

ASO-TDMA기반 다중-홉 VHF 대역 데이터 통신 시스템의 주파수 재사용을 고려한 채널간 부하 균형을 위한 자원 할당 최적화

조구민[°], 이준만^{*}, 윤창호^{**}, 임용곤^{**}, 강충구^{***}

Optimization of Resource Allocation for Inter-Channel Load Balancing with Frequency Reuse in ASO-TDMA-Based VHF-Band Multi-Hop Data Communication System

Kumin Cho[°], Junman Lee^{*}, Changho Yun^{**}, Yong-Kon Lim^{**}, Chung G. Kang^{***}

요약

해양 통신을 위한 VHF 대역 데이터 통신 시스템(VHF Data Exchange System: VDES)은 송수신단의 종류에 따라 서로 다른 주파수 대역을 사용하도록 설계되어 있으며, 육상국으로부터 멀리 떨어진 선박국에게 육상국과 연결성을 보장하기 위해 제안된 ASO-TDMA (Ad-hoc Self-Organizing TDMA) MAC 프로토콜을 이용하여 다중-홉 통신을 수행하는 경우에 주파수 채널간 부하 불균형 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 주파수 채널간 부하 불균형 문제를 해결하기 위해 통계적 기하(stochastic geometry) 모델링을 도입한다. 이를 기반으로 동일 홉 영역에서의 공간적 자원 재사용률을 분석하고, 각 홉 영역 별로 최적의 자원 할당을 통해 채널간의 부하 불균형 문제를 해결하여 자원 활용도를 극대화하는 것을 보인다.

Key Words : VHF maritime communication, AIS (Automatic Identification System), Ad-hoc self-organizing-TDMA (ASO-TDMA), Load-balancing, Poisson Point Process (PPP)

ABSTRACT

Depending on the type of Tx-Rx pairs, VHF Data Exchange System (VDES) for maritime communication is expected to employ the different frequency channels. Load imbalance between the different channels turns out to be a critical problem for the multi-hop communication using Ad-hoc Self-Organizing TDMA (ASO-TDMA) MAC protocol, which has been proposed to provide the connectivity between land station and remote ship stations. In order to handle the inter-channel load imbalance problem, we consider a model of the stochastic geometry in this paper. After analyzing the spatial reuse efficiency in each hop region by the given model, we show that the resource utility can be maximized by balancing the inter-channel traffic load with optimal resource allocation in each hop region.

※ 본 연구결과는 국토해양부의 “U기반 해운 물류 체계 구축을 위한 기반기술 연구” 과제에서 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

[°] First and Corresponding Author: Korea University School of Electrical Engineering, kumin84@korea.ac.kr, 학생회원

^{*} School of Electrical Engineering, Korea University, handol306@korea.ac.kr, 학생회원

^{**} Korea Institute of Ocean Science & Technology, {sgn0178, yklim}@kriso.re.kr 정회원

^{***} School of Electrical Engineering, Korea University, ccgkang@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-06-203, Received June 30, 2015; Revised July 20, 2015; Accepted July 20, 2015

I. 서 론

ITU-R에서는 증가하는 해상 데이터 통신의 수요를 해결하기 위해 새로운 VHF 대역 데이터 통신시스템(VDES)에 대한 권고문 M. 1842-1을 제시하였다^[1]. [1]에서는 VHF 대역 데이터 통신망은 선박국의 위치 및 긴급 조난 정보를 전달하기 위한 Automatic Identification System (AIS)과 공존이 가능한 네 가지 데이터 통신 시스템에 대한 PHY 및 MAC 계층 프로토콜 예시를 보였다. 이러한 예시들은 직접 통신이 가능한 송수신단간의 통신 방법에 대한 예시이므로, 30km 내외의 통신 커버리지를 갖는 VHF 해양통신망에서 넓은 해상에 분포하는 선박국과 육상국간에 연결성을 보장하기 위해 Ship Ad-hoc Network (SANET)에 대한 연구가 진행되고 있다^[2-3]. [2-3]에서는 기존 통신시스템과의 호환성을 유지하는 SANET을 구성하기 위해 AIS에서 사용되는 MAC 프로토콜인 Self Organizing TDMA (SO-TDMA)를 다중-홉 데이터 통신이 가능하도록 변형한 애드혹 자율 구성 TDMA (ad-hoc self-organizing-TDMA: ASO-TDMA) 방식의 MAC 프로토콜을 제시하였다.

