

논문 2011-48TC-1-7

Underwater Acoustic Networks에서 협력적 다중홉 통신의 성능 향상을 위한 파운틴 code의 적용

(Application of Fountain code for Improved Performance of Cooperative
Multihop Communication over Underwater Acoustic Networks)

최민철*, 김창중**, 이호경***

(Min Cheol Choi, Chang-Joong Kim, and Ho-Kyoung Lee)

요약

협력적 다중 홉 통신은 열악한 무선 통신 환경인 수중 음향 네트워크 환경에서 보다 더 효율적인 통신을 제공한다. 그러나 이러한 협력적 다중 홉 통신은 초기 시간 구간에서 협력 노드 개수 부족으로 인하여 초기 노드에서 오류가 난 신호를 받을 확률이 높고, 오류 신호가 계속적으로 전송되므로 오류 확률증가가 예상된다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 초기 시간 구간에서 파운틴 코드를 적용하여 성능을 개선시킬 수 있음을 모의실험을 통해 보인다. 또한 주파수와 거리에 따른 성능을 송신전력의 관점에서 보고 모의실험을 통해 성능을 보인다.

Abstract

Cooperative multihop communications support effective transmissions over underwater acoustic channels as inferior wireless channels. But the performance of cooperative multihop systems may degrade due to the lack of cooperative nodes at the initial operation time duration. At the initial time duration, the lack of cooperative nodes causes more errors, and the multihop network propagates these errors. In this paper, we apply fountain code to the cooperative multihop system at the initial time duration, and show performance improvements by simulations.

Keywords: 수중 음향 통신, 협력적 다중 홉 통신, 파운틴 코드

I. 서론

파운틴 코드는 Erasure 채널로 표현되는 네트워크

상에서 브로드캐스팅 및 멀티캐스팅에 적합하도록 개발된 채널 부호화 기술로서, 정해진 부호율 없이 정보비트를 많은 양으로 부호화하여 전송하는 특징을 가지고, 부호화한 데이터의 양이 정해지지 않기 때문에 이를 Rateless code라고도 부른다^[1]. 이러한 파운틴 코드는 많은 양으로 부호화된 정보패킷을 보낸 후, 피드백 없이 복호가 가능할 정도의 패킷을 수신하여 복호화 함으로써 에러 없이 완벽한 수신을 가능하게 한다는 장점을 가지며^[1-2], 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 수중 채널은 기존의 무선통신 채널에 비해 심각한 페이딩 현상을 겪게 된다. 물리적 특성으로써 경로 손실 지수(Path loss exponent)가 1.5정도로 그리 열악한 편은 아니지만, 캐리어 주파수가 커질수록 심각한 페이딩 현상을 겪게 되므로, 기존의 무선 통신채널에서

* 학생회원, 홍익대학교 전자정보통신공학과
(Information and comm. Engineering, Hong-Ik University)

** 정회원, 홍익대학교 전파통신공학과
(Department of Radio Sciences And communication engineering, Hong-Ik University)

*** 평생회원, 홍익대학교 전자전기공학부
(Electronic and Electrical Engineering, Hong-Ik University)

※ 본 연구는 한국교육과학기술부와 한국연구재단이 출연한 해외연구유치사업 연구비로 연구한 내용입니다. (과제번호: K20901000004-09-E0100-00410)

접수일자:

사용되는 캐리어 주파수 보다는 훨씬 낮은 대역인 음향파, 초음파를 이용해야 한다^[3]. 이러한 이유로 열악한 수중 채널에서 보다 나은 통신환경을 제공하기 위한 방법으로 수중에서의 센서나 차량들을 통한 협력 다중노드(Multi-node cooperation)를 기본으로 하는 협력적 다중홉 통신(Multi-hop cooperative communication)이 제안되었다^[4-5].

이러한 통신은 다중홉과 협력 통신을 통해 이득을 얻을 수 있지만, 초기 전송 구간에서는 협력하는 노드의 개수가 부족하여 전송 다이버시티에 의한 협력 이득을 얻기 힘들고, 초기 오류가 난 노드는 계속적으로 오류가 난 신호를 보내게 되는 error propagation 현상이 생기게 되므로, 이에 따른 성능감소가 있다. 그러므로 본 논문에서는 협력적 다중홉 통신의 초기 전송 구간에서 파운틴 코드를 적용하여, 협력 통신의 이득 감소에 따른 error propagation 현상을 막고, 이를 통해 성능을 개선시킬 수 있음을 모의실험을 통해 보인다. 또한 이러한 수중통신 시스템은 채널감쇠지수가 주파수와 거리에 지수적으로 감소하기 때문에 주파수와 거리에 따른 성능을 수신신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)로 비교한다면 혼동이 올 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주파수와 거리에 따른 성능을 송신전력의 관점에서 바라보고 이에 따른 성능지표를 모의실험을 통해 제시한다.

