

Analysis of Lumped Element Negative Group Delay Circuit

정용채[†] · 최흥재* · 김철동**

(Yongchae Jeong · Heungjae Choi · Chul Dong Kim)

Abstract - In this paper, we have mathematically analyzed lumped element type negative group delay circuit (NGDC) and derived general design equation. The applicability of the proposed design equation is validated with mathematical and circuit simulation as well as with experimental results for international mobile telecommunication 2000 (IMT-2000) downlink band. As a design example, single branch NGDC with -0.8ns of group delay (GD) for narrow bandwidth of the specific frequency is simulated and fabricated. Finally, π -network NGDC is proposed and validated to obtain wideband GD response of -1.7 ± 0.06 nsec for 60 MHz.

Key Words : Negative group delay, IMT-2000

1. 서론

분산 매질에서 빛의 전파에 대한 연구가 Brillouin와 Sommerfeld에 의해서 처음 이루어졌다[1]. 그들의 연구에 따르면, 협대역의 펄스(pulse) 신호는 위상 속도(phase velocity), 군속도(group velocity), 전단 속도(front velocity), 에너지 전달 속도(energy transport velocity), 그리고 신호 속도(signal velocity) 등의 5개 속도로 규정될 수 있다. Chu와 Wong의 실험에 의하면 에너지 전달 속도와 신호 속도는 변칙적인 흡수 분산 영역에서 군속도가 진공 상태에서의 빛의 속도보다 빠를 수 있음을 보였다[2]. 아울러 Wang은 실험적으로 picosecond 단위의 레이저 펄스를 비정상적인 확산 특성을 갖는 물질에 인가했을 때 음의 군속도를 가짐을 확인하였다[3]. 이러한 연구에서 관찰된 음의 군지연(Negative Group Delay: NGD)은 매우 흥미로운 성질이며, 대개 일상생활에서 존재하는 평범한 물질들이 가질 수 없는 때때로 혼란스러운 개념이기도 하다. 그러나 이미 언급한 연구자들은 NGD가 Einstein의 특수 상대성 이론과 인과성에 배치되지 않음을 보였다. 또한 몇몇 연구자들은 NGD의 응용에 대해서 연구하였고, 특히 전자회로에 적용하는 것을 연구하였다[4]-[7].

초고주파 대역 전력증폭기의 비선형성을 개선하는 피드포워드 방식의 선형 전력 증폭기(linear power amplifier: LPA) 설계에 있어서, 협대역 신호 상쇄를 위해서는 두 입력 신호의 진폭과 역위상 정합이 매우 중요하다. 그런데 광대역

주파수 폭을 갖는 입력 신호의 상쇄를 위해서는 신호 진폭의 정합과 전 주파수 대역에서 역위상 정합을 만족시키기 위해 군지연 시간의 정합이 매우 중요하다[8]. 피드포워드 방식 LPA 설계에 있어서, 주 증폭기의 출력 단에 위치하면서 군지연 시간의 정합을 위해 사용되는 군지연 회로는 많은 군지연 시간을 필요로 하고, 동축 선로나 광대역 시간 지연 대역통과여파기를 이용하여 군지연 시간을 얻기 때문에 군지연 회로는 큰 삽입 손실을 갖게 되어 전체 시스템의 효율을 저하시키는 주된 요소 중에 하나이다. 피드포워드 방식 LPA의 삽입손실을 줄이고자 음의 군지연 회로(Negative Group Delay Circuit: NGDC)를 적용하려는 시도도 있었다[9]. 그러나 여기에 사용된 NGDC는 매우 좁은 주파수 대역 폭을 갖는 신호에서만 적용 가능하면서 입출력 반사 특성이 불량하였고, 무엇보다도 NGD 시간을 얻기 위한 회로 설계 방법식을 제시하지 않았다. 따라서 WCDMA 신호와 같이 음성이외에 영상 및 여러 가지 부가 서비스를 지원하는 현대의 이동통신 서비스에는 적용이 불가능하고, 임의의 NGD 시간을 갖는 NGDC를 구현하는 것은 거의 불가능하다.