ASO-TDMA에서 각 선박국은 자신의 위치를 기준으로 육상 기지국과의 거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF 대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산한다. 계산된 홉 수에 따라 ASO-TDMA 프레임에서 자신이 사용할 자원의 위치를 파악한 후에 자신과 동일한 홉 영역에 존재하는 선박국들과 경쟁을 통해 자원을 획득하여 데이터를 전송한다. ASO-TDMA기반 다중-홉 해양통신망에서 [4]는 선박국의 수와 전송률에 따라 시스템의 수율을 분석하는 연구를 수행하였으며, 분석을 바탕으로 [5]에서는 각 홉 영역 간에 부하 균형을 유지하고 시스템의 수율을 최대화하는 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다. 한편, 1분의 시간자원을 홉 영역별로 분할하여 사용하는 ASO-TDMA 시스템에서는 송신단이 보내는 메시지가 수신단에게 전송되기까지 약 1분 이상의 지연시간이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하여 실시간 및 비실시간 트래픽의 특성에 따라 차등적 서비스를 제공하는 MAC 프로토콜에 대한 연구도 진행되었다^[6-7].

기존 ASO-TDMA는 단일 주파수 채널에 대해서 설계되고 관련 최적화 작업이 수행되었다. 그러나 VDES 시스템은 다수의 채널을 사용할 수 있으며, 이때 송수신단의 종류(육상국 또는 선박국)에 따라 서로 다른 주파수 채널이 할당된다. 이 경우에 육상국과 선

박국, 그리고 선박국과 선박국간의 트래픽 부하에 따라 채널간에 불균형이 발생할 수 있다. 예를 들어, 다중-홉 통신에서는 선박국간 통신의 비중이 많기 때문에 선박국간 통신을 위해 사용되는 주파수 대역에서 다른 대역에 비해 더 높은 부하가 발생하며, 네트워크의 트래픽이 증가할 경우에 해당 주파수 채널에서 병목현상이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 주파수 채널간 부하 불균형 문제를 해결하기 위해 통계적 기하(stochastic geometry) 모델링을 도입한다. 이를 기반으로 동일 홉 영역에서의 공간적 자원 재사용률을 분석하고, 각 홉 영역 별로 최적의 자원 할당을 통해 주파수 대역간의 주파수 대역간의 부하 불균형 문제를 해결하여 자원활용도를 극대화하는 것을 보이고자 한다.

본 논문의 2장에서는 시스템 모델을 다루고, 3장에서는 부하 균형을 위한 각 홉 영역의 자원할당 방식을 다룬다. 4장에서는 3장에서 고려하는 자원 할당 최적화를 위해 필요한 자원 재사용율을 분석한다. 5장에서는 3장 및 4장에서 수행된 수학적 분석 결과를 이용하여 다양한 상황에서 VDES의 부하 균형에 따른 결과를 비교하고, 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 ASO-TDMA 기본 개요

ASO-TDMA는 ITU-R M.1842-1에 제시된 바와 같이 해상안전 통신망인 AIS 시스템과 상호 공존성을 유지하는 데이터 통신을 지원하기 위해 AIS와 동일한 프레임 구조를 사용하며, AIS와 동일 주파수에서 동작하더라도 AIS 기기들 간에 통신을 방해하지 않도록 기존 AIS의 MAC 프로토콜인 SO-TDMA를 다중-홉 통신용으로 변형한 다중접속방식을 사용한다.

