

저잡음·저소비전력 특성을 가지는 위성방송 수신용 초소형 다운컨버터 MMIC

윤 영*

* 한국해양대학교 전자·정보통신공학부

Miniaturized DBS Downconverter MMIC Showing a Low Noise and Low Power Dissipation Characteristic

Young Yun*

* Dept. of Radio Information and Communication Engineering, Korea Maritime University

요 약 : 본 논문에서는 0.2 μ m GaAs MODFET (modulation doped FET)를 이용하여 제작한 위성방송수신용 고성능 다운컨버터 MMIC에 관해서 보고한다. GaAs화합물 반도체 기판상에 제작된 본 논문의 고집적 다운컨버터 MMIC는 싱글 밸런스 믹서, IF증폭기, 액티브형 버퍼, 그리고 국부 발진기 주파수 (LO) 신호의 누설전력 억제용 필터까지 한 칩에 내장하고 있다. 저잡음특성을 실현하기 위해서, 믹서의 소스부에 소스인덕터가 접속된 소스인덕터 피드백 회로형태의 믹서를 이용하였으며, 그 결과 잡음지수 4.8 dB의 초저잡음 다운컨버터 MMIC가 실현되었다. 이는 종래의 위성방송 수신용 다운컨버터 MMIC의 잡음지수보다 3dB정도 낮은 수치이다. 그리고, 소비전력을 줄이기 위해 믹서에 대해서 저LO입력 전력 설계를 수행하였고, 그 결과 믹서의 LO신호 입력부에 위치하는 LO 증폭기가 불필요하게 되었다. 이로인해 본 논문의 다운컨버터 MMIC에 대해서 175 mW (동작전압:5V, 소비전류:35mA)의 저소비전력 특성을 얻을 수 있었으며, 이는 종래의 위성방송 수신용 다운컨버터 MMIC의 소비전력의 70%에 해당한다. 더욱이, IF신호 출력단에서의 LO신호 누설전력을 억제하기 위해서, 스파이럴 인덕터 필터가 본 논문의 MMIC에 내장되었다. 그리고, 다운컨버터 MMIC칩의 면적을 줄이기 위해, 믹서의 입력부의 X밴드 입력정합회로로서 MMIC 패키지 내부의 본딩 와이어를 이용하였다. 그 결과, 0.84X0.9 mm²의 초소형 MMIC가 제작되었다. 본 논문의 MMIC칩 면적은 종래의 위성방송 수신용 MMIC의 50%이하이다.

핵심어 : 저잡음, 저소비전력, 위성방송수신용, 다운컨버터 MMIC, GaAs

Abstract : In this work, using 0.2 mm GaAs modulation doped FET (MODFET), a high performance DBS downconverter MMIC was developed for direct broadcasting satellite (DBS) applications. Without LNA, the downconverter MMIC showed a very low noise of 4.8 dB, which is lower by 3 dB than conventional ones. A low LO power of -10 dBm was required for the normal DBS operation of the downconverter MMIC, which reduced the power consumption via a removal of LO amplifier on MMIC. It required only a low power consumption of 175 mW, which is lower than 70 percent of conventional ones. The LO leakage power at IF output was suppressed to a lower level than -30 dBm, which removes a bulky LO rejection filter on a board. The fabricated chip, which include a mixer, IF amplifiers, LO rejection filter, and active balun, exhibited a small size of 0.84x0.9 mm².

Key words : Low noise, Low power, Downconverter, MMIC, DBS, GaAs

1. 서 론

최근, GaAs디바이스의 고성능화와 함께 직접위성방송 (direct broadcasting satellite) 수신 시스템용 MMIC에 있어서도 고성능화, 소형화가 요구되어지고 있다. 그럼에도 불구하고, 위성방송 수신용 MMIC분야의 연구개발은 주로 1990년도 중반까지 원활히 수행되었으며(T. Sugiura, 1985) (K. Hubbard, 1995) (P. Bacon, 1993) (E. Camargo, 1996), 그 이후에는 위성방송 수신용 모듈의 연구개발에 대한 발표가 있었으나(J. C. Jeong, 2002), MMIC분야에 있어서의 연구개발은 원활히 수행되지 않고 있다. 이러한 종래의 위성방송 수신용 다

운컨버터 MMIC(T. Sugiura, 1985) (K. Hubbard, 1995) (P. Bacon, 1993) (E. Camargo, 1996)에는 이하의 문제점들이 존재한다.

