

°송재철\*, 최형진\*  
\*성균관대학교 전자공학과

A Study on Discrete Symbol  
Synchronization Algorithm for OQPSK and QAM Modulation

° Song Jaichul\*, Choi Hyungjin\*  
\*Dept. of Electronics Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

As a result of digital realization of timing recovery circuits, new digital algorithms for timing error detection are required. In this paper, we present a new digital timing error detection algorithm which can be applied to OQPSK(Offset Quadrature PSK) signal and QAM (Quardrature Amplitude Modulation) signal. According to the proposed algorithm, it requires only two samples per symbol for its operation. One of them is used for symbol decision. The other is used for symbol synchronization. Specifically, the algorithm for OQPSK includes a form of detected angle and transition logic table for transition detection.

1. 서론

오늘날 digital signal processor와 반도체 기술 특히, VLSI의 지속적인 기술향상과 대량화로 인하여 통신기술은 기존의 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 전환되는 추세에 있다. 이러한 추세로 인하여 통신 시스템, 특히 수신단 모뎀(Modem)의 디지털화는 점점 일반화되어 가고 있다. 또한, 디지털 코히어런트(coherent) 통신을 위하여, 수신단의 여러가지 회로중에서 타이밍 검출 회로에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.[1-6]

타이밍 에러 검출 회로가 디지털화 됨으로 인하여 갖추어야 할 가장 기본적인 기능은, 효율적인 타이밍 에러 검출을 위한 알고리즘이다. 최근 몇년동안 이러한 타이밍 에러 검출 회로의 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-6]

현재까지 제안된 타이밍 에러 검출을 위한 알고리즘은 다음과 같다. 한개의 심볼당 한개의 샘플치를 취하는 방법[1], Early Late Gate 방식과 유사한 WDM (Wave Difference Method) 방법[3], 심볼당 4개의 표본치를 취하는 WDM 방식에서 Interpolation 을 사용하여 표본치를 2개로 줄이는 방법등이 제안되었다.[4] 논문 [1-4]에서

제안된 타이밍 에러 검출을 위한 알고리즘은 2-level 디지털 베이스 밴드 신호(digital baseband signal)에만 적용할수 있었다. 그러나, Gardner가 디지털 베이스 밴드 신호뿐만 아니라 BPSK, QPSK 변조방식에도 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.[5] 이 알고리즘은 전이 검출(transition detection)을 위해서 신호의 zero-crossing 성질을 이용하고 있으며, 타이밍 에러 검출을 위해서 심볼당 2개의 샘플치가 필요하게 된다. 두개의 샘플치는 심볼의 중앙과 심볼의 경계에서 각각 취한다. 이렇게 취한 두개의 샘플치중 심볼의 중앙에서 취한 샘플치는 심볼 결정(decision)에 사용되며, 심볼의 경계에서 취한 샘플치는 심볼동기(symbol synchronization)에 사용된다. 특히, Gardner 의 알고리즘을 위한 심볼의 경계와 중앙에서 각각 취한 샘플치는 진폭(amplitude)의 형태로 나타낸다. 논문 [6]에서는 Gardner 의 알고리즘을 Maximum Likelihood 이론으로 증명했으며, 논문 [7]에서는 Hardlimiter 을 적용하여 Gardner의 이론을 해석하였다. 그러나 Gardner 의 알고리즘과 논문 [7]의 알고리즘은 2-level PAM, BPSK, QPSK 와 같은 제한된 변조방법의 신호들에서만 적용이 가능하다.

논문 [8]에서는 Gardner의 2-level PAM, BPSK, QPSK

신호에만 적용가능한 알고리즘을 확장하여서 Multi-level 디지털 베이스밴드 신호, 일반적인 MPSK 변조기법에도 적용할 수 있는 타이밍 에러 검출 알고리즘이 제안되었다. 이 알고리즘은 타이밍 에러 검출회로의 정상동작을 위하여 심볼당 두개의 샘플값이 요구된다. 두개의 샘플치는 심볼의 중앙과 심볼의 경계에서 각각 취한다. 심볼의 중앙에서 취한 샘플값은 심볼 천이 level (symbol transition level)과 심볼 천이 검출(symbol transition detection)을 위해서 사용된다.