AIS는 1분을 기본 단위로 하는 프레임을 정의하며, 하나의 프레임은 2250개의 시분할 슬롯으로 구성된다^[8]. AIS 선박국들은 각 프레임에 존재하는 빈 슬롯들을 탐색하여 빈 시간 슬롯에 SO-TDMA MAC 프로토콜을 이용하여 데이터를 전송한다. SO-TDMA는 선박국이 주기적으로 자신의 위치 및 항행 정보를 주변에 알릴 때 사용되는 MAC 프로토콜로서, 트래픽이 주기적으로 발생하는 특성 때문에 한번 자원을 획득하면 다수의 주기에 걸쳐 경쟁 없이 사용이 가능한 예약기능이 존재한다. 따라서 네트워크에 처음 진입하는 선박국이 이미 예약된 자원에 전송을 시도하지 않도록 하기 위해, 우선 한 프레임 동안 슬롯의 사용정보를 파악한 후에 가용한 슬롯에 전송을 시도하도록 설

계되었다.

AIS는 선박국의 상태나 운항속도에 따라 데이터의 전송주기가 결정된다. 이 데이터의 전송주기에 따라 각 프레임에서 전송할 수 있는 기회의 수가 s_{limit} 으로 주어지며, 이 값에 따라 전송률이 결정된다. 선박국은 주어진 전송률에 따라 전송을 시도할 때, 다른 선박국이 전송한 데이터와 충돌이 일어날 확률을 낮추기 위해 정해진 주기를 기준으로 전송을 시도하는 슬롯의 위치를 랜덤하게 결정한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 선박국은 임의의 한 슬롯을 기준 슬롯(Nominal Start Slot: NSS)으로 선택하고, 주어진 전송률에 따라 전송간격(Nominal Increment: NI)을 $NI = 2250/s_{limit}$ 으로 설정한 후에 NSS를 기준으로 NI 주기마다 떨어진 슬롯을 Nominal Slot (NS)으로 설정하고 전송을 시도한다. 이때 NSS와 NI가 동일한 선박국들이 존재한다면 모든 전송에서 데이터 충돌이 일어나기 때문에 SO-TDMA는 NSS 또는 NS를 중심으로 다음과 같이 전송가능 범위(Selection Interval: SI)로 설정하고 SI범위 내에서 랜덤하게 Nominal Transmission Slot (NTS)를 선택하여 전송하도록 설계되었다.

$$NSS - cNI \leq SI \leq NSS + cNI \quad (1)$$

여기서, c 는 SI의 범위를 결정하기 위한 상수로서 $c \leq 1$ 이며, SO-TDMA에서는 $c = 0.1$ 로 사용되었다. 이 과정에서 데이터의 충돌 없이 전송에 성공한 슬롯은 3과 8사이에 랜덤하게 결정된 timeout에 해당하는 프레임동안 선박국에게 예약되어 다른 선박국의 전송 시도 없이 독점적으로 사용할 수 있다. SO-TDMA에서는 timeout의 최소 및 최대 값을 각각 3과 8로 설정해 두었으며, timeout은 수율 성능에 영향을 미치는 변수이므로 시스템의 특성에 따라 다르게 구현될 수 있다. 각 선박국은 위의 과정을 통해 예약에 성공한 슬롯에 전송을 시도할 때마다 timeout값을 1씩 감소시키며, 해당 슬롯의 timeout 값이 0이 되면 슬롯의 사용을 중단하고 자신의 SI범위 내에 가용한 슬롯 중에 하나를 또 다시 선택하여 전송을 시도한다.

