

2D 전송선을 이용한 Cloaking 구조 설계 및 분석

Design and Analysis of Cloaking Structure Using 2D Transmission Line

김 충 주 · 이 범 선

Chungju Kim · Bomson Lee

요 약

본 논문에서는 기존의 인덕터와 커패시터 소자만을 이용하여 2D cloaking 회로의 단일 셀을 설계했을 경우의 단점을 보완하기 위하여 2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로를 설계하고 분석하였다. 2D 전송선 구조를 이용할 경우, 단일 셀의 크기와 필요한 소자의 값을 사용 가능한 범위 안에서 조절할 수 있다는 장점이 있다. 이에 필요한 모든 설계식을 유도하였다. 자유 공간에 완전 도체로 이루어진 원통형 산란체를 상정하고, 이에 대한 cloaking 회로를 유도된 설계식을 이용하여 설계하고 이에 대한 cloaking 효과를 우선 회로 시뮬레이터인 ADS를 이용하여 살펴보았다. 제시된 시뮬레이션 제원에서 cloaking medium 효과는 10.5 dB 이득으로 나타났다.

Abstract

We design and analyze the cloaking circuit using 2D transmission line structure to make up for the weakness of the established cloaking circuit using only lumped inductor and capacitor elements. The 2D transmission line structure enables one to conveniently design the cloaking circuit with available element values. All the necessary analysis and synthesis(design) formulas have been derived. A cloaking circuit for a cylindrical scatterer in free space has been designed based on the provided design formulas and its effects have been investigated using the circuit simulator ADS. The effect of the cloaking medium for this specific case has been observed to be about 10.5 dB.

Key words : Metamaterial, 2D Cloaking, Transmission Line Method

I. 서 론

최근 Metamaterial(MTM)에 관한 연구가 활발히 진행되면서 이를 이용한 새로운 기술에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이중의 하나로 전·자기적으로 물체가 보이지 않게 하는 cloaking에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며^{[1]-[6]} 이중에서도 2D TLM (Transmission Line Method)을 이용한 cloaking 회로 분석이 매우 활발하게 진행되고 있다^{[4]-[6]}. 하지만

기존의 연구들에서는 인덕터와 커패시터 소자만을 이용하여 2D cloaking 회로를 구현한 논문이 대부분 이고, 이 경우 단일 셀의 크기는 소자의 크기에 제한되며, 필요한 소자의 값이 존재하지 않은 경우 이를 조절할 방법이 없기 때문에 실제 구현하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 2D 전송선 구조를 이용하여 cloaking 회로를 구현하였다. 2D 전송선 구조를 이용할 경우 전송선의 특성

「이 연구는 2011년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20100027006)

경희대학교 전자·전파공학과(Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University)

· 논문 번호 : 20110527-18S

· 교신저자 : 이범선(e-mail : bomson@khu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 24일

임피던스와 전기적 길이를 조절하여 단일 셀의 크기 조절할 수 있으며, 필요한 소자 값을 조절할 수 있다는 장점이 있다.

II. 2D 전송선 구조 분석

2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로의 단일 셀은 전송선의 전기적 길이와 특성 임피던스 그리고 단일 셀의 위치에 따라 2D 우형(통상적인 전송선) 전송선을 사용하기도 하고, 2D MTM(Metamaterial 또는 좌형) 전송선을 사용하기도 한다. 그리고 수평 방향으로는 우형 전송선이면서 수직 방향으로는 MTM 전송선을 사용하기도 하고, 그 반대인 경우도 있다. 그렇기 때문에 2D 전송선 구조에 대한 정확한 분석은 이를 이용하는 cloaking 회로 설계에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 2D 전송선 구조에서 우형 전송선과 MTM 전송선의 등가회로를 제시하고, 이를 분석하였다.

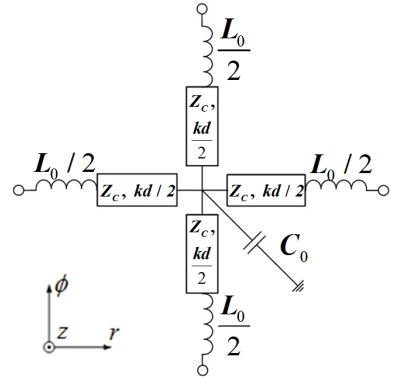
그림 1에서 (a)는 2D 우형 전송선 구조의 등가회로를, (b)는 2D MTM 전송선 구조의 등가회로이다. 여기서 Z_c 는 전송선의 특성 임피던스이고, L_0 와 C_0 는 각각 집중인덕턴스와 캐패시턴스이다. 그리고 kd 는 전송선의 전기적 길이이다. k 는 파수임과 동시에 TEM 전송선의 전파 상수이다.

