밀리미터파 대역 응용을 위한 직렬 급전 마이크로스트립 배열 안테나 설계

Series-Fed Microstrip Array Antenna for Millimeter-Wave Applications

김 진 혁 · 황 금 철 · 신 재 호

Jin-Hyuk Kim · Keum-Cheol Hwang · Jae-Ho Shin

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역 응용을 위해 직렬 급전 마이크로스트립 배열 안테나를 이용하여 합 및 차 패턴을 구현하였으며, 안테나는 첨예한 빔 패턴을 가지면서도 부엽 레벨(SLL)이 -20 dB가 되도록 설계 및 제작하였다. 등간격의 직렬 급전 배열 안테나를 전송 선로 등가 회로 모델로 해석하였으며, Taylor 및 Bayliss 분포를 적용하여 합/차 패턴을 생성할 수 있는 급전 여기 전류 분포를 구하였다. 또한, 패치를 잇는 연결선의 길이를 적절히 조절하여 최적화된 복사 패턴을 구현하였다. 35 GHz 밀리미터파 대역에서 시뮬레이션 및 실험 결과를 서로 비교함으로써 설계한 안테나의 타당성을 입증하였다.

Abstract

In this paper, design of series-fed microstrip antennas with sum and difference patterns is presented for millimeter-wave applications. The antenna was designed to exhibit high-gain and low side-lobe level(SLL) below -20 dB. A conventional transmission-line model, Taylor and Bayliss distributions were employed to determine current distribution for sum and difference patterns. Moreover, connecting lines between microstrip patches were tuned to achieve an optimized design. The measurement was also performed to validate the designed antennas.

Key words : Series-Fed Microstrip Array, Sum Pattern, Difference Pattern, Millimeter-Wave

I. 서 론

밀리미터파 응용 기술은 고해상도 의료 이미징 획득, 혁신적인 보안 장치, 원격 환경 모니터링, 위성 데이터 링크와 원격 탐사 등의 응용 분야가 해마다 발전함에 따라 중요한 역할을 하고 있다. 또한, 파장이 작은 밀리미터파 기술은 한정된 공간의 안테나 하우징에 많은 배열 소자를 집적해야 하는 배열 안테나 설계의 어려움을 해결할 수 있는 중요한 기반 기술로 연구되고 있다. 직렬 급전 패치 배열 안테

나는 통신 분야 및 레이더 센서 안테나로서 널리 사용되어 왔다. 마이크로스트립 안테나는 기본적으로 접지 면이 있는 단일 유전체 기판 상에 인쇄된 방사 소자로 구성되어 있으며, 방사 소자의 가장자리에 마이크로스트립 급전 선로를 연결하거나, 기판의 뒷면에 동축 선로를 연결하여 안테나를 급전시키는 구조로 되어 있다. 단일 복사 소자를 이용하여 특정 빔 패턴을 갖는 고이득 안테나를 구현하기 위해서는 각 배열 소자에 공급되는 전류의 크기와 위상, 그리고 소자 간의 간격과 소자 수를 조절함으로써 실현 가

「이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임 (No. 2011-0009815).
동국대학교 전자전기공학부(Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University)

· 논 문 번 호 : 2011023-123

· 교 신 저 자 : 황금철(e-mail : kchwang@dongguk.edu)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 30일

능하다. 마이크로스트립 배열 안테나를 구성하는 경우, 병렬 급전 방식보다는 급전선의 구조가 간단한 직렬 급전 방식을 택할 수 있다. 이러한 직렬 급전 배열 구조는 급전 길이를 최소화할 수 있어, 안테나의 효율을 저감시키는 급전선에 의한 손실과 누설 복사를 줄일 수 있는 장점이 있다^[1]. 또한, 배열 소자 간의 커플링을 줄일 수 있어 배열 소자 각각의 전류 분포를 비교적 정확히 예측할 수 있다. 본 논문에서는 링 하이브리드를 적용하지 않고 밀리미터파 대역에서 합/차 패턴을 갖는 직렬 급전 마이크로스트립 배열 안테나를 설계하였다.

II. 전송 선로 모델과 배열 안테나 구조

마이크로스트립 안테나의 해석 방법은 전송 선로 모델, cavity 모델, full-wave 해석, Green 함수 해석 등을 예로 들 수 있다. 이 중 전송 선로 모델(TLM)은 full-wave 해석 방법에 비해 계산량이 적고 간단한 식으로 표현할 수 있는 장점이 있으며, 비교적 정확한 결과를 제공한다^[2].

N 개의 마이크로스트립 패치를 가지는 직렬 급전의 안테나를 그림 1(a)에 보였다. 여기서 W_p 은 p -번째

패치에 폭에 해당하는 길이로 방사 효율이 최대가 되도록 다음 실험식에 의해서 구할 수 있다^[3].

$$W_p = \frac{c_0}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

패치의 길이 L 은 실효 유전율 ϵ_e 에 따라 $\lambda_g/2$ 의 길이를 가지지만, 구형의 마이크로스트립 패치의 양 끝단에 각각의 방사 슬롯이 존재하며, 패치는 유한한 폭과 길이를 가지기 때문에 fringe effect를 고려하여 특정 공진 주파수를 가지는 실제 길이 $L = \lambda_g/2 - 2\Delta L$ 를 얻을 수 있다^[4].

