

## 능동인덕터 사용에 따른 MMIC 주파수 변환기의 성능향상과 면적축소에 관한 연구

準會員 具 賢 澈\* 正會員 朴 廷 浩\*

### Study on Performance Improvement and Size Reduction Using Active Inductors in MMIC Frequency Converter

Hyun Cheol Koo\* , Jung Ho Park\* *Regular Member*

#### 要 約

이 논문에서는 TV 튜너로 사용될 수 있는 MMIC 주파수 변환기를 설계하였다. MMIC를 설계할 때에 수동인덕터는 다른 수동소자나 능동소자에 비해서 그 차지하는 면적이 매우 크고 원하지 않는 상호 간섭이 일어나 동작특성이 나빠지고 신뢰성과 재현성도 의심하지 않을 수 없다. 그러나 주파수 변환기에 사용되는 증폭기에 능동인덕터를 적용시키면 높은 안정성과 넓은 대역폭을 유지하게 된다. 믹서나 필터 등에도 능동정합을 이용하면 원하는 부분에서 높은 출력을 얻을 수 있다. 이 연구에서는 능동인덕터를 주파수 변환기에 적용하여 기존의 인덕터를 사용한 것과 비교하였다. 능동인덕터와 능동정합을 이용한 주파수 변환기가 기존의 것보다 면적에서 28.6% 줄이면서도 원하는 주파수 대역에서 더 큰 출력 신호를 얻을 수 있다.

#### ABSTRACT

In this paper, a design of active inductors and their application in a frequency converter are proposed. In MMIC design, passive spiral inductor takes larger area than any other passive and active elements. A conventional spiral inductor generates undesired crosstalk, and its performance cannot have certainty and reproducibility. Meanwhile the active inductor eliminates these drawbacks, and operates for much wider bandwidth. Furthermore, its size is smaller and nearly independent of inductance. The performance of MMIC frequency converter with active inductors is directly compared with that of the frequency converters with spiral inductors. The size is 28.6% smaller with better performance in MMIC frequency converter.

\*高麗大學校 電子工學科  
Dept. of Electronics Eng., Korea Univ.  
論文番號 : 9467  
接受日字 : 1994年 3月 4日

## I. 서 론

최근들어 화합물 반도체 분야에서는 새로운 소재 개발과 다양한 소자 연구, 그리고 이를 이용한 집적 회로 기술이 빠른 발전을 계속하여 초고속, 초소형 응용기술분야에 이용되고 있다. 공정기술 분야에서의 현격한 발전과 화합물 반도체 재료의 여러가지 우수한 성질을 이용하여 여러분야에 점차 사용범위를 넓혀가고 있다. 집적회로는 GaAs MESFET을 중심으로 발전한 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 분야에서 여러가지 초고주파 회로에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 MMIC에 사용되는 인덕터와 이와 관련된 회로설계에 관한 연구를 중심으로 하고 있다. MMIC내에 수동소자는 저항, 인덕터, 캐패시터가 있는데 이 소자들은 주로 박막(thin film)을 이용하여 제작되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 그런데 인덕터의 경우 저항이나 캐패시터와 비교해 볼 때 그 차지하는 면적의 소형화에 한계가 있다. 또한 박막으로 제작한 인덕터는 상호간섭(crosstalk) 현상이 심하게 나타나는 단점이 있어 원하는 인덕턴스를 얻기가 매우 힘들다. 이에 반해 이 논문에서 이용한 능동소자를 이용한 인덕터는 위와 같은 단점을 해결해 주고 있다. 인덕턴스에 관계없이 크기가 거의 일정하며 넓은 주파수 범위에서 동작을 시킬 수 있다.

