

MMIC 상에서 초소형 무선 통신 시스템에의 응용을 위한 반전된 형태의 주기적 용량성 구조를 이용한 전송선로의 RF 특성에 관한 연구

김정훈¹ · 정장현² · 윤영[†]

(Received July 23, 2014 ; Revised August 29, 2014 ; Accepted October 20, 2014)

A Study on RF Characteristics of Transmission Line Employing Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices for Application to Highly Miniaturized Wireless Communication system on MMIC

Jeong-Hoon Kim¹ · Jang-Hyeon Jang² · Young Yun[†]

요약: 본 논문에서는 MMIC(Monolithic microwave integrated circuit) 상에서 초소형 무선 통신 시스템에서의 응용을 위해 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로(IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 RF 특성을 연구하였다. 측정 결과, 본 논문에서 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로는 기존의 마이크로스트립 전송선로는 선로파장의 11.85%로 단파장의 성능을 보였고, 전파상수, 유효 유전율은 기존의 전송선로에 비하여 훨씬 높은 결과를 보여주었다. PACD(periodically arrayed capacitive devices) 선로구조에 비해 삽입손실이 1~10 GHz에서 22.6%정도 개선되었다. 또한 IPACD 선로구조의 등가회로를 closed-form 방정식을 통하여 이론적으로 해석하였으며, 실질적인 대역폭의 의미를 가지는 1차 통과대역에서의 차단 주파수는 129.2 GHz로 나타나 광대역의 특성을 보여주었다.

주제어: Radio frequency, 용량성 소자, 전송선로, 무선통신시스템, Monolithic microwave integrated circuit

Abstract: In this paper, we studies on the RF characteristics of the transmission line employing IPACD (inverted periodically arrayed capacitive devices) on MMIC (monolithic microwave integrated circuit) for application to wireless communication system. According to measured results, the novel transmission line employing IPACD showed a wavelength much shorter than conventional transmission lines. In addition, the IPACD structure showed an effective permittivity much higher than conventional ones. We also extracted the bandwidth characteristic of the IPACD structure using equivalent circuit analysis. According to the results, the cut-off frequency of the proposed structure was 129.2 GHz.

Keywords: Radio frequency, Capacitive devices, Transmission line, Wireless communication system, Monolithic microwave integrated circuit

1. 서론

인류가 삶을 영위하는데 있어 가장 궁극적인 목적은 좀 더 안락하고 양질의 삶을 사는 것이라 할 수 있다. 21세기에 접어들어 정보 통신 또는 무선 통신은 이러한 인류의 삶의 발전에 맞추어 고도로 진화해왔다. 개인용 혹은 산업용 컴퓨터, 이동식 단말기 등의 장치들은 하나의 기능뿐만 아니라 여러 가지 다양한 기능들을 실행하고 있으며, 무선

통신 시스템은 사람과 사람을 뛰어넘어, 해양·항공 등의 다양한 분야로 그 영역을 확장하여왔다. 이러한 시대의 흐름에 따라 각종 무선기기의 소형화는 이루어야할 가장 큰 업적의 하나로 볼 수 있다. 그러나 결합기와 분배기, 필터 등 무선통신기기에 결합되는 대부분의 수동소자는 상대적으로 높은 주파수대를 사용하는 RF 단에서 그 크기가 매우 커져 일반적으로 MMIC 내부에 집적되지 못하고

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1692-5641>): Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: yunyoung@kmou.ac.kr Tel:051-410-4426

¹ Department of Radio Communication Engineering Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jh3155@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5057

² Department of Radio Communication Engineering Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jjh2010@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5057

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

MMIC 외부의 프린트 기판 상에 설계 및 제작되어 전체적인 시스템의 크기를 커지게 하는 주요 원인이 되고 있다 [1]-[6]. 최근 수동소자의 소형화를 위하여 본 연구그룹에서는 주기적으로 배치된 용량성 소자(PACD, periodically arrayed capacitive devices)를 이용한 단파장 전송선로를 개발하였다[5]-[7]. 상기 PACD 구조의 전송선로는 지금까지 발표된 전송선로 중 가장 짧은 선로 파장을 보여주었다. 그러나 PACD 선로구조는 다소 높은 삽입손실 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로(IPACD, inverted periodically arrayed capacitive devices)를 제안하였으며, 상기 구조 선로의 RF 특성을 고찰하였다. 구체적으로는 IPACD 구조 선로의 선로파장, 삽입손실, 전파상수, 유효유전율, 등가회로 및 대역폭에 대하여 연구하였다.

