

양방향 선박-대-선박 릴레이 통신 시스템을 위한 네트워크 부호화와 릴레이 선택

도 푸 틴*, 정 현 우*, 정 민 아**, 김 윤 희^o

Network Coding and Relay Selection for a Bidirectional Ship-to-Ship Relay Communication System

Thin Phu Do*, Hyun Woo Jeong*, Min-A Jung**, Yun Hee Kim^o

요 약

본 레터는 두 통신 선박이 다수의 릴레이 선박의 협력으로 데이터를 교환하는 해상 통신 시스템을 고려한다. 이 때 릴레이 선박들이 채널 상태 정보에 따라 아날로그 네트워크 부호화와 디지털 네트워크 부호화를 적응적으로 선택하는 방법을 제안하고, 이러한 적응 전송 시 최적의 릴레이 선박을 선택하는 기준을 함께 제공한다. 모의 실험 결과 제안한 방법이 단일 네트워크 부호화를 적용하는 기존의 방식보다 향상된 성능을 제공함을 볼 수 있다.

Key Words : Analog network coding, Digital network coding, Relay selection

ABSTRACT

This letter considers a ship-to-ship communication system in which two ships exchange their information with the help of multiple relay ships. For the system, we propose a novel relay scheme that allows relay ships to select a method between analog network coding (ANC) and digital network coding (DNC) adaptively based on channel state information. We also provide a relay selection criterion in supporting the proposed adaptive network coding. The simulation results show that the proposed scheme outperforms the conventional scheme employing only the ANC or only the DNC.

I. 서 론

선박-대-선박 해상 통신 환경에서 선박 사이의 거리가 먼 경우 주변에 운행 중인 선박들의 협력을 통해 통신 품질을 향상시킬 수 있다^{1,2}. 특히 네트워크 부호화를 응용한 두 단계 양방향 릴레이 프로토콜을 적

용하면 기존의 단방향 릴레이보다 향상된 주파수 효율을 향상시킬 수 있다².

두 단계 양방향 릴레이 기법은 릴레이에서 신호를 복호하지 않고 증폭하여 전송하는 증폭-후-전달 기반의 아날로그 네트워크 부호화 방식과^{2,3}, 릴레이에서 두 통신 노드가 전송한 정보를 복호하여 전송하는 복

※ 본 연구는 본 연구는 2012년도 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원 (2012R1A1A2040091) 및 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2009-0093828)과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 융합고급인력 과정지원사업(IITP-2015-H8601-15-1006)의 연구결과로 수행되었음

• First Author : Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, dopthinh@gmail.com, 학생회원

o Corresponding Author: Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, yheekim@khu.ac.kr, 중신회원

* Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, jhw5529@khu.ac.kr, 학생회원

** Department of Computer Engineering, Mokpo National University, majung@mokpo.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2015-04-097, Received April 2, 2015; Revised July 9, 2015; Accepted July 9, 2015

호-후-전달 기반의 디지털 네트워크 부호화가 있다^{3,4)}. 아날로그 네트워크 부호화는 릴레이 복잡도를 줄이는 한편 디지털 네트워크 부호화는 릴레이 복잡도는 매우 크지만 신호대잡음비가 크면 최적의 성능을 제공한다. 두 기법의 성능 비교 결과를 보면 시스템 환경에 따라 성능이 더 좋은 기법이 달라지는 것을 볼 수 있다³⁾.

본 레터에서는 채널 상태 정보에 따라 릴레이가 아날로그 또는 디지털 네트워크 부호화 방식을 적응적으로 선택하는 방법을 제안하고, 시스템 오류 확률을 최소화할 수 있도록 두 네트워크 부호화 기법을 선택하는 기준과 최선의 릴레이를 선택하는 기준을 제시한다.

II. 시스템 모형

그림 1과 같이 두 통신 선박 S_1 과 S_2 , N 릴레이 선박 $\{Q_n, n=1,2,\dots,N\}$ 으로 구성된 양방향 릴레이 해상 통신 시스템을 고려한다. 각 선박의 통신 기기는 안테나가 하나이고 반 이중 모드로 동작한다. 이 때 모든 선박간 채널은 가역적이고 주파수 플랫 페이딩 특성을 지닌다고 가정한다. 따라서, 선박 S_i 와 선박 Q_n 사이의 채널 응답은 $h_{in} \sim CN(0, \Omega_{in})$, $i=1,2$, $n=1,2,\dots,N$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서, $CN(\mu, \Sigma)$ 은 평균이 μ 이고 분산이 Σ 인 복소 정규 분포를 가리킨다. 두 통신 선박 S_1 과 S_2 는 정보 전송률이 R 인 정규 코드북으로 정보를 교환한다.