이 논문에서는 집중 소자 형태의 NGDC를 수학적으로 분석하고, 임의의 NGD 시간을 얻을 수 있는 일반적 설계식을 유도하였다. 제안된 설계식의 유용성과 회로 적용성을 보이기 위해 IMT-2000 기지국 송신 주파수에서 음의 NGD 시간을 갖는 NGDC를 설계하고 구현하였다.

2. NGDC의 수학적 분석

2.1 Shunt-Series 구조의 NGDC (SS-NGDC)

그림 1(a)는 제안하는 Shunt-Series 구조의 NGDC의 기본 회로도를 보이고 있다. 기본적으로 이 회로는 LC 공진회로에 소모성 저항이 부착되어, 공진 주파수에서 감쇄를 일으

[†] 교신저자, 정회원 : 전북대 전자정보공학부 교수 · 공박
E-mail : ycjeong@jbnu.ac.kr

* 비회원 : 전북대 전자정보공학부 박사과정

** 비회원 : 세원텔레텍(주)

접수일자 : 2009년 9월 1일

최종완료 : 2009년 11월 13일

키는 작용을 한다. 이 SS-NGDC의 입력 임피던스는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z_{in,SS} = R_{SS} + j\omega L_{SS} + \frac{1}{j\omega C_{SS}} \quad (1)$$

식 (1)과 식 (2)의 SS-NGDC회로의 ABCD-파라미터로부터 전달 계수(S21)의 위상 계수(φ_{SS})를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{SS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,SS} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_{SS} + j\left(\frac{\omega^2 L_{SS} C_{SS} - 1}{\omega C_{SS}}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\phi_{SS} = \tan^{-1} \left[\frac{(\omega^2 L_{SS} C_{SS} - 1)\omega Z_0 C_{SS}}{(2R_{SS} + Z_0)R_{SS} C_{SS} \omega^2 + 2(\omega^2 L_{SS} C_{SS} - 1)^2} \right] \quad (3)$$

식 (3)으로부터 φ_{SS}의 시간 변화에 따른 변화율을 통해 균지연 시간(GD_{SS})을 유도할 수 있는데, 이때 공진조건(ω = (L_{SS}C_{SS})^{0.5})을 대입하면 식 (4)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$GD_{SS} \Big|_{\omega=1/\sqrt{L_{SS}C_{SS}}} = -\frac{d\phi}{d\omega} = -\frac{2Z_0 L_{SS}}{R_{SS}(2R_{SS} + Z_0)} \quad (4)$$

식 (4)에서 모든 파라미터들이 양의 값을 가지므로 균지연 시간은 음의 값을 갖게 된다. 따라서 제안한 회로가 동작 주파수에서 공진이 되도록 하면 NGD 현상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 임의의 동작주파수에서 임의의 원하는 NGD를 얻기 위해서는 식 (4)를 통해 R_{SS}와 L_{SS} 소자 값을 정할 수 있고, 공진 조건을 이용하여 C_{SS} 소자 값도 얻을 수 있다. 회로 소자 값들의 조합에 따른 NGD 변화의 직관적인 이해를 돕기 위해 Matlab 프로그램을 이용하여 그림 1(b)와 같이 3차원 그래프로 나타냈으며, 이를 통해 제안된 SS-NGDC의 균지연은 저항 값에 반비례하고 인덕턴스에 비례함을 알 수 있다. 아울러 SS-NGDC의 전달 계수와 반사 계수 특성을 그림 1(c)에 나타냈다. 저항 값을 0으로 접근시킬수록 NGD의 증가를 가져 오지만 삽입 손실의 증가와 반사 특성의 열화를 초래함을 확인할 수 있다.