(1) 다운컨버터 MMIC회로의 제일 앞단에 존재하는 믹서 (mixer)는 10 dB 정도의 높은 잡음지수 특성을 보이며, 따라서 전체 수신부 시스템의 잡음특성을 개선하기 위해 다운컨버터 MMIC의 앞단에 추가로 다단의 LNA (low noise amplifier) 칩이 요구된다.

(2) 다운컨버터 MMIC회로의 제일 앞단에 존재하는 믹서의 국부 발진기 (LO) 입력부에 있어서, 10 dBm 이상의 높은 LO 입력전력이 요구되며, 그 결과 LO입력부에 추가로 LO증폭기

* 대표저자 : 윤 영(총신회원), yunyoung@mvd.biglobe.ne.jp, 011-9507-7082

가 요구된다. 그런데 이는 다운컨버터 MMIC회로의 소비전력을 증가시키는 주된 원인이 되고 있다.

(3) IF신호 출력단에서의 LO신호 누설전력을 억제하기 위해서, 위성방송 수신용 MMIC를 실장한 기판상에, MMIC와는 별도로 제작된 LO누설전력 억제용 필터가 요구되며, 이는 위성방송 수신 시스템의 전체 모듈사이즈를 증가시킨다.

(4) 다운컨버터 MMIC회로의 제일 앞단에 존재하는 믹서의 X밴드 입력정합을 위해서, GaAs MMIC상의 마이크로스트립 라인으로 구성되는 입력정합회로가 이용되며, 이는 다운컨버터 MMIC칩 사이즈를 크게 증가시킨다.

본 논문에서는 0.2 μ m GaAs MODFET (modulation doped FET)를 이용하여 제작한 위성방송수신용 고성능 다운컨버터 MMIC에 관해서 보고한다. 믹서의 잡음지수특성을 개선하기 위해, FET의 소스부에 최적의 소스인덕터가 접속된 소스인덕터 피드백 회로(source inductive feedback circuit)형태의 믹서를 이용하였다. 그리고 믹서의 LO입력전력 감소에 의한 LO 증폭기의 삭제를 통해 MMIC의 소비전력을 줄이기 위해, 믹서의 게이트 바이어스에 대해서 최적의 바이어스 설계를 수행하였다. 게이트 바이어스의 최적설계치는 전달컨덕턴스 g_m 의 측정치로부터 구하였다. 더욱이, IF신호 출력단에서의 LO신호 누설전력을 억제하기 위해서, LO주파수에서 자기공진특성을 갖도록 설계한 스파이럴 인덕터 필터를 MMIC 내부에 내장하였다. 그리고 MMIC칩의 소형화를 위해서, 믹서의 입력부의 X밴드 입력정합회로로서 MMIC 패키지 내부의 본딩 와이어를 이용하였다. 그 결과, MMIC상에서 아주 큰 사이즈를 가지는 X밴드용 마이크로스트립 라인 입력정합회로 패턴을 제거하였다. 본 논문의 위성방송 수신용 다운컨버터 MMIC는 종래의 위성방송 수신용 다운컨버터 MMIC(T. Sugiura, 1985) (K. Hubbard, 1995) (P. Bacon, 1993) (E. Camargo, 1996) 및 기타의 X-Ku밴드용 컨버터 MMIC(M. L. de la Fuente, 1999) (B. Tzeng, 2002) (L. M. Devlin, 2002) (T. A. Bos, 2002)에 비해 약 3dB가량 낮은 잡음특성 (4.8 dB), 종래의MMIC의 70%의 저소비전력 (175 mW)특성을 보이며, 그리고, 종래에 비해 MMIC 칩면적이 50%이하로 감소되었다.