본 연구에서 제시한 능동소자를 이용하여 만든 인덕터는 GaAs MESFET을 중심으로 하여 설계하였다. GaAs MESFET의 중요한 파라미터를 변화시켜서 몇개의 MESFET을 조합하여 원하는 인덕턴스를 갖는 블럭단위의 회로를 구성한다. 이것을 초고주파 회로에 적용시켜 기존에 박막을 이용한 회로와 비교, 분석하여 회로의 면적을 줄임은 물론 동작특성도 우수한 MMIC를 구성하는 것이 본 연구의 목적이라 하겠다. 그리고 수동인덕터를 그대로 능동인덕터로 대체하는 것 뿐만 아니라 저항과 캐패시터, MESFET을 이용하여 정합을 시키는 능동정합에 대한 연구도 포함하고 있다. 실제로 적용된 증폭기, 필터, 믹서 등의 설계와 해석을 통해 동작특성이 어떻게 향상되는지를 기존 회로와 비교 분석하였다. 그리고 최종적으로 주파수 변환기에 적용하여 TV 튜너(tuner)에 MMIC화의 실현을 제시하였다.

## II. 증폭기내의 능동인덕터의 적용

이 절에서는 먼저 주파수 변환기에 필수적으로 사용되는 증폭기에 적용한 것을 보이겠다. 여기에서 해석한 모든 회로는 입력단과 출력단을 50 Ω 부하에 전력이 최대로 전달 되도록 정합을 하였다.

여기에 사용된 능동인덕터의 회로도도 그림 1과 같다. 이 능동인덕터는 캐스코드(cascode) FET과 궤환(feedback) 저항으로 구성되어 있다.<sup>[3]</sup>

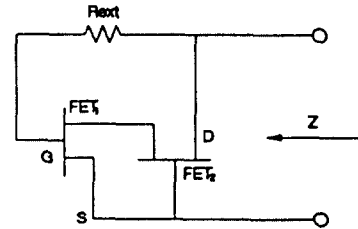


그림 1. 능동인덕터의 회로도  
Fig. 1. Circuit of active inductor

능동인덕터를 설계하기 위해서는 MESFET 등가 회로에서의  $C_{gs}$ (gate-source capacitance),  $g_m$ (transconductance) 등의 파라미터가 인덕턴스를 결정하기 때문에 매우 중요하다. 이 회로의 양단에서의 임피던스는 식 (1)과 같이 실수부와 허수부로 이루어진다. 우리가 여기서 같은 FET을 사용하고 간략화 하면 식 (2)가 된다.

$$Z = \frac{1 + j\omega C_{gs1} R_{ext}}{g_{m1} + j\omega [C_{gs1} - C_{gs2} + \omega^2 C_{gs2} (C_{gs1} C_{gs2} / g_{m1} g_{m2})]} \quad (1)$$

$$Z \approx \frac{1}{g_m} + j\omega \frac{C_{gs} R_{ext}}{g_m} \quad (2)$$

이 형태는  $R_{ext}$ 로서 인덕턴스를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다. MESFET의 디멘션을 정확히 변화시키는 것보다는 먼저 비슷한 MESFET을 선정하고 다음에  $R_{ext}$ 를 변화시키는 것이 원하는 인덕턴스를 얻기가 쉽다. 그러나 원하지 않는 저항성분이 나타나는 단점이 있다.

그림 2는 고정형 수동인덕터를 능동인덕터로 대체

한 증폭기 회로이고 그림 3은 수동인덕터와 캐패시터만 사용한 리액티브 정합 증폭기이다.<sup>14</sup> 리액티브 정합 방식을 사용하면 다른 회로에 비해 설계가 간단하고 높은 전력이득을 갖는 특징이 있다.

세가지 증폭기의 전력이득과 입력 반사계수, 출력 반사계수를 주파수에 따라 해석 하였다. 입출력 반사계수는 증폭기의 설계시 이 값들이 낮을수록 좋다. 증폭기의 해석 결과는 뒤에서 다른 증폭기와 비교하여 놓았다.