본 논문에서는, TWT(Traveling Wave Tube Amplifier), HPA (High Power Amplifier)와 같은 비선형 증폭기를 포함하고 있는 위성통신에 적용이 적합한 변조기법인 OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying or Staggered QPSK) 및 디지털 마이크로웨이브 통신에 적합한 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조기법에 적용이 가능한 타이밍 에러 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 타이밍 에러 검출회로의 정상동작을 위하여 심볼당 두개의 샘플치가 요구된다. 두개의 샘플치는 각 심볼의 중앙과 경계에서 취한다. 특히, OQPSK 변조기법에 적용가능한 타이밍 에러 검출 알고리즘은 복조각 (angle) 의 형태로 나타낼 수 있다.

2. OQPSK 및 QAM 변조 방법

2-1. 디지털 수신기(Receiver)의 구조

그림 1 에 이산 심볼 동기 알고리즘을 적용할 수 있는 디지털 샘플 수신기의 구성을 나타내고 있다. 그림 1 에서 나타난 샘플 보간기 (sample interpolator)의 출력은 심볼당 2개의 샘플치  $I_k, Q_k$  로 된다. 보간 보간기(sample interpolator)는 심볼 동기화기 (symbol synchronizer)의 출력인 타이밍 위상 추정량에 의하여 샘플 시간 간격을 조정한다. 심볼 타이밍 acquisition 과 동기는 그림 1 의 블록 다이어그램 뒷 부분에서 행해지고, 캐리어 타이밍 acquisition 과 동기는 그림 1 의 앞 부분 다이어그램 앞 부분에서 행해진다. 그림 2 에서 심볼 동기화기의 구체적인 블록도를 나타내고 있다. 타이밍 에러 검출회로를 거쳐 타이밍 에러 추정량은 동기화기 (synchronizer)를 거쳐 샘플링 보간기(interpolator)의 입력으로 들어가게 된다.

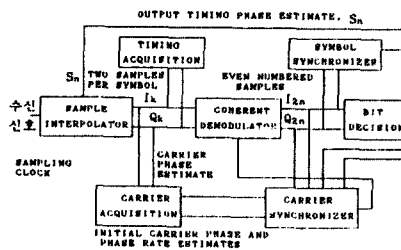


그림 1. 디지털 수신기의 블록도  
Figure 1. Block Diagram For Digital Receiver

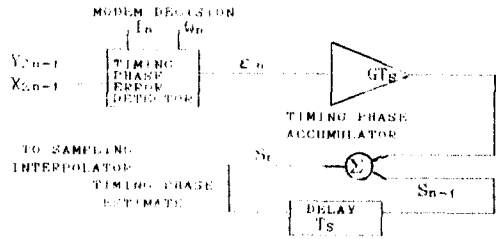


그림 2. 심볼 Tracking 을 위한 동기화기  
Figure 2. Synchronizer for Symbol Tracking

2-2. OQPSK

OQPSK 는 QPSK의 변형으로, QPSK의 in-phase 성분과 quadrature 성분이 timing 에 있어서 심볼의 반주기(half symbol period) 만큼의 지연을 갖게된다. 최대위상의 변화는 QPSK 경우의 180° 에 비해, OQPSK 에서는 90°만 발생하게 된다. 따라서, OQPSK 에서는 신호 스펙트럼의 주파수 side-lobe 을 QPSK 경우보다 억압할 수 있다.[9]

OQPSK의 복조 블록도를 그림 3 에서 나타내고 있다. 변조시 4-channel 에서 심볼의 반주기에 해당하는 offset delay 를 채우고, 복조회로에서 다시 1-channel 에서 offset delay 를 채움으로써, 신호의 최대 위상 변화를 줄일 수 있다.

