이중루프를 사용한 주파수 합성기에 관한 연구.

*한 영 열 **김 동 기 °한 경 섭
한양 대학교 공과대학 전자통신과

A Study on the two loop frequency synthesizer.

*Han Young Yearl **Kim Dong Gi Han Kyung Sup
Dept. of Electronic Communication Engineering, Hanyang Univ.

Abstract

To generate a output frequency from the double loop frequency synthesizer using two diffent reference frequency can be accomplished by using the numerical combination of the divider in PLL. In this paper, the hopping pattern analysis for the two divider numbers in PLL is carried out throughly. Three hopping patterns considered are found to be implemented easily by PN code genertor. And bandwidth of the mixer in double loop frequency synthesizer is given for the hopping patterns.

1. 서 론

이중 루프 주파수 합성기는 두개의 PLL(phase-locked loop) 주파수 합성기로 구성되며 출력 주파수는 두개의 기준 주파수 차의 간격을 가지고 발생된다. 하나의 PLL을 사용한 주파수 합성기는 위상 비교기, 저역 여파기, 전압제어 발진기, 분주기로 이루어지며 출력 주파수는 기준 주파수와 분주수의 곱이된다. 이중 루프를 사용한 주파수 합성기는 두개의 루프와 이 들을 결합시키는 혼합기로 구성되고 출력 주파수는 두 기준 주파수 차의 주파수를 발생시킨다. 출력 주파수는 각 루프의 분주정수에 의하여 결정된다. 이중루프를 사용한 주파수 합성기는 단일 기준 주파수를 사용한 주파수 합성기보다 도약 천이시간(Transition Time)이 짧은 이점을 가지고 있으나 원하는 출력 주파수를 얻기 위하여 두개의 분주정수를 결정하여야 한다. 주파수 도약 통신에서는 주파수 도약 형태를 결정하기 위하여 주로 PN부호를 사용하고 있으며 본 논문에서도 원하는 출력 주파수를 얻기위하여 PN부호와 관련 두 분주 정수를 배당하는 방법을 제시하고 대역통과 여과기의 대역을 결정하고 분주정수 배당방법에 따른 최적 통과 대역폭을 제시한다.

2. 이중루프 주파수 합성기의 원리

그림1은 단일 루프를 사용한 주파수 합성기 블럭도로 출력 주파수 f_{out}은 단일 기준 주파수 f_{ref}이 N배 만큼 체배된 출력 주파수 $f_{out}=Nf_{ref}$가 나온다.

PLL의 폐루프 전달함수는

$$\frac{f_{out}}{f_{ref}} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

$$G(s) = \frac{K_\phi K_o F(s)}{s}, \quad H(s) = \frac{1}{N} \qquad (1)$$

이며, K_ϕ는 위상비교기 이득, K_o는 전압제어 발진기이며 F(s)는 루프 여파기의 전달함수이다.
PLL 폐루프 전달함수는 사용하는 저역여파기 종류에 따라 다르나 이차 PLL의 전달함수는

$$\frac{f_{out}}{f_{ref}} = N\omega_n \frac{2a\zeta s + \omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \qquad (2)$$

로 표시된다. Lag여파기를 사용하였을 때는 a=0이 되고 적분기 Lead여파기를 사용하였을 때는 a=1이 된다. ω_n은 자연주파수이고 ζ는 damping factor이다.

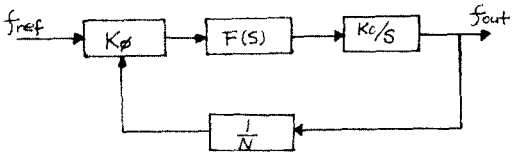

그림1. PLL주파수 합성기의 동가적 모델.