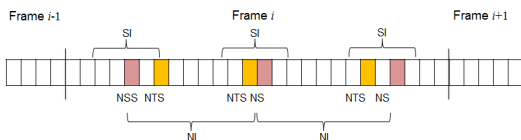


그림 1. SO-TDMA 프레임 구조
Fig. 1. SO-TDMA frame structure

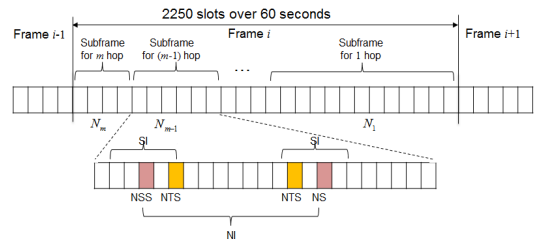


그림 2. ASO-TDMA 프레임 구조
Fig. 2. ASO-TDMA Frame structure

ASO-TDMA는 다중-홉 통신시 발생될 수 있는 히든 노드 문제(hidden node problem)을 해결하기 위해 그림 2와 같이 하나의 SO-TDMA 프레임을 다수 개의 부프레임으로 분할하고, 선박국의 위치에 따라 서로 다른 자원을 할당하는 방식을 사용한다^[3]. ASO-TDMA에서 각 선박국은 GPS를 이용하여 육상국과 자신의 직선거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF 대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산하여 미리 정해진 부프레임을 사용한다. 동일한 홉 영역에 존재하는 선박국들은 같은 부프레임을 사용하고, 인접한 홉들간에는 서로 다른 부프레임을 할당하기 때문에 물리적인 거리에 따라 간섭이 미치지 않는 홉들간에는 재사용이 가능하다. VHF 대역 커버리지가 x km인 통신시스템에서 부프레임의 수가 m 개 이고 육상국과의 거리가 y km 떨어진 선박국이 존재한다면, 해당 선박국이 사용할 부프레임 j 는 $j = \lceil y/x \rceil \bmod m$ 으로 계산된다.

2.2 VDES를 위한 주파수 대역 할당

VHF Data Exchange Systems (VDES)는 선박국의 안전 및 보안과 해양환경 보호와 관련된 서비스를 개선하기 위해 선상이나 육상에서 해상정보의 수집, 통합, 교환, 표현, 및 분석을 전자적으로 융합하고 통일된 포맷으로 보여주는 자동화된 전자항법 체계(E-navigation)의 구성 요소 중에 하나이다. VDES는 해상 VHF 주파수를 이용 선박국의 위치를 식별하기 위한 AIS의 과부하 문제를 해결하기 위하여 추가의 해상 VHF 주파수를 할당함으로써 AIS의 부하를 분산하기 위해 제안되었다. 이와 관련하여, 2014년 1차 ITU-R WP5B 회의에서는 데이터 통신을 하기 위한 별도의 VDES 채널을 표 1과 같이 배정하였다. 이에 따르면, Lower대역의 채널은 선박국이 육상국으로 전송하는 경우에 할당되며, Upper 대역의 채널은 선박국이 선박국에게 전송하는 경우와 선박국이 육상국에게 전송하는 경우에 할당되어야 한다. 한편, VDES는

표 1. VDES 주파수 할당
Table 1. VDES frequency allocation

Channel No.	Tx Frequency(MHz)	
	Lower	Upper
24	157.200	161.800
84	157.225	161.825
25	157.250	161.850
85	157.275	161.875

ITU-R M.1842-1 Annex에 제시된 바와 같이 25kHz의 대역폭을 가지는 VHF 채널을 최대 4개까지 병합하여 데이터 통신이 가능하다.

그림 3은 VDES에서 다중-홉 통신을 수행할 때 송수신단의 종류에 따라 서로 다른 주파수 대역을 사용하는 예시를 보이며, 본 논문에서는 편의상 육상국이 선박국에게 전송하는 방향을 하향링크(Downlink: DL)로 정의하고 반대의 경우를 상향링크(Uplink: UL)로 정의한다. VDES는 다중-홉 통신을 위해 제안된 시스템이 아니므로 송수신단의 종류에 따라 사용하는 주파수 대역을 분리하면 병목 현상이 발생할 수 있다. 각 홉영역에서 발생하는 트래픽의 양이 적을 때에는 lower 대역이 경부하(underload) 상태이기 때문에 문제가 없으나, 발생하는 트래픽의 양이 늘어나 과부하(overload) 상태가 되면 lower 대역은 자원이 부족하여 병목 현상이 발생하지만 upper 대역은 육상국으로부터 1홉 영역에 존재하는 선박국이 육상국에게 전송할때만 사용되기 때문에 경부하 상태를 유지하게 된다. 따라서 이러한 문제점은 VDES에서 다중-홉 통신을 수행하는 경우에 자원 효율성을 저하시키므로 lower 및 upper대역의 load가 균형을 이루기 위한 자원 할당 방법이 필요하다.

