

역 L-형 급전구조를 갖는 광대역 마이크로 스트립 슬롯 안테나의
최적화 설계

장 용 응*, 신 호 섭**

* 극동정보대학 전자통신과, ** 충북대학교 정보통신과

Optimized Design of Wideband Microstrip Slot Antenna with
Reverse L-shaped Feedline

Yong-Woong Jang*, Ho-Sub Shin**

* Dept. of Electronics, Communication Eng., Keuckdong College

** Dept. of Computer and Communication Eng., Chungbuk Nat'l Univ.

국문 요약

T-모양의 급전구조를 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나는 정합을 쉽게 이룰 수 있고, 대역 폭이 기존의 슬롯을 가로지르는 급전구조에 비하여 넓었다^[1].

본 논문에서는 역 L-형 마이크로스트립 급전구조를 제안하여 FDTD(Finite Difference Time Domain) 법으로 해석하여 안테나를 최적화 설계하였다. 슬롯 폭이 16 mm일 때, 전압 정재파비가 2.0 이하인 조건에서 대역폭은 2.3 GHz를 중심으로 약 48 % 정도의 광 대역 특성을 얻었다. 제안된 급전구조는 기존의 슬롯을 가로지르는 급전구조의 복사 저항보다 매우 낮았다. 또한 역 L-형 급전구조의 대역폭 특성을 기존의 급전구조의 슬롯 안테나들과 비교하였다.

I. 서론

마이크로스트립 슬롯 안테나를 급전시키는 일반적인 방법은 마이크로스트립 급전 선로를 슬롯 중심에 수직하게 가로지르게 하는 급전 방식이었다^[2]. 그러나 이러한 구조는 매우 높은 방사저항을 갖기 때문에 슬롯의 공진 주파수에서 정합이 매우 어려워진다. 이러한 문제점을 보완한 구조가 T-모양의 마이크로스트립 급전선을 사용한 것인데, 방사 저항값을 현저히 줄이면서 슬롯폭이 증가하여도 그 값을 일정하게 유지할 수 있어 설계가 편리하게 된다^[1].

본 논문에서는 T-모양 급전구조보다 대역폭을 개선시키고, 슬롯 폭이 16 mm 이상에서도 대역폭이 비례적으로 증가시킬 수 있는 역 L-형 마이크로스트립 급전구조를 제안하였다. 역 L-형 마이크로스트립 급전구조는 방사저항 값을 줄이면서 슬롯 폭에 따라 대하여 별다른 정합 회로를 사용하지 않고 좋은 정합특성을 얻을 수 있고, 2중 공진이 발생하여 대역 폭을 더욱 확장시킬 수

있었다. 또한 제안된 안테나를 FDTD 법으로 해석하여 전체의 분포를 시간 영역에서 각각 계산하였고, 이를 Fourier 변환하여 반사손실, 입력 임피던스, 전압 정재파비를 주파수 영역에서 각각 계산하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 안테나와 기존의 급전구조를 갖는 안테나들의 특성들과 비교 및 분석하고자 한다.

II. FDTD 해석 이론

시간영역 유한 차분법은 전자기 산란문제를 해결하기 위한 방법으로서 1966년 Yee에 의하여 제시되었다. 이러한 유한 차분 근사식은 모든 증분에서 2차적인 절단 에러를 내포하고 있다. Yee의 표시에 따라 직각 격자에서 공간 점은 $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ 로 나타낼 수 있고, 시간 증분은 $t = n \Delta t$ 로 나타낼 수 있으며, 시간과 공간에 대한 임의의 함수로 나타낼 수 있다. 단위격자 상에 전기성분 E와 자기성분 H를 배치하고, E 성분과 H 성분을 반 시간스텝 간격으로 유한차분 방정식으로 나타낸다^{[3][4]}.

시·공간분할 알고리즘이 갖는 안정조건은 시간 간격

(Δt)과 공간 분할 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)에 대한 관계식에 의해서 결정된다. 시간 영역 유한차분법에 의한 마이크로스트립 안테나의 해석에 있어서 넓은 주파수 대역의 응답 특성을 얻기 위해서는 광대역 주파수 스펙트럼을 포함하는 Gaussian 펄스를 선택한다. 해석 대상에서 y 방향으로 진행하는 이상적인 Gaussian 펄스를 인가하였다^[3-4].