두개의 기준 주파수 차를 이용한 이중 루프 주파수 합성기 블럭도는 그림2와 같다. 각 루프의 기준 주파수는 수정발진기에서 발생한 주파수를 분주함으로써 얻어진다. 각 루프내 분주기에 입력되는 분주정수는 코드발생기에서 만들어진 주파수 도약 패턴에 따라 제어기의 감시하에 동작하도록 한다. VCO1의 출력 주파수와 VCO2의 출력 주파수는 혼합기에서 혼합된 후 두 주파수의 차가 대역통과 여파기를 통과하고 이 차주파수는 분주기에서 N1으로 분주된 후 주루프의 위상비교기에 입력된다.
보조루프의 출력주파수 f_o는

$$f_o = \frac{f_{ref2} * N2}{M2} \qquad (3)$$

가 되고, 주루프 출력주파수 f_{out}은 각루프의 출력주파수와 혼합된 후 두주파수 차의 성분이 N1에 의하여 분주되고, 이 분주된 주파

수와 기준주파수가 위상동기가 되도록 VCO1에서 출력주파수가 발생된다.

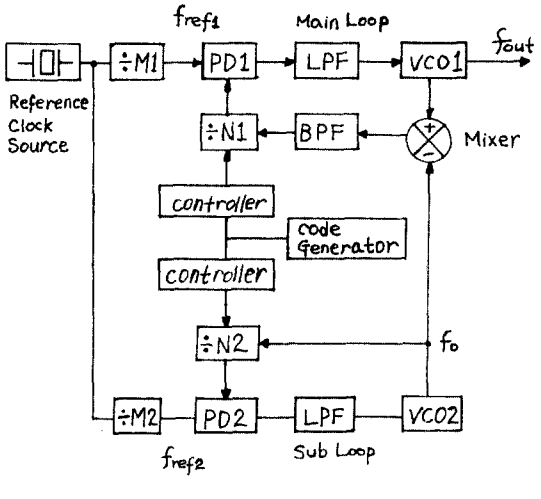

그림2. 이중루프 주파수 합성기.

3. 본주기의 본주정수 결정

이중루프 주파수 합성기에서 어느 일정한 출력주파수에 대하여 본주정수 N1과 N2의 값이 정해져야 하는데 이 때 정해질 수 있는 본주정수 N1, N2의 값이 여러 개가 있을 수 있다. 그러므로 여러 개의 본주정수를 찾는 방법을 제시한다.

주루프의 기준주파수를 f_{ref1}, 보조루프의 기준주파수를 f_{ref2}라 할때, $f_{ref1} > f_{ref2}$이면 출력주파수는 $(f_{ref1} - f_{ref2})L$이다. 여기서 L은 최저 출력주파수가 나올 수 있는 값 이상이 되는 정의 정수이다.

(정리1) 기준주파수의 차를 이용한 이중루프 주파수 합성기에서 어느 일정한 출력주파수에 대하여 (N1, N2)값이 결정되면 ((N1-K2), (N2+K1))은 같은 출력주파수를 나타낸다. 여기서 N1, N2는 정의 정수이고

$$K1 = \frac{f_{ref1}}{f_{ref1} - f_{ref2}}, \qquad K2 = \frac{f_{ref2}}{f_{ref1} - f_{ref2}}$$

이다.

(증명) 출력주파수 f_{out}은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 = (f_{ref1} - f_{ref2}) L = f_{out} \quad (4)$$

식(4)의 좌변에 f_{ref1}과 f_{ref2}의 최소공배수를 더하고 빼면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 - LCM(f_{ref1}, f_{ref2}) \\ & + LCM(f_{ref1}, f_{ref2}) \\ =& (f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2) - \left(\frac{f_{ref2}}{f_{ref1} - f_{ref2}}\right) f_{ref1} \\ & + \left(\frac{f_{ref1}}{f_{ref1} - f_{ref2}}\right) f_{ref2} \\ =& f_{ref1}\left(N1 - \frac{f_{ref2}}{f_{ref1} - f_{ref2}}\right) + f_{ref2}\left(N2 + \frac{f_{ref1}}{f_{ref1} - f_{ref2}}\right) \\ =& f_{ref1}(N1 - K2) + f_{ref2}(N2 + K1) \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 (N1, N2)와 ((N1-K2), (N2+K1))은 같은 출력주파수를 발생한다.

