



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(6), 515-519(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.6.515

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

IEEE 1588 PTP를 이용한 전파 지연 거리 측정의 정밀도 향상 기법

구영모¹, 부정일², 하정완³, 김복기⁴Precision Improvement Technique of Propagation Delay Distance Measurement
Using IEEE 1588 PTPYoung Mo Gu¹, Jung-il Boo², Jeong-wan Ha³ and Bokki Kim⁴Inha Technical College¹, DANAM SYSTEMS^{2,4}

ABSTRACT

IEEE 1588 PTP is a precision time protocol in which two systems synchronize without the aid of GPS by exchanging packets including transmission/reception time information. In the time synchronization process, the propagation delay time can be calculated and the distance between the two systems can be measured using this. In this paper, we proposed a method to improve the distance measurement precision less than the modulation symbol period using the timing error information extracted from the preamble of the received packet. Computer simulations show that the distance measurement precision is proportional to the length of the preamble PN sequence and the signal-to-noise ratio.

초 록

IEEE 1588 PTP는 두 시스템이 GPS의 도움 없이 송수신 시간 정보를 포함한 패킷을 주고받으면서 동기화하는 정밀 시각 프로토콜인데 시각 동기화 과정에서 전파 지연 시간을 계산하고 이를 이용하여 두 시스템 간의 거리를 측정할 수 있다. 본 논문에서는 수신 패킷의 프리앰블에서 추출한 타이밍 오류 정보를 이용하여 변조 심벌 주기 이하로 거리 측정 정밀도를 향상하는 방법을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 거리 측정 정밀도는 프리앰블 PN 시퀀스의 길이와 신호대잡음비에 비례하는 것을 보였다.

Key Words : IEEE 1588 PTP, Propagation Delay(전파 지연), Timing Error(시간 오차), Distance Measurement(거리 측정), Global Positioning System(범지구 위치 결정시스템)

1. 서 론

지상의 두 시스템 간의 거리 측정은 두 시스템이 GPS (Global Positioning System) 좌표를 교환하여 쉽게 계산할 수 있지만, GPS의 지원이 없거나 교란 등의 이유로 GPS 이용이 불가능한 경우에는 무선

전송 전파 지연 특성을 이용하는 무선 거리 측정 기술이 유용하다. 무선 거리 측정 기술은 이외에도 위치 시스템, 네비게이션, 텔레메트리 등의 다양한 상업적 또는 군사적 목적으로 사용되고 있다.

PN (Pseudo Noise) 레인징(ranging)은 상대방과의 거리를 측정하고자 하는 시스템이 PN 시퀀스를 변조

† Received : February 15, 2021 Revised : March 15, 2021 Accepted : April 5, 2021

¹ Professor, ² Deputy Chief Engineer, ³ Senior Research Engineer, ⁴ CTO¹ Corresponding author, E-mail : ymgu@inhac.ac.kr, ORCID 0000-0002-3605-783X

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

한 신호를 반복적으로 전송하여 상대방 시스템에 반사되거나 상대방 시스템이 수신 후 재전송하는 신호를 수신하여 PN 시퀀스를 검출한 후 왕복 시간을 계산하여 거리를 계산하는 방법인데 그 정밀도는 칩 동기화를 하지 않는 open-loop의 경우에는 칩 간격이고 [1], DLL (Delay-Locked Loop)을 이용하여 칩 동기화를 수행하더라도 신호대잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio) 50dB 이하에서는 칩 간격의 1/100보다 크다 [2]. 정밀도를 높이기 위해 칩 간격을 짧게 하면 PN 시퀀스의 반복 주기도 짧아져 측정 범위가 축소되는 단점이 있다. 따라서 측정 범위를 확대하기 위해 두 개 이상의 PN 시퀀스를 결합하여 반복 주기를 확장하는 방법들이 제안되었다[3,4].