OQPSK 변조 신호는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \frac{1}{2} [d_1(t) \cos \omega_c t + d_2(t-T/2) \sin \omega_c t] \quad (1)$$

여기서, T는 심볼의 주기이며,  $d_1(t), d_2(t-T/2)$  는 각각 I-channel 이의 데이터 형태이며, 그림 4 에서 나타내고 있다. 그림 3 에서는 전형적인 OQPSK 복조기의 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

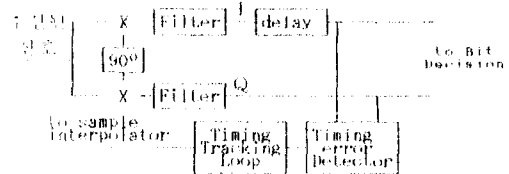


그림 3. OQPSK 의 복조 회로의 블록도  
Figure 3. Block Diagram of OQPSK modulation circuit

2-3. QAM

진폭과 위상을 둘 다 변조하는 변조기법중에 하나인 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)은 PSK 나 PAM 변조방법보다 수파수 대역폭, 전송 power 면에서 유리한 변조기법이다.[9]

QAM 신호의 일반적인 신호의 형태는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

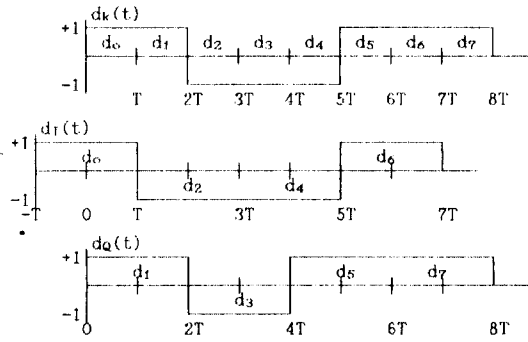


그림 4. QQPSK의 입력 data 파형  
Figure 4. Input data waveforms of QQPSK

$$S(t) = C_i \cos(\omega_c t + \phi_i) = A_i \cos \omega_c t + B_i \sin \omega_c t \quad \text{----- (2)}$$

여기서,  $A_i, B_i$ 는 각각 I, Q-channel의 진폭을 나타내고 있으며,  $i=1, 2, 3, \dots$ 의 값을 갖는다.

M-ary QAM의 변-복조기의 블록도를 그림 5에서 나타내고 있다. 입력되는 data는 S/P 변환부를 거쳐서 각각 I, Q-channel로 분리된 후, 2-level을 L-level로 변환시키는 2-to-L level 변환기를 거친 다음 변조된다. 복조기에서 수신된 QAM 신호는 다시 I, Q-channel로 분리된 후, filter를 통과한 다음 (L-1)의 판정값을 갖는 판정회로로 입력된다. P/S 변환기를 통과하면 복조가 완료된다. 한편, 심볼의 동기를 위하여, (L-1) 판정회로를 거친 I-Q channel 신호는 타이밍 에러 검출기로 입력된다.

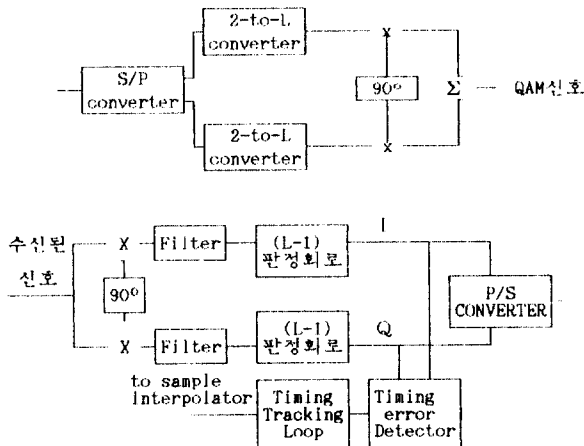


그림 5. M (LxL)-ary QAM의 변-복조회로  
Figure 5. M (LxL)-ary QAM Modulation, Demodulation Circuit