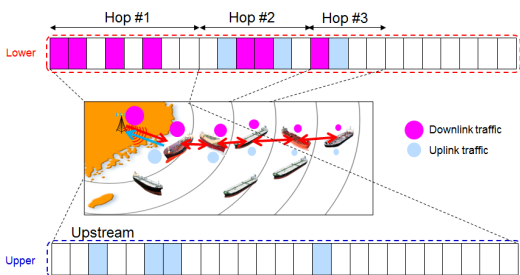


그림 3. VDES 데이터 전송 예시
Fig. 3. VDES data transmission example

2.3 자원 재사용률 분석을 위한 PPP 모델링
해상에 존재하는 선박국이 육상국을 통해 인터넷

망을 사용하기 위해 ASO-TDMA에서는 육상국의 위치를 기준으로 VHF 대역 통신 반경(30km)마다 직교하는 시간 자원을 할당하여 선박국들의 종단간 연결성을 보장한다³⁾. 육상국을 통해 인터넷 망과 통신을 수행하는 다중-홉 해양통신망의 특성상 선박국들이 발생시킨 데이터 트래픽은 육상국으로 집중되며, 두 번째 홉 영역에 존재하는 송신 선박국들이 동시에 첫 번째 홉 영역에 존재하는 수신 선박국들에게 데이터를 전송할 경우에 심각한 간섭을 야기할 수 있다. 그림 4는 두 번째 홉 영역에 존재하는 다수의 송신 선박국(빨간색 점)이 ASO-TDMA 프로토콜에 따라 첫 번째 홉 영역에 존재하는 수신 선박국에게 데이터를 전송하는 경우를 나타내는 예시이다. 수신 선박국은 육상국으로부터 만큼 떨어진 곳에 존재한다고 가정하며, 송신 선박국은 한 프레임 동안 자원의 예약 여부를 확인하고 전송을 시도하기 때문에 특정 시간 슬롯에서 동시에 전송에 참여하는 송신 선박국들은 δkm 이상의 간격을 유지하고 있다고 가정한다.

각 육상국을 중심으로 반경 d_n 마다 홉 영역이 구분되며 홉 영역 i 에 존재하는 선박국들은 밀도가 λ_i 인 포아송 점과정(Poisson Point Process: PPP)으로 분포한다고 가정한다. 홉 영역 i 에 존재하는 선박국 위치들의 집합을 Φ_i 로 나타내며, 홉 영역 i 에 존재하는 i 번째 선박국의 위치를 $x_j \in \Phi_i$ 로 표기한다. 송신 선박국들은 자원을 예약하여 전송하는 ASO-TDMA MAC 프로토콜을 사용하기 때문에 동시에 전송하는 송신 선박국들간의 평균 거리는 δkm 만큼 떨어져 있다고 가정한다.

홉 영역 i 에 존재하는 송신 선박국은 자신이 보유한 상향링크 트래픽을 홉 영역 $(i-1)$ 에 존재하는 수신 선박국에게 전송한다. 홉 영역 i 의 송신단과 수신단간 채널의 이득을 α_i 라고 하면, 이때 수신한 데이터 패킷의 신호대 잡음비(signal-to-interference ratio)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SIR = \frac{\alpha_0^2 X_0 - x}{\sum_{i > 0: X_i \in \Phi_{2, TX}} \alpha_i^2 |X_i - x|^{-\beta}} \quad (2)$$

이때 수신 선박국에서 패킷의 SIR이 일정 문턱값(threshold) 이상이면 메시지를 성공적으로 수신하였다고 가정한다(즉, $\Pr[SIR \geq T]$). 각 홉간 채널이득 $\{\alpha_i\}$ 는 Rayleigh fading을 겪는다고 가정한다. $\Phi_{2, TX}$ 는 특정 시간 슬롯에 홉 영역 2에서 전송에 참

여하는 선박국 위치들의 집합($\Phi_{2, TX} \subseteq \Phi_2$)을 나타내며, β 는 경로 손실 지수(pathloss exponent)를 나타낸다.