(정리2) 두 기준주파수의 차를 이용한 이중루프 주파수 합성기에서 $(f_{ref1} - f_{ref2})$의 주파수차로 출력주파수를 발생할 때 출력주파수와 본주 정수 관계는 다음 세 유형을 가질 수 있다.

유형1; 출력주파수가 $(f_{ref1} - f_{ref2})$만큼 증가할 때 본주정수는 (N1, N2)에서 ((N1-1), (N2+1))이 된다.

유형2; 출력주파수가 f_{ref1}만큼 증가할 때 본주정수는 (N1, N2)에서 ((N1+1), N2)가 된다.

유형3; 출력주파수가 f_{ref2}만큼 증가할 때 본주정수는 (N1, N2)에서 (N1, (N2+1))이 된다.

(증명)

유형1; 본주정수(N1, N2)에 의한 출력주파수를 f_{out}이라하면 $f_{out} = f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2$ 이고 이 출력주파수에서 $(f_{ref1} - f_{ref2})$만큼 증가하면 다음 출력주파수가 발생한다.

$$\begin{aligned} & f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 + (f_{ref1} - f_{ref2}) \\ =& f_{ref1}(N1 + 1) + f_{ref2}(N2 - 1) \end{aligned} \quad (6)$$

또 출력주파수에서 $(f_{ref1} - f_{ref2})$만큼 감소시키면 본주정수는 (N1, N2)에서 ((N1-1), (N2+1))이 된다.

유형2; 출력주파수 f_{out}보다 $K1(f_{ref1} - f_{ref2})$만큼 증가한 주파수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 + K1(f_{ref1} - f_{ref2}) \\ =& f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 + f_{ref1} \\ =& f_{ref1}(N1 + 1) + f_{ref2} N2 \end{aligned} \quad (7)$$

유형3; 출력주파수 f_{out}보다 $K2(f_{ref1} - f_{ref2})$만큼 증가한 주파수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & f_{ref1} N1 + f_{ref2} N2 + K2(f_{ref1} - f_{ref2}) \\ =& f_{ref1} N1 + f_{ref2}(N2 + 1) \end{aligned}$$

5단 PN부호 발생기로 생성할 수 있는 모든 상태수는 $2^5 - 1 = 31$ 이고, 각 상태의 이진수는 본주기로 입력된다. 최저주파수를 16MHz로 하고 25KHz 간격으로 31개의 도약주파수들을 발생시켜보면 16MHz-16.75MHz 사이에서 도약한다.

정리1을 사용하여 16MHz가 되는 정의 정수쌍(N1, N2)를 모두 구해보면, f_{ref1}=200KHz, f_{ref2}=175KHz일 때, 200(K)N1+175(K)N2=16000(K)에서 N2=0 이면 N1은 80이 된다. 여기서 200과 175의 최소공배수는 1400이므로 K1=8, K2=7이다. ((N1-K2), (N2+K1))정수쌍도 16MHz를 생성하므로 80에서 7을 계속 빼고, 0에서 8을 계속 더하면, 이 정수쌍들은 16MHz를 발생한다. 즉 (80,0), (73,8), (66,16), (69,24), (52,32), (45,40), (38,48), (31,56), (24,64), (17,72), (10,80), (3,88)의 정수쌍은 모두 16MHz를 발생시킨다. 이 외 정수쌍이 16MHz를 발생시키는 쌍은 없다. 만일 출력주파수가 L=641인 25(K)*641=16025(K)일 때는 200(K)N1+175(K)N2=16025(K)가 되는 N1과 N2의 정수쌍을 찾아내려면 다음과 같다. N2=0로 놓으면 N1이 정의 정수가 아니므로 0에서 8까지 변화시키면 이중에 N1이 정의 정수가 되는 수가 반드시 있다. 위의 예에서는 N2=7, N1=74이다. 그러므로 (74,7), (67,15), (60,23), ...의 정수쌍은 16025KHz를 발생시킨다.

