

수중 통신 시스템을 위한 가변 길이를 갖는 Slotted ALOHA

이준만*, 강충구°

Slotted ALOHA with Variable Slot Length for Underwater Acoustic Systems

Junman Lee*, Chung G. Kang°

요약

본 논문은 수중 채널에서 서로 상이한 전달 지연 시간의 분포를 갖는 노드들이 혼재한 상황에서 랜덤 액세스 슬롯의 크기를 다르게 설정하여 랜덤 액세스 성능을 향상시키는 방법을 제안한다.

Key Words : Underwater acoustic network, Slotted ALOHA, Random access

ABSTRACT

In this letter, we consider a random access scheme for underwater acoustic network, in which a slotted ALOHA with variable slot length is designed to enhance the random access performance for the nodes with the varying propagation delay.

I. 서론

수중 신호의 전달 속도는 온도, 염분의 농도, 깊이 등에 크게 따라 달라지고^[1], 지연 시간이 육상에 비해 아주 길기 때문에 완벽한 동기화 성능을 기대하기 어렵다. 또한, 수중 노드가 빠른 이동성을 갖는 경우라면 그 속도에 따라서 동기화 성능은 크게 차이가 난다. 이러한 수중 동기화 문제를 해결하기 위해 다양한 동기화 알고리즘이 제시되어 왔고, 수중 동기화 오류를 상쇄시키기 위하여 guard time이 포함된 Slotted

ALOHA가 제안된 바 있다^[1,2].

본 논문에서는 서로 다른 동기화 성능, 즉 서로 다른 지연 시간의 분포를 갖는 노드들이 혼재한 상황에서, 랜덤 액세스 슬롯의 크기를 서로 다르게 두어 랜덤 액세스 성능을 향상시키는 방식을 제안하고, 그 성능 분석을 통해 최적 구조를 제시하고자 한다.

II. 시스템 모델

수중 노드들과 수중 기지국 사이의 통신을 위해, 시간 축으로는 그림 1과 같이 연속된 고정 길이 T_f 를 갖는 프레임으로 구성된다. 프레임의 앞 부분은 노드들이 상향 링크의 데이터 전송에 필요한 자원 요청을 위한 구간이며, 이를 위해 수중 노드들은 주어진 자원 중에서 임의로 선택하여 랜덤 액세스 메시지를 수중 기지국에 전송한다. 수중 기지국은 충돌 없이 랜덤 접속에 성공한 노드에게 자원을 할당해주며, 해당 노드들은 Data Period (DP)에서 데이터를 전송한다. 이때 노드의 상황에 따라 유연한 접속을 위해 랜덤 액세스 슬롯의 길이를 달리 둘 수 있도록 한다. 이를 위해 슬롯의 길이에 따라 해당 영역을 각각 Short Slot Period (SSP) 와 Long Slot Period (LSP)로 구분하고, 그 구간의 슬롯 길이를 각각 T_n 와 T_m 이라고 하자. 한 프레임 내에서 할당된 랜덤 접속 구간의 길이를 T_{RA} 이라고 고정하고, SSP와 LSP에서의 슬롯 개수를 각각 n 와 m 이라고 하면 다음을 만족한다.

$$nT_n + mT_m = T_{RA} \tag{1}$$

노드들의 트래픽 생성 패턴은 Poisson 분포를 따른다고 가정한다. 또한 수중 노드들의 개수는 충분히 많으며, 각 노드들의 도착율은 충분히 작다고 가정한다. 즉, 임의의 노드가 한 프레임 내에서 두 개 이상의 슬롯에서 랜덤 액세스 메시지를 전송할 확률은 무시할

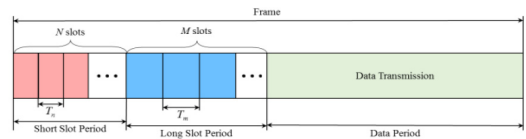


그림 1. 프레임 구조
 Fig. 1. Frame structure

※ 본 연구결과는 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (분산형 수중 관측 제어망 개발)
 • First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, handol306@korea.ac.kr, 학생회원
 ° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, ccgkang@korea.ac.kr, 정회원
 논문번호 : KICS2015-12-403, Received December 22, 2015; Revised January 13, 2016; Accepted January 14, 2016

만큼 작다고 가정한다.

노드들은 지연 시간의 불확실성 정도에 따라 SSP 또는 LSP에서 랜덤 접속을 시도하며, 이때 각 구간을 접속하는 노드들의 그룹을 각각 Short Slot Group (SSG)와 Long Slot Group (LSG)라고 구분할 수 있다. 본 논문에서는 분석의 단순성을 위하여 각 노드들의 지연 시간이 크거나 작은 두 가지 극단적인 상황을 고려한다. 즉, SSG에 속한 노드들의 지연시간은 상수 값으로 일정하다고 가정하고, LSP에 속한 노드들의 지연 시간 분포는 같은 분산 σ^2 을 갖는 가우시안 분포를 따른다고 가정한다^[1].