본 논문에서는 송수신 선박국간 최대 거리 w 내에서 자유롭게 송수신 쌍을 결정할 수 있도록 랜덤 라우팅(random routing)을 가정하였다. 랜덤 라우팅을 사용할 때 송수신 선박국간 최대 거리에 대한 제약 조건을 두지 않으면, 송수신 선박국이 육상국의 위치를 기준으로 서로 반대 방향에 위치하는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 라우팅에 의한 성능 열화가 발생되므로 현실적인 라우팅을 반영하기 위해 최대 거리 w 를 적용하였다. 그림 4에서, $\theta_1(r|l)$ 과 $\theta_2(r|l)$ 은 수신 선박국과 육상 기지국의 거리가 l 로 주어질 때 송신 선박국이 존재할 수 있는 영역의 각도로서, 선박국의 분포에 따라 랜덤하게 주어진다.

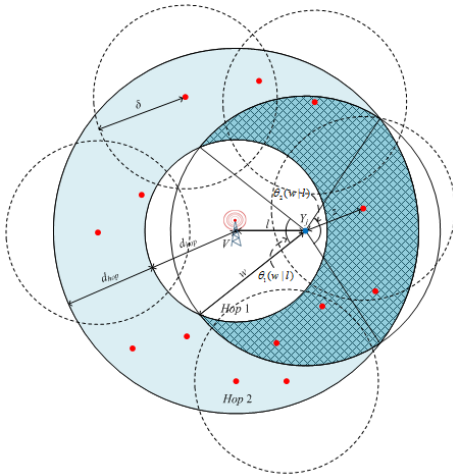


그림 4. 첫 번째 홉 영역 자원의 재사용률 분석을 위한 전송 시나리오 예시
Fig. 4. Transmission scenario to analyze spatial reuse efficiency in the first hop region

III. 부하 균형을 위한 VDES 자원할당 방법

현재 VDES는 다중-홉 통신을 고려하고 있지 않기 때문에 선박국간에 애드혹 통신 시나리오를 적용하면 그림 5와 같이 upper 및 lower 대역 자원이 비대칭적으로 사용된다. 트래픽의 양이 채널이 처리 가능한 용량보다 적은 경우하(under-load) 상태일 때는 특정 홉영역에서 병목 현상이 일어나지 않도록 자원을 할당함으로써 모든 홉의 트래픽을 처리할 수 있다. 이와는 반대로, 채널이 과부하(over-load) 상태일 때는 upper

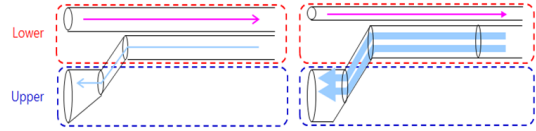


그림 5. 시나리오 예시: (a) 경부하 상태 (b) 과부하 상태
Fig. 5. Illustrative example: (a) underload state (b) overload state

대역 자원은 여유가 있지만 lower 대역 자원은 부족하여 upper 대역 자원을 효율적으로 사용하지 못하는 문제가 발생한다. 이러한 경우에는 하향 및 상향링크 자원을 비대칭적으로 할당하여 upper 대역의 부하를 강제적으로 증가시켜 채널 사용을 극대화할 수 있다. 따라서, 채널을 효율적으로 사용하기 위해 트래픽의 부하에 따라 적응적인 자원할당이 필요하며, 각 소절에서 구체적인 자원 할당 방법을 제시한다.