2. PACD 및 IPACD 전송선로의 구조

Figure 1 (a)는 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로(PACD, periodically arrayed capacitive devices)의 구조를 나타낸다[5]-[7]. Figure 1 (a)에서 볼 수 있듯이, PACD 선로 구조는 기존의 마이크로스트립 타입의 전송선로의 신호선 양쪽에 주기적 금속 스트립(PMS, periodic metal strip)을 접속하고, 그 위에 SiN의 제 2유전체와 상부 금속층(ULM, upper layer metal)을 설치한 구조이다. 또한 ULM은 비아홀을 통하여 최하단의 접지 금속면과 연결되므로 ULM은 접지 전위를 공급받게 된다[5]. Figure 1 (b), (c)는 본 논문에서 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로(IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 전체구조와 X-X 단면구조를 나타내고 있다. Figure 1 (a)의 ULM과 LLM을 반전하여 나타내어진 구조이다. Figure 1에서 알 수 있듯이, 기존의 전송선로는 신호선과 최하단 접지면 사이에 존재하는 주기적인 정전용량 C_a 를 가지는 반면, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 ULM과 LLM 사이에 추가적인 용량성 성분 C_b 가 나타나게 된다. 따라서 Equation (1), (2)에서 알 수 있듯이 선로파장의 식의 분모가 C_a 에서 C_a+2C_b 로 바뀌므로 기존의 전송선로에 비하여 파장이 짧아지고 특성 임피던스가 줄어드는 결과를 보이게 된다[1].

$$\lambda_g = \frac{1}{f\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{L(C_a+2C_b)}} \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C_a+2C_b}} \quad (2)$$

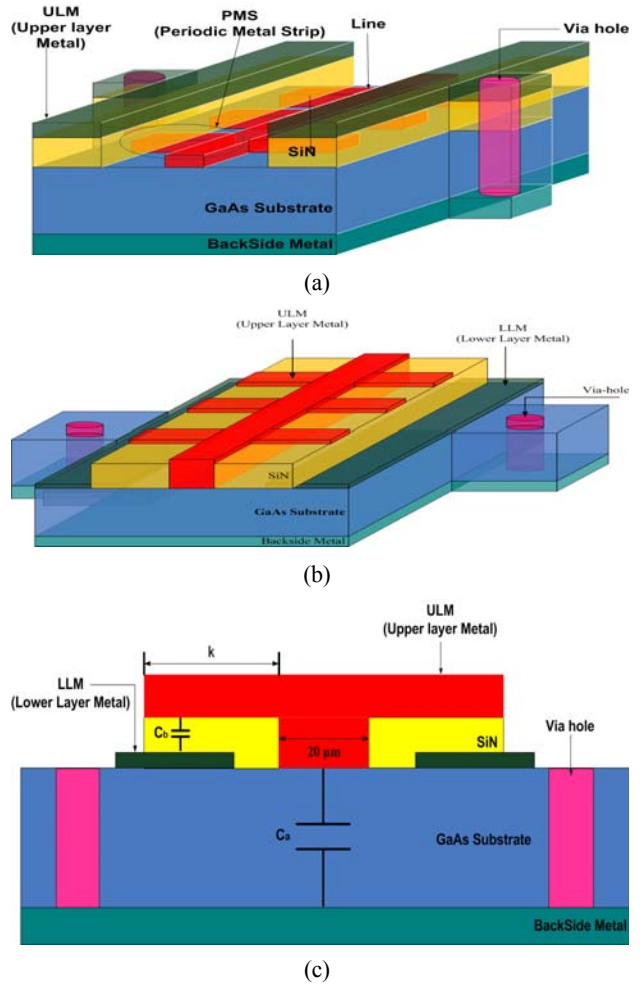


Figure 1: (a) A structure of transmission line employing periodically arrayed capacitive devices. (b) A structure of transmission line employing inverted periodically arrayed capacitive devices. (c) A crosssectional view of X-X direction of inverted periodically arrayed capacitive devices.