2. 회로구성

Fig. 1은 본 논문의 위성방송수신용 다운컨버터 MMIC의 회로도도를 보여준다. 제일 앞단의 믹서로서는 싱글 밸런스 게이트 믹서(singly balance gate mixer)가 이용되었으며, 믹서의 뒷단에는 2단의 IF 차동증폭기, 액티브형 버퍼, 그리고 싱글 엔드형 IF 증폭기가 차례로 접속되어 있다. 입력단의 180°하이브리드에 의해 믹서에 출력단에 출력되는 두 개의 IF 출력신호는 서로간에 180°의 위상차를 가지며, 이들은 액티브형 버퍼에 의해 동위상신호로 결합된다. 각 회로에 대해 단전원 바이어스를 사용하기 위해, FET의 소스에 소스 저항을 접속한 자기 바이어스형 회로가 이용되었다. 직접위

성방송 수신을 위해서 RF신호로서는 12.2-12.7 GHz대역의 주파수 신호가 이용되었으며, 그리고, 11.25 GHz의 LO 주파수 신호가 이용되었다. 따라서 IF출력신호는 950 MHz-1450 MHz이다.

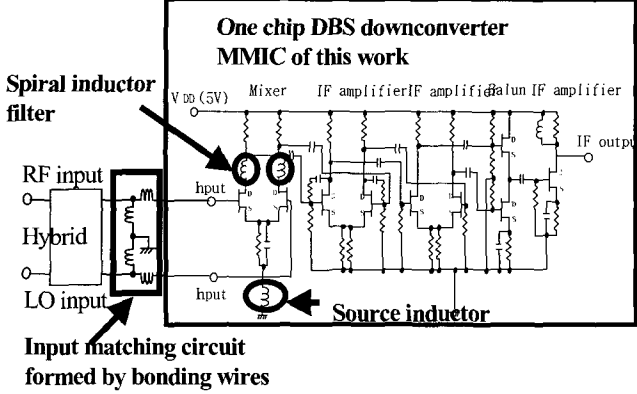


Fig. 1 A schematic circuit of the downconverter MMIC

3. 믹서의 저LO전력 설계

본 논문에서는 믹서의 LO입력전력 감소를 통해 LO입력부의 LO증폭기를 제거하기 위해, 믹서의 게이트 바이어스에 대해서 저LO전력 바이어스 설계를 수행하였다. 일반적으로 믹서는 LO 전력의 변동에 민감하게 반응하므로, 믹서의 안전한 동작을 위해서는 LO 전력의 변동에 대해서 RF성능이 변화하지 않는 포화영역에서 믹서를 동작시킬 필요가 있다. 변환이득(conversion gain)을 고려하면, LO입력전력에 대한 변환이득의 포화영역을 믹서의 동작영역으로 설정해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 1의 제일 앞단의 믹서의 변환이득을 포화시키기 위해 필요한 LO 입력전력이 최저가 되도록 믹서의 FET에 대한 게이트 바이어스의 최적치를 결정하였다. 본 논문에서는 게이트 바이어스의 최적치를 구하기 위해 믹서회로의 시뮬레이션을 수행하지 않고, FET의 전달컨덕턴스의 실측치로부터 직접 구하였다. 믹서의 변환이득은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$G_c = \frac{g_1^2 r_d}{4 \omega_{RF}^2 C^2 r_i} \quad (1)$$

식 (1)에서, g_1 , r_d , ω_{RF} , C , r_i 은 각각, FET의 등가회로에 있어서의 상호전달컨덕턴스, 드레인 저항, RF각주파수, 입력 커패시턴스, 입력저항에 해당한다. 식 (1)로부터 믹서의 변환이득 특성은 상호전달컨덕턴스(g_1)특성으로부터 예측가능하다. 상호전달컨덕턴스는 이하의 식에 의해 FET의 전달컨덕턴스(g_m)의 실측치로부터 직접 구할 수 있다.

$$g_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_m(t) e^{-j\omega_o t} d(\omega_o t) \quad (2)$$