II. 채널 및 신호 모델

본 장에서는 다중홉 시스템 상에서 정보 비트를 보내기 위해 다중 노드가 협력하고, 초기 전송 구간에는 파운틴 코드를 적용하여 error-free한 상태로 전송되는 경우를 고려한다. 또한 노드의 기하학적 구조에 따라서 서로 다른 성능을 갖게 될 것이고, 본 논문에서는 선형 토폴로지와 격자형 토폴로지를 다룬다. K 는 협력하는 노드들의 개수이고, I 는 전송노드와 수신 노드를 포함한 전체 노드의 개수이다. 그렇다면 임의의 노드 i 에 대해 $(i-1)$ 번째 시간 구간 바로 전까지 각각의 노드 $\{1, 2, \dots, i-1\}$ 는 이미 전송된 정보 비트를 받았다고 가정하고, 초기 K 개의 노드는 파운틴 코드를 통해 오류없이 신호를 복호했으므로 정보 비트를 $\{\hat{b}_1 = b, \dots, \hat{b}_K = b, \hat{b}_{K+1}, \dots, \hat{b}_{i-1}\}$ 를 복호했다고 가정한다. 여기서 b 는 전송하고자 하는 비트이다. 그렇다면 $i-1$ 번째 시간 구간 동안에는, 근접하는 $K(K \leq I)$ 개의 노드

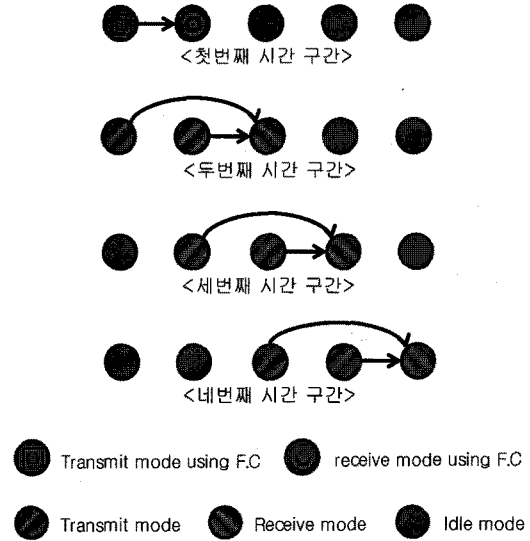


그림 1. $I=5, K=2$ 의 예
Fig. 1. Example of $I=5, K=2$.

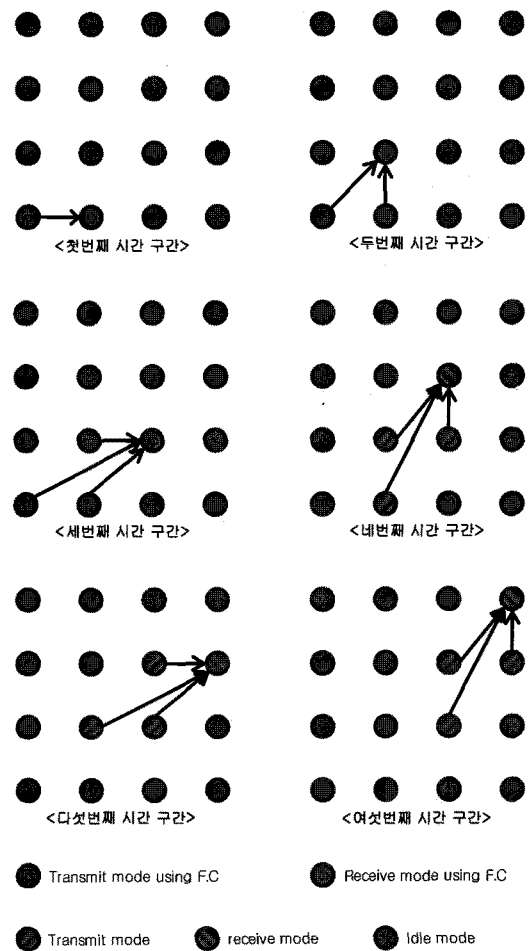


그림 2. $I=7, K=3$ 의 예
Fig. 2. Example of $I=7, K=3$.

에서만 i 번째 노드로 전송한다고 가정한다. 그림 1은 전체 노드의 개수가 5개, 협력하는 노드의 개수가 2개

일 경우를 나타낸 그림이고, 그림 2는 전체 노드의 개수가 7개, 협력하는 노드의 개수가 3개일 경우를 나타낸 그림이다.