3. IPACD 구조 전송선로의 단파장·저손실 특성

Figure 2는 본 논문에서 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로(이하 IPACD)와 PACD 선로 및 기존의 전송선로의 선로파장을 나타낸 그림이다. 측정에 사용된 IPACD 구조의 전송선로는 선로폭이 20 μm, ULM의 길이 l_c 가 20 μm이며, Figure 2에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시하는 IPACD 구조의 선로파장은 추가적인 용량성 성분 C_b 로 인하여 기존의 마이크로스트립 선로의 11.85%로 축소되었음을 알 수 있다[1]. 예를 들어, 주파수 5 GHz에서 기존의 마이크로스트립 선로의 선로파장은 21.12 mm인 반면, PACD 구조의 선로파장은 1.99 mm, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 선로파장은 2.504 mm로 나타났다. 본 논문에서 제안하는

IPACD 구조는 PACD 구조의 선로 파장에 비하여 다소 긴 파장을 보여주지만, 기존의 마이크로스트립 선로에 비해 단파장의 특성을 나타내므로 무선 통신 시스템의 소형화에 응용될 수 있음을 알 수 있다.

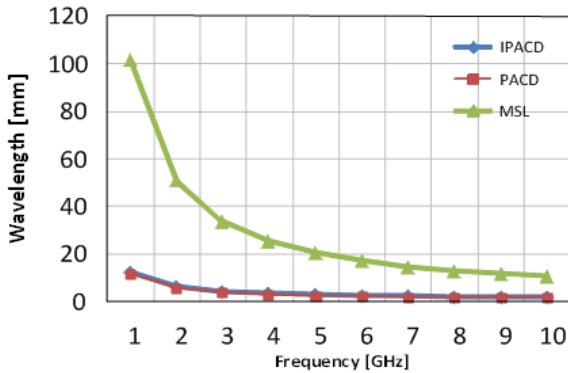


Figure 2: Measured wavelengths of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

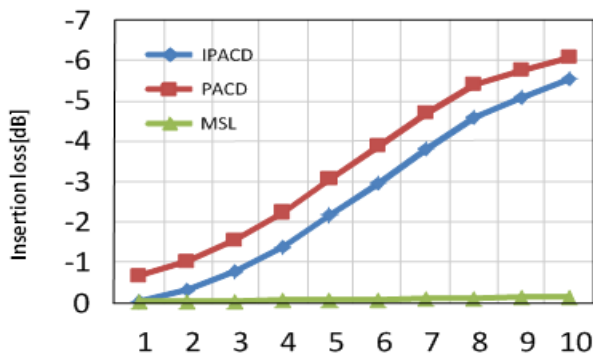


Figure 3: Insertion loss of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

4. IPACD 구조 전송선로의 전송특성

Figure 4는 본 논문에서 제안하는 IPACD 선로구조와 PACD 선로 및 기존의 마이크로스트립 선로의 전파상수 (β)를 보여주고 있다. 일반적으로, 전파상수는 Equation (3)을 통하여 표현되며, Figure 4를 통해 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로의 전파상수는 기존의 마이크로스트립 선로의 전파상수에 비해 높은 수치를 나타냄을 알 수 있다. 구체적으로, 기존의 전송선로의 전파상수는 0~10 GHz에서 0.062 ~ 0.616 Rad/mm로 나타났고, PACD는 0.56 ~ 4.44 Rad/mm로 나타났으며 본 논문에서 제안하는 IPACD는 0.52 ~ 4.13 Rad/mm를 나타내었다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

Figure 5는 IPACD 선로구조와 PACD 선로 및 기존의 마이크로스트립 선로의 유효 유전율(ϵ_e)을 나타낸 그림이다. Figure 5를 통해 알 수 있듯이 본 논문에서 제안하는

IPACD 구조의 전송선로는 기존의 전송선로에 비해 월등히 높은 유효 유전율 특성을 보여준다. 구체적으로 0~10GHz에서 PACD 선로구조는 약 679.1~435.5, 기존의 전송선로의 유효 유전율은 8.8~8.7을 보이고 있으며, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 유효 유전율은 약 609.4~390.2으로 나타났다. 상기의 결과는 다음과 같이 설명된다. 기존의 전송선로는 주기적 구조가 아닌데 반해 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 주기적 구조이므로 상대적으로 전송상수가 큰 slow-wave 특성이 존재하기 때문이다. Figure 5의 유효 유전율은 파장 측정결과로부터 Equation (4)을 이용하여 계산되었다[7][10].