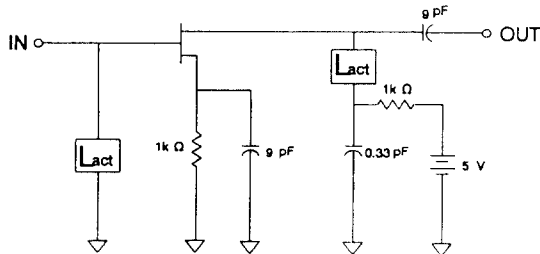


그림 2. 능동인덕터를 이용한 1단 증폭기 회로도  
Fig. 2. Circuits of 1-stage amplifier using active inductors

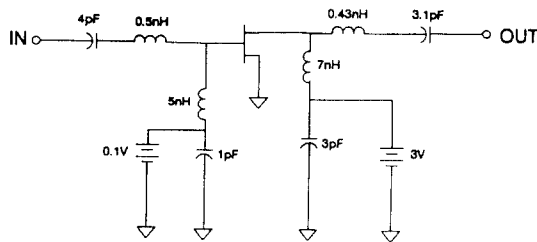


그림 3. 리액티브 정합 증폭기 회로도  
Fig. 3. Circuit of reactive matching amplifier

증폭기에서 중요한 요소가 또 하나 있는데 바로 안정도(Stability factor)를 나타내는  $k$ 이다. 이 값은 식 (3)과 같이 S 파라미터 해석으로 구할 수 있다.<sup>15</sup> 여기서  $k$ 가 1보다 크다는 조건을 만족하면 그 회로는 다른 조건에 관계없이 안정하다.  $k$ 가 1보다 작으면 입력 또는 출력 임피던스의 실수부가 음수로 나타나 원하지 않는 발진(oscillation)이 일어날 수 있는 경우이다. 이럴 경우에는 반사계수 평면 상에서 알맞은 영역을 선택하여 임피던스 정합을 하여야 한다.

$$k = \frac{1 - |S_{11}| - |S_{22}| + |D|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} \quad (D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}) \quad (3)$$

표 1에서는 위에서 제시한 몇가지 증폭기의 특성을 요약하여 보이고 있다. 이 표를 보면 능동인덕터를 사용하면 넓은 대역폭과 높은 안정도, 그리고 입출력 반사계수에서도 우수한 성질을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 리액티브 정합 증폭기에 비해 낮은 최고 이득을 보이고 있으나 이득대역폭이 좁은 거의 비슷한 수준까지 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 그런데 리액티브 정합 증폭기는 회로의 안정성에 대한 문제와 인덕터를 많이 사용하는데 따르는 큰 칩 사이즈, 그리고 신뢰성도 의심하지 않을 수 없다. 수동인덕터를 사용한 것은 최고 이득만 높을 뿐 다른 특성에서는 뛰어난 점을 나타내지 못하고 있다.

여기에서 사용할 수 있는 다른 능동인덕터의 회로도는 그림 4에 있는데 같은 FET을 사용하면 저항 성분이 나타나지 않는 장점이 있다.<sup>16</sup>

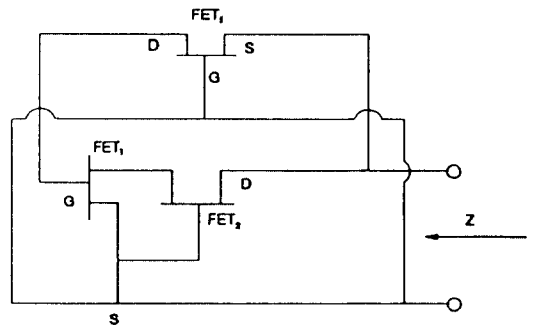
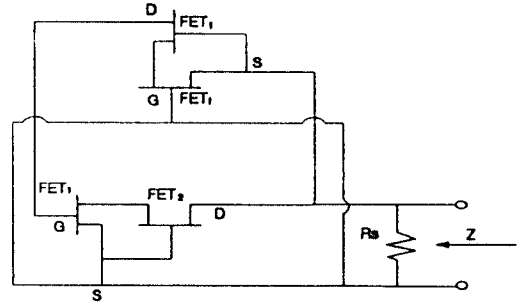