거리 측정 정밀도를 향상하기 위해 PN 시퀀스 대신에 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호를 사용하는 레인징 방식도 제안되었는데 시간 영역에서 샘플 간격 정수배의 시간 지연을, 주파수 영역에서 샘플 간격 이내의 시간 지연을 측정하는 방식으로 SNR 30dB 이하에서 정밀도를 샘플 간격의 1/100 이하로 향상하였다[5-7]. OFDM 방식은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)이 커서 송신기 파워 앰프의 선형 특성을 유지하려면 파워 앰프의 back-off를 크게 하여야 하므로 효율이 낮아지는데 이를 극복하기 위해 주파수 변환을 하더라도 일정 진폭 특성이 유지되는 CAZAC 시퀀스를 이용한다.

IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol) 는 공간적으로 흩어져 있는 다수의 시스템이 동일한 타이밍을 공유하기 위해 정의된 정밀 시각 프로토콜인데 그 과정 중에 두 시스템이 송수신 시간 정보를 포함한 패킷을 주고받으면서 전파 지연 시간을 계산하고 이를 이용하여 타이밍을 보정한다. 무선 시스템의 경우 계산된 전파 지연 시간을 두 시스템 간의 거리를 측정하는데 이용할 수 있다[8]. 참고문헌 [8]에서는 전파 지연 시간을 계산할 때 참고문헌 [1]의 open-loop 방식과 유사하게 프리앰블을 검출하는 변조 심별 시간을 기준으로 하였기 때문에 그 정밀도는 심별 간격(주기)이다. 따라서 심별 전송율이 낮으면 심별 간격이 커서 거리 측정 정밀도가 낮아진다.

IEEE 1588 PTP를 이용하여 두 무선 시스템 간의 거리를 측정할 때 송신 전력 제한이 있는 경우에는 정밀도를 높이기 위해 CAZAC 시퀀스를 이용하는 OFDM 신호를 사용하기가 어렵다. 레인징의 경우에는 신호 전체에 CAZAC 시퀀스를 적용하여 PAPR을 낮출 수 있지만 데이터를 포함하는 패킷의 경우에는 CAZAC 시퀀스를 패킷 전체에 적용하기가 어렵기 때문이다. 패킷 전송은 PN 레인징과 같이 신호를 계속 송신하는 것이 아니라 패킷을 시간상 불연속적으로 송신하므로 DLL을 적용하기가 어렵다.

본 논문에서는 대역 및 전력 제한이 있어 SRC (Square-root Raised Cosine) 펄스 정형과 단일 반송

파(single carrier) 변조를 사용하는 무선 통신 시스템에서 IEEE 1588 PTP를 이용하여 두 무선 시스템 간의 거리를 측정할 때, 수신 패킷의 프리앰블에서 추출한 타이밍 오류 정보를 이용하여 수신 시간의 정밀도를 변조 심별 주기 이하로 만들어 거리 측정 정밀도를 향상하는 방법을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 타이밍 오류의 표준편차를 계산하여 기존 시스템의 정밀도와 비교하고 이는 프리앰블의 PN 시퀀스 길이와 SNR에 비례하는 것을 보인다.

II. 전파 지연 거리 측정 기법

2.1 IEEE 1588 PTP를 이용한 거리 측정

Figure 1을 이용하여 IEEE 1588 PTP 기법을 간략히 설명하면 다음과 같다. 노드 A가 시간 t_1 에 패킷 1을 전송하면 노드 B는 이를 전송 전파 지연 시간 t_{prop} 후 시간 t_2 에 수신하고, 시간 t_3 에 (t_3-t_2) 정보를 담은 패킷 2를 송신하면 노드 A는 이를 다시 $t_{prop} \pm \Delta$ 후 시간 t_4 에 수신한다. 시간 (t_4-t_1) 과 시간 (t_3-t_2) 간에는 식 (1)이 성립하는데 노드 A는 시간 (t_4-t_1) 을 알고 있고 시간 (t_3-t_2) 는 수신한 패킷 2에 포함된 정보이므로 식 (2)와 같이 t_{prop} 를 계산할 수 있으므로 노드 A와 노드 B 간의 거리 s_{A-B} 를 식 (3)을 이용해 계산할 수 있다. 식 (3)에서 c 는 전파의 속도($=3 \times 10^8$ m/sec)이다.