위의 관계식과 같이 공간에 대한 설정은 해의 안정성을 보장받기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1)$$

여기서, λ 는 적용 대상 주파수중 가장 높은 주파수의 파장이다. 즉, 가장 짧은 파장의 1/10 보다 작도록 선정한다.

마이크로스트립 안테나와 같은 구조는 전체, 자체 성분을 무한 경계영역까지 계산해야 하는 개방구조이다. 이와 같은 개방 구조에 대한 FDTD 해석은 컴퓨터 처리 속도와 기억용량의 한정 때문에 해석 대상영역을 제한하고, 제한영역에 구조와 동일하도록 흡수경계조건을 부여한 계산영역의 경계면에서, 전자파의 반사가 일어나지 않도록 한다. 마이크로스트립 안테나 구조의 해석에서 Mur의 흡수경계조건을 적용한다.

시간영역 유한차분법에 의해 계산된 시간영역에서의 계산 값은 Fourier 변환에 의한 주파수 영역의 응답을 구할 수 있다. 마이크로스트립 안테나의 산란 계수는 마이크로스트립 급전선로가 개방종단으로 되어 있으므로 1 port 회로가 되며, 이때 반사 계수 S_{11} 은

$$S_{11}(W) = \frac{\mathcal{F}[V'(t)]}{\mathcal{F}[V(t)]} \quad (2)$$

이다. 여기서 $V_{ret}(t)$ 는 기준점에서 반사전압을 나타내며, $V_{inc}(t)$ 는 기준점에서 입사전압을 나타낸다. \mathcal{F} 는 Fourier 변환을 나타낸다. 안테나의 입력 임피던스는 기준점에서의 산란 계수 계산 결과를 마이크로스트립 안테나 급전중단점에 변환시킴으로 구할 수 있다.

계산된 반사계수로부터 전압 정재파비(VSWR : Voltage Standing Wave Ratio)는 다음과 같이 구해진다.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |S_{11}(\omega)|}{1 - |S_{11}(\omega)|} \quad (3)$$

그리고, 마이크로 스트립 슬롯 안테나의 % 대역폭은 다음 식으로 정의된다.

$$\% \text{ Bandwidth} = \frac{f_{r2} - f_{r1}}{f_{rc}} \times 100 \quad (4)$$

여기서, f_{rc} 동작 중심 주파수이고, f_{r2}, f_{r1} 은 각각 VSWR이 2이하인 상, 하측 주파수이다.

III. 해석 및 최적화 설계

3-1. 안테나의 구조 및 FDTD 적용

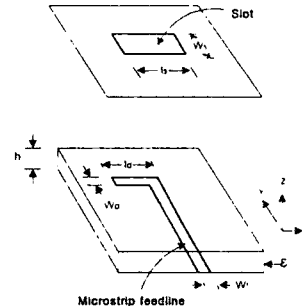


그림 1. 역 L-형 급전구조를 갖는 슬롯 안테나 구조 및 설계 변수

그림 1은 안테나의 기하학적인 구조와 설계변수를 나타낸 것으로서, 여기서 l 와 W 는 슬롯의 폭과 길이, l_0 와 W_0 는 역 L-형 급전선의 수평부 길이와 폭, offset는 슬롯 중심에서 역 L-형 급전선 수평부 중심까지의 간격, W_1 는 급전선의 폭을 나타낸 것이다.

안테나를 FDTD 방법으로 3차원 공간에서 해석하였으며, 비유전율 $\epsilon_r = 4.3$, 유전체의 두께 $h = 1$ mm인 FR-4 기판을 대상으로 시뮬레이션하였다. 사용한 공간 분할 간격은 $\Delta x=0.3214$ mm, $\Delta y=0.25$ mm, $\Delta z=0.333$ mm이고, 전체 해석공간은 x, y, z 방향으로 각각 $310 \cdot 400 \cdot 63$ 개의 격자로 구성하였다.

그림 2는 안테나 상에서 펄스가 시간에 따라 진행되는 것으로서 각각 시간 스텝이 $1000\Delta t$ 에서 파의 진행 상태를 2차원 그래프로 나타낸 것이다.