그림 4. 다른 능동인덕터의 회로도  
Fig. 4. Circuit of other active inductors

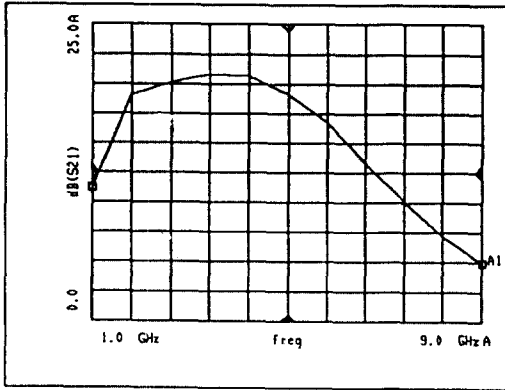
표 1. 여러가지 증폭기의 특성 비교

Table 1. Comparison of various amplifiers

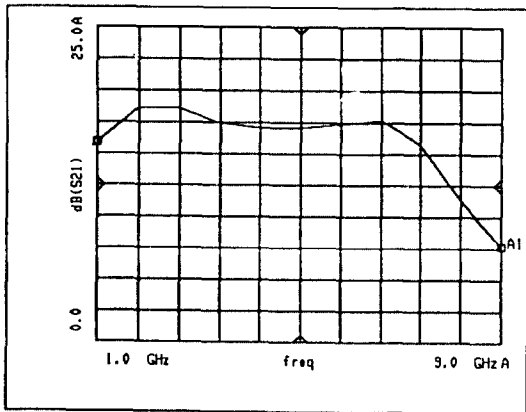
	능동인덕터를 이용한 증폭기	수동인덕터를 이용한 증폭기	리액티브 정합 증폭기
최고이득	9.6dB(2GHz)	13.8dB(3GHz)	11.6dB(2GHz)
3dB 대역폭	7.5GHz	4GHz	6.5GHz
이득·대역폭	72 dBGHz	55.2 dBGHz	75.4 dBGHz
안정도(4GHz)	1.769	0.961	0.6
칩크기(상대값)	57	100	100
입출력 반사계수	평균 -10dB정도	평균 -8dB정도	평균 -8dB정도

2단 증폭기에서 수동인덕터를 사용한 것은 이득-대역폭의 곱이 100 dBGHz 정도인 반면, 능동인덕터를 사용한 것은 120~130 dBGHz로 나타나 훨씬 큰 값

을 가진다. 특히 능동인덕터를 사용한 것은 2단으로 연결한 것이 1단만 사용하는 것보다 평면한 이득곡선을 보여 실용적인 면에서도 매우 우수하다. 그림 5에서는 두 가지 2단 증폭기의 주파수에 따른 전력이득을 보여주고 있다.



(a) 수동인덕터 사용



(b) 능동인덕터 사용

### III. 능동정합을 이용한 믹서와 필터

이 절에서 제시한 방법은 능동인덕터를 그대로 수동형 인덕터에 대체한 것이 아니라 수동형 인덕터를 사용하지 않고 능동소자인 MESFET과 캐패시터, 저항으로 설계한 것이다.<sup>[7,8]</sup> 여기에서 제시 할 믹서는 출력부분을 능동 정합하여 회로를 구성한 것이다. 캐패시터와 인덕터를 사용하여 구성한 듀얼 게이트(dual gate) 믹서를 능동정합하여 변형시킨 것이 그림 6에 나타나 있는데 입력단과 같은 형태이던 출력단을 MESFET과 캐패시터로만 정합을 하였다. 캐패시터