$$(t_4 - t_1) = 2t_{prop} \pm \Delta + (t_3 - t_2) \quad (1)$$

$$t_{prop} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \pm \Delta}{2} \quad (2)$$

$$s_{A-B} = c \times t_{prop} \quad (3)$$

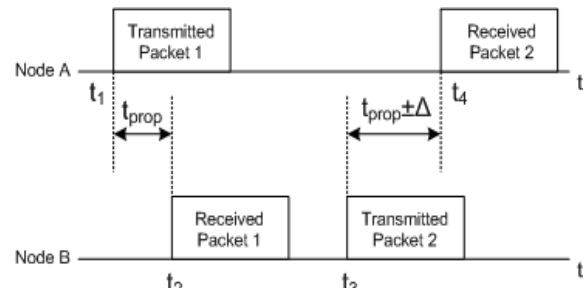


Fig. 1. IEEE 1588 precision time protocol

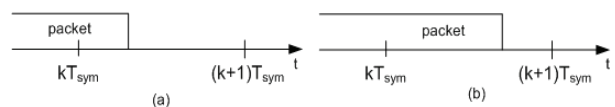


Fig. 2. Packet arrival time

식 (2), (3)에서 보듯이 거리 s_{A-B} 측정의 정밀도는 시간 t_{prop} 의 정밀도에 의해 결정되는데 패킷 송신 시간 t_1 , t_3 과 수신 시간 t_2 , t_4 의 정밀도가 다를 경우 t_{prop} 의 정밀도는 낮은 정밀도에 의해 결정된다. 예를 들어 송수신기 CPU (Central Processing Unit)의 동작 속도가 100MHz이고 패킷 전송 심벌율이 1Msps (symbols per second)라고 가정하면 송신기는 10ns의 정밀도로 패킷을 송신할 수 있지만 Fig. 2와 같이 심벌 단위로 패킷 검출을 하면 패킷 도착 시간은 kT_{sym} 또는 $(k+1)T_{sym}$ 이 되고 변조 심벌의 주기 T_{sym} 이 1us이므로 패킷 수신 시간의 정밀도는 1us로 제한될 수 있다. Fig. 2에서 패킷 도착 시간을 T_{sym} 의 1/100까지 측정할 수 있다면 t_{prop} 의 정밀도를 10ns로 향상할 수 있다. 시간 t_1 과 t_4 사이에 노드 A와 B가 정지해 있지 않고 고속으로 이동한다면 Δ 에 의해 오차가 발생할 수 있는데 본 논문은 노드 A와 B가 정지해 있거나 저속으로 이동하여 $\Delta \approx 0$ 인 상황을 가정한다.

2.2 타이밍 오류 측정

Figure 3(a)는 송신기와 수신기에서 타이밍 오류를 측정하는 부분만을 묘사한 송수신 블럭도이다. 송신기는 패킷 변조기와 SRC 필터, DAC (Digital Analog Converter)로 구성되어 있고, 수신기는 심벌율의 2배 즉, 심벌 주기 T_{sym} 의 1/2 간격인 샘플 주기 T_s 로 샘플링하는 ADC (analog digital converter), 패킷을 검출하기 위한 프리앰블 상관기로 구성된다. 채널은 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 가정한다. 패킷의 구성은 Fig. 3(b)와 같이 프리앰블과 데이터로 구성된다. 프리앰블은 길이가 m 인 LFSR (Linear Feedback Shift Register)로 생성된 주기가 $N=2^m-1$ 인 PN 시퀀스 c_k 로 식 (4)와 같이 차등(differential) BPSK (Binary Phase Shift Keying)로 변조되어 -1 또는 +1의 값을 갖는 것으로 가정한다.

$$s_k = s_{k-1}^* c_k \quad (4)$$

수신기의 프리앰블 상관기(preamble correlator)로 입력된 신호 r_k 는 식 (5)와 같은데 s_k 는 송신 신호, w_k 는 잡음, Δf 는 주파수 오프셋, ϕ 는 위상 오프셋이다.