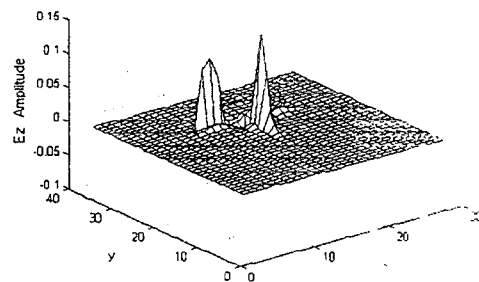


그림 2. 시간 스텝 $1000\Delta t$ 에서의 E_z -성분

안테나의 입력 임피던스는 식 (6)을 이용하여 구할 수 있으며, 2.3 GHz를 중심으로 동작하고 있으며, 그림 3에 나타내었다.

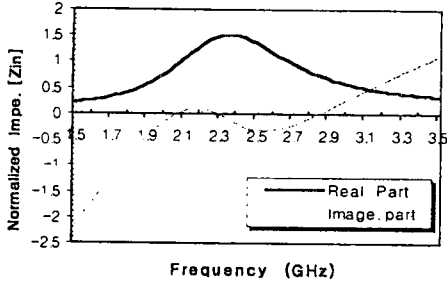


그림 3. 입력 임피던스

3-2. 설계변수에 따른 전압 정재파비의 특성

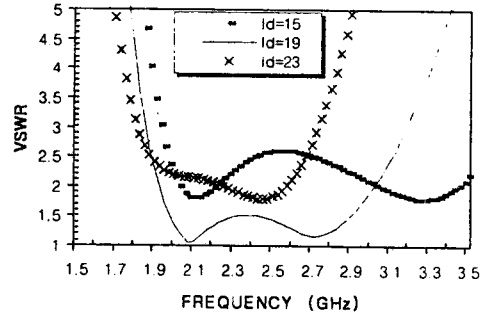
그림 1의 구조를 갖는 안테나에서 슬롯의 폭(W_s), 슬롯의 길이(l_s), 역 L-모양 급전선의 길이(l_d), 슬롯 중심에서 역 L-모양 급전선 중심 사이의 간격(offset) 등의 변화에 따라 안테나의 대역폭 특성이 변하게 된다.

역 L-모양 급전선의 길이(l_d) 변화에 따른 전압 정재파비는 식 (8)을 이용하여 계산하였으며, l_d 를 제외한 다른 파라메타는 기본 값($l_s=50\text{mm}$, $W_s=16\text{mm}$, $W_d=2\text{mm}$, offset=3.5 mm, $W_f=1.94\text{mm}$, $\epsilon_r=4.3$, $h=1.0\text{mm}$)으로 고정시키고, FDTD 최소격자($\Delta x=0.3214\text{mm}$)에 16배를 곱한 $16\Delta x$ 만큼씩 슬롯의 길이를 변화시켜 전압 정재파비를 계산하였다. 전압 정재파비의 계산은 FDTD 결과를 Fourier 변환하여 구한 반사계수로 부터 얻을 수 있으며, l_d 가 15 mm, 19 mm, 23 mm 일 때, 계산한 결과는 그림 4와 같다.

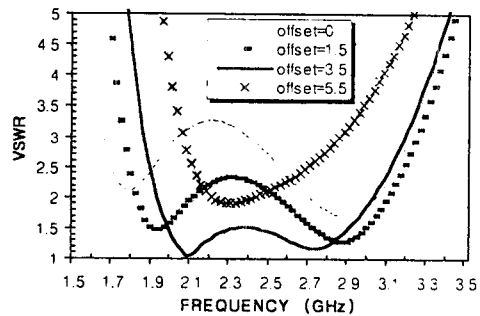
슬롯 중심에서 역 L-모양 급전선 중심 사이의 간격(offset) 변화에 따라 전압 정재파비를 슬롯 중심에서 역 L-모양 급전선 중심 사이의 간격을 제외한 다른 파라메타를 기본 값에 고정시키고, FDTD 최소격자($\Delta y=0.25\text{mm}$)에 4배를 곱한 $4\Delta y=2\text{mm}$ 만큼씩 offset을 변화시켜 전압 정재파비를 계산하였다. 슬롯 중심에서 T-모양 급전선 중심 사이의 간격을 0mm, 1.5 mm, 3.5mm, 5.5mm 에서 전압 정재파비를 계산한 결과는 그림 5와 같다. 정합시 가장 중요한 변수 중에 하나가 offset이며, offset 이 3.5 mm 일 때, 중심 주파수 2.3 GHz를 정합이 이루어졌으며, VSWR 2.0 이하에서 사용 가능한 대역폭이 가장 넓은 것을 알 수 있다.