그림 5. 2단 증폭기의 전력이득 곡선  
Fig. 5. Power gain of 2-stage amplifiers

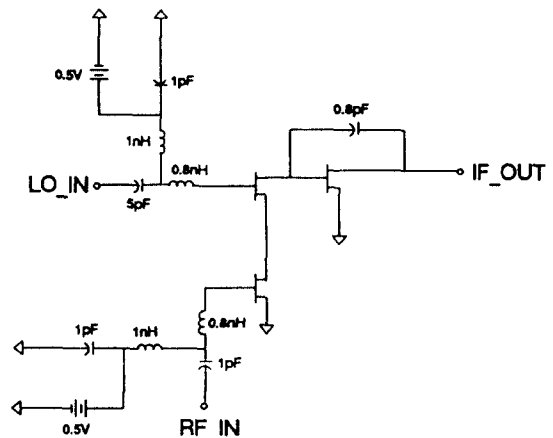


그림 6. 능동정합 믹서의 회로도  
Fig. 6. Circuits of active matching mixer

값의 변화로써 원하는 믹서의 출력을 조절할 수 있다. 기존의 듀얼게이트 믹서는 출력단이 입력단과 값이 수동인덕터와 캐패시터로 이루어졌는데 이 믹서는(능동정합을 이용한 믹서는) MESFET과 원하는 주파수대의 높은 출력을 얻기위한 캐패시터로 이루어져 있다. 이 믹서는 작은 전원공급만이 필요한 장점도 있다.

두 회로 모두 RF 입력단에는 5 GHz와 5.1 GHz의 주파수로 -20dBm, 국부 발진기(LO)단에는 4.5 GHz의 주파수로 7 dBm의 전력을 입력하였으며 출력단은 50 Ω의 저항을 연결하여 해석하였다. 이 회로들은 합성된 파형중 저주파 부분을 사용하기 위해서 구성한 것이다. 두 회로의 출력특성을 비교해 보면 전체적으로 능동정합을 한 회로가 낮은 전력 스펙트럼과 변환이득을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 이 회로에 목적에 비추어 볼 때 저주파 영역에서 최고점이 능동정합을 한 것이 2.4 dBm 정도 크게 나타남을 알 수 있다. 고주파 부분을 사용하려고 하면 출력부분의 정합을 변형 시키면 된다.

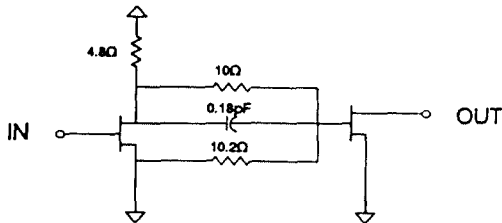


그림 7. 능동정합 저역통과 필터의 회로도  
Fig. 7. Circuits of active matching low pass filter

능동 필터의 회로도도 그림 7에 나타나 있는데 여기에서 설계한 것은 어떠한 주파수 이하의 신호만을 전달시키기 위한 저역통과(Low pass filter) 필터이다. 이 필터의 입력단과 출력단은 50 Ω을 연결하여 해석하였다. 능동 정합 필터가 훨씬 고주파를 잘 제거하는 것을 알 수 있다. 그러나 차단 주파수(cutoff frequency)가 1 GHz 이하인 필터는 수동필터를 사용하는 것이 더 좋은 특성을 나타내므로 여기서 설계한 주파수 변환기에 사용되는 필터에는 능동정합 필터가 적당하지 않다.