III. 랜덤 액세스의 성능 분석

본 절에서는 SSG와 LSG에 속한 노드들의 랜덤 액세스 성공 확률 P_{SSG} 와 P_{LSG} 를 수학적으로 유도하고, 각 그룹의 도착율에 따라서 랜덤 액세스 메시지의 성공 수 S_{SSG} 와 S_{LSG} 를 구하도록 한다. SSG에 속하는 노드들은 지연 시간의 불확정성이 없다고 가정했기 때문에 SSP의 슬롯에는 guard time이 필요 없다. 즉, SSP의 슬롯 길이 T_n 는 랜덤 액세스 메시지 크기 T_s 와 같다. SSG에 속한 노드들이 λ_n 의 도착률로 전송을 시도할 때, SSP내 슬롯에서 노드가 성공적으로 랜덤 액세스 메시지를 보낼 확률은 다음과 같다^[1].

$$P_{SSG} = \left(\frac{\lambda_n T_f}{n} \right) e^{-\left(\frac{\lambda_n T_f}{n} \right)} \quad (2)$$

SSG에 속한 노드들의 지연시간이 상수 값이고, 이 경우에는 기존의 Slotted Aloha에서의 연구 결과와 동일하다^[1]. SSG내에서 노드들이 성공적으로 랜덤 액세스 메시지를 송신하는 개수는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{SSG} = \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} P_{SSG}^k (1 - P_{SSG})^{n-k} \quad (3)$$

LSG에 속하는 노드들의 지연 시간은 불확정성이 존재하기 때문에 슬롯의 크기를 SSG와 같이 랜덤 액세스 메시지 크기와 동일하게 둘 경우, 다른 슬롯간 메시지 충돌이 야기된다. 그러므로 LSP 슬롯의 크기를 $T_m = T_s + \delta$ 으로 δ 의 guard time을 갖도록 하여 다른 슬롯으로부터 오는 랜덤 액세스 메시지로부터의 충돌을 방지하고자 한다. 한편, P_{LSG} 를 유도하기 앞서 $\lceil 2\sigma/T_m \rceil \leq 2$ 를 가정하여 인접한 두 슬롯에서 넘어오는 것에 대한 충돌까지만 고려하도록 한다.

LSG에 속한 임의의 기준 단말이 랜덤 액세스 메시지를 전송할 때 해당 메시지는 가우시안 분포를 갖는 지연 시간을 겪고 도착한다. 기준 단말이 전송하는 랜덤 액세스 메시지의 지연 시간을 y_p 라 하자. 이때 기준 단말이 LSP의 I 번째 슬롯에 메시지를 전송했을 때 전송에 성공할 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{LSG} = \int_{(I-2)T_m}^{(I+2)T_m} \Pr[y_p = y] \times \sum_{i=0}^{\infty} \Pr\{(i+1) \text{ arrivals in slot I}\} \times \prod_{w=0}^i \{1 - \Pr\{y - T_s \leq y_0 \leq y + T_s\}\} \times \prod_{u=-2, \neq 0}^2 \left[\sum_{l=0}^{\infty} \Pr\{i \text{ arrivals in slot (I+u)}\} \times \prod_{w=0}^i \{1 - \Pr\{y - T_s \leq y_k \leq y + T_s\}\} \right] dy \quad (4)$$

(4)는 슬롯 I를 기준으로 최대 인접한 두 개 슬롯까지 포함하여 $[y - T_s, y + T_s]$ 에 다른 노드가 보내는 랜덤 액세스 메시지가 없을 때의 확률에 해당한다. LSG에 속한 노드들의 지연시간은 서로 분산이 같은 가우시안 분포를 따른다고 가정했다. $(I+k)$ 번째 슬롯 향해 메시지를 전송할 때 해당 메시지가 겪는 전송 시간 y_k 는 $y_k \sim N((I+k)T_s, \sigma^2)$ 를 만족한다.

$\int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \frac{1}{2} \left[\text{erf}\left(\frac{b-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(\frac{a-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]$ 이고, 이때 $a = y + T_s$, $b = y - T_s$, 그리고 $\mu = (I-k)T_m$ 일 때 $\Pr\{a \leq y_k \leq b\}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr\{b \leq y_k \leq a\} = \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{y + T_s - (I-k)T_m}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{y - T_s - (I-k)T_m}{\sigma\sqrt{2}}\right) = P_k \quad (5)$$

LSP에 속한 노드들의 도착율을 λ_m 이라고 하면, (5)의 정의에 따라 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{LSG} = \int_{(I-2)T_m}^{(I+2)T_m} \frac{1}{1 - P_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y - IT_m}{\sigma}\right)^2} \times \left[e^{-\frac{\lambda_m T_f P_0}{m}} - e^{-\frac{\lambda_m T_f}{m}} \right] e^{-\frac{\lambda_m T_f}{m}(P_2 + P_1 + P_{-1} + P_{-2})} dy \quad (6)$$

SSG와 마찬가지로 LSG내에서 노드들이 성공적으로 랜덤 액세스 메시지를 송신하는 수는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{LSG} = \sum_{k=0}^m k \binom{m}{k} P_{LSG}^k (1 - P_{LSG})^{m-k} \quad (7)$$

(3)과 (7)에 의해서 시스템 내의 성공한 랜덤 액세스 메시지의 평균 수 S_{sys} 는 다음과 같다.

$$S_{sys} = S_{SSG} + S_{LSG} = \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} P_{SSG}^k (1 - P_{SSG})^{n-k} + \sum_{k=0}^m k \binom{m}{k} P_{LSG}^k (1 - P_{LSG})^{m-k} \quad (8)$$

S_{sys} 는 SSP와 LSP의 각 슬롯의 수, LSP내 슬롯의 guard time, 그리고 SSG과 LSG의 도착율에 따라 달라진다.

