

CSMA/CA 기반 수중 통신망에서 간섭의 영향 연구

송민제*, 조호신*, 장윤선^o

Effect of Interference in CSMA/CA Based MAC Protocol for Underwater Network

Min-je Song*, Ho-shin Cho*, Youn-seon Jang^o

요약

무선 통신기술의 발전과 함께, 수중 통신 기술도 초기의 점대점 통신에서 벗어나 다수개의 노드를 연결하는 네트워크 구축으로 연구가 진행되고 있다. 수중의 통신환경은 전파지연, 도플러 효과, 다중경로, 그리고 전파손실의 측면에서 기존의 지상 무선 환경과 크게 차이가 있다. 따라서, 지상의 연구 결과가 수중에서 그대로 적용되기는 어려운 상황이다. 특히, 전파환경에 의존성이 큰 매체접속제어 프로토콜은 수중 통신망을 위해 새로 설계되어야 한다. CSMA/CA는 데이터 패킷의 충돌을 피하고 숨겨진 노드 문제를 해결할 수 있으므로 이를 기반으로 한 여러 수중 매체접속제어 프로토콜들이 제안되어 왔다. 하지만 현실적으로는 RTS/CTS가 도달하는 전송범위 밖에서 발생한 간섭에 의해 수신신호의 성능이 저하되어 RTS/CTS의 효율이 감소될 수 있다. 본 논문에서는 수중 환경에서 전파반경 밖의 간섭 신호의 영향으로 인해 발생하는 신호대잡음비(SNR) 감소를 분석하여 RTS/CTS의 효율 감소를 도출하고, 기존 매체접속제어 프로토콜에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 수중 환경에서의 전파 간섭 문제와 지상에서의 전파 간섭 문제를 비교 분석하여 지상과 차별화된 수중 통신환경에서 고려해야 할 사항들을 정리해 보았다.

Key Words : underwater communication, CSMA, interference

ABSTRACT

With the advance of wireless communication technology in terrestrial area, underwater communication is also evolving very fast from a simple point-to-point transmission to an elaborate networked communications. Underwater acoustic channel has quite different features comparing with the terrestrial radio channel in terms of propagation delay, Doppler shift, multipath, and path loss. Thus, existing technologies developed for terrestrial communication might not work properly in underwater channel. Especially medium access control (MAC) protocols which highly depend on propagation phenomenon should be newly designed for underwater network. CSMA/CA has drawn lots of attention as a candidate of underwater MAC protocol, since it is able to resolve a packet collision and the hidden node problem. However, a received signal could be degraded by the interferences from the nodes locating outside the receiver's propagation radius. In this paper, we study the effects of interference on the CSMA/CA based underwater network. We derived the SNR with the interference using the sonar equation and analyzed the degradation of the RTS/CTS effects. These results are compared with the terrestrial results to understand the differences. Finally we summarized the design considerations in CSMA/CA based underwater network.

※ 이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

• First Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, mjsong@cnu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, jangys@cnu.ac.kr, 종신회원

* School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, hscho@ee.knu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-06-196, Received June 22, 2015; Revised August 3, 2015; Accepted August 3, 2015

I. 서 론

최근 해양학적 정보수집 또는 군 전술상의 탐지 등을 목적으로 수중 네트워크에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수중의 통신환경은 기존의 지상 무선 환경과 크게 차이가 있는데, 지상에서 사용하는 RF 주파수들은 수중에서 전달 손실이 크기 때문에 사용할 수 없고 대신 음파를 이용하여 통신을 하게 된다^{1,2}.

음파의 전파속도는 1500m/s로 아주 느리게 전파되며 전달 손실도 지상파는 그 특성이 다르다. 이외에도 음파는 파도 및 해저지형에 의한 산란 및 반사가 존재하며 염도, 해류, 수온 및 수심의 변화에 따라 음파의 전달속도가 달라지므로 지상보다 더 열악한 통신 채널을 제공한다. 따라서, 기존의 지상에서 연구된 통신 프로토콜들을 그대로 수중 환경에 적용하는 것은 불가능하며 수중통신 환경에 맞는 프로토콜들이 따로 연구되어야한다.

수중 통신망을 위한 매체접속제어 프로토콜에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 지상의 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)기반의 프로토콜을 적용하는 논문들도 발표되었다^{3,4}.