그림 1(a)에서 유효 인덕턴스(H)와 유효 캐패시턴스(F)는 다음과 같다.

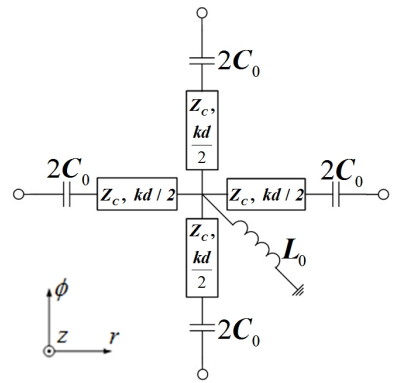
$$L_{eff} = Ld + L_0, C_{eff} = 2Cd + C_0 \quad (1)$$

여기서 양 측면 종단은 개방으로 가정하였다. 이런 가정에서 총 캐패시턴스는 r 방향과 ϕ 방향의 전송선에 의한 커패시턴스로 $2Cd$ 가 됨을 알 수 있다. 여기서 $L(H/m)$ 과 $C(F/m)$ 는 각각 전송선의 직렬과 병렬 분포 정수 값이다. $Ld(H)$ 과 $Cd(F)$ 는 각각 전송선의 직렬과 병렬 부분의 단위 셀 길이 $d(m)$ 에 해당하는 집중 정수 값이다. 본 논문에서는 단위 셀 길이 d 가 파장에 비해 매우 짧기 때문에 집중 정수처럼 취급하여도 큰 문제가 없다. Ld 와 Cd 는 우형 전송선의 특성이 $Z_c(=\sqrt{L/C})$ 와 $kd(=\omega\sqrt{LC}d)$ 로 주어졌을 때 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Ld = \frac{Z_c kd}{\omega}, Cd = \frac{kd}{\omega Z_c} \quad (2)$$



(a) 우형 전송선
(a) Right handed transmission line



(b) MTM 전송선
(b) MTM transmission line

그림 1. 2D 전송선 구조의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of 2D transmission line structure.

주기 구조의 특성 임피던스와 같은 성질을 갖는 Bloch 임피던스 Z_B 와 각주파수 ω 에서의 셀당 위상 변화 ϕ_ω 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Z_B = \sqrt{\frac{Ld + L_0}{2Cd + C_0}} \quad (3)$$

$$\phi_\omega = (-\beta d) = (-\omega\sqrt{(Ld + L_0)(2Cd + C_0)}) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)는 그림 1(a)와 같은 단위 셀이 주기적으로 무한히 나열되었을 때의 중요한 두 가지 특성을 보여 주는 분석식이다. 만일, 거꾸로 어떤 특정한 Z_B 와 ϕ_ω 를 구현하는 주기적인 2D 전송선 회로가 요구된다면 식 (3)과 (4)를 이용하여 집중 정수 $C_0(F)$ 와 $L_0(H)$ 의 값을 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{\phi_\omega}{Z_B \omega} - 2Cd, L_0 = \frac{Z_B \phi_\omega}{\omega} - Ld \quad (5)$$

그림 1(b)는 2D 전송선의 단위 셀이다. 유효 인덕턴스와 유효 캐패시턴스는

$$L_{eff} = Ld - \frac{1}{\omega^2 C_0}, C_{eff} = 2Cd - \frac{1}{\omega^2 L_0} \quad (6)$$

과 같이 표현할 수 있고, Bloch 임피던스와 셀당 위상 변화는 다음과 같다.

$$Z_B = \sqrt{\frac{Ld - \frac{1}{\omega^2 C_0}}{2Cd - \frac{1}{\omega^2 L_0}}} \quad (7)$$

$$\phi_\omega = -\omega \sqrt{\left(Ld - \frac{1}{\omega^2 C_0}\right) \left(2Cd - \frac{1}{\omega^2 L_0}\right)} \quad (8)$$

만약 전송선의 길이가 파장에 비해 작을 경우 ($d \ll \lambda$), 식 (8)은 식 (9)와 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\phi_\omega \simeq -\left(\omega \sqrt{L(2C)d} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_0 C_0}}\right) \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 이용하면 집중 정수 C_0 와 L_0 의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{\sqrt{2}}{Z_C} \frac{1}{\omega(\sqrt{2}kd + \phi_\omega)} \quad (10)$$

$$L_0 = \frac{Z_C^2 C_0}{2} \quad (11)$$

III. 2D Cloaking 회로 분석

그림 2는 원통 좌표계에서의 전체 2D cloaking의 구조와 단일 셀의 구조를 보여주고 있다. 여기서 R 은 background medium의 반지름이고, a 는 산란체의 반지름, b 는 cloaking medium의 반지름이며, r 은 cloaking 매질 내의 단일 셀까지의 반지름이다. Cloaking medium의 각 방향에 대한 유전율과 투자율은 참고 문헌 [2]로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_r = \frac{r-a}{r}, \mu_\phi = \frac{r}{r-a}, \epsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{r-a}{r} \quad (12)$$