IV. 성능 분석

그림 2는 SSG에 속한 노드들의 지연 시간이 일정하고, $\lambda_n = 1.0$ packets/s, $\lambda_m = 1.0$ packets/s, $T_f = 5.0$ s, $T_{RA} = 1.0$ s, $T_n = T_s = 0.02$ s, 그리고 LSG에 속한 노드들의 지연 시간의 분포가 표준 편차가 $\sigma = 2T_s$ 인 가우시안 분포일 때, SSP의 슬롯 개수 n 을 조절해가면서 S_{sys} , S_{LSP} , S_{SSP} 의 개수를 각각 guard time δ 의 유무에 따라 나타낸 것이다. 여기서 볼 수 있듯이 guard time이 존재 하지 않을 경우와 존재할 경우 S_{sys} 가 최대 20% 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 n 이 증가할수록 guard time이 존재하지 않을 때의 성능이 오히려 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 guard time이 다른 슬롯으로부터 넘어오는 랜덤 액세스 메시지를 저지하는 효과보다 guard time으로 야기된 오버헤드로 인하여 슬롯의 개수가 감소함으로써 나타나는 병목 현상이 심해지기 때문이다.

그림 3은 보다 부하가 높은 상황으로 $\lambda_n = 2.2$ packets/s와 $\lambda_m = 8.0$ packets/s를 가정하였고, 시뮬레이션으로 최적화된 guard time이 포함된 Slotted ALOHA와의 비교를 보여준다. SSP와 LSP의 슬롯의 개수에 따라 S-ALOHA와의 성능 차이가 달라지지만, 최대 11% 정도의 성능 차이를 보인다. SSP의 슬롯 개수가 적을 때에는 ($n < 10$) 오히려 S-ALOHA의 성

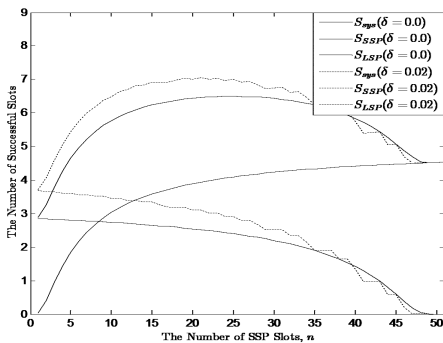


그림 2. SSP 슬롯 수 n 에 따른 성능
Fig. 2. Performance as varying the number of n

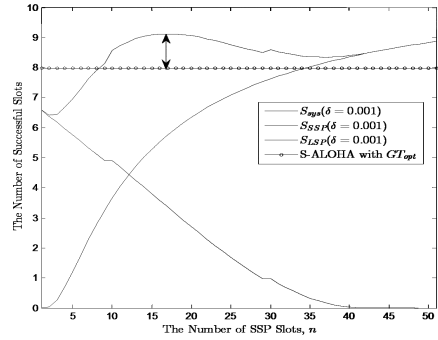


그림 3. Slotted ALOHA와의 성능 비교
Fig. 3. Performance comparison with Slotted ALOHA

능이 훨씬 더 좋다는 것을 관찰할 수 있다. 이는 전송 성공 확률이 상대적으로 높은 SSG에 속한 노드들의 성능이 시스템 전체 성능에 큰 영향을 미치기 때문이다. 이처럼 제안하는 방식이 S-ALOHA보다 성능이 대체적으로 향상되었지만 시스템 부하에 따라서 SSP와 LSP의 슬롯 개수의 최적화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 수중 채널에서 두 개의 다른 길이(SSP 및 LSP)를 갖는 랜덤 액세스 슬롯을 이용하여 랜덤 액세스 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 또한 제안하는 방식은 최적화된 guard time을 갖는 S-ALOHA의 성능보다 뛰어나다는 것을 확인하였다. 다만 시스템 부하에 따라서 SSP와 LSP 슬롯 수를 최적화하기 위한 적응적 알고리즘에 대한 연구가 추후에 필요하다. 또한, 본 방식은 SSP와 LSP의 두 구간만 고려하나, 이를 일반화한 최적의 시스템 구조에 대해서 살펴볼 필요가 있다.

References

- [1] P. Mandal and S. De, "New reservation multi access protocols for underwater wireless ad hoc sensor networks," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 277-291, May 2014.
- [2] J. Liu, Z. Zhou, Z. Peng, J.-H. Cui, M. Zuba, and L. Fiondella, "Mobi-sync: Efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks," *IEEE Trans. Paralle. Distrib. Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 406-416, Feb. 2012.