

## 위성방송용 QPSK 복조기를 위한 DPLL구조의 Carrier Recovery Loop 설계

하 창 우, 이 완 범, \*김 형 균, 김 환 용  
원광대학교 전자공학과, \*(주)아름 테크놀로지  
전화 : 063-850-6740 / 핸드폰 : 016-683-4329

### Design of Carrier Recovery Loop in DPLL Structure for QPSK Demodulator Satellite Broadcasting

Chang Woo Ha, Wan Bum Lee, \*Hyeoung Kyun Kim, Hwan Yong Kim  
Dept. of Electronics Engineering, Wonkwang Univ., \*Arum technology Co., Ltd.  
E-mail : hacw305@yahoo.co.kr

#### Abstract

In this paper the complexity of implementation is reduced by the reduction into half of the number of the multiplier in filter structure of the conventional carrier recovery loop, and as the drawback of NCO of the conventional carrier recovery loop wastes a amount of power for the structure of lookup table , We designed the structure of combinational logic without the lookup table. In the comparison with dynamic power of the proposed NCO, the power of NCO with the lookup table is 175 $\mu$ W, NCO with the proposed structure is 24.65 $\mu$ W. As the result, it is recognized that about one eight of loss power is reduced In the simulation of carrier recovery loop designed QPSK demodulator, it is known that the carrier phase is compensated.

#### I. 서 론

최근까지 위성방송에서는 아날로그 방식의 변조 기법이 사용되어 왔으나, 점차 디지털 방식의 변조 기법으로 전환되고 있다. 위성에서 전송되는 신호 전력은 매우 작으므로, 위성 방송에서 사용되는 디지털 변조기법은 전력 효율이 높은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)의

위상 변조 기법이 많이 사용되고 있다.<sup>[1]-[3]</sup>

위성방송의 복조단에서 복소 신호의 전송시 송신단과 수신단 사이의 반송파 위상이 동기 되지 않아서 위상차  $\theta$ 가 발생하면 복조된 심벌은 복소 평면상에서 변,복조단의 위상차  $\theta$  만큼 회전하게 된다. 일단 정상도가 회전한다면 수신단 측에서는 정확한 정상도를 구별할 수가 없다. 특히 위상에 정보를 가지는 QPSK 복조기의 경우는 정확한 위상동기가 필수적이다.<sup>[4]-[6]</sup>

본 논문에서는 기존 Carrier Recovery Loop의 필터 구조에서 곱셈기 수를 반으로 줄여서 구현의 복잡도를 줄일 수 있었고, 기존 Carrier Recovery Loop의 NCO(Numerically Controlled Oscillator)는 lookup table을 갖는 구조로 되어 있어 전력 소모가 큰 단점을 가지므로 lookup table을 사용하지 않는 조합 회로의 구조로 설계하여 전력 소모를 줄일 수 있었다. 설계한 Carrier Recovery Loop를 사용하여 위상오차에 따른 문제점을 극복하여 반송파 위상오차 보정 결과를 모의실험을 통해 확인하였다.

#### II. DPLL 구조의 Carrier Recovery Loop

위성방송용 QPSK 복조기에 위상오차가 포함된 입력 신호는 Carrier Recovery Loop를 통해 위상오차를 극복하여 복조기의 출력으로 내보낸다. 위성방송용 복조기의 Carrier

Recovery Loop는 DPLL(Digital Phase Locked Loop) 구조를 이용하여 구성한다. DPLL은 위상 검출기(Phase-detector), 루프 필터(Loop filter), 저역통과필터(Lowpass filter), 정합필터(Matched filter), NCO로 구성된다. 위성 방송수신용 DPLL 구조의 Carrier Recovery Loop 전체 구조는 그림 1과 같다.

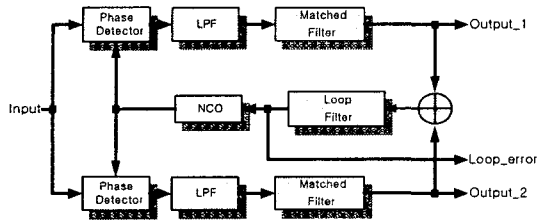


그림 1. DPLL 구조의 Carrier Recovery Loop

### 2.1 위상 검출기 구조

위상 검출기는 승산형(Multiplier)위상 검출기로 설계하였다. Carrier Recovery Loop의 입력신호와 NCO의 출력신호의 곱셈 연산을 통해 출력신호를 발생한다.