한편 i 번째 노드($i \geq K$)에서 받는 기저대역 신호는 다음과 같이 표현 할 수 있다^[3].

$$r_i(t) = \sum_{k=i-K}^{i-1} A_{k,i} \sqrt{P_{k \rightarrow i}} \hat{b}_k c_k(t - t_{k,i}) + n(t) \quad (1)$$

$$(t \in [(i-1)T_s, iT_s])$$

$n(t)$ 는 평균이 0, 분산이 1인 백색 가우시안 프로세스이며, 노드 k 와 노드 i 사이의 채널 감쇠(Channel Attenuation)를 의미하는 $A_{k,i}$ 는 변수 $\gamma_{A_{k,i}}^2 = C d_{k,i}^{-\alpha} a(f_c)^{d_{k,i}}$ 를 갖는 레일라이 확률변수이고, f_c 는 캐리어 주파수, $\alpha = 1.5$ 는 경로 손실 지수(Path loss exponent)이다. $a(f_c)$ 는 dB/km로 주어진다. $\{A_i\}_{i=1}^K$ 는 각각 서로 독립적이며, $d_{k,i}$ 는 k 노드와 i 노드 사이의 거리를 의미하고, C 는 상수이다. 또한 k 노드에서 i 노드로 전송하는 전력은 $P_{k \rightarrow i}$ 로 표현하고, c_k 는 확산 시퀀스이다. 또한 완벽한 채널 추정이 이루어졌다고 가정하고, 딜레이에 관한 정보도 알고 있다 가정한다. 또한 maximum ratio combining(MRC)가 수신단에서 이뤄졌다고 가정한다.

III. 다중 홉 이득

한편, 수중통신에서의 수신신호 대 잡음비는 다음과 같이 정의할 수 있다^[5].

$$SNR_T \equiv \frac{2P_T \gamma_{A_0}^2}{\sigma_n^2} = 2P_T C d_0^{-\alpha} a(f_c)^{-d_0} \quad (2)$$

이는 송신부와 수신부의 직접전송시에 해당하는 수신신호대 잡음비이며, 이를 통해 다중홉을 이용하여 전송할 경우 i 번째 노드($i \geq K$)에서 수신신호 대 잡음비는 다음과 같이 표현한다.

$$SNR_i = 2(P_T/n) \gamma_{i-1 \rightarrow i}^2 = 2(P_T/n) C d_{i-1 \rightarrow i}^{-\alpha} a(f_c)^{-d_{i-1 \rightarrow i}} \quad (3)$$

n 은 홉 수이며 전력 제한을 위해 $\sum_{i=1}^n P_{i-1 \rightarrow i} = P_T$ 의 조건을 만족 한다. 식 (2), (3)을 통해 직접 송신시, 다중홉을 이용한 송신시 각각의 경우에 해당하는 이론적 비

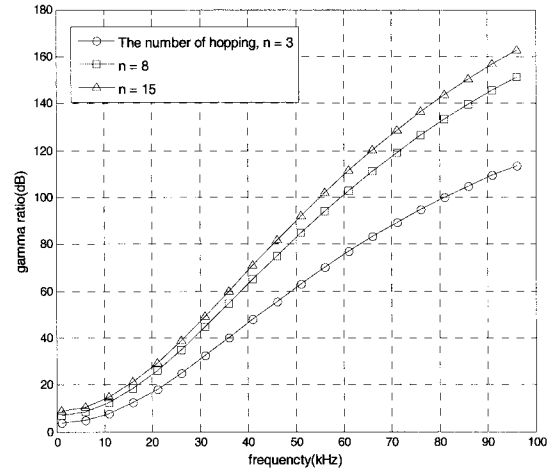


그림 3. 주파수 대 채널 감쇠 지수 ($d = 10\text{km}$)
Fig. 3. Frequency vs. channel attenuation factor. ($d = 10\text{km}$)

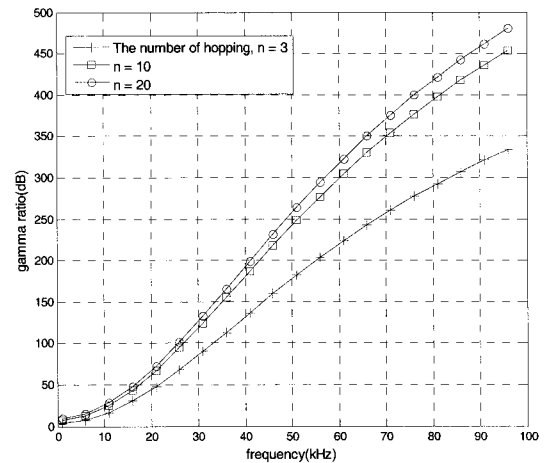


그림 4. 주파수 대 채널 감쇠 지수 ($d = 30\text{km}$)
Fig. 4. Frequency vs. channel attenuation factor. ($d = 30\text{km}$)