계산한 결과, 슬롯의 길이(l_s)는 50 mm, 슬롯의 폭(W_s)은 16 mm, 수평부 급전선의 길이(l_d)는 19 mm, T-모양 급전선의 폭(W_d)은 2 mm, 슬롯 중심에서 수평부 급전선 중심 사이의 간격(offset)은 3.5 mm, 급전선

의 폭(W_f)은 1.94 mm로 최적화하였으며, 2중 공진이 발생하면서 광대역 특성을 얻었으며, 정재파비 2 이하에서 사용 가능한 주파수 영역은 1,100 MHz 정도이고, 중심 주파수 2.3 GHz에서 % 대역폭은 약 48%의 광대역 특성을 얻었다.



$W_s=16\text{mm}$, $l_s=50\text{mm}$, $W_d=2\text{mm}$, offset=3.5 mm, $W_f=1.94\text{mm}$
그림 4. 역 L-모양 급전선의 길이(l_d)에 대한 전압 정재파비



$W_s=16\text{mm}$, $l_s=50\text{mm}$, $W_d=2\text{mm}$, $l_d=19\text{mm}$, $W_f=1.94\text{mm}$

그림 5. 옵셋 간격에 대한 전압 정재파비

3-3. 슬롯 폭에 따른 최적의 설계변수와 대역폭 비교

그림 6은 슬롯을 가로지르는 기존의 급전구조와 역 L-형 급전구조의 슬롯의 폭 변화에 따라 복사저항 값을 정규화시켜 나타낸 것이다. 여기서 기존의 급전구조는 슬롯폭이 증가함에 따라 복사저항이 비례적으로 증가하여 슬롯의 폭이 16 mm에서 약 9 ($450\ \Omega$)이나, 역 L-형 급전구조는 설계 변수들을 조정하므로 낮은 복사저항 값을 거의 일정하게 유지할 수 있었다. 이것은 역 L-형 급전구조는 별다른 정합 회로를 사용하지 않고, 넓은 슬롯 폭에서도 좋은 정합 특성을 얻어 낼 수 있다는 것을 의미한다.

슬롯 중심에서 역 L-모양 급전선 중심 사이의 간격

(offset) 변화에 따라 입력 임피던스를 계산하기 위해 offset을 제외한 다른 파라메타를 기본 값에 고정시키고, FDTD 최소격자($\Delta y=0.25$ mm)에 4배를 곱한 $8\Delta y=2$ mm만큼씩 offset을 변화시켰다. Offset을 1.5 mm, 3.5mm, 5.5mm 에서 50Ω 로 정규화된 입력 임피던스의 계산된 결과는 그림 7과 같다. 이 경우 offset=3.5 mm일 때, 복사 저항은 중심 주파수 2.3 GHz에서 약 $1.0(50\Omega)$ 이며, 복사 리액턴스는 0에 접하게 되었다. 이것은 중심 주파수에서 임피던스 정합이 잘 된 것을 의미한다.

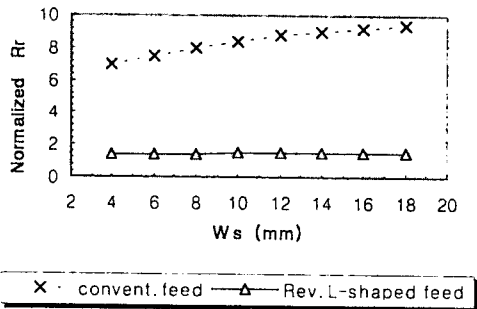
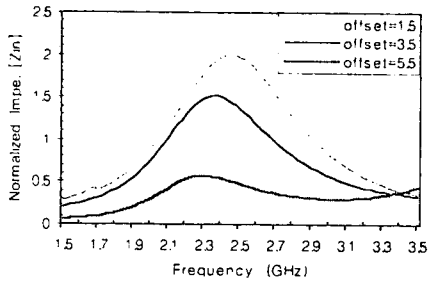