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.300)}{(\epsilon_e - 0.258)} \frac{(W/h + 0.264)}{(W/h + 0.8)} \quad (2)$$

여기서 p -번째 패치의 양 끝단에 슬롯으로부터 발생되는 방사 컨덕턴스 G_p 는 패치의 폭 W_p 과 자유 공간에서의 파장 λ_0 로부터 다음 적분식으로 구할 수 있다^[2].

$$G_p = \frac{1}{\eta_0 \pi} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi W_p}{\lambda_0} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta = \frac{I_p}{120\pi^2} \quad (3)$$

$$I_p = -2 + \cos(X) + X \text{Si}(X) + \frac{\sin(X)}{X}, \quad X = k_0 W_p \quad (4)$$

그림 1(b)는 그림 1(a)의 등가 전송 선로 모델로, n -번째 슬롯에서의 전압과 전류는 V_n , I_n 으로 둘 수 있었으며, 다음과 같이 ABCD matrix로부터 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -j \frac{\sin\theta_n}{Y_n} \\ -j Y_n \sin\theta_n & \cos\theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -G_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Y_0 는 50-Ω을 가지는 마이크로스트립 선로의 characteristic admittance이며, V_1 을 초기값 1로 두면 $I_1 = V_1 Y_0$ 에서 I_1 의 값을 구할 수 있다. $\theta_n = \beta_n L_n$ 는 n -번째 슬롯과 $(n+1)$ -번째 슬롯 사이의 위상 길이를 나타낸다. p -번째 패치에 여기되는 가중치 함수를 $a_p = A_p e^{j\phi_p}$ 로 두면, p -번째 패치의 방사 컨덕턴스는 다음과 같다.

$$G_p = Y_p a_p^2 / |V_n|^2 \quad (6)$$

(a) N 개의 마이크로스트립 배열 안테나
(a) Microstrip array antenna with N -elements

(b) 전송 선로 등가 회로 모델
(b) Transmission-line equivalent circuit

그림 1. N 개의 마이크로스트립 배열 안테나와 전송 선로 등가 회로 모델

Fig. 1. Microstrip array antenna with N -elements and its equivalent circuit.

여기서 슬롯 간 위상 길이를 모두 $\theta_n=180^\circ$ 로 두면 $|V_n|=1$ 이 된다. 따라서 원하는 패턴을 위한 가중치 진폭 a_p 이 결정되면, 식 (3)과 식 (6)을 동시에 만족하는 패치 폭 W_p 를 결정할 수 있다.

III. 합(Sum) 및 차(Difference) 패턴 생성

합 패턴 부엽의 크기를 조절할 수 있는 선 전류 분포는 Taylor에 의해서 도입되었다. Taylor 선 전류 분포는 낮은 부엽 레벨을 갖는 대신 안테나 이득이 저하되는 단점이 있으나, 본 논문에서는 낮은 부엽 레벨을 구현하는 것이 목적이므로 Taylor one-parameter distribution을 이용하여 -20 dB의 SLL(Side-Lobe Level) 가지는 대칭의 전류 분포를 적용하였다^[5]. 식 (1)로부터 계산된 패치 폭을 기준 폭 W_7 으로 정하고, W_7 의 어드미턴스 Y_7 과 식 (3)의 G_7 을 이용하여 가중치 a_7 을 구할 수 있다. a_7 을 제외한 나머지 가중치들은 상대적인 비를 고려하여 얻을 수 있다. 도출된 각각의 패치에 가중치들을 적용하여 식 (7)의 오차 함수를 최소화 시키는 p -번째 패치 폭 W_p 을 도출할 수 있다.

$$G_p - Y_p a_p^2 = 0 \quad (7)$$

이를 표 1에 보였으며, 그림 2는 도출된 패치 폭을 적용하여 설계된 안테나를 보였다. 안테나를 중심으로 좌우의 패치가 대칭이므로, $p=8$ 이후의 패치 파라미터는 별도로 나타내지 않았다. 또한, 각각의 패치를 잇는 연결선이 복사 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위해 $120\text{-}\Omega$ 의 임피던스를 갖도록 설계하였다. 여기서 연결선의 길이를 미세 조정함으로써 각각의 패치에 동위상으로 급전되도록 하였다.

목표물의 위치를 정확히 추적하기 위해 차 패턴의 주 빔은 첨예한 빔 패턴과 함께, 주 빔의 중앙에

표 1. 최종 설계 파라미터

Table 1. Designed parameters of the antenna.