트오류확률(Bit Error Rate, BER)를 얻을 수 있으며 이 두 확률의 비를 다중홉 이득(Multi Hopping Gain, MHG)이라 한다^[4-5]. 이러한 다중홉 이득은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$MHG = C' \frac{\gamma_{i-1 \rightarrow i}^2}{\gamma_{A_0}^2} \quad (4)$$

즉, 두 채널감쇠지수의 비에 비례하는데, 그림 3, 그림 4는 주파수에 따른 두 채널감쇠지수의 비를 나타낸 그래프이다. 주파수, 거리에 따라 채널감쇠지수의 비가 증가하므로, 다중 홉 이득 또한 증가한다고 볼 수 있다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 파운틴 코드를 적용한 협력적 다중 홉 통신 시스템의 모의실험 결과를 다룬다. 선형 노드 구조와 격자형 노드 구조에서 각각 모의실험 하였으며, 수신단에서는 이상적인 등화기를 통해 심볼간 간섭에 의한 효과는 존재하지 않는다고 가정하고, 다중사용자에 의한 다중 사용자 간섭(Multiuser Interference) 또한 고려하지 않는다. 또한 경로 손실 지수는 1.5이고 캐리어 주파수는 1.5kHz이다. 그림 5는 총 노드의 개수 $I=13$ 인 선형 노드 구조에서의 모의실험 결과이다. 협력하는 노드의 개수가 2, 3, 4개이며 초기 전송 구간, 즉 협력 노드 개수가 2개일 경우에는 첫 번째 시간 구간, 협력 노드 개수가 3개일 경우에는 두 번째 시간 구간, 협력 노드 개수가 4개일 경우에는 세 번째 시간 구간까지 파운틴 코드를 적용한 경우를 모의실험한 결과이다. 그림 6은 총 노드의 개수 $I=13$ 인 격자형 노드 구조에서의 모의실험 결과이다. 협력하는 노드의 개수가 2, 3, 4개이며, 그림 5와 마찬가지로 파운틴 코드를 적용하였을 경우를 모의실험한 결과이다. 그림 5, 그림 6에서처럼 충분한 오류확률 개선의 효과가 있음을 볼 수 있고, 이는 초기에 모든 협력 노드가 오류 없이 협력통신을 하는 것에 따른 이득이라 할 수 있다.

한편 협력적 다중 홉 시스템의 성능은 다중 홉 이득에 비례하게 되므로 두 채널감쇠지수의 비에 또한 비례한다. 그러므로 다중 홉 시스템은 식 (2)에서 정의한 SNR_T 의 관점으로 본다면, 주파수와 거리가 커짐에 따

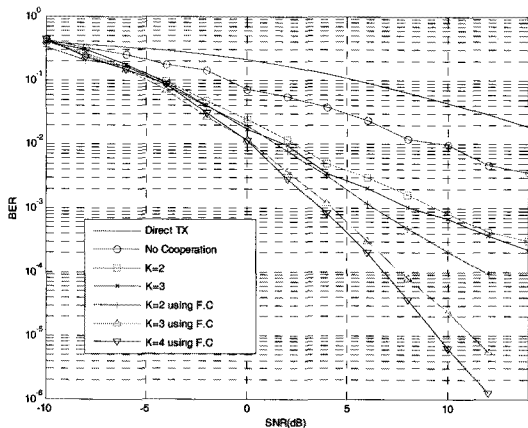


그림 5. 선형 토폴로지에서 모의실험 결과 ($I=13$, 경로 손실 지수 = 1.5, 캐리어 주파수 = 1.5kHz)
 Fig. 5. Simulation over linear topology ($I=13$, attenuation factor = 1.5, carrier frequency = 1.5kHz).