3. QQPSK 타이밍 검출 알고리즘

2장의 간단한 논리로 부터, QQPSK 변조방식의 가장 큰 특징은 I, Q-channel 간에 심볼의 반주기 지연(half symbol delay)이다. 그러므로, I-channel에 대해 offset delay를 행한 이후에는 근본적으로 QPSK의 신호와 동등한 형태로 변환된다. clock acquisition 후에, acquisition 되어진 데이터 심볼을 이용해서 offset delay 양의 근사적인 추정이 가능하다.[7]

I-channel의 n번째 심볼 중앙에서 취한 샘플치(이후 약속 샘플치)와 심볼 경계에서 취한 샘플치(이후 홀수 샘플치)를 각각  $I_{(2n-2)}, I_{(2n-1)}$ 으로 나타내고, 심볼의 반주기만큼 offset delay시킨 샘플치를 각각  $I_{d(2n-2)}, I_{d(2n-1)}$ 으로 이후에 논의에서 나타내기로 한다. 비슷한 방법으로, Q-channel에서 n번째 심볼의 중앙과 경계에서 취한 샘플치를 각각  $Q_{2n}, Q_{2n-1}$ 으로 역시 이후로 나타내기로 한다.

I, Q-channel에서 n번째 심볼의 중앙에서 취한 샘플치와 (n+1)번째 심볼의 중앙에서 취한 샘플치의 차(difference) 즉,  $(I_{d2n} - I_{d(2n-2)}), (Q_{2n} - Q_{2n-2})$ 를 식(3), (4)에서와 같이  $X_{2n-1}, Y_{2n-1}$ 으로 대치하면,

$$X_{2n-1} = I_{d2n} - I_{d(2n-2)} \quad \text{----- (3)}$$

$$Y_{2n-1} = Q_{2n} - Q_{2n-2} \quad \text{----- (4)}$$

$X_{2n-1}$ 은 I-channel의 심볼 전이(symbol transition)를,  $Y_{2n-1}$ 은 Q-channel의 심볼 전이를 나타내고 있다.

표1, 표2에서  $X_{2n-1}, Y_{2n-1}$ 의 심볼 전이 논리값(symbol transition logic value)을 나타내고 있다.

표 1. I-channel에 대한 심볼 전이 논리표  
Table 1. Symbol Transition Logic Table for I-channel

$X_{2n-1}$	$I_{d2n}$	
	1	-1
$I_{d(2n-2)}$	1	0
	-1	1

표 2. Q-channel에 대한 심볼 전이 논리표  
Table 2. Symbol Transition Logic Table for Q-channel

$Y_{2n-1}$	$Q_{2n}$	
	1	-1
$Q_{2n-2}$	1	0
	-1	1

표1, 표2 논리표에서 심볼이 1에서 -1으로, -1에서 1로 전이가 일어나면  $X_{2n-1}, Y_{2n-1}$ 은 모두 -1, 1의 값을 갖게 되는 반면, 심볼의 전이가 발생하지 않으면 0의 값을 갖게 된다.

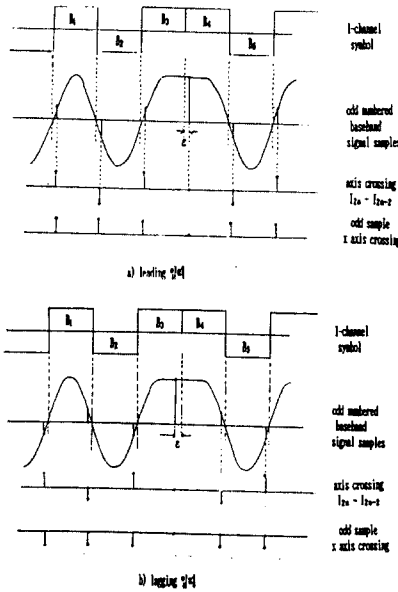


그림 6. QPSK의 타이밍 에러검출을 위한 개념도  
Figure 6. Conceptual Diagram of QPSK Timing Error Detection Algorithm