CSMA/CA기반 프로토콜은 데이터의 충돌을 피하기 위해 RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send) 패킷을 교환하면서 채널을 미리 확보하게 된다. RTS와 CTS의 제어패킷을 성공적으로 교환한다면 송수신 노드는 주위 노드들의 방해 없이 데이터를 교환할 수 있다는 것이다. 하지만, 좀 더 현실적인 상황을 고려해 보면 RTS와 CTS의 제어 패킷이 도달하는 전송 범위 내에서는 데이터를 간섭할 노드들이 없겠지만 그림 1의 빗금 영역처럼 도달 범위 밖의 통신 노드들이 발생시키는 간섭 신호들은 피할 방법이 없다. 일부 이러한 간섭 신호들은 데이터의 신호대잡음비(SNR)를 떨어뜨려 수신기에서 데이터 검출을 어렵게 할 수 있다.

지상의 무선 통신 환경에서는 이러한 간섭신호들의 영향에 대해 정리가 되어 있으나⁵, 수중 환경에 대해서는 정리되어 있지 않으므로 본 논문에서는 수중 통신에서 이러한 간섭으로 인한 성능 저하를 분석해 보았다. 먼저, 수중 환경에서의 신호대잡음비(SNR) 식을 도출하고, 음파의 손실모델을 이용하여 간섭 신호가 미치는 영향을 정리하였다. 또한 이 결과는 지상의 전파 간섭 영향과 비교 분석하였다.

II. 수중환경에서 간섭의 영향 분석

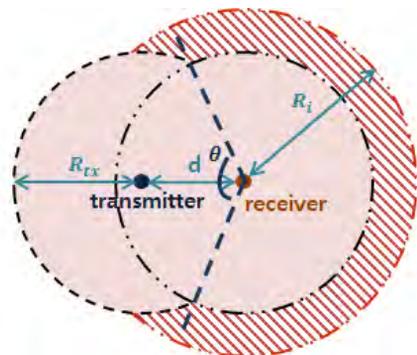
그림 1에서 d 는 송신기와 수신기 사이의 거리이며, R_{tx} 는 각 노드의 전파 반경을 나타낸다. R_i 는 수신기에 간섭의 영향을 미칠 수 있는 간섭반경이라 정의한다. 그림 1에서 간섭영역을 보면, 송신기와 수신기를 중심으로 R_{tx} 의 반지름을 갖는 원의 영역들은 RTS/CTS 제어패킷의 교환으로 간섭 노드가 존재할 수 없으므로 간섭반경, R_i 의 반지름을 갖는 원의 영역에서 이 부분을 제외하고 빗금 친 영역만이 실제의 간섭영역이 된다.

송신기에서 수신기로 데이터가 전송될 때, 빗금 친 영역 내의 간섭노드가 데이터 전송을 시도한다면 수신노드의 본래 수신 신호에 간섭노드가 보낸 신호가 중첩되어 간섭으로 인한 성능감소가 발생한다. 간섭노드에 의한 성능 감소를 분석하기 위해 음파의 전력손실을 정리하고 이를 바탕으로 간섭에 의한 신호대잡음비 저하에 대해 분석한다.

수중에서는 소나 방정식을 이용하여 거리와 전달손실의 상관관계에 따라 송신, 수신 전력을 알면 구하고자 하는 표적의 거리를 추정할 수 있다. 소나 방정식을 이용해 방사된 수중 신호의 전력을 정리하면 식(1)과 같다.

$$P = SL - TL + DI \text{ [dB]} \tag{1}$$

식(1)에서 SL(Source Level)은 방사신호 레벨 즉, 음파를 내보내는 송신기로부터 나오는 신호의 세기이며 TL(Transmission Loss)은 전달손실로 물속에서 확



--- Area covered by RTS/CTS
 Interference area not covered by RTS/CTS

그림 1. 전송 영역 및 간섭 영역
 Fig. 1. Transmission range and interference range

산과 감쇠에 의해 발생하는 에너지 손실을 말한다. DI(Directivity Index)는 방향성지수를 나타내는데 본 논문에서는 비방향성 안테나를 가정하기 때문에 지향성 지수 DI는 무시한다⁶⁾. 앞에서 언급한 소스 레벨(SL), 전달 손실(TL)에 관한 식을 나타내면 다음과 같다⁷⁾.

$$SL = 10 \log \frac{I_i}{1 \mu Pa} \quad [dB] \quad (2)$$

$$TL = 20 \log R + \alpha R \quad [dB] \quad (3)$$

식(2)의 I_i 는 밀도 레벨(Intensity level)이라한다. 밀도 레벨은 단위 면적당 전송되는 평균 에너지양을 의미한다. 밀도레벨의 단위는 μPa 로, $1 \mu Pa = 0.67 \times 10^{-18} W/m^2$ 이다.