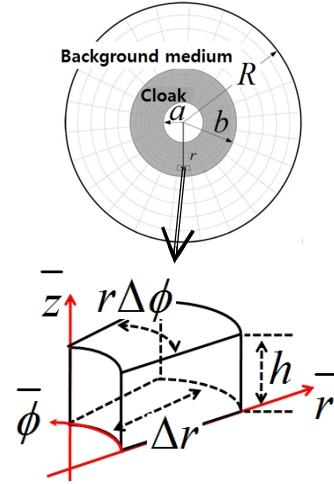


그림 2. 원통 좌표계에서의 2D cloaking의 구조
Fig. 2. Structure of 2D cloaking in cylindrical coordinate.

유전율과 투자율은 전자기적 매질 특성을 나타내는 두 개의 중요한 필드 파라미터이다. 이러한 매질 특성을 회로로 구현하기 위해서는 필드 파라미터를 회로 파라미터로 치환하는 작업이 필요하다. 단일 셀의 각 방향에 대한 인덕턴스(H)와 캐패시턴스(F)는 다음과 같다.

$$L_r = \mu_\phi \mu_b \frac{\Delta r}{r \Delta \phi} h, L_\phi = \mu_r \mu_b \frac{r \Delta \phi}{\Delta r} h \quad (13)$$

$$C_z = \frac{\epsilon_z \epsilon_b r \Delta r \Delta \phi}{h} \quad (14)$$

여기서 μ_b 는 와 ϵ_b 는 각각 background medium의 투자율과 유전율이며, h 는 기판의 높이를 의미한다.

식 (12)를 이용하여 cloaking medium의 각 방향에 대한 유전율과 투자율을 구한 후, 그 값을 식 (13)과 (14)에 대입하면 각 방향에 대한 인덕턴스와 캐패시턴스의 값을 알 수 있다.

IV. 2D 전송선 구조를 이용한 Cloaking 회로 설계

2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로를 설계하기 위해 먼저 cloaking 회로 단일 셀의 각 방향에 대한 인덕턴스와 캐패시턴스를 구해야 된다. 그 후 전송선의 길이와 임피던스를 결정하고, 분포 정수 값

을 계산하여 이 값이 단일 셀의 각 방향에 대한 인덕턴스와 캐패시턴스 값보다 작을 경우에는 우형 전송선을, 클 경우에는 MTM 전송선을 사용한다.

우형 전송선(그림 1(a))을 사용할 경우의 직렬 집중 정수의 값과 병렬 집중 정수는 식 (1)에 의해 다음과 같다.

$$L_{0,series} = L_{eff} - Ld \tag{15}$$

$$C_{0,shunt} = C_{eff} - 2Cd \tag{16}$$

그리고 MTM 전송선(그림 1(b))을 사용할 경우 직렬 집중 정수의 값과 병렬 집중 정수의 값은 식 (6)에 의해 다음과 같다.

$$C_{0,series} = \frac{1}{\omega^2(Ld - L_{eff})} \tag{17}$$

$$L_{0,shunt} = \frac{1}{\omega^2(2Cd - L_{eff})} \tag{18}$$

예를 들어, $R=0.9$ m일 때 r 방향으로의 단일 셀 개수가 40개 ϕ 방향으로의 단일 셀 개수가 90개일 경우 Δr 은 0.0225 m이고, $\Delta \phi$ 는 4° 가 된다. Background medium이 자유 공간이고, 기관의 높이가 1 mm, 산란체의 반지름 a 가 0.1575 m(7 cell), cloaking medium의 반지름 b 가 0.495 m(22 cell)일 경우 background medium의 최외곽($r=0.9$ m) 단일 셀의 r 방향에 대한 인덕턴스는 0.45 nH이고 ϕ 방향에 대한 인덕턴스는 3.51 nH이며(식 (13) 이용) z 방향에 대한 캐패시턴스는 12.52 pF이다(식 (14) 이용). 그리고 cloaking medium의 최내곽($r=0.495$) 단일 셀의 r 방향에 대한 인덕턴스는 6 nH이고 ϕ 방향에 대한 인덕턴스는 0.26 nH이며, z 방향에 대한 캐패시턴스는 2.11 pF이다. 이와 같은 방법으로 모든 셀의 각 방향에 대한 인덕턴스와 캐패시턴스를 구하면 2D cloaking 회로가 완성된다. 집중 소자만을 이용할 경우, 통상의 소자값 범위를 벗어나는 경우가 있어 구현이 되지 않는 경우가 많다.