$$r_k = s_k e^{j2\pi\Delta f T_s k + \phi} + w_k \quad (5)$$

프리앰블 상관기는 계수가 c_n 인 FIR (Finite Impulse Response) 필터 형태로 필터 메모리에 저장된 2N개의 샘플값 r_n 로부터 상관 값 $\gamma(k)$ 를 식 (6)과 같이 계산한다.

$$\gamma(k) = \sqrt{\left\| \sum_{n=0}^{N-1} (r_{k-2n} r_{k-2n-2}^*)^* c_n \right\|^2} \quad (6)$$

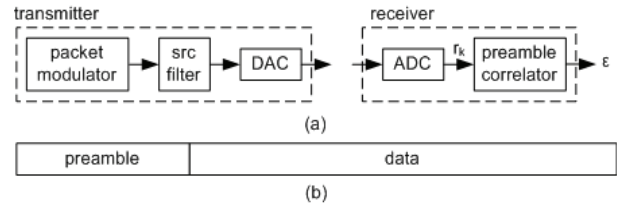


Fig. 3. (a) System model and (b) Packet configuration

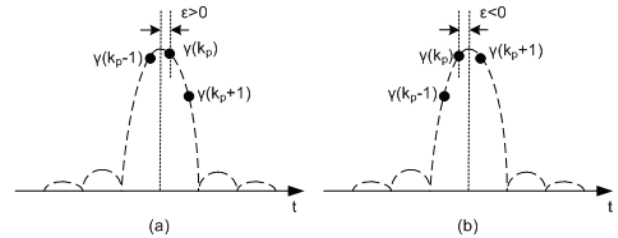


Fig. 4. Correlation value based on sample timing error

프리앰블 상관기에 프리앰블 전체가 입력되는 시간 k_p 에 상관값은 최대가 되므로 프리앰블을 검출할 수 있다. 프리앰블은 차등 부호화되었기 때문에 식 (6)에서 주파수 오프셋 Δf 와 위상 오프셋 ϕ 는 상쇄되어 소거된다. PN 시퀀스의 특성과 송신기 내의 SRC 필터 특성으로 인해 상관값이 최대가 되는 시간 k_p 전후 샘플의 상관값 $\gamma(k_p-1)$, $\gamma(k_p)$, $\gamma(k_p+1)$ 은 Fig. 4와 같다. ADC에서 샘플 타이밍 오류가 없는 $\epsilon=0$ 인 경우에는 $\gamma(k_p-1)=\gamma(k_p+1)$ 이 성립하지만 $\epsilon>0$ 인 경우에는 $\gamma(k_p-1)>\gamma(k_p+1)$ 이고, $\epsilon<0$ 인 경우에는 $\gamma(k_p-1)<\gamma(k_p+1)$ 이므로 식 $\gamma(k_p-1)-\gamma(k_p+1)$ 은 Fig. 5와 같이 SRC 필터의 롤오프 계수(roll-off factor)에 따라 약간의 차이는 있지만 S-커브 형태가 된다. 따라서 샘플 타이밍 오류 ϵ 를 식 (7)과 같이 계산할 수 있다. 식 (7)에서 함수 $K[x]$ 는 샘플 타이밍 오류 ϵ 이 범위 $-0.5 \sim +0.5$ 에서 선형이 되게 하는 함수로서 S-커브의 역함수 형태