식(3)의 TL에서 R은 음파 신호의 전송거리이며 α 는 흡음 계수이다⁸⁾.

$$\alpha = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f + 0.0033 \quad [dB/km] \quad (4)$$

흡음 계수는 수중환경의 변수(수온, 수압, 염도 등)에 영향을 받는 값으로써, 노드의 위치에 따른 에너지 흡수율을 의미한다⁷⁾. 식(4)에서 주파수, f는 흡음 계수에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 사용하는 음파의 주파수가 높을수록 수중에서 음파의 흡수가 증가한다.

식(3)으로부터 수중 환경에서의 전송거리에 따른 전달손실(path loss)은 그림 2에 보였으며, 지상 환경과의 전달손실을 비교하였다. 전송거리가 0m부터 1000m까지일 때, 수중 환경에서 전송 주파수가 9kHz인 음파의 전달 손실과 지상에서 전송 주파수가

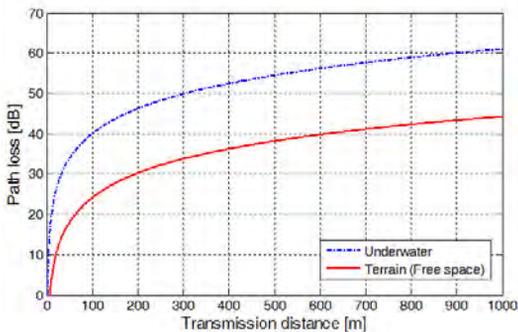


그림 2. 전송거리에 따른 전달손실
Fig. 2. Path loss vs. transmission distance

2.4MHz인 전파의 전달 손실을 비교한 시뮬레이션 결과이다⁹⁾.

그림 2와 같이 수중의 전달손실은 지상과 다르므로 간섭 신호에 대한 영향도 지상과는 다를 것이므로 수중에서 간섭으로 인한 SNR을 저하를 분석한다.

간섭 신호에 의한 수신 데이터 신호의 성능 감소를 다음과 같은 신호대잡음비(SNR) 식으로 나타낸다.

$$SNR = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\text{수신 전력}}{\text{간섭 전력}} \quad (5)$$

수신기에 수신된 신호 전력은 송신기와 수신기간의 거리, d에 의해 다음과 같다.

$$P_r = SL - TL(d) \quad [dB] \quad (6)$$

간섭노드로부터 발생한 간섭 신호의 전력은 간섭노드와 수신기사이의 거리, r에 의해 식(7)과 같다.

$$P_i = SL - TL(r) \quad [dB] \quad (7)$$

신호대잡음비식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SNR[dB] &= P_r - P_i \\ &= SL - TL(d) - (SL - TL(r)) \\ &= -TL(d) + TL(r) \\ &= -(20 \log d + \alpha d) + 20 \log r + \alpha r \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 데이터의 송수신을 위한 최소한의 신호대잡음비($SNR_{THRESHOLD}$)를 10이라 두면, 이를 만족하기 위한 송신노드와 수신노드간의 거리, d와 최대 간섭 거리 즉, 간섭 반경, R_i 와의 관계를 구하면 그림 3과 같다.

그림 3의 가로축은 송신노드와 수신노드 사이의 거

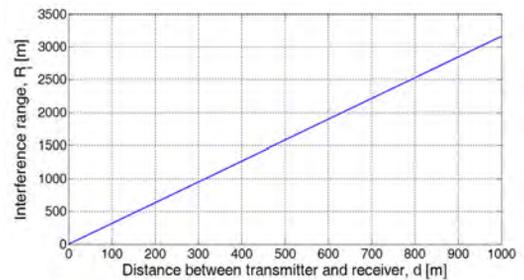


그림 3. 전송거리, d에 따른 간섭 반경, Ri
Fig. 3. Transmission distance, d vs. Interference range, Ri

리, d 이고 세로축은 간섭 반경, R_i 의 값이다. 그림 3에 나타난 결과를 선형 보간하여 송신노드와 수신노드 사이의 거리와 간섭 반경 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$R_i = 3.17d \tag{9}$$

이때, 흡음 계수, α 는 f 가 9kHz인 경우 9.8666×10^{-4} [dB/m]의 값을 갖는다.

식(9)로부터 송신노드와 수신노드의 거리, d 가 가까울 때는 R_i 의 간섭 반경이 그림 1의 수신노드 전파 반경 내에 존재하므로 간섭에 대한 문제가 발생하지 않는다. 하지만, d 가 멀어질수록 R_i 의 반경이 그림 1의 빗금친 부분으로 확대되면서 간섭의 영향으로 SNR이 감소되어 신호를 검출할 수 없게 된다.