Agilent사의 ADS2009를 이용하여 SS-NGDC의 회로 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타냈다. 2.14 GHz 대역에서 -1.2 nsec의 NGD를 얻기 위해서 식 (4)와 그림 1(b)를 이용하여 회로 소자 값을 추출하였는데, 필요 소자 값은 각각 R_{SS}=20 Ω, C_{SS}=0.25 pF, L_{SS}=22.1 nH 였다. 이때 삽입 손실과 반사 계수는 각각 -7 dB와 -5 dB이며, 신호의 전달 및 반사 계수특성과 NGD 특성을 그림 2(b)와 (c)에 나타냈다. 시뮬레이션으로 얻어진 NGD 시간이 -1.2 nsec로 설계 목표 값과 일치함을 확인할 수 있다.

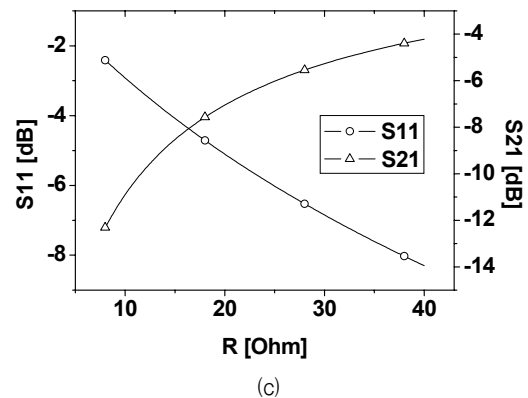
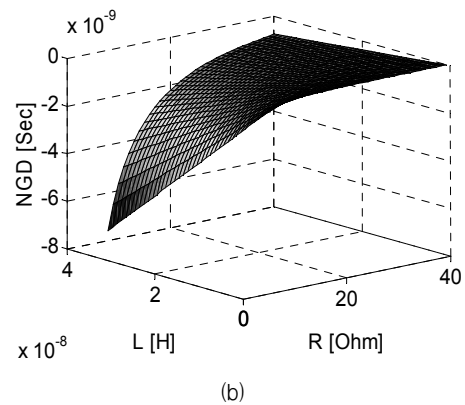
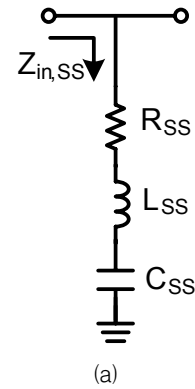
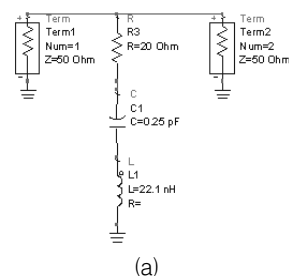


그림 1 (a) Shunt-Series 구조 NGDC의 회로도, (b) 저항 값과 인덕턴스에 따른 NGD 특성, (c) 저항 값에 따른 Shunt-Series 구조 NGDC의 전달 및 반사 계수 특성
Fig. 1 (a) Circuit diagram of SS-NGDC, (b) 3-D plot of SS-NGDC according to the resistance and inductance, and (c) transmission and reflection characteristic with respect to resistance.



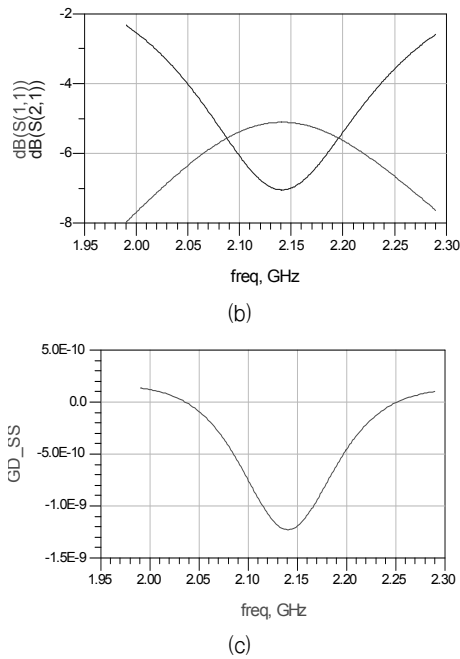


그림 2 (a) Shunt-Series 구조 NGDC의 시뮬레이션 회로도, (b) 반사 및 전달 계수 특성 (c) 군지연 특성
 Fig. 2 (a) Simulated circuit of SS-NGDC, (b) reflection and transmission characteristic, and (c) group delay response.