제안하는 양방향 릴레이 프로토콜은 다음과 같다. 첫 단계에서는 통신 선박 S_1 이 정보 신호 x_1 을, 통신

선박 S_2 가 정보 신호 x_2 를 동시에 전송한다. 이에 대한 릴레이 Q_n 에서의 수신 신호는

$$y_{Q_n} = \sqrt{P_S}h_{1n}x_1 + \sqrt{P_S}h_{2n}x_2 + w_{Q_n} \quad (1)$$

이고, 여기서 P_S 는 통신 선박의 송신 전력, $w_A \sim CN(0, \sigma^2)$ 는 선박 A 에서의 배경 잡음이다.

두 번째 단계에서는 선택된 릴레이 Q_{n_0} 이 릴레이 신호 x_Q 를 전송한다. 이 때 릴레이가 아날로그 네트워크 부호화를 선택하면

$$x_Q = \sqrt{\frac{1}{P_S|h_{1n_0}|^2 + P_S|h_{2n_0}|^2 + \sigma^2}} y_{Q_{n_0}} \quad (2)$$

이고, 디지털 네트워크 부호화를 선택하면

$$x_Q = (x_{1n_0} \oplus x_{2n_0}) \quad (3)$$

이다. 여기서, \oplus 는 배타합, \hat{x} 는 x 의 추정값이다. 두 송신 신호 가운데 어떤 신호를 보낼지 선택하는 방법은 다음 절에서 기술하기로 한다.

두 번째 단계에서 각 통신 선박 S_i , $i=1,2$ 가 수신한 릴레이 신호는 다음과 같다.

$$y_{S_i} = \sqrt{P_Q}h_{in_0}x_Q + n_{S_i} \quad (4)$$

여기서 P_Q 는 릴레이 송신 전력을 나타낸다. 릴레이 송신 신호가 (2)이면, 통신 선박은 (4)에서 자가 간섭을 소거한 뒤 상대방 송신 신호를 검출하고, 릴레이 송신 신호가 (3)이면 각 통신 선박은 (4)로부터 x_Q 의 추정값 \hat{x}_Q 을 검출한 뒤 $\hat{x}_Q \oplus x_i$ 로써 상대방 송신 신호를 검출한다.

III. 릴레이 전송 모드 및 릴레이 선택

본 절에서는 시스템 오류 확률을 줄이기 위해 채널 상태정보에 따라 아날로그 네트워크 부호화와 디지털 네트워크 부호화 가운데 성능이 좋은 네트워크 부호화 기법을 선택하는 전송하는 기준과 그에 따라 최선의 릴레이를 선택하는 기준을 제공한다.

시스템 오류 확률은 두 통신 선박 S_1 과 S_2 이 목표 전송률 R 을 지원하지 못 할 확률이다. 두 통신 선

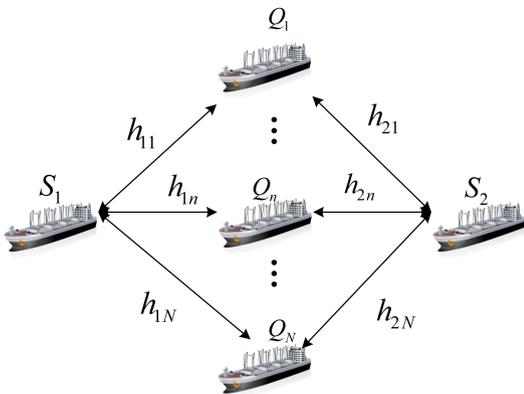


그림 1. 양방향 다중 릴레이 해상 통신 시스템.
Fig. 1. Bi-directional multi-relay marine communication system.