#### IV. 주파수 변환기내의 적용

이 절에서는 앞에서 살펴본 여러가지 회로를 종합하여 능동 인덕터와 능동정합을 이용한 주파수 변환기를 설계하였다. 블럭도는 그림 8에 나타나 있다. 주파수 변환기는 RF 입력 신호를 수신하여 국부 발진기의 신호와 믹서를 이용하여 합성하여 원하는 주파수를 얻는 회로이다. 보통 RF 입력 전력은 그 값이 작기때문에 증폭기를 기전 후 믹서에 신호를 입력시킨다. 국부 발진기단에는 발진주파수가 4 GHz이고 출력전력을 10 dBm으로 구성한 회로를 연결하였고, RF 입력단은 4.5 GHz와 4.6 GHz의 신호를 수신기단의 전형적인 전력인 -40 dBm을 입력하였다. 출력단은 50 Ω의 저항을 연결하였을 때에 전력이 최대로 전달되도록 회로의 소자값들을 최적화 하였다.

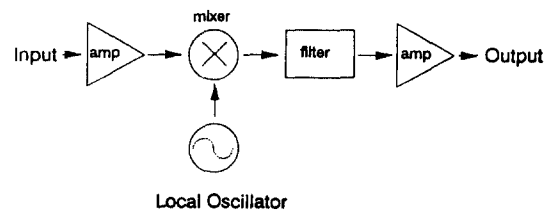
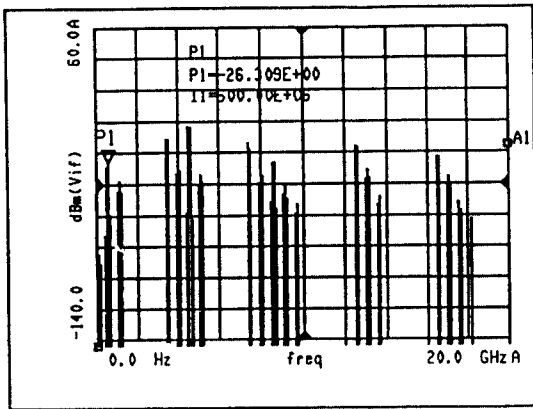


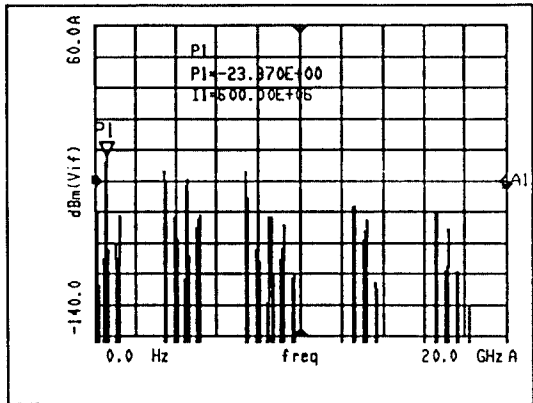
그림 8. 주파수 변환기 블럭도  
Fig. 8. Block diagram of frequency converter

그림 9에서는 능동인덕터와 능동정합을 사용한 회로와 이 방식을 사용하지 않은 기존 회로의 출력특성을 비교하였다. 입력 전력과 국부 발진기는 같은 것을 사용하였다. 능동인덕터를 사용한 회로가 증폭기단에서 입력 주파수인 4.5-4.6 GHz에서 더 낮은 증폭을 나타낸다. 그러나 출력단에서의 능동정합으로 주파수 변환기 출력값은 0.6 GHz 대역에서 그림 9(b)의 출력이 (a)보다 크게 나타나고 있다. 뿐만 아니라 증폭기의 안정도도 뛰어나기 때문에 간단한 저역 통과 필터를 사용하면 다운 변환기(Down converter)로서 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 앞에서 해석한 주파수 변환기 회로를 레이아웃(layout)한 그림이다. 이 논문에서 제시한 방법이 기존의 것보다 증폭기에서는 약 43%, 믹서에서는 약 12% 감소하였으며 전체 회로에서는 28.6%정도 감소하였다. 능동인덕터와 능동정합을 사용한 것이 칩 면적 측면에서도 장점이 있음을 알 수 있다.