2-2 Series-Parallel 구조의 NGDC (SP-NGDC)

그림 3(a)은 Series-Parallel 구조를 갖는 또 다른 NGDC 이다. 앞 절과 유사한 과정을 통하여 NGD에 대한 일반식들을 공진 조건(\$\omega=(L_{sp}C_{sp})0.5\$)에서 식 (5)~(8)과 같이 얻을 수 있다.

$$Z_{in,SP} = \frac{1}{\frac{1}{R_{SP}} + \frac{1}{j\omega L_{SP}} + j\omega C_{SP}} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{SP} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{in,SP} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega L_{SP} R_{SP}}{\omega L + jR(\omega^2 L_{SP} C_{SP} - 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\phi_{SP} = \tan^{-1} \left[\frac{2(\omega^2 L_{SP} C_{SP} - 1)\omega Z_0 L_{SP} R_{SP}^2}{2\omega L_{SP} Z_0 (\omega L_{SP} R_{SP} + 2\omega L_{SP} Z_0) + 4Z_0^2 R_{SP}^2 (\omega^2 L_{SP} C_{SP} - 1)^2} \right] \quad (7)$$

$$GD_{SP} \Big|_{\omega=1/\sqrt{L_{SP}C_{SP}}} = -\frac{2R_{SP}^2 C_{SP}}{2Z_0 + R_{SP}} \quad (8)$$

식 (8)에서 모든 파라미터들이 양의 값을 가지므로 군지연 시간은 음의 값을 갖게 된다. 따라서 제안된 SP-NGDC 역시 동작 주파수에서 공진이 되도록 하면 NGD 현상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 회로 소자 값에 따른 NGD 변화의 직관적인 이해를 위해 Matlab 프로그램을 이용하여 그림 3(b)와 같이 3차원 그래프로 나타냈으며, 제안된 SP-NGDC의 군지연은 저항 값에 비례하고 캐패시턴스에

반비례함을 알 수 있다. 아울러 SP-NGDC의 전달 계수와 반사 계수 특성을 그림 3(c)에 나타냈다. NGD의 증가는 삽입 손실의 증가와 반사 특성의 열화를 동반함을 확인할 수 있다. 그러나 NGDC의 삽입손실은 일반적인 소신호 증폭기로 보충할 수 있으므로 실제 구현할 때 큰 문제가 되지 않는다.