f_{ref1}=200KHz, f_{ref2}=175KHz이고, 도약주파수가 31개일 때, 16MHz를 발생하는 (N1, N2)를 (10,80)로 선택하여 3가지의 도약유형을 보면 표1과 같다. 유형1은 출력주파수가

25KHz씩 증가할 때 마다 N1은 하나씩 증가하고 N2는 하나씩 감소한다. 유형2에서는 주기8마다 N1이 증가하고 N2는 그대로 있다. 유형3에서는 주기7마다 N1은 그대로 있고 N2가 하나씩 증가하며 그 사이에서는 유형1을 따른다.

표1. 분주 정수쌍의 3유형

출력주파수(MHz)	분주 정수쌍(N1,N2) 유형1	유형2	유형3
16.000	(10,80)	(10,80)	(10,80)
16.025	(11,79)	(11,79)	(11,79)
16.050	(12,78)	(12,78)	(12,78)
16.075	(13,77)	(13,77)	(13,77)
16.100	(14,76)	(14,76)	(14,76)
16.125	(15,75)	(15,75)	(15,75)
16.150	(16,74)	(16,74)	(16,74)
16.175	(17,73)	(17,73)	(17,73)
16.200	(18,72)	(11,80)	(11,80)
16.225	(19,71)	(12,79)	(12,79)
16.250	(20,70)	(13,78)	(13,78)
16.275	(21,69)	(14,77)	(14,77)
16.300	(22,68)	(15,76)	(15,76)
16.325	(23,67)	(16,75)	(16,75)
16.350	(24,66)	(17,74)	(16,82)
16.375	(25,65)	(18,73)	(11,81)
16.400	(26,64)	(12,80)	(12,80)
16.425	(27,63)	(13,79)	(13,79)
16.450	(28,62)	(14,78)	(14,78)
16.475	(29,61)	(15,77)	(15,77)
16.500	(30,60)	(16,76)	(16,76)
16.525	(31,59)	(17,75)	(16,83)
16.550	(32,58)	(18,74)	(11,82)
16.575	(33,57)	(19,73)	(12,81)
16.600	(34,56)	(13,80)	(13,80)
16.625	(35,55)	(14,79)	(14,79)
16.650	(36,54)	(15,78)	(15,78)
16.675	(37,53)	(16,77)	(16,77)
16.700	(38,52)	(17,76)	(16,84)
16.725	(39,51)	(18,75)	(11,83)
16.750	(40,50)	(19,74)	(12,82)

유형1은 5단 PN부호 발생기로 주파수 도약을 시킬 수 있으며 초기상태가 (11111)이고 PN부호 발생기가 그림3과 같을 때 도약주파수와 분주 정수쌍은 표2와 같이 된다.

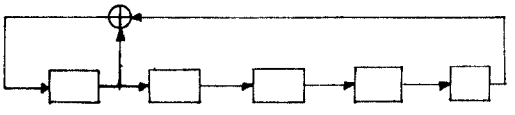

그림3. 5단 PN부호 발생기

PN부호 발생기 상태의 이진수를 십진수로 변환한 다음 9를 더하면 N1이 되고, 81에서 PN부호 상태값을 빼면 N2가 되어 랜덤하게 주파수가 도약한다. 유형3의 도약주파수의 N1주기가 7이므로 49개의 도약주파수를 이용한다면 하나의 3단 PN부호 발생기로 랜덤하게 도약시킬 수 있다. N1의 본래 주기가 7이며 이러한 주기가 7개 나타나므로 하나의 3단 PN부호 발생기로 설계할 수 있다. 유형2도 비선형 3단 시프트 레지스터 부호 발생기를 사용하면 상태수가 전부 8개 나타나므로 64개 주파수를 도약시키려면 효율적으로 설계할 수 있다.