식 (2)에서, $g_m(t)$, ω_0 는 각각 FET의 시간변화 전달컨덕턴스, LO각주파수에 해당한다. 식 (2)에서 g_I 은 $g_m(t)$ 의 Fourier 변환의 LO성분이다. Fig. 2는 변환이득을 포화시키기 위해 필요한 LO 입력전력(P_{LO_SAT})의 게이트 바이어스 의존성을 보여주고 있다. P_{LO_SAT} 는 식(1), (2) 그리고 FET의 전달컨덕턴스의 측정치로부터 구하였다. Fig. 2에서 V_{ds} 는 FET의 드레인-소스간 전압을 의미한다. P_{LO_SAT} 는 g_I 이 최대치의 95%까지 포화하는데 요구되는 LO 입력전력으로 결정하였다. Fig. 2에서 FET의 게이트전압 -0.43 V에서는 -10 dBm보다 낮은 LO 입력전력에서 g_I 이 포화상태에 달한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1에서 보이는 믹서의 FET의 드레인 로드저항 및 소스저항을 이용하여, FET의 게이트 바이어스를 최적치인 -0.43 V에 설정하였다.

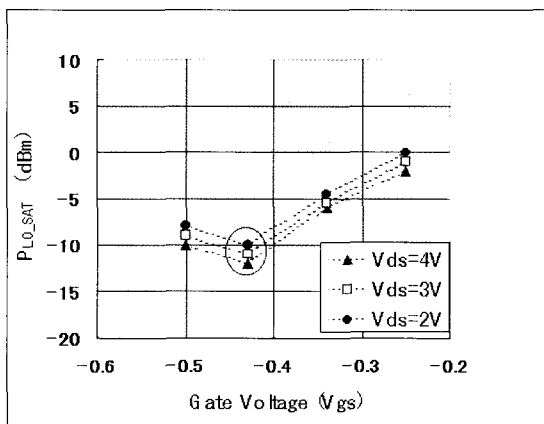


Fig. 2 The gate bias voltage dependencies of the LO powers required for the saturation of conversion gain (P_{LO_SAT})

4. 믹서의 저잡음설계

Fig. 1에서 믹서의 잡음특성을 개선하기위해, FET의 소스부에 소스인덕터가 접속된 소스인덕터 피드백 회로형태의 믹서를 이용하였으며, 믹서 회로형식으로는 싱글 밸런스 게이트 믹서를 이용하였다. Fig. 1과 같이 최적의 소스인덕터를 FET에 접속하면, 이득정합과 잡음정합의 최적 신호원입피턴스가 서로 일치하는 방향으로 FET의 입력입피턴스가 변하기 때문에, LNA등에서는 소스인덕터 피드백 회로가 널리 이용되고 있다(M. Aikawa, 1996). 그러나, 아직까지는 소스인덕터 피드백 회로를 이용한 믹서에 대해서는 연구보고가 없으나, 본 논문에서는 LNA를 사용하지 않고 직접 믹서로부터 저잡음특성을 얻기위해서 믹서의 소스부에 직접 소스피드백 인덕터를 접속하였다. 일반적으로 소스피드백 인덕터를 이용하는 경우에는 기생 인덕터 성분에 의해 FET의 이득이 감소하는 경향이 있으나, 본 논문에서는 밸런스형의 믹서를 이용함으로써 상기 문제를 해결하였다. 밸런스형의 회로는 FET의 소스 접속부에 가상접지를 공급하므로, 싱글 엔드형 회로에 비해 소스인덕터에 의한 변환이득 저하는 그다지 문제가 되지 않는다(E. Camargo, 1996). Fig. 3은 본 논문의 다운컨버터 MMIC의 잡음지수의 소스인덕터 의존성을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 소스인덕터의 최적치는 $0.4-0.7$ nH이며, 이 경우 잡음지수는 $4-5$ dB이다. 최적 소스 인덕터로서 MMIC 패키지의 기생인덕터가 이용되었다.

음지수의 소스인덕터 의존성을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 소스인덕터의 최적치는 $0.4-0.7$ nH이며, 이 경우 잡음지수는 $4-5$ dB이다. 최적 소스 인덕터로서 MMIC 패키지의 기생인덕터가 이용되었다.

한편 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 믹서의 X밴드 입력정합을 위해서 패키지내부의 본딩와이어 인덕터가 이용하였다. 따라서 MMIC상에서 아주 큰 사이즈를 가지는 X밴드용 마이크로스트립 라인 입력정합회로 패턴을 제거함으로써 MMIC의 소형화를 실현하였다.