$$\epsilon_e = \left(\frac{2\pi}{\omega\lambda} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \right)^2 \quad (4)$$

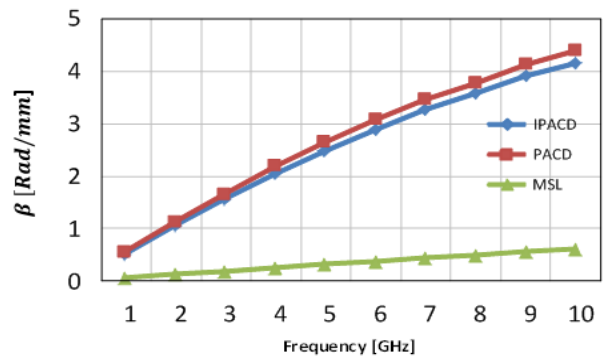


Figure 4: Effective propagation constant of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

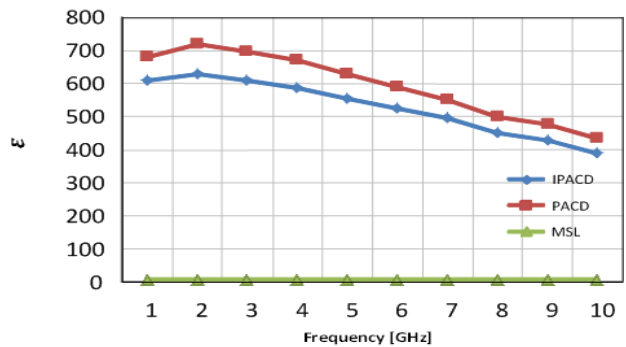


Figure 5: Effective permittivity of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

5. IPACD 구조 전송선로의 등가회로

Figure 6은 IPACD 구조 전송선로의 단위셀에 대한 등가회로와 전체의 등가회로를 나타낸 그림이다. Figure 6에서 알 수 있듯이 IPACD 구조 전송선로의 등가회로는 N개의 단위 셀로 이루어져 있다[6][7]. C_b 는 ULM (upper layer metal)과 LLM (lower layer metal) 사이에 추가적으로 발생하는 주기적인 용량성 성분이고, C_a 는 선로와 최하단

접지면 사이에 발생하는 주기적인 용량성 성분을 나타낸다. R_L 과 L_{ind} 는 각각 전송선로의 저항과 인덕턴스 성분을 의미하며, R_g 와 L_g 는 ULM의 저항성분과 인덕턴스 성분을 나타낸다. 각각의 성분에 대한 closed-form 방정식은 아래와 같이 나타낸다.

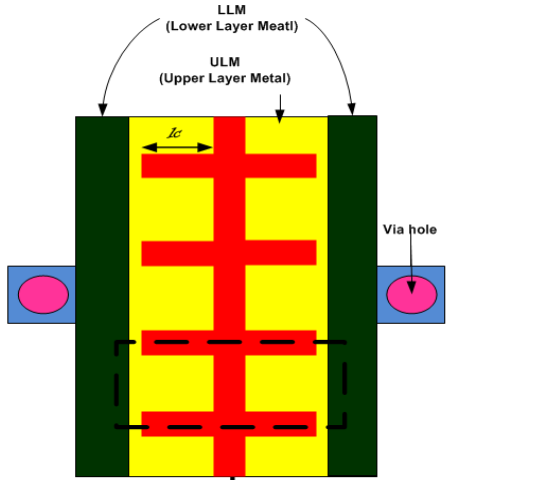


Figure 6: Equivalent circuit of the transmission line employing IPACD.