표2. 5단 PN부호 발생기에 의한 출력주파수

PN부호 발생기의 상태 LSB				MSB	분주정수		출력주파수
Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	N1	N2	Fout(MHz)
1	1	1	1	1	40	50	16.750
0	1	1	1	1	39	51	16.725
1	0	1	1	1	37	53	16.675
1	1	0	1	1	34	56	16.600
1	1	1	0	1	28	62	16.450
0	1	1	0	0	19	75	16.125
1	0	1	1	0	22	68	16.300
0	1	0	1	1	35	55	16.625
0	0	1	0	1	29	61	16.475
1	0	0	1	0	18	72	16.200
0	1	0	0	1	27	63	16.425
0	0	1	0	0	13	77	16.075
0	0	0	1	0	17	73	16.175
0	0	0	0	1	25	65	16.375
1	0	0	0	0	10	80	16.000
0	1	0	0	0	11	79	16.025
1	0	1	0	0	14	76	16.100
0	1	0	1	0	17	71	16.325
1	0	1	0	1	30	60	16.500
1	1	0	1	0	20	70	16.250
1	1	1	0	1	32	58	16.550
0	1	1	1	0	23	67	16.325
1	0	1	1	1	38	52	16.700
0	1	0	1	1	36	54	16.650
0	1	1	0	1	31	59	16.525
0	0	1	1	0	21	69	16.275
0	0	0	1	1	33	57	16.575
1	0	0	0	1	26	64	16.400
1	1	0	0	0	12	78	16.050
1	1	1	0	0	16	74	16.150
1	1	1	1	0	24	66	16.350

4. 대역 통과 여파기의 설계

이중루프 주파수 합성기 VCO1에서 나온 주파수와 VCO2에서 나온 주파수는 믹서에서 빼지며 31개 도약주파수를 사용하는 경우를 고찰하면 각기 (N1,N2)를 이루는 유형에 따라 대역통과 여파기의 대역폭이 다르다. 유형1의 도약유형을 이용하면 200N1(KHz)가 통과주파수이므로 대역통과 여파기의 통과주파수는 2에서 8MHz가 되며 도약주파수가 많아질 수록 대역폭도 증가한다. 유형2에서는 최소통과 주파수와 최고통과 주파수가 200*10(KHz)에서 200*19(KHz)이므로 2에서 3.8MHz이다. 그러나 유형3은 N1이 7주기로 반복하므로 항상 통과주파수는 2에서3.2MHz이다. 유형3은 도약주파수가 증가하더라도 대역통과 여파기의 대역폭은 항상 일정하고 3개의 도약유형중 가장 작은 대역폭을 갖는다.

유형	통과주파수 (MHz)	대역폭 (MHz)	비고
1	2-8	6	도약주파수 증가하면 대역폭 증가
2	2-3.8	1.8	도약주파수 증가하면 대역폭 증가
3	2-3.2	1.2	대역폭 일정

5. 결 론

기준주파수의 차를 이용한 이중루프 주파수 합성기는 두개의 분주정수에 의하여 도약주파수가 결정된다. 이중루프 주파수 합성기의 분주정수창을 사용한 3개의 도약유형을 제시하고 PN부호 발생기로 설계할 수 있음을 보였다. 그리고 대역폭을 각 유형에 따라 결정하였다.

Reference

1) V.Manassewitch,"Frequency Synthesis Theory and Design",John Welley & Sons Inc.,1976
2) U.L.Rohde,"Digital PLL Frequency Synthesizer Theory & Design",Prentice Hall Inc.,1983
3) W.F.Egan,"Frequncy Synthesis by Phase Lock",John Willey & Sons Inc.,1981
4) J.Groski-Popiel,"Frequncy Synthesis Techniques and Application",IEEE Press,1975
5) W.C.Lindsey and M.K.Simon,"Phase-Locked Loops and Their Application", IEEE Press,1975
6) D.G.Messerschmitt,"A New PLL Frequncy Synthesis Structure",IEEE Trans. on Comm.,Vol1 COM-26, No.8 pp1195-1200 Aug.1978