지상의 경우는 SNR=10의 조건에서 아래와 같은 관계식이 얻어진다⁵⁾.

$$R_i = \sqrt[3]{10} \times d = 1.78 \times d \tag{10}$$

III. 간섭에 의한 RTS/CTS 효율 감소 분석

RTS/CTS만 교환하면 충돌을 피할 수 있고 전파 반경 내에서 데이터 전송에 문제가 없다고 생각했지만 간섭에 의해 신호의 SNR이 감소되면서 신호의 검출이 어렵게 될 수도 있다. 따라서, RTS/CTS 채널 예약의 의미를 잃을 수도 있다. 본 장에서는 수중 간섭의 환경에서 전파반경내의 RTS/CTS의 효율을 수식적 모델로 정리, 분석하였다.

RTS/CTS의 효율, $E_{RTS/CTS}$ 은 식(11)과 같이 간섭 반경, R_i 내의 원의 면적(A_i)에 대해 송신노드와 수신노드가 RTS/CTS 핸드셰이킹으로 간섭을 막을 수 있는 면적, $A_{iRTS/CTS}$ 의 비를 나타낸다.

RTS/CTS 핸드셰이킹으로 간섭면적, A_i 를 모두 막으면 간섭이 발생하지 않는 경우이므로 RTS/CTS는 1의 효율을 갖는 것이다.

$$E_{RTS/CTS} = \frac{A_{iRTS/CTS}}{A_i} \tag{11}$$

먼저, A_i 의 면적과 $A_{iRTS/CTS}$ 를 구한 후 $E_{RTS/CTS}$ 를 구한다.

$$A_i = \pi R_i^2 \tag{12}$$

$$A_{iRTS/CTS} = \pi R_i^2 - \frac{2\pi - \theta}{2\pi} (\pi R_i^2 - \pi R_{tx}^2) \tag{13}$$

$A_{iRTS/CTS}$ 는 A_i 에서 그림 1의 빗금 친 실제 간섭 면적을 빼면 RTS/CTS 핸드셰이킹으로 간섭을 막을 수 있는 면적이 된다. 실제 간섭면적은 A_i 에서 수신노드의 전송영역을 뺀 도넛 모양의 영역에서 송신노드의 전송영역이 차지하는 비율만큼을 빼면 된다. 여기서 θ 는 그림 1로부터 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(\frac{d/2}{R_{tx}}\right) \tag{14}$$

식(12)와 식(13)에 식(9)를 대입하면 d 의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$A_i = \pi(3.17d)^2 \tag{15}$$

$$A_{iRTS/CTS} = \pi(3.17d)^2 - \frac{2\pi - 2\cos^{-1}\left(\frac{d/2}{R_{tx}}\right)}{2\pi} (\pi(3.17d)^2 - \pi R_{tx}^2) \tag{16}$$

Case1) $0 \leq d \leq 0.315R_{tx}$
 $E_{RTS/CTS} = 1$

Case2) $0.315R_{tx} < d \leq R_{tx}$
 $E_{RTS/CTS} = 1 - \frac{(\pi - \cos^{-1}\left(\frac{d/2}{R_{tx}}\right))((3.17d)^2 - R_{tx}^2)}{\pi(3.17d)^2} \tag{17}$

그림 4는 수중 환경에서의 RTS/CTS의 효율과 지상에서의 RTS/CTS의 효율을 비교하였다. 지상에서는 송신노드와 수신노드의 거리, d 가 $0.56R_{tx}$ 를 초과하면 RTS/CTS 핸드셰이킹 효과는 감소되는 반면, 수중 환경에서는 d 가 $0.315R_{tx}$ 를 초과하면 RTS/CTS 핸드셰이킹 효과는 감소한다. 수중 환경에서의 RTS/CTS 효율은 지상에서의 RTS/CTS 효율에 비해 상당히 낮은 효율을 보인다. 즉, 수중 환경에서의 간섭영향이 지상에서의 간섭영향보다 크다는 것을 보여준다.

