} = -36.39^\circ$, $S_{31} = -37.52^\circ$, $S_{41} = -36.93^\circ$, $S_{51} = -36^\circ$, $S_{61} = -37.53^\circ$, $S_{71} = -36.25^\circ$). 주파수 2.05 GHz에서 무한파장 특성을 나타내는 CRLH 전송선로의 각 포트들에 6개의 inset 급전형 단일 마이크로스트립 패치 안테나들을 접속시키면 안테나들의 로딩 효과에 의하여 무한파장 특성을 나타내는 주파수가 2.03 GHz로 변화되는 특성을 보였다. 실제로 안테나 들이 무한파장 특성을 나타내는 CRLH 전송선로에 접속되어진 경우에 이러한 선로가 동일한 위상의 직렬 전력 분배기로 동작하는지의 여부를 확인하기 위하여 안테나 도체 상의 전계를 모의 실험한 결과를 그림 8에 나타내었다. CRLH 전송선로 상의 전계 분포는 동일하게 나타났으며 패치안테나 도체상의 전계는 안테나가 기본 패치동작 모드로 동작하고 있으며 직선편파 형태로 방사하고 있음을 보여주고 있어서 설계의 타당성을 입증하고 있다.



(a) 0°

(b) 180°

그림 8. 전계 분포
Fig. 8. E-field distribution

그림 6에 나타난 3×2 마이크로스트립 패치 배열 안테나에 대한 모의실험 결과 각각의 안테나 포트 (포트 2 - 포트 7) 들에 대한 전력의 크기와 위상값들을 그림 7에 나타내었다. 주파수 2.03 GHz에서

III. 안테나 제작 및 특성 측정

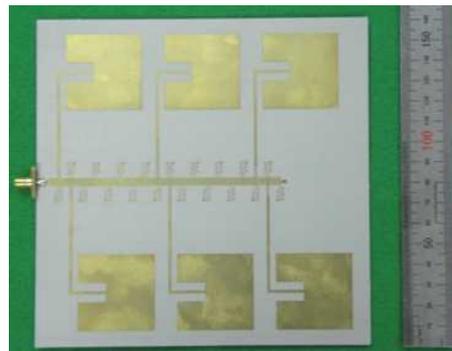


그림 9. 제작된 안테나 사진
Fig. 9. Photograph of the fabricated antenna

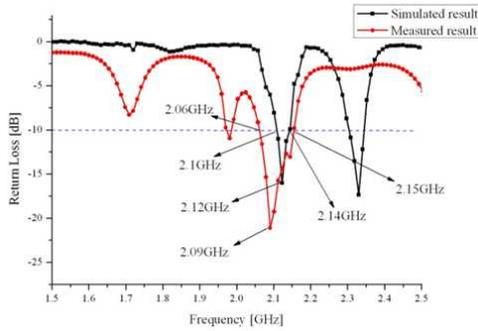
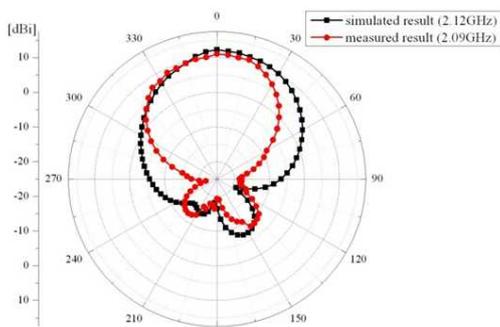
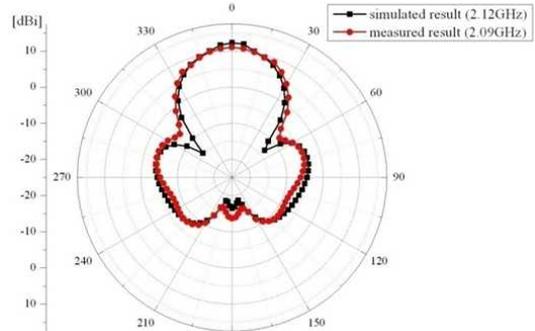


그림 10. 모의실험 및 측정된 반사손실 값의 비교
 Fig. 10. Comparison of the simulated and measurement return loss

그림 9에 NH9348(비 유전율 = 3.48, 두께 = 1.524 mm) 기판을 사용하여 인쇄 기판회로 방법으로 제작된 안테나의 사진을 나타내었다. 제작된 안테나의 반사손실에 대한 모의실험 값들과 측정값에 대한 비교를 그림 10에 나타내었다. 측정되어진 안테나의 공진 주파수는 모의실험 값보다 다소 상향되어졌으며 주파수 2.09 GHz를 중심으로 90 MHz의 임피던스 대역폭($SWR \leq 2$)을 나타내고 있다. 그림 11에 제작된 안테나의 방사패턴을 모의 실험된 값들과 비교하여 나타내었다. 제작된 안테나는 브로드사이드한 방사패턴을 나타내고 있었으며 측정되어진 안테나의 최대이득과 효율은 각각 10.98 dBi 와 69.5%이다. 단일 패치안테나의 이득이 약 6 dBi 인 점을 감안하면 안테나 배열에 의하여 약 5 dBi의 이득 향상을 보였다.



(a) x-y 평면



(b) y-z 평면

그림 11 안테나의 방사패턴
 Fig. 11 Radiation pattern of the antenna

IV. 결론

본 논문에서는 전파상수 β 가 0의 값을 갖는 무한 과장 특성을 사용하여 CRLH 전송선로 직렬형 전력 분배기를 설계한 후에 추가적인 6개의 마이크로스트립 패치배열안테나를 부설하여 높은 이득을 나타내며 브로드사이드한 빔 특성을 나타내는 안테나를 설계 하였다. 설계 되어진 각각의 출력 포트 사이의 전력의 크기와 위상은 무한 과장을 나타내는 주파수에서 거의 동일하게 나타났다. 인접한 안테나 사이의 배열 간격을 $10.2 \text{ mm} (\approx \lambda_g/8)$ 로 감소시키어 전체 안테나의 접지면 크기가 $162 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 로서 소형화 설계되었으며 각각의 안테나 포트는 인터디지트 형태의 용량성 결합 구조를 사용하여 마이크로스트립 패치 안테나와 CRLH 선로를 효과적으로 정합시켰었다. 이러한 구조를 사용하면 마이크로스트립 배열안테나의 크기를 줄일 수 있으므로 무선통신용 안테나의 소형화 및 고 이득 평면형 안테나의 구현이 가능하다.

참고문헌

[1] W. L. Stutzman and G.A. Thiele, Antenna Theory and Design, 2nd ed. New York: Wiley, 1998.