위상검출기의 입력신호  $s(t)$ 를 식(1)로 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{2P} \cdot \cos(2\pi f_c t + \theta(t)) + n(t) \quad (1)$$

NCO의 출력신호는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$v(t) = -V_o \sin(2\pi f_c t + \hat{\theta}(t)) \quad (2)$$

따라서, 위상 검출기의 출력  $e(t)$ 는 입력신호와 NCO의 출력신호의 곱인 식 (3)처럼 된다.

$$e(t) = \sqrt{\frac{P}{2}} V_o \sin(\theta(t) - \hat{\theta}(t)) + \frac{V_o n_s(t)}{2} \cos \hat{\theta}(t) - \frac{V_o n_c(t)}{2} \sin \hat{\theta}(t) \quad (3)$$

### 2.2 저역통과 필터 구조

저역통과 필터의 입력은 Carrier Recovery Loop로 수신된 신호와 NCO의 출력신호와 곱셈 연산을 통해 들어온다. 저역통과 필터는 시스템의 잡음제거 기능을 하는 정합 필터의 기능을 보조하는 역할을 한다. 기존 필터구조는 M 개의 계수 값에 해당하는 M 개의 곱셈기가 필요하다. 곱셈기의 면적이 크기 때문에 Chip 면적을 많이 차지한다. 따라서 필터의 곱셈기수를 반으로 줄일 수 있는 구조는 식 (4)처럼 표현되며 식 (4)의 구조는 그림 2와 같다.

$$H(z) = \sum_{m=0}^{M/2-1} h_m \{Z^{-m} + Z^{-(M-m)}\} + h_{M/2} Z^{-M/2} \quad (4)$$

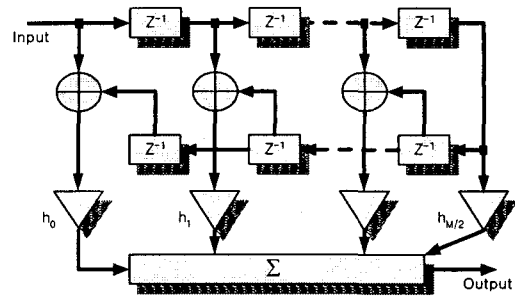


그림 2. 곱셈기 수를 줄인 저역통과 필터의 구조

### 2.3 Matched 필터 구조

대역폭이 제한된 채널로 전송하기 위해서는 임펄스 옆을 펄스 성형을 통하여 대역이 제한된 신호로 변화시켜야 한다. Matched 필터를 이용하여 대역폭을 제한하게 되면 주파수 영역 상에서는 원하는 스펙트럼을 얻을 수 있으나 시간 영역에서는 인접 심벌간의 간섭(ISI)이 발생하게 된다. 따라서, 대역폭을 감소시키면서 심벌간의 간섭을 방지하기 위해서는 Nyquist criterion을 만족하는 펄스를 사용해야 한다. Matched 필터를 구현하기 위해 탭 수와 계수 및 각 연산자의 비트수를 SPW를 이용해서 모의실험을 하였다. Matched 필터의 탭(tap) 수를 결정하기 위해 탭 수를 변화시켜가면서 BER을 checking 하였다. 모의실험 결과는 그림 3과 같다.

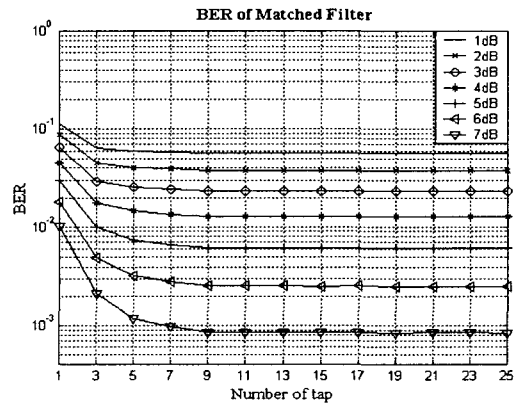


그림 3. Matched 필터의 탭 수에 따른 BER

모의실험 결과에서 보는바와 같이 탭 수가 9개 이상에서 BER 값이 이상적인 값과 다른 차이를 보이지 않는다. 따라서 Matched 필터의 탭 수는 고정 소수점에서의 비트 제한과 timing error 및 carrier offset 등을 고려하여 15 탭으로 결정하였다.

## 위성방송용 QPSK 복조기를 위한 DPLL구조의 Carrier Recovery Loop 설계

### 2.4 루프 필터 구조

루프 필터는 위상 검출기에서 예측한 위상오차 정보를 입력으로 하여 NCO를 구동하기 위한 제어 전압을 출력시키는 2차 루프 필터의 구조를 사용한다. 루프 필터를 사용하면 주파수 offset을 추적 가능하게 할 뿐만 아니라 잡음도 제거하는 효과를 가진다. 루프 필터의 전달함수는 식 (5)로 표현된다.

$$F(Z) = K_p + \frac{K_i}{(1-Z^{-1})} \quad (5)$$

식 (5)의 계수 값  $K_p$  와  $K_i$ 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$K_p = (4 B_L / (1 + (1/4 \zeta^2))) / G_L$$

$$K_i = (2 B_L / (\zeta + (1/4 \zeta)))^2 / G_L \quad (6)$$

위 식에서  $B_L$ 은 루프 대역폭이며  $\zeta$ 는 damping factor 이며  $G_L$ 은 루프의 이득이다. 설계한 루프 필터 구조는 그림 4와 같다.