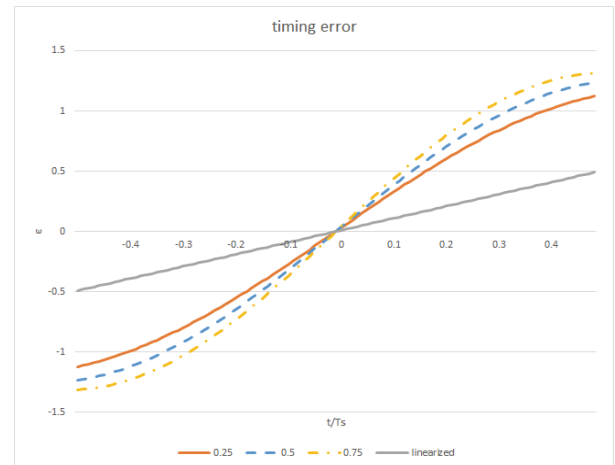


Fig. 5. S curve of sample timing error according to roll-off factor

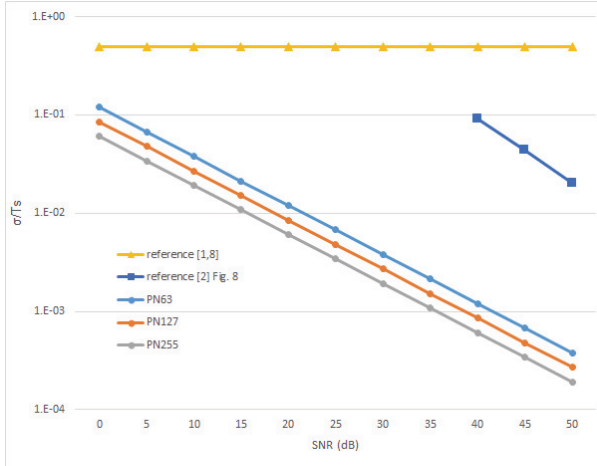


Fig. 6. Standard deviation of sample timing error according to SNR

이며 PN 시퀀스 길이 N 과 SRC 필터의 롤오프 계수에 따라 달라진다.

$$\epsilon = K[\gamma(k_p - 1) - \gamma(k_p + 1)] \times [\gamma(k_p - 1) - \gamma(k_p + 1)] \quad (7)$$

ADC에서 샘플 타이밍 오류가 있는 경우 프리앰블 검출기에서 상관값이 최대가 되는 시점으로 계산한 패킷 수신 시간 t_r 와 실제로 패킷을 수신하는 시간 t'_r 과는 샘플 타이밍 오류 ϵ 에 샘플 타이밍 간격 T_s 를 곱한 만큼 오차가 발생한다. 따라서 식 (8)과 같이 이를 보정하면 패킷 수신 시간을 더욱 정확하게 계산할 수 있다.

$$t'_r = t_r - \epsilon T_s \quad (8)$$

2.3 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 거리 측정 정밀도 계산

샘플 타이밍 오류를 보정하지 않는 open-loop 방식[1,8]의 경우에 패킷 도착 시간의 정밀도는 샘플 간격인 T_s 의 $\pm 1/2$ 이지만 식 (8)과 같이 보정을 한 경우에 정밀도는 식 (7)로 계산한 샘플 타이밍 오류 ϵ 의 표준편차로 볼 수 있다. Fig. 6은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 SRC 필터의 롤오프 계수가 0.25이고, PN 시퀀스의 길이 N 에 따른 식 (7)로 계산한 ϵ 의 표준편차를 비교한 것이다. 동일한 SNR에서 N 이 증가할수록 표준편차가 감소하고, SNR이 증가할수록 표준편차가 감소한다. 표준편차가 동일할 때 N 이 두 배가 되면 약 3dB의 SNR 이득이 있다. 참고문헌 [2]의 결과와 비교하면 SNR이 20dB 이하에서도 샘플 간격의 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 의 정밀도를 확보할 수 있다.

식 (7)에서 계산한 샘플 타이밍 오류의 오차를 식 (2)에 적용하면 전송 전파 지연 시간 t_{prop} 의 정밀도를 계산할 수 있다. 식 (2)에서 패킷 수신 시간 t_2 , t_4 가 더해지므로 t_{prop} 의 정밀도는 t_2 , t_4 각각의 정밀도의 2

Table 1. Distance measurement precision

SNR	N	σ	precision	
			1Msps	10Msps
10dB	63	3.79e-2	11.37m	1.14m
	127	2.69e-2	8.07m	0.81m
	255	1.92e-2	5.76m	0.58m
20dB	63	1.20e-2	3.60m	0.36m
	127	8.49e-3	2.55m	0.25m
	255	6.06e-3	1.82m	0.18m
30dB	63	3.79e-3	1.14m	0.11m
	127	2.69e-3	0.81m	0.08m
	255	1.92e-3	0.58m	0.06m