그림 6. 급전방식에 따른 복사저항의 비교



$W_s=16$ mm, $l_s=50$ mm, $W_d=2$ mm, $l_d=19$ mm, $W_t=1.94$ mm

그림 7. '오프셋' 간격에 대한 입력 임피던스

표 1은 FDTD 법을 적용하여 역 L-모양 급전선을 갖는 슬롯 안테나에서 슬롯 폭이 6 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm 일 때, 설계변수를 가지고 전압 정재파비를 최적화하여 대역폭을 나타낸 것이다. 또한, 오프셋과 슬롯 폭에 대하여 정합 특성은 $\frac{offset}{W_s} \approx 0.218$ 정도의 비율에서 슬롯 폭이 증가하면 조금씩 증가하였고, 사용 주파수 대역폭은 슬롯 폭에 비례하여 대역폭이 증가하는 특성을 얻었다.

표 1. 슬롯 폭 변화에 따른 최적의 설계변수와

대역폭

Table 1. Optimized design parameter and bandwidth as a function of the slot width

W_s [mm]	l_d [mm]	offset [mm]	offset/ W_s	FDTD 범 BW[MHz](% BW)
6	23	1.2	0.2	500 (21.7 %)
8	22	1.75	0.22	650 (28.3 %)
10	21	2.0	0.20	800 (34.8 %)
12	20	2.5	0.208	930 (40.4 %)
14	19.5	3.0	0.218	990 (43 %)
16	19	3.5	0.218	1,100 (47.8 %)
18	18	4.0	0.222	1,180 (51 %)
20	17	4.75	0.237	1,250 (54 %)

(단, $l_s = 50$ mm, $W_d = 2$ mm)

그림 8은 표 1과 같이 슬롯 폭에 따른 최적화된 설계 변수에 따라 계산된 전압 정재파비의 특성으로 슬롯 폭이 16 mm 이상에서도 대역폭 특성이 둔화되지 않고 계속 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

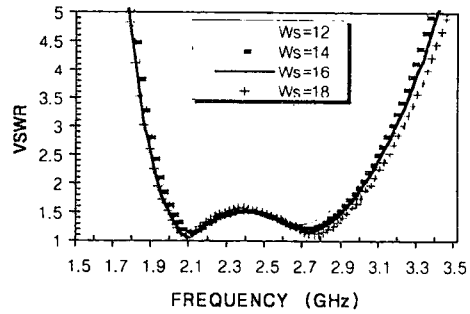


그림 8. 슬롯 폭에 따른 최적화된 전압 정재파비 값

유전율 4.3, 유전체의 두께 1.0 mm인 FR-4 기판을 대상으로 계산된 단층 유전체에서 T-모양과 역 L-모양 급전구조에 대한 반사손실과 최적의 설계변수 및 대역폭을 비교한 것을 그림 9와 표 2에 각각 나타내었다. 역 L-모양 급전구조는 2-중 공진이 발생하면서 1,100 MHz(약 48 %)의 광 대역 특성을 얻었다. T-모양으로 급전시킨 슬롯 안테나의 대역폭은 39.6 % 정도였으며¹¹⁾, 슬롯을 가로 가로지르는 기존의 급전구조의 대역폭은 5~30 % 이하였다¹⁶⁻¹⁷⁾. 그리고 3 층의 유전체로 적층화시킨 U-슬롯 안테나¹⁸⁾의 대역폭이 44 % 정도였다. 그러므로 본 논문에서 제안된 안테나는 기존의 슬롯 안테나보다 단층의 유전체에서 구현이 가능하므로 적층화시킨 경우¹⁸⁾보다 두께가 얇고, 제작이 용이하며, 그리고 대역폭을 향상시켰다.

그림 10은 T-모양과 역 L-형 급전구조를 갖는 슬롯

안테나를 최적화 했을 때, 슬롯의 폭(W_s) 변화에 따른 $offset/W_s$ 비율을 나타낸 것이다. T-모양 급전구조가 역 L-형 급전구조보다 전체적으로 $offset/W_s$ 비가 높았다.