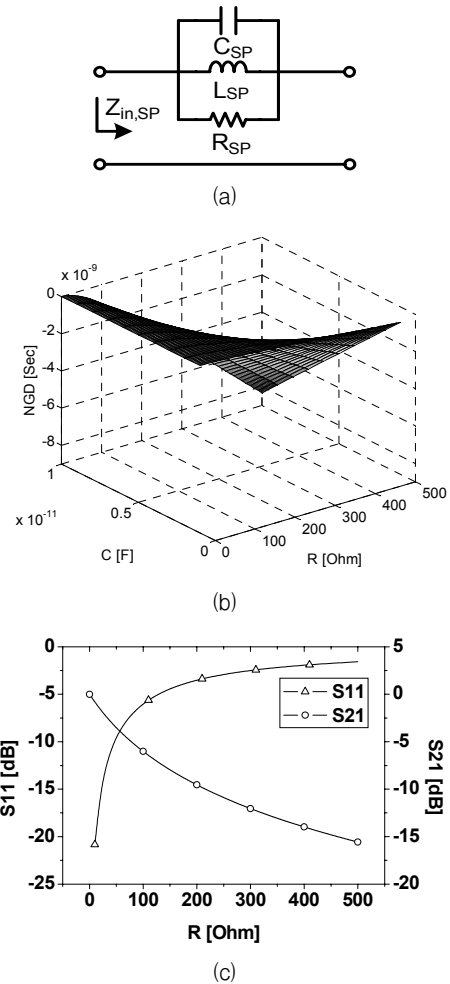


그림 3 (a) Series-Parallel 구조 NGDC의 회로도, (b) 저항 값과 캐패시턴스에 따른 음의 군지연 시간 특성, (c) 저항 값에 따른 Shunt-Series 구조 NGDC의 전달 및 반사 계수 특성
 Fig. 3 (a) Circuit diagram of SP-NGDC, (b)3-D plot of SP-NGDC according to the resistance and capacitance, and (c) transmission and reflection characteristic with respect to resistance.

SP-NGDC의 회로 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타냈다. 2.14 GHz 대역에서 -1.2 nsec의 NGD를 얻기 위해서 식 (8)과 그림 3(b)를 이용하여 회로 소자 값을 추출하였는데, 필요 소자 값은 각각 \$R_{sp}=220 \Omega\$, \$C_{sp}=4 \text{ pF}\$, \$L_{sp}=1.38 \text{ nH}\$ 이다. 이때 삽입 손실과 반사 계수는 각각 -10 dB와 -3 dB이며, 신호의 반사 및 전달 계수특성과 NGD 특성을 그림 4(b)와 (c)에 나타냈다. 시뮬레이션으로 얻어진 NGD가 -1.2 nsec로 설계 목표값과 일치함을 확인할 수 있다.

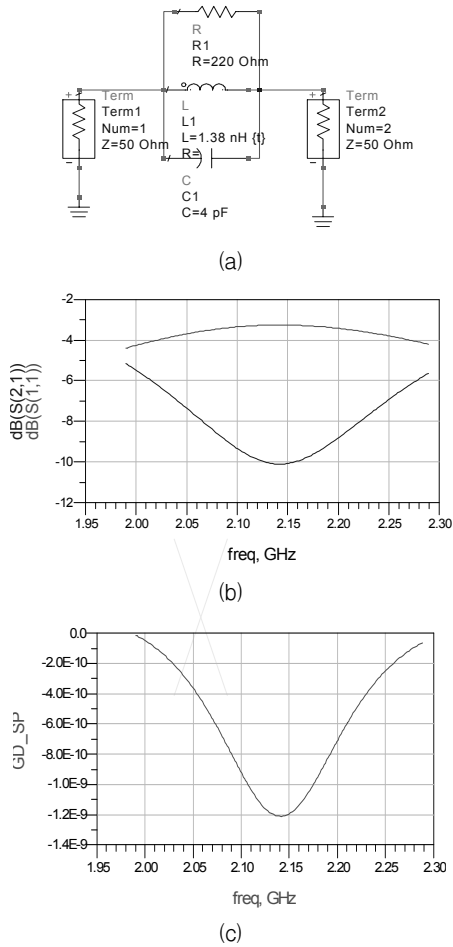


그림 4 (a) Series-Paralle 구조 NGDC의 시뮬레이션 회로도, (b) 반사 및 전달 계수 특성 (c) 군지연 특성
Fig. 4 (a) Simulated circuit of SP-NGDC, (b) reflection and transmission characteristic, and (c) group delay response.