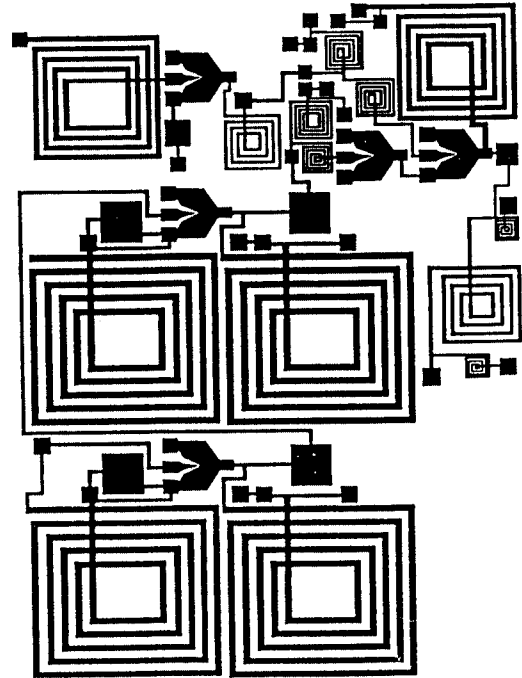
(a) 기존회로



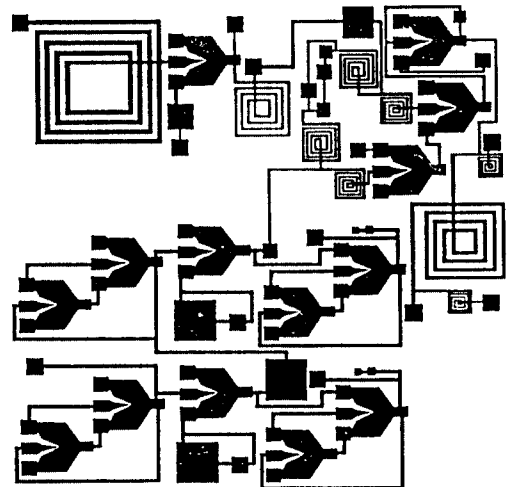
(b) 능동인덕터와 능동정합 사용 회로

그림 9. 주파수 변환기의 전력 스펙트럼

Fig. 9. Output power spectrum of frequency converters



(a) 기존회로 (1500  $\mu\text{m}$   $\times$  2100  $\mu\text{m}$ )



(b) 능동인덕터와 능동정합 사용회로 (1500  $\mu\text{m}$   $\times$  1500  $\mu\text{m}$ )

그림 10. 주파수 변환기 레이아웃

Fig. 10. Layouts of frequency converters

### V. 결 론

본 논문에서는 기존에 사용되고 있는 수동인덕터의 여러 문제점을 보완한 능동인덕터를 몇 가지 보여 주고 있다. 수동인덕터를 1대1로 대체하는 능동인덕터 뿐만 아니라 그 회로의 특성과 목적에 알맞게 능동소자를 이용하는 능동정합 회로에 대한 연구도 포함하고 있다. 그리고 실제 응용한 예로 증폭기, 필터, 믹서 등에 적용하였으며 최종적으로 TV 튜너(tuner)에 사용되는 주파수 변환기에 적용하여 보였다.

능동인덕터를 증폭기에 이용하여 해석한 결과 기존의 증폭기에 비해 넓은 대역폭과 낮은 임계역 변조 계수를 갖는다. 인장도 또한 우수하여 필요한 주파수 대역에서 이득이 다소 떨어지더라도 위치가 않는 변신형상이 일어나지 않아 다른 회로와 연결하였을 때 우수한 성능을 보여 주었다.

기존의 필터에서 수동인덕터를 제거한 능동 필터는 필요없는 부분의 출력을 더욱 잘 제거하는 특성을 나타냈다. 이와 비슷한 방법으로 능동정합을 이용한 믹서는 기존의 것보다 원하는 주파수의 잔류 스펙트럼 값을 더욱 크게 얻을 수 있었다. 0.6 GHz 대역에서 2.4 dBm 이상 큰 전력을 출력할 수 있었다.