2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로 설계를 위하여 위와 같은 방법으로 구한 인덕턴스와 캐패시턴스를 이용한다.

1 GHz에서 전송선의 길이 kd 가 10° 이고, 특성 임피던스 Z_c 가 50 Ω 일 경우, 전송선의 인덕턴스 $Ld=1.39$

nH이고, 캐패시턴스 $Cd=0.56$ pF이다. 위에서 구한 최외곽 단일 셀의 r 방향에 대한 인덕턴스는 0.45 nH로 전송선의 인덕턴스보다 작기 때문에 MTM 전송선을 사용하며, 식 (17)에 의해 직렬 집중 정수 $C_{0,series}=26.98$ pF이 된다. ϕ 방향에 대한 인덕턴스는 3.51 nH로 전송선의 인덕턴스 크기 때문에 우형 전송선을 사용하고, 식 (15)에 의해 직렬 집중 정수 $L_{0,series}=2.12$ nH가 된다. 그리고 z 방향에 대한 캐패시턴스는 12.52 pF으로 전송선의 캐패시턴스보다 작기 때문에 우형 전송선을 사용하고, 식 (16)에 의해 병렬 집중 정수 $C_{0,shunt}=11.4$ pF가 된다. 그리고 최내곽 단일 셀의 경우 r 방향은 우형 전송선을 사용하여 식 (15)에 의해 $L_{0,series}=4.61$ nH가 되고, ϕ 방향은 MTM 전송 선로를 사용하여 식 (17)에 의해 $C_{0,series}=22.5$ pF이 된다. 그리고 z 방향은 우형 전송선을 사용하여 식 (16)에 의해 $C_{0,shunt}=1$ pF이 된다.

표 1은 2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로 설계에서 사용한 제원을 정리한 것이다.

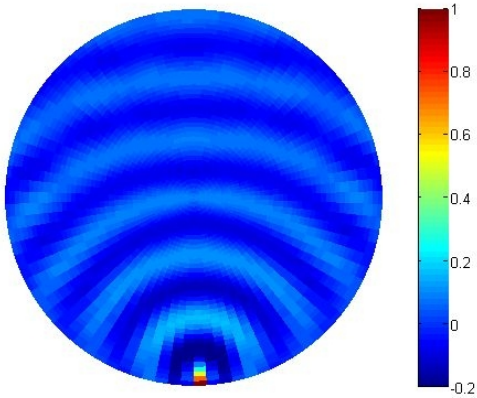
그림 3은 표 1의 제원을 이용하여 ADS와 MATLAB으로 구현한 각각의 경우에 대한 전압 분포를 보여준다. 이는 ADS를 이용하여 모든 단일 셀을 설계한 후 각각 단일 셀에서의 전압의 크기와 위상 변위를 추출하여 MATLAB으로 전체 회로에서의 전압 분포를 계산하여 구현한 것이다. 그림 3(a)는 자유 공간에서의 전압 분포이고, (b)는 내부에 원통형 산란체(PEC)가 있을 경우의 전압 분포를, 그리고 (c)는 산란체를 cloaking하였을 경우의 전압 분포를 보여준다.

Point source를 인가하였을 때 자유 공간의 경우 cylindrical wave가 산란 없이 진행되는 것을 볼 수 있으며, 내부에 원통형 산란체가 있을 경우 파가 완전

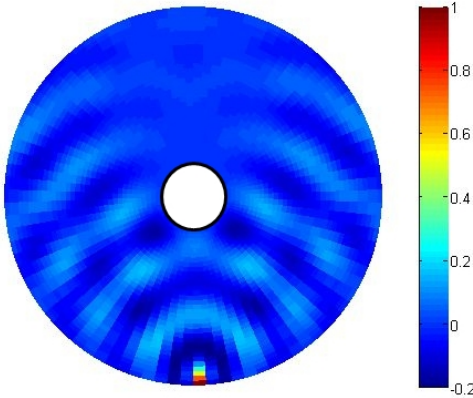
표 1. 2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로 설계의 제원

Table 1. Specification for designing cloaking circuit using 2D transmission line structure.