l_h, l_c 는 각각 ULM의 폭과 길이를 나타내고, W 는 전송선로의 선로폭을 의미하며 G 는 전송선로와 그라운드 사이의 간격을 나타낸다. 또한 d_i 는 SiN 필름의 두께를 의미한다. Equation (6)의 C_b 에 $\left(\frac{l_c}{G}\right)^2$ 이 들어간 이유는 기생 커패시턴스 성분에서 발생하는 비선형성 때문이다 [6][7]. Figure 7과 Figure 8은 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 위상차와 삽입 손실의 측정치와 Equation (5) - (10)을 이용한 계산치의 비교 결과이다. 아래의 그림에서 알 수 있듯이 주파수 0 ~ 10 GHz 대역에서 IPACD 구조 전송선로의 위상차와 삽입손실은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

$$L_{ind} = \left[0.1255 + 0.026 \times \left(\frac{l_c}{W} \right) - 0.0415 \times \left(\frac{l_c}{W} \right)^2 \right] (nH) \quad (5)$$

$$C_b = \left[0.45 - 0.2 \times \left(\frac{l_c}{G} \right) + 0.25 \times \left(\frac{l_c}{G} \right)^2 \right] (pF) \quad (6)$$

$$C_a = \left[0.01 - 0.77 \times 10^{-2} \times \left(\frac{l_c}{d_i} \right) + 0.3 \times 10^{-5} \times \left(\frac{l_c}{d_i} \right)^2 \right] (pF) \quad (7)$$

$$R_L = \left[-0.58 \times \left(\frac{W}{l_c} \right) + 0.608 \right] (\Omega) \quad (8)$$

$$R_g = \left[1.87 - 0.38 \times \left(\frac{l_c}{l_h} \right) + 0.608 \times \left(\frac{l_c}{l_h} \right)^2 \right] (\Omega) \quad (9)$$

$$L_g = \left[-0.1 + 30 \times \left(\frac{l_h}{l_c} \right) + 15.1 \times \left(\frac{l_h}{l_c} \right)^2 \right] (nH) \quad (10)$$

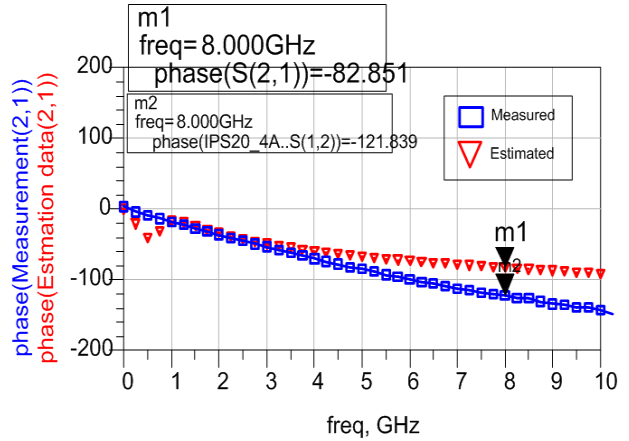


Figure 7: Measured and calculated phase S21 of the transmission line employing IPACD.

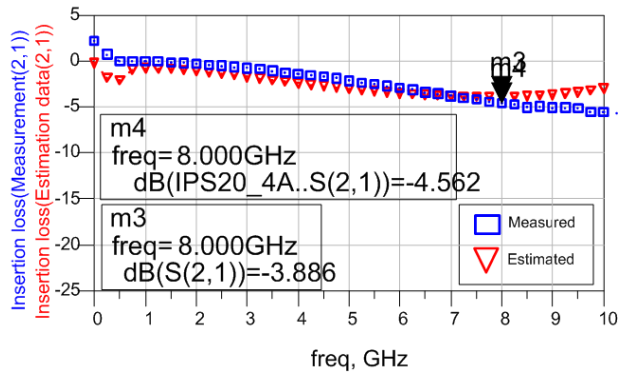


Figure 8: Measured and calculated insertion loss of the transmission line employing IPACD.

6. IPACD 구조 전송선로의 대역폭

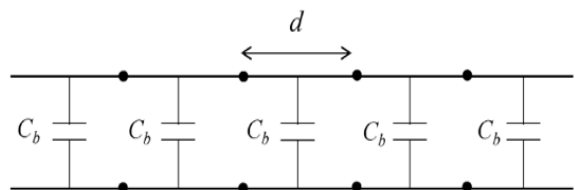


Figure 9: Equivalent circuit of the IPACD structure with periodically loaded capacitor