3. NGDC의 실험결과

앞에서 제안한 SS 구조 및 SP 구조의 NGDC는 좁은 주파수 대역에서만 NGD 특성을 가지므로, 실제 상용 통신 시스템에 직접적으로 적용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 상용 통신에 사용가능할 정도의 주파수 대역폭을 갖도록 SS 구조 및 SP 구조의 NGDC를 그림 5(a)와 같이 π 형 구조로 결합하였다. 각 SS 구조 및 SP 구조의 NGDC는 각각 2.11 GHz, 2.14 GHz, 2.17 GHz에서 공진하도록 설계함으로써, 전체적으로 IMT-2000 기지국 송신 주파수 대역인 2.11~2.17 GHz에서 NGD 특성을 갖도록 설계하였다. 그림 5(b)는 제작된 NGDC의 사진이다. 최초 NGDC는 집중 소자로만 구현하는 것으로 가정하였으나, 사진에서는 DC 바이어스 라인이 볼 수 있다. 상용 집중 소자는 제한적인 소자 값을 제공하며, 초고주파 대역에서는 원하는 인덕턴스를 얻기 힘들어서 인덕턴스는 바랙터 다이오드로 중단된 전송선로를 이용하여 구현하였는데 DC 바이어스 라인은 바랙터 다이오드를 구동시키기 위한 것이다. 바랙터 다이오드 중단 전송선로를 통해 용량성 임피던스를 유도성 임피던스로 변

집중 소자형 음의 군지연 회로 설계

환할 수 있었다. 표 1은 π 형 구조의 NGDC를 구현하기 위해 필요한 소자 값들을 요약한 것이다.

그림 5(a)에 나타난 π -구조 NGDC를 구현하기 전에 기초 실험으로 π -구조를 이루는 SS- 및 SP-NGDC를 제작하여 주파수분석기(Network Analyzer)로 측정하였다. 각 SS- 및 SP-NGDC의 측정 결과를 그림 6에 나타냈는데, 각 중심 주파수에서 측정된 NGD는 각각 -0.81 nsec, -0.86 nsec, 그리고 -0.86 nsec이었다.

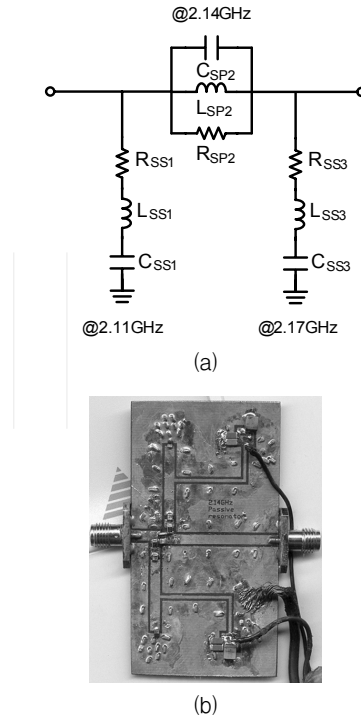
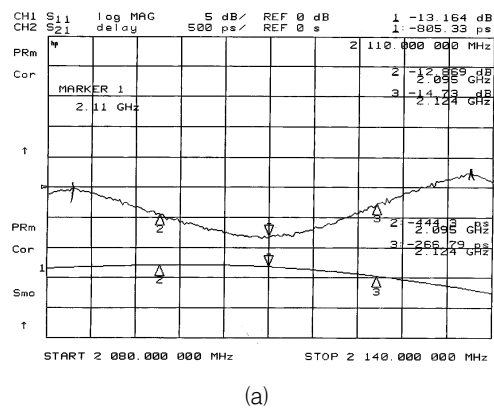


그림 5 (a) 광대역 π -구조 NGDC와 (b) 제작된 π -구조 음의 군지연 회로
Fig. 5 (a) Circuit diagram of broadband π -type NGDC and (b) photo of the fabricated NGDC.

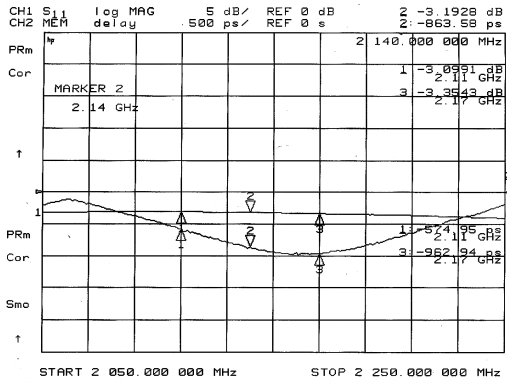
표 1 π -구조 음의 군지연 회로도의 소자값 요약

Table 1 Summary of circuit parameters for π -network.