그림 6의 개념도에서 나타난 바와 같이, 심볼 천이값과 심볼의 경계에서 취한 홀수 샘플간의 곱으로 나타나는 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 는 항상 같은 부호를 나타내고 있다. 그림 6-(a)는 샘플 시간이 이상적인 샘플 시간보다 leading 했을때를 나타내고 있는데, 이 경우 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 는 항상 양(positive)의 값을 나타내고 있다. 그림 6-(b)는 샘플시간이 lagging 했을때를 나타내고 있다. 이 경우에는 그림 6-(a)와는 반대로 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 는 음(negative)의 값을 나타내고 있다. 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 는 타이밍 tracking loop을 거쳐서 심볼의 샘플링 시간 간격( sampling time interval)을 조정하는 샘플링 interpolator의 입력으로 들어가게 된다. 만약, 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 이 양(positive)의 값이 되면, 샘플링 시간 간격은 빨라지고, 반대로 음의 값이 되면, 샘플링 시간 간격은 늦어지게 된다. 심볼들 간에 천이가 발생하지 않으면, 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 는 항상 0의 값을 갖게 되므로 타이밍 위상 지터( timing phase jitter)가 증가하게 되는데, 이문제는 적절한 코딩 기법을 사용함으로써 해결할 수 있다.[6]

이상의 논의로부터 타이밍 에러 추정량은

$$\epsilon = X_{2n-1} \times I_{d(2n-1)} + Y_{2n-1} \times Q_{2n-1} \quad (5)$$

$$= (I_{d2n} - I_{d(2n-2)}) \times I_{d(2n-1)} + (Q_{2n} - Q_{2n-2}) \times Q_{2n-1} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 식 6으로 나타나는 QPSK 변조방법에 적용할 수 있는 타이밍 에러 검출 알고리즘은 그림 7에서 보이고 있다.

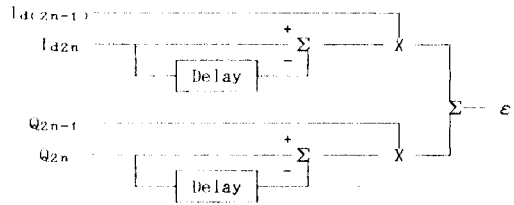


그림 7. QPSK Timing Error Algorithm  
Figure 7. QPSK Timing Error Algorithm

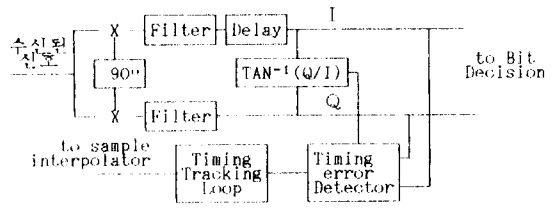


그림 8. QPSK Demodulator Block Diagram  
Figure 8. QPSK Demodulator Block Diagram

QPSK 복조기의 블록 다이어그램을 그림 8에서 나타내고 있다. 이 그림에 의하면 복조된 심볼은 각(angle)의 형태로 나타내고 있다. 식(3),(4)의 심볼의 천이를 검출하고 있는 부분을 다음식과 같이 변환할 수 있다.

$$X_{2n-1} = \cos \frac{2K+1}{4} \pi - \cos \frac{2L+1}{4} \pi \quad (7)$$

$$Y_{2n-1} = \sin \frac{2K+1}{4} \pi - \sin \frac{2L+1}{4} \pi \quad (8)$$

여기서,  $(2K+1)/4$  와  $(2L+1)/4$  은 각각 n번째, (n+1)번째 심볼의 복조된 각(angle)을 나타내고 있으며, K,L=0,1,2,3의 값을 나타내고 있다. 식 (7),(8)에 대한 천이 논리표는 표 3에 나타내고 있다.