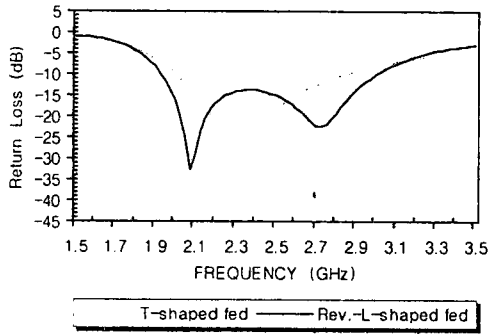


그림 9. T-모양 ¹¹⁾과 역 L-모양 급전구조에 반사 손실의 비교

IV. 결 론

본 논문에서는 역 L-형 마이크로스트립 급전구조를 제안하여 FDTD 법으로 해석하여 안테나를 최적화 설계 하였다. 전체의 진행과정과 분포를 시간 영역에서 각각 계산하였고, 이를 Fourier 변환하여 반사손실, 입력 임피던스, 그리고 전압 정재파비를 주파수 영역에서 각각 계산하였다. 슬롯폭이 16 mm일 때, 음셋과 슬롯 폭에 대하여 정합 특성은 $\frac{offset}{W_s} \approx 0.218$ 정도에서 최적화되었으며, 슬롯 폭이 증가하면 조금씩 증가하였고, 사용 주파수 대역폭은 슬롯 폭에 비례하여 대역폭이 증가하는 특성을 얻었다. 전압 정재파비가 2.0이하인 조건에서 사용 가능한 대역 폭은 2.3 GHz를 중심으로 약 48 %의 광대역 특성을 얻었다.

본 안테나는 마이크로스트립 슬롯 안테나의 가장 큰 단점중에 하나인 협대역성인 점을 해결하였으며, 소형이고 경량이면서 광대역성을 요구하는 이동통신 및 위성 수신용 안테나로 적용 가능하리라 사료된다.

표 2. T-모양과 역 L-모양 급전구조의 최적화된 설계 변수와 대역폭 비교

Feeding structure	l_s (mm)	W_s (mm)	l_d (mm)	W_d (mm)	offset (mm)	W_f (mm)	f_0 (GHz)	B/W (MHz)
T-shape fed ¹¹⁾	50	16	35.5	2	4.5	1.94	2.3	910
Rev.-L-shaped fed	50	16	19	2	3.5	1.94	2.3	1,100

(단, $\epsilon_r=4.3, h=1.0\text{mm}$ 일 때)

참고문헌

- [1] 장용용, 윤종철, 박익모, 신철재, "T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나의 특성 분석," 한국전자파학회 논문지, vol. 9, No. 5, pp. 630-639, 1998년 9월.
- [2] M. Kahrizi, T.K. Sarkar, and Z.H. Maricevic, "Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip line," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-41, pp. 29-37, Jan. 1993.
- [3] Karl S. Kunz, Raymond J. Luebbers, "The finite difference time domain method for electromagnetics." CRC Press,inc, pp.11-26, 1993.
- [4] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra and J. A. Kong, "Application of the Three-Dimensional Finite-Difference Time Domain Method to the Analysis of Planar Microstrip Circuits," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. MTT-38, No.7, pp. 849-857, Jul. 1990.
- [5] A. Axelrod, M. Kisliuk, and J. Maoz, "Broadband Microstrip-fed Slot Radiator," Microwave Journal, pp. 81-92, June 1989.
- [6] Yongxi Qian, Shin-Ichirou Iwata, and Eikichi Yamashita, "Optimal Design of an Offset-Fed, Twin-Slot Antenna Element for Millimeter-Wave Imaging Arrays," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.4, No.7, July 1994.
- [7] S. H. David, "A Survey of Broadband Microstrip Antennas," Microwave Journal, pp. 60-84, Sept. 1996.
- [8] B.L. Ooi, C.L. Lee, "Broadband air-filled stacked U-slot antenna", Electronics Letters, Vol. 35, No. 7, pp. 51-52, April 1999.