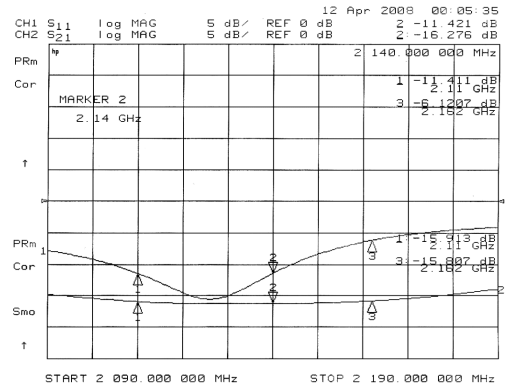
R_{SS1}	20 Ω	R_{SP2}	220 Ω	R_{SS3}	20 Ω
L_{SS1}	22.2 nH	L_{SP2}	1.4 nH	L_{SS3}	22.4 nH
C_{SS1}	0.25 pF	C_{SP2}	4 pF	C_{SS3}	0.24 pF



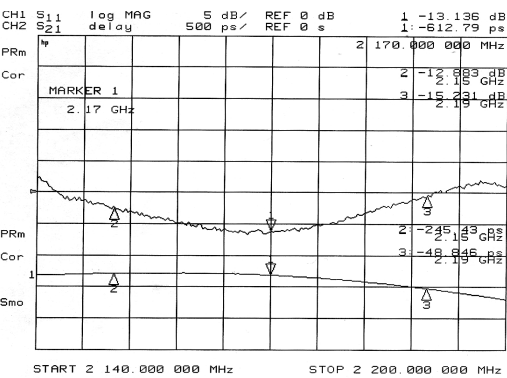
(a)



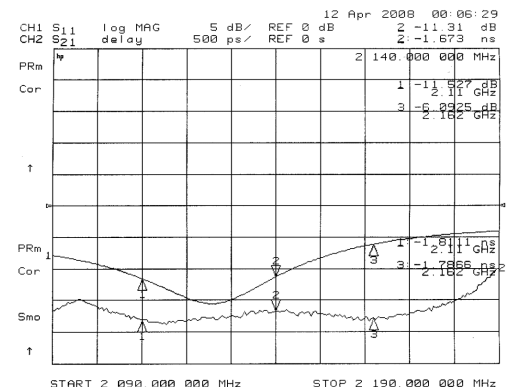
(b)



(a)



(c)



(b)

그림 6 측정 결과 : (a) SS-NGDC 회로 @2.11 GHz, (b) SP-NGDC 회로 @ 2.14 GHz, (c) SS-NGDC 회로 @2.17 GHz

Fig. 6 Measured results of : (a) SS-NGDC branch @2.11 GHz, (b) SP-NGDC branch @ 2.14 GHz, and (c) SS-NGDC branch @2.17 GHz.

그림 7은 제작된 광대역 NGDC의 측정 결과이다. 제작된 NGDC는 60 MHz의 대역폭에 -16 ± 0.2 dB의 삽입 손실과 -1.7 ± 0.06 nsec의 NGD를 가짐을 확인할 수 있었다. NGDC의 삽입손실은 초고주파 범용 증폭기를 사용함으로써 보충할 수 있다. 측정된 NGD가 -0.8 nsec가 아닌 -1.7 nsec를 가진 이유는 협대역 NGDC의 주파수 특성이 인접 주파수에 중첩되어 나타남으로 더 큰 NGD 특성을 갖게 된 것이다. 측정된 반사 계수는 중심 주파수에서 -11.4 dB이고, 60 MHz 대역 가장 자리에서도 -6.1 dB 특성을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 NGD에 대해 살펴보았고, 전기적 구현에 대하여 고찰하였다. 우리는 집중 소자로 구현된 NGDC의 회로 모델들을 살펴보고, NGD를 얻기 위한 일반식들을 유도하였다. 설계의 예로서 협대역 NGDC들과 π -구조의 광대역 NGDC를 설계 및 제작하여 60 MHz 대역폭에 대하여 -1.7 ± 0.06 nsec의 NGD를 얻을 수 있었다. 제안된 NGDC를

그림 7 제작된 광대역 NGDC의 측정 결과: (a) 전달 및 반사 계수, (b) NGD 특성

Fig. 7 Measured results of broadband NGDC: (a) transmission and reflection characteristic, and (b) group delay characteristic.