표 3. QPSK의 천이 논리표

Table 3. QPSK Transition Logic Table

$S_{2n}$	$S_{2n-2}$	$X_{2n-1}$	$Y_{2n-1}$
$\cos \frac{2K+1}{4} \pi$	$\cos \frac{2L+1}{4} \pi$	$\cos \frac{2K+1}{4} \pi - \cos \frac{2L+1}{4} \pi$	$\sin \frac{2K+1}{4} \pi - \sin \frac{2L+1}{4} \pi$
$-\cos \frac{2K+1}{4} \pi$	$-\cos \frac{2L+1}{4} \pi$	$-\cos \frac{2K+1}{4} \pi + \cos \frac{2L+1}{4} \pi$	$-\sin \frac{2K+1}{4} \pi + \sin \frac{2L+1}{4} \pi$

타이밍 에러 검출 회로의 타이밍 에러 추정량  $\epsilon$ 은 식 (7)(8)로부터 다음식대로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = X_{2n-1} \times I_{d(2n-1)} + Y_{2n-1} \times Q_{2n-1} \quad (9)$$

$$= (\cos \frac{2K+1}{4} \pi - \cos \frac{2L+1}{4} \pi) \times I_{d(2n-1)} + (\sin \frac{2K+1}{4} \pi - \sin \frac{2L+1}{4} \pi) \times Q_{2n-1} \quad (10)$$

식 (10)의 알고리즘을 그림 9에 나타내고 있다. 그림 9의 천이 검출 논리 table은 표 3의 천이 논리표를 따르고 있다.

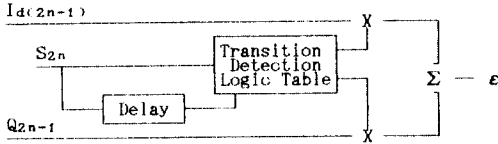


그림 9. 각복호를 위한 OQPSK의 타이밍 에러 검출 알고리즘

Figure 9. OQPSK Timing Error Detection Algorithm for Angle Demodulation

4. QAM 신호의 타이밍 검출을 위한 알고리즘

M(LxL)-ary QAM 신호의 복조기는 I,Q-channel로 구성되며 각각의 channel은 L 상태의 multi-level 상태의 값을 갖을 수 있다. 특히, M=4 일 경우에는 QPSK 복조방법과 동일하므로 이미 제안된 Gardner의 방법[5]이나 논문 [8]에서 제안한 방법을 사용하면 된다.

논문 [8]에서 제안한 multi-level PAM 신호에 적용할 수 있는 알고리즘은 다음과 같다.

$$\epsilon = (A_{2n-1} - M_n) \times T_n \quad \text{----- (11)}$$

$$= (A_{2n-1} - \frac{A_{2n} + A_{2n-2}}{2}) \times (\frac{A_{2n} - A_{2n-2}}{2}) \quad \text{----- (12)}$$

여기서, Mn은 천이 level 추정량을 나타내며, A2n, A2n-1은 각각 multi-level PAM 신호의 n번째 심분의 중앙과 경계에서 취한 샘플치를 나타내고 있다.

현재까지 제안된 알고리즘은 기본적으로 zero-crossing 성질을 이용하고 있다[1-8]. multi-level 신호에 대해서는 여러개의 천이 level을 갖고 있기 때문에 그림 10에 나타난것과 같이 천이 level을 정해 주어야만 한다.[8] 이러한 천이 level 추정 (transition level estimation)은 수신된 전후 심분의 중앙 샘플치, 즉 심분의 전후 짝수 샘플치를 이용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.[8]

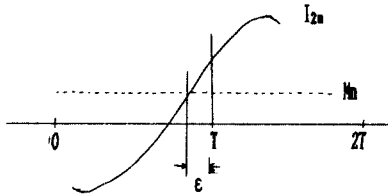


그림 10. I-channel 경우의 Multi-level 신호에 대한 개념도  
Figure 10. Conceptual Diagram of Multi-Level Signal for I-channel

$$M_n = (I_{2n} + I_{2n-2}) / 2 \quad \text{---- (13)}$$

$$N_n = (Q_{2n} + Q_{2n-2}) / 2 \quad \text{---- (14)}$$

여기서, Mn, Nn은 각각 I, Q-channel에 대한 천이 추정 level을 나타내고 있고, I2n, Q2n은 각각 n번째 심분에 대한 I,Q-channel의 짝수 샘플치를 나타내고 있다. 또한, 심분간의 천이 level 검출을 위한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_n = (I_{2n} - I_{2n-2}) / 2 \quad \text{---- (15)}$$