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 대역폭에 대하여 고찰하였다. 대역폭 및 임피던스를 계산하기 위해서 IPACD 구조의 전송선로는 **Figure 9**과 같이 용량성분 C_b 가 중단된 길이 d 인 주기적인 전송선로로 표현되었다[7][10]. IPACD 선로구조는 용량성 성분 C_a 와 C_b 를 가지지만 C_a 는 마이크로스트립 선로의 선로와 접지사이에 존재하는 용량으로 기존의 주기적인 전송선로에 포함되어 있다. C_b 는 IPACD 선로구조의 주기적인 세셉턴스 j_b 로 표현되며, **Equation (11)**과 같다.

$$j_b = j\omega C_b / Y_0 = j\omega C_b Z_0 \quad (11)$$

$$b = \omega C_b Z_0 \quad (12)$$

$$C_b = C'_b + C_f \quad (13)$$

$$d = \frac{L}{2} + T + \frac{L}{2} = L + T \quad (14)$$

$$C'_b = \epsilon_{\sin} \frac{S}{d_{\sin}} = \epsilon_{\sin} \frac{W \times T}{d_{\sin}} \quad (15)$$

$$C_f = \epsilon_{\sin} \frac{\Delta W \times T}{d_{\sin}} \quad (16)$$

위의 식에서 ϵ_{\sin} 과 d_{\sin} 은 각각 SiN유전체의 두께와 유전율을 나타내며 W , L 은 각각 그라운드 폭과 길이이며, T 는 주기적 구조의 open-stub, 즉 ULM의 간격을 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) & j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd) \\ j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd + \frac{d}{2} (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd)) & \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$kd = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_b \epsilon_c} d \quad (19)$$

위의 **Equation (17)**, **(18)**은 주기적 구조의 n번째 단위 셀에 대한 입출력 전류 I_n , I_{n+1} 과 입출력 전압 V_n , V_{n+1} 에 대한 ABCD 행렬을 나타낸다. **Equation (19)**의 ω , μ , ϵ , d 는 각각 단위 셀을 구성하는 전송선로의 투자율, 유전율, 길이를 나타낸다. 주기적 구조상에서 전송상수를 γ 라 가정하면 **Equation (20) - (23)**이 성립한다.

$$V_{n+1} = V_n e^{-\gamma d} \quad (20)$$

$$I_{n+1} = I_n e^{-\gamma d} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{n+1} e^{\gamma d} \\ I_{n+1} e^{\gamma d} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} A - e^{\gamma d} & B \\ C & D - e^{\gamma d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

위의 방정식의 근이 0이 아닌 근을 가지며, 무손실 회로에서 $AD - BC = 1$ 이라 적용하여 방정식을 풀이하게 되면 **Equation (24)**, **Equation (25)**와 같은 값을 가지게 된다.

$$\frac{e^{-\gamma d} + e^{+\gamma d}}{2} = \cosh \gamma d \quad (24)$$

$$\frac{(A+D)}{2} = (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) \quad (25)$$

선로의 구조가 주기적일 때 전송 상수 γ 는 손실성분을 가지므로 $\gamma = \alpha + j\beta$ 가 되므로 **Equation (26)**으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \cos \gamma d &= \cosh \alpha d \cosh \beta d + j \sin \alpha d \sin \beta d \\ &= \cos kd - \frac{b}{2} \sin kd \end{aligned} \quad (26)$$

위의 **Equation (26)**에서 $\alpha = 0, \beta \neq 0$ 일 때 통과대역 **Equation (27)**을 구할 수 있으며 $\alpha \neq 0, \beta = 0$ 일 때 저지대역 **Equation (28)**을 구할 수 있다.

$$\cosh j\beta d - \cos \beta d = \cos kd - Xkd \sin kd \quad (27)$$

$$\cosh \alpha d = |\cos kd - Xkd \sin kd| \geq 1 \quad (28)$$

$$X = \left(\frac{C_b Z_0}{2 \sqrt{\epsilon_c} \sqrt{\mu_0 \epsilon_c} d} \right) \quad (29)$$

Figure 10은 **Equation (27)-(29)**를 이용하여 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 통과대역과 저지대역의 $k - \beta$ 의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