기존의 피드포워드 방식의 선형 전력 증폭기의 균지연 회로와 결합하여 사용하면 균지연 시간과 삽입손실을 줄일 수 있어 전체 시스템의 효율 개선, 용적 감소, 그리고 발열량 감소에 따른 시스템 안정성 증대를 기대할 수 있다. 또한 NGDC 회로를 집중 소자로 구현할 경우 사용할 수 있는 소자 값이 제한적이므로 원하는 NGD를 정확하게 구현하는데 한계가 있다. 만약 집중소자로 구현된 NGDC를 분산 소자로 구현할 수 있다면 더욱 용이하게 NGD 특성을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 향후 연구 내용이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF- 2008-313-D00805).

참 고 문 헌

[1] L. Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity*, Academic Press, New York, 1960, pp. 113-137.

- [2] S. Chu and S. Wong, "Linear Pules Propagation in an Absorbing Medium," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48. pp. 738-741, 1982.
- [3] L. J. Wang, A. Kuzimich, and Dogariu, "Gain-assisted of Superluminal Light Propagation," *Nature* 406, pp. 277-279, June 2000.
- [4] D. Solli, R. Y. Chiao, "Superluminal effects and negative delays in electronics, and their applications," *Physical Review E*, Issue 5, pp. 056601-1, November 2002.
- [5] O. F. Siddiqui, M. Mojahedi, G. V. Eleftheriades, "Periodically Loaded Transmission Line With Effective Negative Refractive Index and Negative Group Velocity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 10, pp. 2619-2625, October 2003.
- [6] M. Kitano, T. Nakanishi, K. Sugiyama, "Negative Group Delay and Superluminal Propagation: An Electronic Circuit Approach," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 43-51, January 2003.
- [7] B. Ravelo, A. Perennec, and M. Le Roy, "Synthesis of Broadband Negative Group Delay Active Circuits," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 2177-2180, June 2007.
- [8] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifiers Design*, Norwood, MA, Artech House, 2002.
- [9] H. Noto, K. Yamauchi, M. Nakayama, and Y. Isota, "Negative Group Delay Circuit for Feed-Forward Amplifier," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1103-1106, June 2007.

저 자 소 개



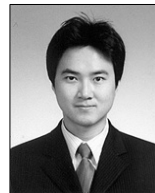
정 용 채 (鄭 龍 采)

1989년 서강대 전자공학과 졸업 (공학사).
 1991년 동대학원 전자공학과 졸업 (석사).
 1996년 동대학원 전자공학과 졸업 (공학박사).
 1991~1998 삼성전자 정보통신본부 선임 연구원, 1998~ 현재 전북대학교 전자정보 공학부 교수.

Tel : (063)270-2458

Fax : (063)270-2394

E-mail : ycjeong@jbnu.ac.kr



최 흥 재 (崔 興 宰)

2004년 전북대 전자정보공학부 졸업 (공학사). 2006년 동대학원 정보통신공학과 졸업 (석사). 2006~현재 동대학원 박사과정.

Tel : (063)270-2458

Fax : (063)270-2394

E-mail : streetpoet@jbnu.ac.kr



김 철 동 (金 哲 東)

1971년 서울대 전자공학과 졸업(공학사)
 1985년 미국 Wisconsin-Madison 전기공학과 (공학박사) 1985~1990년 미국 AT&T Bell Labs. MTS 1990~1997년 삼성전자 정보통신사업본부 상무이사
 1997~현재 세원텔레텍(주) 대표이사