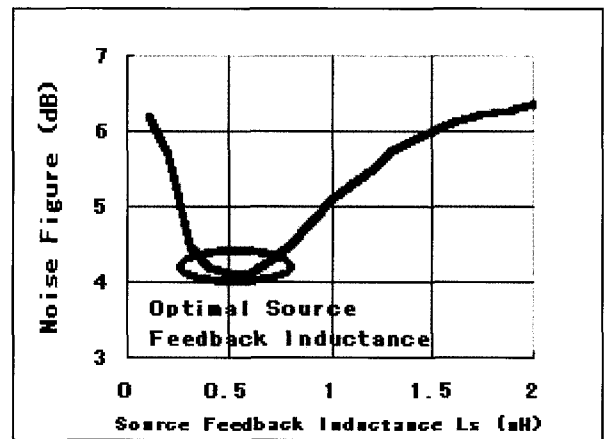


Fig. 3 The source inductance dependencies of the noise figure for the downconverter MMIC

5. LO신호 누설전력 억제용 스파이럴 인덕터 필터의 내장

일반적으로 IF신호 출력단에서의 LO신호 누설전력을 억제하기 위해서, 위성방송 수신용 MMIC를 실장한 기관상에, MMIC와는 별도로 제작된 LO누설전력 억제용 IF필터가 요구되며, 이는 위성방송 수신 시스템의 전체 모듈사이즈를 증가시킨다. 본 논문에서는 LO신호 누설전력 억제용 필터를 MMIC상에 내장하기 위해서 Fig. 1과 같이 소형의 스파이럴 인덕터 필터가 이용되었다. 스파이럴 인덕터는 LO주파수에서 자기공진특성을 갖도록 설계되었다. 스파이럴 인덕터의 자기공진 주파수는 상부전극 메탈과 하부전극 메탈 사이의 교차부에서 발생하는 용량에 크게 의존하므로, 스파이럴 인덕터의 턴수와 하부전극 메탈의 폭을 조정함으로써 자기공진 주파수를 조정할 수 있다. 본 논문에서는 스파이럴 인덕터에 대하여 턴수가 8턴, 상부전극 메탈의 선로폭이 $5\mu m$, 하부전극 메탈의 선로폭이 $20\mu m$ 가 되도록 설계를 하여 LO주파수인 11.25 GHz에서 자기공진특성을 갖도록 하였다. Fig. 4는 스파이럴 인덕터의 등가회로를 보여주며, Fig. 5는 스파이럴 인덕터의 삽입손실특성을 보여준다. Fig. 5의 계산결과는 Fig. 4의 등가회로의 삽입손실특성이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 LO주파수에서의 삽입손실은 -40 dB이하이다.