지상의 전송 손실과 수중에서의 전송 손실을 비교해 봄으로써 수중통신의 효율을 높이기 위해서는 수

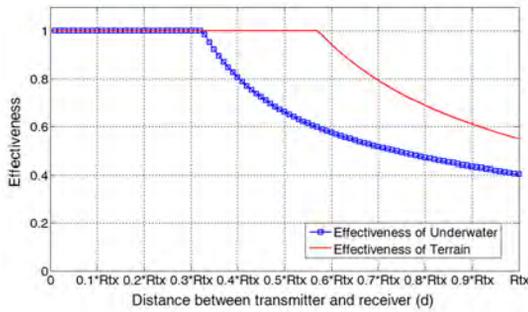


그림 4. RTS/CTS 효율, $E_{RTS/CTS}$
 Fig. 4. Effectiveness of RTS/CTS

중통신망에서는 지상망과는 다른 수중환경에 최적화된 통신시스템 구축이 필요하다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

수중 환경에서의 무선 센서 네트워크는 성능에 영향을 미치는 변수가 많아 통신이 어려운데 비해 필요한 연구들이 부족한 실정이다. 해양학적 정보수집, 오염 정도 측정, 재해방지, 전술상의 탐지 등 해양 개발 및 탐사의 목적으로 수중 네트워크에 대한 관심이 증가하고는 있지만 수중 환경에 적합한 통신 프로토콜의 연구는 지상에서의 프로토콜 연구보다 많이 부족하다.

본 논문에서는 수중 통신망에서 전파의 간섭에 대해 정의하고 그 영향을 분석하였다. 간섭의 영향을 수중 환경에 적합한 수식으로 정리하였고, 간섭으로 인한 신호대잡음비를 정리하였다.

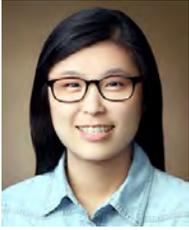
수중 환경에서는 간섭의 영향이 더 컸으며 이로 인해 CSMA/CA기반의 매체접속제어 프로토콜의 경우, 데이터 충돌을 피하기 위한 RTS/CTS 핸드셰이킹의 효과가 송신기와 수신기 사이의 거리가 증가할수록 크게 감소함을 보였다.

수중 통신망 구축을 위해서는 음파의 긴 전파지연, 제한적인 전력 등 고려해야 할 사항이 많다. 신뢰성 있는 데이터 전송을 위한 RTS/CTS기반 매체접속제어 프로토콜의 적용에 있어서 간섭도 중요한 고려사항의 하나이며 본 논문의 결과를 바탕으로 추후 이에 대한 최적화 연구를 계속 진행할 계획이다.

References

- [1] I. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges," *J. Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, Mar. 2005.
- [2] H.-M. Park and S.-H. Park, "Underwater sensor network technology for tactical defense," *Inf. and Commun. Mag.*, vol. 24, no. 10, pp. 34-43, Oct. 2007.
- [3] R. K. Creber, et. al., "Performance of undersea acoustic networking using RTS/CTS handshaking and ARQ retransmission," in *Proc. OCEANS 2001*, vol. 4, pp. 2083-2086, Nov. 2001.
- [4] H. H. Ng, W. S. Soh, and M. Motani, "MACA-U: a media access protocol for underwater acoustic networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-5, New Orleans, USA, Nov. 2008.
- [5] K. Xu, "How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in Ad Hoc networks?," in *Proc. IEEE GLOBECOM'02* vol. 1, pp. 72-76, Taipei, Taiwan, Nov. 2002.
- [6] J. W. Lee and H.-S. Cho. "A cooperative ARQ scheme for single-hop and multi-hop underwater acoustic sensor networks," *J. KICS*, vol. 36 no. 5, pp. 539-548, May 2011.
- [7] E. Kim and D. Kim, "Energy efficient routing protocol of underwater sensor networks in the deep ocean," in *Proc. Korean Inst. of Inf. Sci. and Eng.*, vol. 34, no. 2(D), pp. 294-299, Oct. 2007.
- [8] H.-W. Jeon and S.-J. Lee, "Underwater channel analysis and transmission method research via coded OFDM," *J. KICS*, vol. 36, no. 5, pp. 573-581, May 2011.
- [9] A. Vinaye, M. Ramraj, and A. Sheeba, "Path loss analysis for 3G mobile networks for urban and rural regions of mauritius," in *Proc. 6th Int. Conf. Wireless Commun. Sys. (ICWMC)*, pp. 164-169, Valencia, Sept. 2010.

송민제 (Min-je Song)



2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 공학사
2014년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 무선센서네트워크, 수중통신

장윤선 (Youn-seon Jang)



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학사
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1999년 3월~2006년 2월: 한국 전자통신연구원 선임연구원
2006년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 부교수
<관심분야> 광통신 전송시스템, 무선인지 기술, 수중통신망

조호신 (Ho-shin Cho)



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1999년 3월~2001년 2월: 한국 항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부 전임강사
2003년 3월~현재: 경북대학교 IT대학 교수
2010년 1월~2011년 1월: 미국 키네티컷 대학 방문 교수
<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽 제어, 수중음향센서네트워크