배가 된다. 이때 Fig. 1의 노드 A, B의 수신기 SNR은 동일하다고 가정하는데 SNR이 동일하지 않을 경우 더 낮은 SNR이 정밀도를 결정한다고 볼 수 있다. 식 (3)으로 두 무선 장치 간의 거리 s_{A-B} 를 계산할 수 있는데 샘플 타이밍 오류를 보정하지 않는 open-loop[1,8] 경우에 패킷 수신 시간의 정밀도가 샘플 간격인 T_s 의 $1/2$ 이므로 t_{prop} 의 정밀도는 그 2배인 T_s 이고[8] s_{A-B} 의 정밀도는 cT_s 이다. 패킷 변조 심벌의 심벌율이 각각 1Msps, 10Msps일 때 T_s 는 각각 500ns, 50ns이므로 거리 측정 정밀도는 150m, 15m로 심벌율이 증가할수록 샘플 간격이 감소하므로 거리 측정 정밀도가 증가한다. 샘플 타이밍 오류를 이용하여 패킷 수신 시간을 보정할 경우 Fig. 6의 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 적용하면 SNR이 10dB, 20dB, 30dB일 때 PN 시퀀스 길이 N 과 심벌율에 따른 거리 측정 정밀도는 Table 1과 같다. 심벌율이 증가하면 정밀도가 향상되지만 동일한 심벌율에서도 SNR과 N 이 증가하면 정밀도가 향상된다.

III. 결론

본 논문에서는 GPS의 도움 없이 IEEE 1588 PTP를 이용하여 두 무선 시스템 간의 거리를 측정할 때 수신 패킷의 프리앰블에서 추출한 타이밍 오류 정보를 이용하여 기존의 방법과 비교하여 SNR이 20dB 이하에서도 심벌 간격의 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 의 정밀도로 패킷 수신 시간을 보정하여 거리 측정 정밀도를 향상하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 거리 측정 정밀도는 동일한 변조 심벌

울에서도 패킷 프리앰블로 사용하는 PN 시퀀스 길이와 수신기의 SNR에 비례하여 향상되는 것을 보였다. 제안한 방법은 거리를 측정하는 동안은 두 무선 시스템 간의 거리가 거의 변하지 않는 경우를 가정하였는데 향후 고속으로 이동하는 시스템에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- 1) Berner, J. B. and Bryant, S. H., "Operations comperation of deep space ranging types: sequential tone vs. pseudo-noise," *Proceeding of the 2002 IEEE Aerospace Conference*, Vol. 3, 2002, pp. 1313~1326.
- 2) Gill, W. J., "A comparison of binary delay-lock tracking-loop implementations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-2, July 1966, pp. 415~424.
- 3) Yamamoto, Z-I., Hirosawa, H. and Nomura, T., "Dual speed PN ranging system for tracking of deep space probes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23, Vol. 4, July 1987, pp. 519~527.
- 4) "Pseudo-noise (PN) ranging systems," The Consultative Committee for Space Data Systems, Informational Report, CCSDS414.0-G-2, February 2014.
- 5) Ren, G., Sun, C., Ni, H. and Bai, Y., "OFDM-based precise ranging technique in space applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 47, No. 3, July 2011, pp. 2217~2221.
- 6) Sheng, B., "Enhanced OFDM-based ranging method for space applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 50, No. 2, April 2014, pp. 1606~1609.
- 7) Yan, C., Wang, J., Fu, L., Jiang, C., Chen, M. and Ren, Y., "Timing synchronization and ranging in networked UAV-aided OFDM systems," *Journal of Communications and Information Networks*, Vol. 3, No. 4, December 2018, pp. 45~54.
- 8) Boo, J-I., Ha, J-W., Kim, K-S. and Kim, B., "Wireless TDD time synchronization technique considering the propagation delay between mobile vehicles," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 5, October 2019, pp. 392~399.