여러가지 회로를 종합하여 TV 튜너에 사용되는 주파수 변환기를 구성하였다. 본 연구에서 제시한 능동인덕터와 능동정합을 수동인덕터를 사용한 회로에 비해 주파수 변환기를 설계하였을 때 출력값이 0.6 GHz 대역에서 2.439 dBm 큰 전력 스펙트럼 값을 얻었으며 변조도 약 28.6% 줄어 들었다. 능동인덕터는 인덕턴스가 커지더라도 거의 같은 면적이 필요하므로 큰 값을 갖는 인덕터가 많이 사용될수록 면적을 많이 절약할 수 있다. 또한 수동인덕터는 공정상 여러조건에 따라 인덕터 값의 신뢰성과 재현성이 떨어 지는 반면 능동소자를 이용하면 이러한 단점을 개선할 수 있다.

지금까지 살펴본 능동인덕터와 능동정합에 대한 연구는 더 높은 주파수에서도 사용할 수 있는 인덕터의 개발로 진행되어야 한다. 또한 능동인덕터 면적을 더욱 많이 설계하여 주파수대와 목적에 가장 적합한 것을 사용하면 이상적인 인덕터에 좀더 가깝게 동작할 것이다. 그리고 능동소자를 많이 사용함으로써 생기는 공정상에 복잡함과 가격에 대한 문제점도 개선해야 할 사항이라 하겠다. 끊임없이 더 높은 주파수 대의 MMIC의 구현을 위한 노력이 계속 이루어지고

있는 이 때에, 능동인덕터와 능동정합에 대한 연구는 집적회로 시스템 개발에 중요한 역할을 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Robert A. Pucel, "Design Considerations for Monolithic Microwave Circuits" *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 29, pp. 513-534, June 1981.
2. Ewald pettepaul, Hartmut Kapusta, Andreas Weisgerber, Heinrich Mampe, Jürgen Luginsland, and Ingo Wolff, "CAD Models of Lumped Elements on GaAs up to 18 GHz," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 36, pp. 294-304, Feb. 1988.
3. Shinji Hara, Tsunco Tokumitsu, Toshiaki Tanaka, and Masayoshi Alkawa, "Broad band Monolithic Microwave Active Inductor and Its Application to Miniaturized Wide Band Amplifiers," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 36, pp.1920-1924, Dec. 1988.
4. 김평남 외, 『주파수 캐던 응용 기술 개발』, 한국과학기술연구원 연구 보고서, N476-3603-4
5. George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde, *Microwave Circuit Design*, John Wiley & Sons, Singapore, 1990.
6. Shinji Hara, Tsunco Tokumitsu, and Masayoshi Alkawa, "Lossless Broad band Monolithic Microwave Active Inductor," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 37, pp. 1979-1981, Dec. 1989.
7. Stephen E. Sussman-Fort, "Design Concepts for Microwave GaAs FET Active Filters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 37, pp.1418-1424, Sep. 1989.
8. Stephen E. Sussman-Fort, "A Realization of a GaAs FET Microwave Active Filter," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT 38, pp.1521-1526, Oct. 1990.



具賢澈(Hyun Cheol Koo)준회원  
1969년 10월 29일생  
1992년 2월 : 고려대 전자공학과(공학사)  
1994년 2월 : 고려대 대학원 전자공학과(공학석사)  
※주관심분야 : 마이크로파 회로, 통신용 회로 설계



朴廷浩(Jung Ho Park) 정회원  
1955년 12월 26일생  
1981년 2월 : 고려대학교 전자공학과(공학사)  
1987년 12월 : Univ. of Delaware (공학박사)  
1987년 ~ 1990년 : 규성사 중앙연구소 연구실장  
1990년 ~ 현재 : 고려대학교 전자공학과 교수  
※주관심분야 : 마이크로파 및 광집적 회로, 광소자