	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$	$p=5$	$p=6$	$p=7$
W_p (mm)	0.675	1.103	1.622	2.194	2.756	3.220	3.488
L_p (mm)	2.870	2.791	2.733	2.690	2.660	2.641	2.631

그림 2. 설계된 합 패턴 배열 안테나 형상
Fig. 2. Designed array antenna with sum pattern.

표 2. 최종 설계 파라미터

Table 2. Designed parameters of the antenna.

	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$	$p=5$	$p=6$	$p=7$
W_p (mm)	1.494	1.801	2.602	3.303	2.951	1.661	0.401
L_p (mm)	2.547	2.548	2.499	2.470	2.484	2.559	2.776

그림 3. 설계된 차 패턴 배열 안테나
Fig. 3. Designed array antenna with difference pattern.

null을 갖는다. Bayliss distribution을 이용한 선 전류 분포는 배열 중심을 기준으로 좌/우 배열간 180° 의 위상차를 가지는 전류 분포를 얻을 수 있다^[6]. 본 설계에서는 $\bar{n}=3$ 을 적용하여, 부엽 레벨 -20 dB 이하를 차 패턴 설계 목표로 하였으며, 앞 절과 동일한 방법으로 도출된 설계 결과를 표 2에 나타내었다. 합 패턴 배열 설계와 동일하게 연결선의 길이를 미세 조정하여 패치에 급전되는 위상을 조절하였다. 그림 3은 최종 설계된 파라미터를 적용한 안테나 형상을 보여주고 있다.

IV. 측정 결과

앞 장에서 설명한 바와 같이 그림 4는 합 패턴을, 그림 5는 차 패턴을 구현하기 위해 설계된 안테나의 사진과 측정된 반사 손실을 보여주고 있다. 제작된 안테나는 Taconic TLY-5 기판($\epsilon_r=2.2$, $h=0.51$ mm)을 사용하였다. 2.4 mm connector를 안테나에 고정하기 위해서 별도의 측정 기구를 제작하여 connector와 결합하였다. 제작된 안테나의 측정 결과는 설계 주파수의 10 dB 반사 손실 대역폭 내에서 Ansoft사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 6은 35 GHz에서 측정된 E-plane의 합 및 차 패턴 결과를 보여주고 있다. 복사 패턴은 근접

그림 4. 측정된 합 패턴 안테나 반사 손실과 제작된 사진

Fig. 4. Measured return loss and fabricated antenna for sum pattern.

그림 5. 측정된 차 패턴 안테나 반사 손실과 제작된 사진

Fig. 5. Measured return loss and fabricated antenna for difference pattern.

그림 6. 측정된 E-평면 합 및 차 패턴

Fig. 6. Measured sum and difference patterns in E-plane.

측정장에서 구형 도파관 프루브를 이용하여 측정하

였다.

합 패턴의 경우, 8.22° 의 빔 폭을 가지며, 이득은 15.32 dBi이다. 차 패턴의 경우, 안테나의 boresight 방향으로 -44.9 dB의 null이 발생하며, 이득은 동일한 개수의 패치를 갖는 합 패턴에 비해 4.63 dB 낮은 10.69 dBi를 보였다. 시뮬레이션 된 합/차 패턴의 이득은 각각 17.32 dBi, 15.48 dBi으로, 기관 및 커넥터 손실로 인해 측정 이득이 시뮬레이션 결과보다 다소 낮은 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 직렬 급전 마이크로스트립 배열 안테나를 사용하여, 합 및 차 패턴을 구현하였다. Taylor, Bayliss distribution을 적용하여 합 및 차 패턴을 생성할 수 있는 급전 여기 전류 분포를 구하였으며, 전송 선로 모델을 배열 안테나에 적용하여 패치 폭을 산출하였다. 또한, 연결선의 길이를 미세 조절함으로써 각각의 패치가 패턴 형성에 필요한 이상적인 급전 분포를 갖도록 설계하였다. 제안된 안테나는 측정 결과로부터 설계의 타당함을 입증하였고, 밀리미터파 대역 응용으로서도 적합함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 박익준, 정익수, "모노 펄스 레이더 센서용 직렬 급전 마이크로스트립 패치 배열 안테나 설계", 한국전자과학기술논문지, 21(11), pp. 1248-1258, 2010년 11월.
- [2] A. G. Derneryd, "Linearly polarized microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 24, no. 6, pp. 846-851, Nov. 1976.
- [3] I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Antennas*, Artech House, Dedham, MA, 1980.
- [4] E. O. Hammerstad, "Equations for microstrip circuit design", in *Proc. Fifth European Microwave Conf.*, Hamburg, Germany, pp. 268-272, Sep. 1975.
- [5] T. T. Taylor, "One parameter family of line-sources producing modified $\text{Sin}(\pi u)/\pi u$ patterns", Hughes Aircraft Co. Tech. Mem. 324, Culver City, Calif., Contract AF 19(604)-262-F-14, Sep. 1953.
- [6] E. T. Bayliss, "Design of monopulse antenna difference patterns with low sidelobes", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, pp. 623-650, May-Jun. 1968.