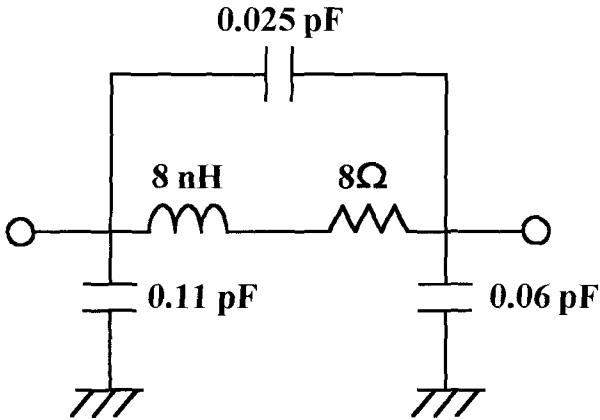


Fig. 4 The equivalent circuit of the spiral inductor

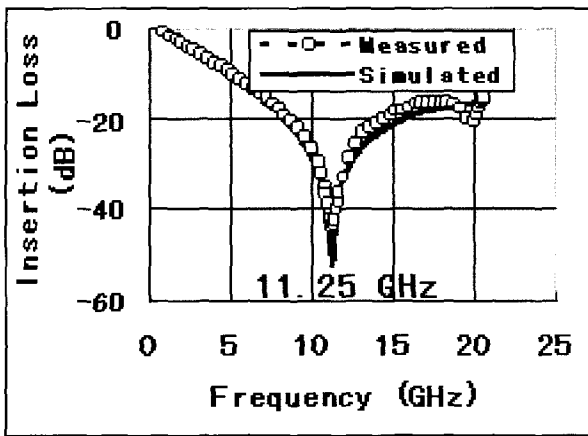


Fig. 5 Insertion loss of the spiral inductor

6. RF특성

Fig. 6은 제작된 다운컨버터 MMIC의 사진을 보여준다. Table 1은 다운컨버터 MMIC의 RF특성을 보여준다. 종래의 결과와 비교하기 위해서 이제까지 발표된 위성방송용 MMIC 뿐 아니라 위성방송용 이외의 X-Ku밴드용 MMIC의 RF특성도 함께 제시하였다. 전체 RF특성은 RF신호의 중심주파수인 12.45 GHz에서 측정되었다. -10 dBm인 저LO입력전력에서 양호한 RF특성을 얻을 수 있었으며, Table 1에서와 같이 LNA를 사용하지 않고도 잡음지수 4.8 dB의 초저잡음 특성을 얻을 수 있었다. 믹서의 저LO전력동작에 의해 믹서의 LO입력단에 LO증폭기가 요구되지 않았으며, 그 결과 다운컨버터 MMIC의 소비전력은 종래의 70%인 175mW이다.

IF출력에서의 LO신호 누설전력과 변환이득은, 각각, 위성방송 수신 시스템의 응용에 있어서 충분한 특성인 -35 dBm과 33 dB이다. 본 논문의 다운컨버터 MMIC는 종래의 다운컨버터 MMIC에 비해, 잡음지수가 3 dB낮은 초저잡음특성, 종래의 70%인 저소비전력특성을 보이며, 그리고 MMIC면적은 종래의 50%이하이다.

Table 1 The RF performances of the downconverter MMIC

RF특성 측정항목	본 논문의 결과	종래의 결과 [참고문헌]
*잡음지수 (dB)	4.8	7.5-10 [7, 8]
변환이득 (dB)	33	9-33 [1, 8]
소비전력 (mW)	175	250-1700 [2, 4, 8, 10]
소비전류 (mA)	35	60-210 [4, 8]
LO신호 누설전력 (dBm)	-35	-23 ~ -24 [1, 5, 7]
LO 입력전력 (dBm)	-10	7-15 [5, 9]
칩 사이즈 (mm ²)	0.84X0.9	1.6X1.5-3.4X3.3[4, 5]

* 잡음지수는 다운컨버터 MMIC의 앞단에 LNA를 사용하지 않았을 때의 측정결과이다.

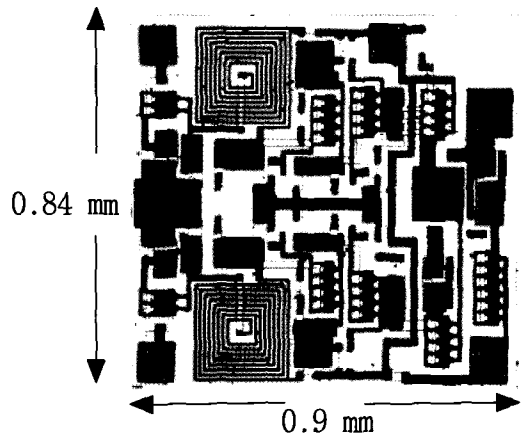


Fig. 6 A photograph of the downconverter MMIC

7. 결 론

본 논문에서는 0.2 μ m GaAs MODFET를 이용하여 위성방송 수신용 다운컨버터 MMIC를 제작 평가하였다. 본 논문의 다운컨버터 MMIC는 GaAs화합물 반도체 기판상에 제작되었으며, 싱글 배런스 믹서, IF증폭기, 액티브형 버퍼, 그리고 LO신호의 누설전력 억제용 필터까지 한 칩에 내장하고 있다. 저잡음특성을 얻기 위해서, 소스인덕터 피드백 회로형태의 믹서를 이용하였으며, 그 결과 잡음지수 4.8 dB의 초저잡음 다운컨버터 MMIC가 실현되었다. 이는 종래의 위성방송 수신용 MMIC의 잡음지수보다 3dB정도 낮은 수치이다. 다운컨버터 MMIC의 저소비전력 특성을 위해 믹서에 대해서 저LO전력동작을 위한 게이트 바이어스 설계를 수행하였고, 그 결과 -10 dBm의 저LO전력에서 믹서로부터 양호한 RF특성을 얻을 수 있었다. 따라서, 믹서의 LO입력부에 LO증폭기가 불필요하게 되었으며, 그 결과 다운컨버터 MMIC로부터 종래의 70%인 175 mW의 저소비전력 특성을 얻을 수 있었다. 그리고, 모듈상의 LO신호 누설전력억제 필터를 MMIC에 내장하기 위해서 LO 주파수에서 자기공진특성을 갖도록 설계된 스파이럴 인덕터가 이용되었으며, 그 결과, -35 dBm의 양호한 LO신호 누설