박 S_1 과 S_2 가 지원 가능한 최대 전송률을 R_1 과 R_2 이라 하면 시스템 오류 확률은 다음과 같다.

$$P_{out} = \Pr\{R_1 \leq R, R_2 \leq R\} \quad (5)$$

만약 릴레이 Q_n 이 아날로그 네트워크 부호화로 양방향 통신을 지원할 경우 두 통신 선박 S_1 과 S_2 가 최대로 지원 가능한 전송률은¹¹

$$R_i = \frac{1}{2} C\left(\frac{\mu\gamma_{1n}\gamma_{2n}}{\gamma_{1n} + \gamma_{2n} + \mu\gamma_{in} + 1}\right), i=1,2 \quad (6)$$

으로 여기서 $C(x) = \log_2(1+x)$ 는 채널 용량 식, $\gamma_{in} = P_S|h_{in}|^2/\sigma^2$ 는 통신 선박 S_i 와 릴레이 Q_n 사이의 링크 신호대잡음비, $\mu = P_Q/P_S$ 는 통신 선박과 릴레이 선박의 전력비이다. 이 경우 식 (5)는 $P_{out}^A = \Pr\{A_n^A \leq 1\}$ 으로 쓸 수 있고, 여기서

$$A_n^A = \frac{1}{(2^{2R} - 1)} \frac{\mu\gamma_{1n}\gamma_{2n}}{(\gamma_{1n} + \gamma_{2n} + \mu\gamma_{\max,n} + 1)} \quad (7)$$

는 아날로그 네트워크 부호화 적용 시의 등가 신호대잡음비이고, $\gamma_{\max,n} = \max(\gamma_{1n}, \gamma_{2n})$ 이다.

한편, 릴레이 Q_n 이 디지털 네트워크 부호화를 지원할 경우 두 통신 선박 S_1 과 S_2 의 전송 가능한 최대 전송률 R_1 과 R_2 는 다음을 만족해야 한다¹⁴.

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} C(\min(\gamma_{1n}, \mu\gamma_{2n})), \quad R_2 = \frac{1}{2} C(\min(\gamma_{2n}, \mu\gamma_{1n})) \\ R_1 + R_2 &= \frac{1}{2} C(\gamma_{1n} + \gamma_{2n}) \end{aligned} \quad (8)$$

이 경우 식 (5)는 $P_{out}^D = \Pr\{A_n^D \leq 1\}$ 로 주어지며,

$$A_n^D = \frac{1}{(2^{2R} - 1)} \min\left\{\min(1, \mu)\gamma_{\min,n}, \frac{\gamma_{1n} + \gamma_{2n}}{2^{2R} + 1}\right\} \quad (9)$$

는 디지털 네트워크 부호화 적용 시의 등가 신호대잡음비이며, $\gamma_{\min,n} = \min(\gamma_{1n}, \gamma_{2n})$ 이다.

본 레터에서는 시스템 오류 확률 (5)를 최소화하도록 채널상태정보에 따라 두 네트워크 부호화에 대한 등가 신호대잡음비가 비교하여 $A_n^A \geq A_n^D$ 이면 아날로그

네트워크 부호화를, $A_n^A < A_n^D$ 이면 디지털 네트워크 부호화를 선택한다. 이 경우 각 릴레이가 지원 가능한 등가 신호대잡음비는

$$\Gamma_n = \max\{A_n^A, A_n^D\} \quad (10)$$

이다. 릴레이 선택은 등가 신호대잡음비가 최대가 되도록 $n_o = \arg\max\{\Gamma_n\}_{n=1}^N$ 로 선택한다.

IV. 성능 평가 및 결론

본 절에서는 모든 채널이 $\Omega_{1n} = \Omega_{2n} = 1$ 로 동일한 분포를 갖는 독립 레일리 페이딩 채널에서 몬테카를로 모의실험으로 성능을 도출한다. 그림 2는 목표 전송률이 $R = 2$ bps/Hz이고, 선박의 전력이 $P_S = P_Q$ 로 같을 때 신호대잡음비 $SNR = P_S/\sigma^2$ 에 따른 시스템 오류 확률을 릴레이 수 N 에 따라 보인 것이다. 그림에서 ‘Prop’는 제안 기법, ‘ANC’는 아날로그 네트워크 부호화만, ‘DNC’는 디지털 네트워크 부호화만을 적용한 기존의 릴레이 선택 기법을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 신호대잡음비가 높으면 디지털 네트워크 부호화가 아날로그 네트워크 부호화보다 성능이 더 좋고 신호대잡음비가 낮으면 그 반대의 경향을 보인다. 제안한 기법은 두 릴레이 방식을 채널 상태 정보에 따라 적응적으로 선택함으로써 모든 신호대잡음비에서 향상된 성능을 제공한다. 특히 릴레이 수가 많아지면 제안 기법의 성능 개선을 더 뚜렷하게