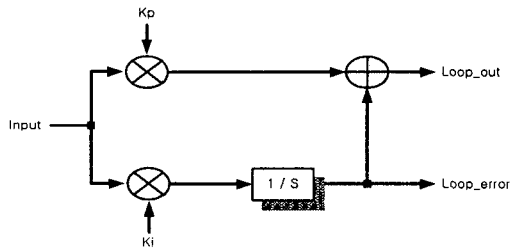


그림 4. 루프 필터의 구조

루프 필터의 대역폭 모의실험 결과는 그림 5와 같다.

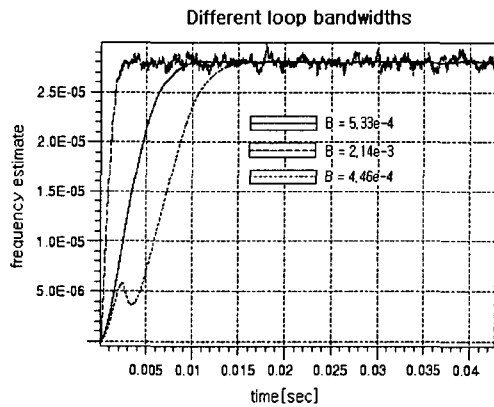


그림 5. 루프 필터의 대역폭 모의 실험

따라서, 모의 실험 결과 루프 필터의 대역폭은  $5.33 \times 10^{-4}$ , damping factor는 0.9를 이용해서  $K_p = 6.0e \times 10^{-5}$  와

$K_i = 3.02e \times 10^{-8}$ 의 계수 값으로 루프필터를 설계했다.

### 2.5 NCO 구조

기존 NCO는 lookup table을 갖는 구조로 되어있어 전력 소모가 큰 단점을 가지고 있다. 기존 NCO 구조는 그림 6과 같다.

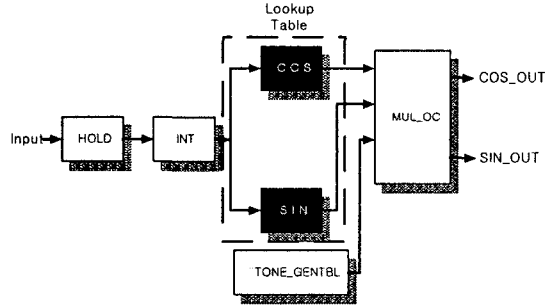


그림 6. 기존 NCO의 구조

저 전력 구조로 설계하기 위해 lookup table을 사용하지 않는 새로운 구조의 NCO로 설계했다. NCO 입력신호의 위상오차  $\Delta\theta \cong 0$  이라고 가정한다면 식 (7)처럼 표현할 수 있다.

$$\cos \Delta\theta + j \sin \Delta\theta \cong 1 + j \Delta\theta \quad (7)$$

NCO는 NCO 자체에 있는 기준 위상에 루프 필터의 출력인 위상오차를 더하여 발전하며 식 (8)과 같다.

$$(\cos \theta + j \sin \theta)(\cos \Delta\theta + j \sin \Delta\theta)$$

$$= (\cos \theta \cdot \cos \Delta\theta - \sin \theta \cdot \sin \Delta\theta) + j(\sin \Delta\theta \cdot \cos \theta + \cos \Delta\theta \cdot \sin \theta) \quad (8)$$

$$\cong (\cos \theta - \Delta\theta \cdot \sin \theta) + j(\Delta\theta \cdot \cos \theta + \sin \theta)$$

$$= \Delta\theta(-\sin \theta + j \cos \theta) + (\cos \theta + j \sin \theta)$$

정규화를 위해 양변에 제곱을 취하고 Taylor 공식을 이용하여 식 (9)와 같이 실제 정규화 된 식으로 표현 할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{1+(\Delta\theta)^2}} = f_n(\Delta\theta)$$

$$= f(0) + f'(0)\Delta\theta + \frac{f''(0)}{2!}(\Delta\theta)^2 + \dots$$

$$+ \frac{f^{(n)}(0)}{n!}(\Delta\theta)^n$$

$$\cong 1 - \frac{1}{2}(\Delta\theta)^2 \quad (9)$$

따라서 식(8)과 식(9)에 의해 lookup table을 사용하지 않는 NCO를 구현할 수 있으며 제안된 lookup table을 갖지 않는 새로운 NCO의 구조는 그림 7과 같다.