전력 특성을 얻을 수 있었다. 다운컨버터 MMIC칩의 면적을 줄이기 위해, 믹서의 입력부의 X밴드 입력정합회로로서 MMIC 패키지 내부의 본딩 와이어를 이용을 하였으며, 그 결과, 종래의 MMIC면적의 50%이하인 $0.84 \times 0.9 \text{ mm}^2$ 의 초소형 MMIC가 실현되었다.

본 논문의 소형화 집적기술 및 저소비전력 설계기술을 이용하면 LO증폭기가 필요없게 되며, 믹서, IF증폭기, LO필터, 출력추 버분을 하나의 다운컨버터 MMIC에 모두 내장할 수 있었다. 또한 본 논문의 저잡음 설계기술을 이용하면 다단 저잡음 증폭기의 단수삭감이 기대된다. 차후로는 본 논문의 소형화 집적기술 및 저잡음·저소비전력 설계기술을 이용하여 위성방송 수신시스템에 있어서 믹서, IF증폭기, LO증폭기, LO필터, 출력추 버분 및 발진기등의 다수의 MMIC를 전부 하나의 MMIC에 내장한 SOC (system on chip) 위성방송 수신시스템 MMIC의 개발이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Tzeng, C. H. Lien, H. Wang, Y. C. Wang, P. C. Chao, and C. H. Chen(2002), A 1-17 GHz InGaP GaAs HBT MMIC analog multiplier and mixer with broad band input matching networks, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-50, pp.2564-2568.
- [2] E. Camargo, and W. Kennan(1996), An E-mode GaAs FET Operating As a Single Balanced Gate Mixer, *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp.951-954.
- [3] J. C. Jeong, Y. H. Lim, B. J. Jang, I. B. Yom, and S. P. Lee(2002), Development of Ku-band receiver/downconverter for satellite transponders, *IEEE MTT S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1257-1260.
- [4] K. Hubbard, K. MacGowan, C. Kau, D. Smith, and S. Maas(1995), A family of low cost high performance HEMT MMICs for commercial DBS applications, *1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol.3, pp.1649-1652.
- [5] L. M. Devlin, A. W. Dearn, G. A. Pearson, P. D. L. Bearsley, and G. D. Morgan(2002), A monolithic 2 to 18 GHz upconverter, *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 257-260.
- [6] M. Aikawa, T. Ohira, T. Tokumitsu, T. Hirota, and M. Muraguchi(1996), *Monolithic Microwave Integrated Circuit*, 2nd edition, (IEICE, Japan), Chap. 3(in Japanese)
- [7] M. L. de la Fuente, J. Portilla, J. P. Pascual, and E. Artal(1999), Low-noise Ku-band MMIC balanced p-HEMT upconverter, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, pp.259-263.
- [8] P. Bacon, E. Olsen, B. Cole, Y. Tajima, and D. Kaczman(1993), A dual-channel Ku-band DBS downconverter, *IEEE GaAs IC Symp. Tech. Dig.*, pp.233-236.
- [9] T. A. Bos, and E. Camargo(2002), A balanced resistive mixer avoiding an IF balun, *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 245-248.
- [10] T. Sugiura, K. Honjo, and T. Tsuji(1985), 12-GHz-band GaAs dual-gate MESFET monolithic mixers, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-33, pp.105-110, Feb.

원고접수일 : 2003년 1월 13일

원고채택일 : 2003년 5월 14일