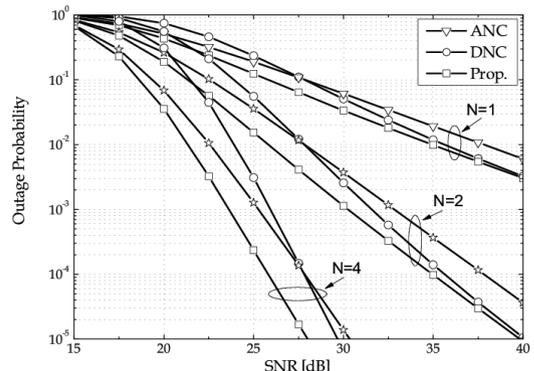


그림 2. 전송률이 $R = 2$ bps/Hz이고 선박 전력이 $P_S = P_Q$ 로 동일할 때 $SNR = P_S/\sigma^2$ 에 따른 시스템 오류 확률. Fig. 2. Outage probability for $SNR = P_S/\sigma^2$ when $R = 2$ bps/H and the power is identical for all ships as $P_S = P_Q$.

볼 수 있다.

V. 결 론

본 레터에서는 선박간 정보 교환에 여러 선박이 협력 가능한 해상 통신 시스템에서 채널상태정보에 따라 아날로그 네트워크 부호화와 디지털 네트워크 부호화를 적응적으로 적용하고 릴레이 또한 선택하는 기법을 제안하였다. 모의실험 결과 제안 기법이 기존 기법보다 성능이 크게 향상되며, 특히 릴레이 수가 증가하면 성능 개선도 증가함을 보였다.

References

- [1] J. Wang, S. Y. Kim, M. A. Jeong, S. R. Lee, and Y. H. Kim, "Rate-aware two-way relaying for low-cost ship-to-ship communications," *J. KICS*, vol. 39C, no. 8, pp. 651-659, Aug. 2014.
- [2] S. J. Kim, P. Mitran, and V. Tarokh, "Performance bounds for bidirectional coded cooperation protocols," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5235-5241, Nov. 2008.
- [3] E. S. Lo and K. B. Letaief, "Design and outage performance analysis of relay-assisted two-way wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 4, pp. 1163-1167, Apr. 2011.
- [4] T. P. Do, J. S. Wang, I. Song, and Y. H. Kim, "Joint relay selection and power allocation for two-way relaying with physical layer network coding," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 301-304, Feb. 2013.

도 푸 틴 (Thinh Phu Do)



2010년 2월: HoChiMinh City University of Technology 통신공학과 공학사
 2010년 9월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 석박통합과정 <관심분야> WBAN, 채널추정

정 현 우 (Hyun Woo Jeong)



2014년 3월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 석박통합과정 <관심분야> WBAN, 채널추정

정 민 아 (Min-A Jeong)



1992년 2월: 전남대학교 전산 통계학과 학사
 1994년 2월: 전남대학교 전산 통계학과 이학석사
 2002년 2월: 전남대학교 전산 통계학과 이학박사
 2002년 2월~2003년 2월: 광주 과학기술원 정보통신공학과 Post-Doc
 2011년 9월~2013년 2월: Cleveland Clinic Research
 2005년 3월~현재: 목포대학교 컴퓨터공학과 부교수 <관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식 시스템, 무선통신응용분야, 임베디드시스템

김 윤 희 (Yun Hee Kim)



1995년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학사
 1997년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
 2000년 1월~2000년 4월: UCSD 방문 연구원
 2011년 1월~2012년 1월: UCSD 방문 연구원
 2000년 8월: 한국과학기술원 전자전산학과 박사
 2000년 9월~2004년 8월: 한국전자통신연구원 선임 연구원
 2004년 9월~현재: 경희대학교 전자정보학부 교수
 2006년 1월~현재 IEEE 준석학회원, 한국통신학회 논문지 편집위원
 <관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론, 통계학적인 호처리, 부호이론