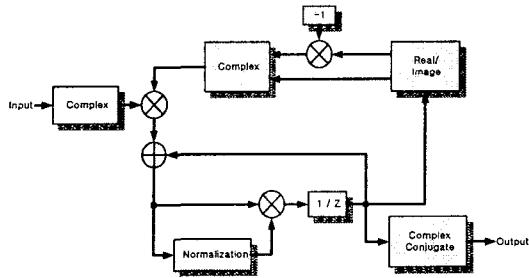


그림 7. 제안된 NCO의 구조

### III. 설계 및 모의실험

위성방송용 QPSK 복조기를 위한 Carrier Recovery Loop의 설계는 먼저, Cossap을 이용해서 부동 소수점으로 설계한 회로의 성능 확인 후 고정 소수점으로 설계하였다.

고정 소수점 모의실험으로 설계한 회로의 모의실험 결과를 통해 성능 분석을 확인한 후 Cadence를 이용하여 4mm×4mm 0.6μm 2 poly 3 metal CMOS 80-QFP full custom으로 설계하였다. 전체 Chip의 입력은 6비트이고 출력은 34비트이다. 설계한 Carrier Recovery Loop의 Cossap을 이용한 Carrier Recovery Loop의 모의실험 모델은 그림 8과 같다.

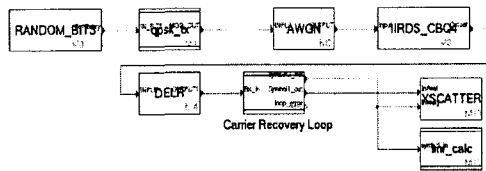


그림 8. Carrier Recovery Loop의 모의실험 모델

모의실험을 위해서 그림 9과 같이 Carrier Recovery Loop의 초기 위상오차를 45°로 설정하였고 이러한 위상 오차성분을 Carrier Recovery Loop를 통과하면서 본래의 신호 위치로 돌려지게 되는 결과를 확인하였다.

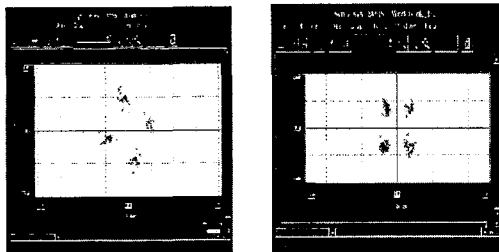


그림 9. Carrier Recovery Loop의 위상오차 보정 결과

설계한 Carrier Recovery Loop의 레이아웃은 그림 10과 같다.

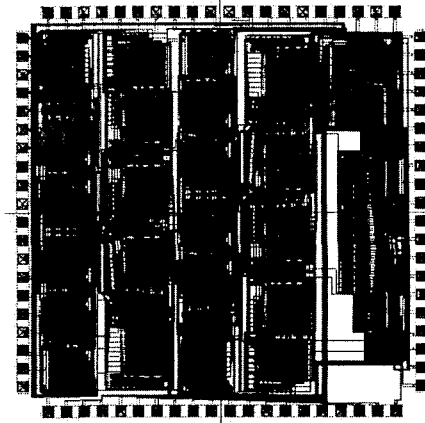


그림 10. Carrier Recovery Loop의 레이아웃

### IV. 결 론

위성방송용 QPSK 복조기에서 복소 신호의 전송 시 반송파 위상이 동기 되지 않아서 위상 차가 발생을 하면 신호의 정상도가 위상 차만큼 회전하게 된다. 이러한 위상 오차의 보정을 위해 Carrier Recovery Loop가 필요하다.

본 논문에서는 기존 Carrier Recovery Loop의 필터 구조에서의 곱셈기 수를 반으로 줄여서 구현의 복잡도를 줄일 수 있었고, 기존 NCO는 lookup table을 갖는 구조로 되어 있어 전력 소모가 큰 단점을 lookup table을 사용하지 않는 조합회로의 구조로 설계하였다. 제안된 NCO의 전력을 비교하면 lookup table을 사용한 NCO의 경우 175μW 이고 새로운 구조의 NCO는 24.65μW의 결과로 약 1/8의 전력소모의 감소를 확인하였다. 설계한 Carrier Recovery Loop의 모의실험을 통해 위상오차의 보정 결과를 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. Pratt and C. W. Satellite Communications. New York, NY: John Wiley & Sons, 1986.
- [2] F. M. Gardner, Phase-Lock Techniques, 2nd ed, New York: Wiley, 1979.
- [3] R. E. Best, Phase-Locked Loops Theory, Design, and Applications, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1984.
- [4] D. H. Wolaver, Phase-Locked Loop Circuit Design, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [5] J. Encinas, Phase-Locked Loop. London, Chapman & Hall, 1993.
- [6] J.G Proakis. Digital Communications. New York, NY: McGraw-Hill, 1989.