$$Y_n = (Q_{2n} - Q_{2n-2}) / 2 \quad \text{---- (16)}$$

여기서, Xn, Yn은 천이 검출을 위한 식이며, 표 1, 2의 천이 논리표를 따르고 있다. 타이밍 검출 회로의 추정량 ε은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = (I_{2n-1} - M_n) \times X_n + (Q_{2n-1} - N_n) \times Y_n \quad \text{---- (17)}$$

$$= (I_{2n-1} - \frac{I_{2n} + I_{2n-2}}{2}) \times (\frac{I_{2n} - I_{2n-2}}{2}) + (Q_{2n-1} - \frac{Q_{2n} + Q_{2n-2}}{2}) \times (\frac{Q_{2n} - Q_{2n-2}}{2}) \quad \text{---- (18)}$$

식 (18)로써 제안된 알고리즘은 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

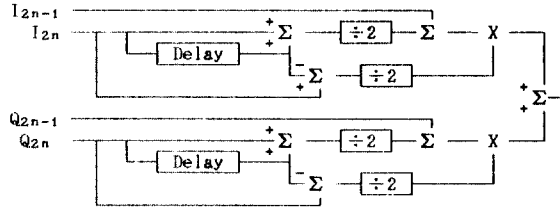


그림 11. QAM 타이밍 검출을 위한 알고리즘  
Figure 11. Algorithm for QAM Timing Detection

5. 결 론

본 연구에서는 OQPSK, QAM 신호에 적용할 수 있는 타이밍 에러 검출을 위한 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 심분당 두개의 샘플값이 요구되며, 심분의 중앙에서 취한 샘플값은 심분 천이 level (symbol transition level)과 심분 천이 검출 (symbol transition detection)에 사용된다. 특히, OQPSK에 적용할 수 있는 알고리즘은 복조된 각(angle)의 형태를 갖는 심분로 구성되었으며, 천이 논리 Table을 포함하고 있다.

차후의 연구 방향은 SQAM, QPR와 같은 변조방식에도 적용할 수 있는 타이밍 에러 검출회로의 에러 추정 알고리즘에 관한 연구개발이라 사료된다.

REFERENCES

[1] K.H.Mueller and M.Muller, "Timing recovery in digital synchronous data receivers," IEEE Trans. Communication., vol.COM-14, pp.516-530, May 1976.

한국통신학회 1990년도 추계종합학술발표회 논문집('90. 11)

- [2] A.Jennings and B.R.Clarke, " Data sequence selective timing recovery for PAM systems,"IEEE Trans. Communication., vol.COM-33, pp.792-731,July 1985.
- [3] T.Suzuki, H.Dakatori, M.Ogawa, and K.Tomooka, "Line equalizer for a digital subscriber loop employing switched capacitor technology," IEEE Trans.Communication. vol. COM-30, pp.2074-2082, Sept. 1982.
- [4] O.Agazzi, C.P.J.Tzeng, D.G.Messerschmitt,and D.A.Hodges, " Timing recovery in digital subscriber loops," IEEE Trans. Communication, vol. COM-33, pp.558-569, Jun 1985.
- [5] Floyd M.Gardner, " A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers," IEEE Trans.Communication, vol.COM-34, pp.423-429, May 1986.
- [6] Martin Oerder, " Derivation of Gardner's timing-error detector from the maximum likelihood principle," IEEE Trans. Communication, vol. COM-35, pp.684-685, Jun 1987.
- [7] S.Joseph Campanella, Schiel Sayegh,"Onboard multichannel demultiplexer/demodulator study," Final Report Comsat Laboratories, Clarksburg, Maryland, Dec.1987.
- [8] 송재철, 최형진, " 디지털 샘플 수신기 구현을 위한 이산 심볼 동기 알고리즘에 관한 연구" 대한 전자 공학회 하계학술지 1990.7.
- [9] A.A.R Townsend, Digital Line-of-sight Radio Links , 1988 Prentice Hall