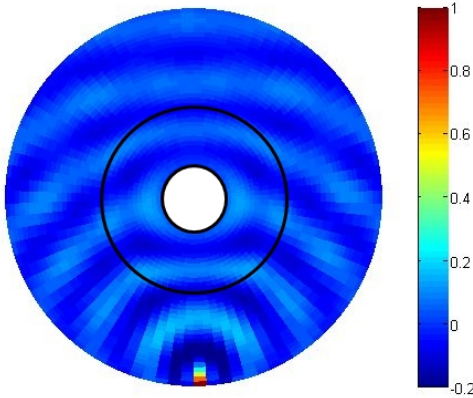
R	0.9 m	Δr	0.0225 m
a	0.1575 m	$\Delta \phi$	4°
b	0.495 m	h	1 mm
f_0	1 GHz	kd	10°
Z_c	50 Ω	Total cell	3,600 cell



(a) 자유 공간일 경우
(a) In the case of free space



(b) 내부에 반사체(PEC)가 있을 경우
(b) In the case of existence of reflector inside



(c) Cloaking medium을 사용한 경우
(c) In the case of using cloaking medium

그림 3. 1 GHz에서 각각의 경우에 대한 전압 분포 (단위: V)

Fig. 3. Voltage distribution of each case at 1 GHz(unit : V).

도체로 이루어진 산란체에 의한 산란으로 제대로 진행하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그리고 산란체를 cloaking medium을 이용해 둘러쌀 경우, 파가 산란체에 의해 영향 받지 않고 마치 자유 공간처럼 진행하는 것을 볼 수 있다. cloaking medium이 투명 망토처럼 작용하는 것을 알 수 있다.

Point source가 1 V일 때 반대쪽에서 측정된 전압은 자유 공간의 경우 0.081 V이고, 내부에 산란체가 있을 경우 0.02 V, 산란체에 cloaking medium을 입혔을 경우 0.067 V로 산란체만 있을 경우 -12.15 dB, cloaking medium을 추가로 사용하였을 때 -1.65 dB 손실이 생기는 것을 확인하였다. 주어진 제원에 의한 시뮬레이션 결과, cloaking medium 효과는 산란체가 있을 경우와 비교해서 10.5 dB 이득이 생긴 것으로 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 2D 전송선 구조를 이용한 cloaking 회로를 설계하기 위하여 2D 우형 전송선과 MTM 전송선의 구조를 분석하고 설계식을 유도하였으며, 이를 cloaking 회로에 적용하여 그 결과를 확인해 보았다. 자유 공간 내부에 산란체만 있을 경우와 비교하여, cloaking medium을 사용한 경우 10.5 dB만큼 이득이 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 전송선 구조를 사용하면 집중 소자만을 사용할 때의 제약(필요한 소자를 찾을 수 없는 등)을 넘어 융통성 있는 설계가 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] J. B. Pendry, D. Schuring, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields", *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782, 2006.
- [2] S. A. Cummer, B. -I. Popa, D. Schuring, D. R. Smith, and J. B. Pendry, "Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures", *Phys. Rev. E* 74, 036621, Sep. 2006.
- [3] D. Schuring, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science Mag.*, vol. 314, pp. 977-979,

Nov. 2006.

[4] X. Liu, C. Li, K. Yao, X. Meng, and F. Li, "Invisibility cloaks modeled by anisotropic metamaterials based on inductor-capacitor networks", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1154-1157, 2009.

[5] X. Liu, C. Li, K. Yao, X. Meng, B. Wu, and F. Li,

"Experimental verification of broadband invisibility using a cloak based on inductor-capacitor networks", *Applied Physics Letters*, no. 59, 191107, Nov. 2009.

[6] S. Harbar, I. Malcic, S. Nanut, and L. Juricev-Sudac, "Feasibility of use of lumped elements in anisotropic 2D cloak", *ICECom, 2010 Conference Proceedings*, Set. 2010.

김 충 주



2010년 2월: 경희대학교 전파통신 공학과 (공학사)
 [주 관심분야] Small Antenna, Metamaterials, Microwave Passive Devices 등

이 범 선



1982년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1991년 8월: 미국 네브레스카 주립대 전자공학과 (공학석사)
 1995년 5월: 미국 네브레스카 주립대 전자공학과 (공학박사)
 1995년 9월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 교수
 2008년 1월~2009년 12월: 한국전자전파학회 마이크로파 및 전파연구회 위원장
 2010년 1월~2010년 12월: 한국전자전파학회 영문지 편집위원장
 2009년 6월~현재: 삼성전자 자문교수
 [주 관심분야] Microwave Antenna, Metamaterials, RF Identification(RFID) Tags, Microwave Passive Devices 등