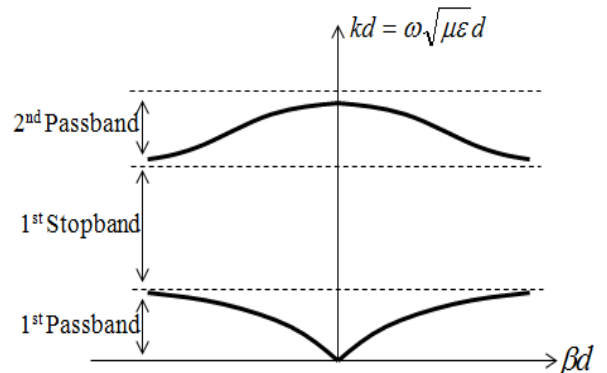


Figure 10: k-β graph of between passband and stopband

Table 1은 **Equation (27)-(29)**와 **Figure 8**을 이용하여 구한 IPACD 구조 전송선로의 대역폭 결과이다. RF 대역에서 물리적으로 의미가 있는 1차 통과대역이 129.2 GHz로 광대역 특성을 보여주었다.

Table 1: Passband and stopband of the transmission line employing IPACD.

	1st passband (GHz)	1st stopband (GHz)	2nd passband (GHz)
IPACD	f < 129.2 BW:129.2	129.2 - 1312.5 BW:1183.3	1312.5 - 1320.8 BW:8.3

7. 결론

본 논문에서는 초소형 무선 통신 시스템에서의 응용을 위하여 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 구조를 이용한 전송선로(IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 RF 특성에 대하여 연구하였다. 측정 결과, 본 논문에서 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로는 기존의 전송선로의 선로파장의 11.85%로 파장이 축소되었다. 예를 들어, IPACD 선로구조의 파장은 5 GHz에서 2.504 mm 인 반면, 기존의 전송선로는 21.12 mm로 나타났다. 그리고 상기 선로 구조의 유효유전율은 609.4 ~ 390.2, 전파상수(β)는 0.52 ~ 4.13 Rad/mm, 로 나타났다. 또한 IPACD 선로구조의 경우 기존 PACD 선로구조에 비해 삽입손실이 1~10 GHz에서 22.6%정도 성능이 개선되었다. 또한 본 논문에서는 closed-form 방정식을 통하여 IPACD 구조 전송선로의 등가회로를 이론적으로 해석하였으며, 실질적인 대역폭의 의미를 가지는 1차 통과대역에서의 차단 주파수는 129.2 GHz로 나타나 광대역의 특성을 보여주었다. 상기의 결과로 미루어 볼 때, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 초소형 무선 통신 시스템 개발에 응용이 가능함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A2A1A11049844).

References

- [1] Y. Yun, "A low loss and short-wavelength transmission line employing inverted periodically arrayed capacitive devices and its application to miniaturized passive components on MMIC," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 1, pp. 149-156, 2012 (in Korean).
- [2] A. A. Abidi, "RF-CMOS comes of age," Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transaction Electronics, vol. E87-C, no. 6, pp. 840-853, 2004.
- [3] J. R. Long, "Passive components for silicon RF and MMIC design," Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transaction Electronics, vol. E86-C, no. 6, pp. 1022-1031, 2003.
- [4] Y. Yun, "A novel microstrip-line structure employing a periodically perforated ground metal and its application to highly miniaturized and low-impedance passive components fabricated on GaAs MMIC," IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques Society, vol. 53, no. 6, pp.1951-1959, 2005.
- [5] J. H. Jeong, S. Y. Kang, and Y. Yun, "A short wavelength transmission line employing periodically arrayed capacitive devices on MMIC," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 6, pp. 840-845, 2010.
- [6] J. H. Jeong, Y. Yun, H. S. Kim, N. W. Jang, and Y. J. Baek, "A basic study on RF characteristics of short wavelength comb-type capacitive transmission line on MMIC," Journal of Microwave, vol. 55, no. 2, pp. 82-94, 2012.
- [7] E. H. Jang, J. H. Jeong, T. I. Choi, Y. Yun, "A study on basic characteristics of short wavelength transmission line employing periodically arrayed capacitive devices and its application to highly miniaturized passive components on MMIC," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 1, pp. 157-165, 2012 (in Korean).
- [8] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques Society, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, 2001.
- [9] A. S. Andrenko, Y. Ikeda, and O. Ishida, "Application of PBG microstrip circuits for enhancing the performance of high-density substrate patch antennas," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 32, no. 5, pp. 340-344, 2002.
- [10] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed., Chapter 4, Addison-wesley, 1990.