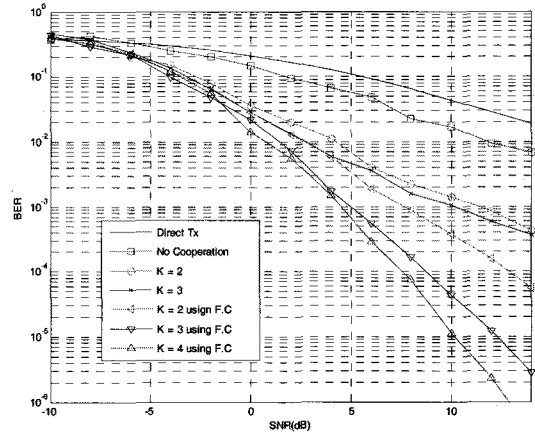


그림 6. 격자형 토폴로지에서 모의실험 결과 ($I=13$, 경로 손실 지수 = 1.5, 캐리어 주파수 = 1.5kHz)
 Fig. 6. Simulation over lattice topology ($I=13$, attenuation factor = 1.5, carrier frequency = 1.5kHz).

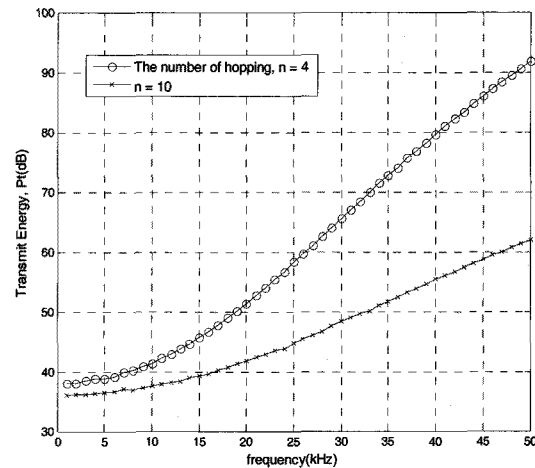


그림 7. 비트오류확률 10^{-3} 을 달성하기 위한 주파수에 따른 송신전력 모의실험 결과
 Fig. 7. Transmit energy vs. frequency to achieve the target BER of 10^{-3} .

라 오류확률이 감소하게 되므로, 각각의 캐리어 주파수에서 SNR_T 에 따른 비트오류확률은 혼동이 될 수 있다. 그러므로 본 장에서는 주파수에 따른 성능의 변화를 보기 위해 추가적인 모의실험을 하였다. 그림 7은 주어진 비트오류확률에서 주파수에 따른 송신전력의 양을 나타낸 그림이다. 그림 7에서처럼 주어진 비트 오류확률을 달성하기 위해 송신전력이 주파수와 거리에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 협력적 다중 홉 통신에서 성능 향상을

위해 초기 전송 구간에 파운틴 코드를 적용하였다. 협력적 다중 홉 통신은 초기 전송 구간에서 협력하는 노드의 개수가 부족하여 전송 다이버시티에 의한 협력이득을 얻기 어렵고, 오류 노드의 비트가 계속적으로 전송되어 성능이 감소된다. 따라서 협력 노드의 개수가 부족한 초기 전송 구간에 파운틴 코드를 적용하여 전송 다이버시티에 의한 협력이득 효과를 증가시킴으로써, 이에 따른 충분한 성능향상의 효과를 볼 수 있다. 또한 주파수에 따른 성능을 비교할 경우, SNR_T 에 대한 비트 오류확률로 보는 것은 혼동이 올 수 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 새로운 성능지표로서 주파수와 거리에 따른 송신전력의 양을 비교하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. C. MacKay "Fountain codes", *IEEE Proc.-Comm.*, vol. 152, no. 6, December 2005.
- [2] J. Byers, M. Luby, M. Mitzenmacher and A. Rege, "A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data," *proceedings of ACM SIGCOMM '98*, 1998.
- [3] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel", *Mobile Computing and Communications Review*, vol. 11, no. 4, Oct. 2007.
- [4] S.-J. Chen, C. Carbonelli, U. Mitra, B. Krishnamachari, "Cooperative communication and routing over fading channels in wireless sensor networks", *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005 International Conference on*, vol. 2, pp. 1477-1482, June, 2005.
- [5] Cecilia Carbonelli, Urbashi Mitra, "Cooperative multihop communication for underwater acoustic networks", *Proc. of the 1st ACM international workshop*, LA, USA, September 2006.

저 자 소 개



최민철(학생회원)
 2009년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2011년 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사 졸업 예정.
 <주관심분야 : 통신, 수중 음향 통신, 신호처리>



이호경(정회원)
 1981년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1987년 Northrop University 전자공학과 석사 졸업.
 1994년 University of Southern California 전자공학과 박사 졸업.

1994년~홍익대학교 전자전기공학부 교수.
 <주관심분야 : 채널코딩, TCM, Turbo TCM, 이동통신, 위성통신>



김창중(정회원)
 2000년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2002년 홍익대학교 전파통신공학과 석사 졸업.
 2011년 홍익대학교 전파통신공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 통신, TCM, 시공간 부호>