3.1 경부하 상태의 부하균형 방법

채널이 경부하 상태일 때는 특정 홉에서 병목 현상이 방지하기 위해, 각 홉 영역에서 보내고자 하는 데이터의 양과 전송 가능한 자원의 비율 ρ 를 최적화해야 하며 (그림 5(a) 참조), 최적의 비율을 결정하는 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max \min \\ & \left\{ \begin{array}{l} N_i^{DL}, i = 1, 2, \dots, N_{SF} \\ N_j^{UL}, j = 2, 3, \dots, N_{SF} \end{array} \right\} \left\{ \rho_i^{DL}(N_i^{DL}), \rho_j^{UL}(N_j^{UL}) \right\} \\ & s.t. \sum_{i=1}^{N_{SF}} N_i^{DL} + \sum_{j=2}^{N_{SF}} N_j^{UL} = 2250 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\min\{x, y\}$ 는 x 와 y 중에 작은 값을 나타내며, $\rho_i^{DL}(N_i^{DL})$ 와 $\rho_j^{UL}(N_j^{UL})$ 는 각각 N_i^{DL} 와 N_j^{UL} 의 함수로써 하향 및 상향 링크 트래픽에 대한 가용 자원의 비율을 나타낸다. 그리고, D_i 와 S_j 는 각각 i 번째 홉 영역에서 발생하는 하향 링크 트래픽의 합과 j 번째 홉 영역에서 발생하는 상향 링크 트래픽의 합을 나타내자. 따라서, $\rho_i^{DL}(N_i^{DL}) = N_i^{DL}/D_i$ 와 $\rho_j^{UL}(N_j^{UL}) = N_j^{UL}/S_j$ 라고 나타낼 수 있다. 프레임 구성하는 부프레임의 수를 N_{SF} 로 나타내자. 이때, max-min 최적화 문제를 해결하기 위해 최소화해 해당하는 부분을 제약 조건으로 변형하여 다음과 같이 동치인 문제로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max \left\{ N_i^{DL}, i=1,2,\dots,N_{SF} \right\} x \\ & \left\{ N_j^{UL}, j=2,3,\dots,N_{SF} \right\} \\ & s.t. \sum_{i=1}^{N_{SF}} N_i^{DL} + \sum_{j=2}^{N_{SF}} N_j^{UL} = 2250 \\ & x \leq \rho_i^{DL}, i=1,2,\dots,N_{SF} \\ & x \leq \rho_j^{UL}, j=2,3,\dots,N_{SF} \end{aligned} \quad (4)$$

최적의 해를 찾기 위해 다음과 같이 Lagrange 함수를 정의하고

$$\begin{aligned} L(x, \lambda, \mu, \kappa) = & x - \lambda_i(x - \rho_i^{DL}) - \mu_j(x - \rho_j^{UL}) \\ & - \kappa \left(\sum_{i=1}^{N_{SF}} N_i^{DL} + \sum_{j=2}^{N_{SF}} N_j^{UL} - 2250 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Karush - Kuhn - Tucker조건에 따라 최적해는 다음을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} dL(x, \lambda, \mu, \kappa)/dx &= 1 - \lambda_i - \mu_j = 0 \\ dL(x, \lambda, \mu, \kappa)/d\lambda_i &= x - \rho_i^{DL} = 0 \\ dL(x, \lambda, \mu, \kappa)/d\mu_j &= x - \rho_j^{UL} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)를 통해 최적의 해 x 는 $x = \rho_i^{DL} = \rho_j^{UL}$ 임을 확인할 수 있으며, 식 (3)에 해당 결과를 대입하면 다음과 같은 해를 도출할 수 있다.

$$x = 2250 / \left(\sum_{i=1}^{N_{SF}} D_i + \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \right) \quad (7)$$

(7)을 이용하여 다음과 같이 각 홉 영역의 하향 및 상향 링크 부프레임 크기를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_i^{DL} &= 2250 d_i / \left(\sum_{i=1}^{N_{SF}} D_i + \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \right) \\ N_j^{UL} &= 2250 s_j / \left(\sum_{i=1}^{N_{SF}} D_i + \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \right) \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 과부하 상태의 부하 균형화(load balancing) 방법

채널이 과부하 상태일 때에는 상향링크 트래픽을 최대한 허용하고, 남은 lower 대역의 자원을 하향링크로 사용하는 방법을 사용하였을 때 upper 대역 자원의 사용률이 최대화된(그림 5(b) 참조). 홉 영역 1의 경우에는 모든 송신 선박국이 육상국으로 데이터를 전송하기 때문에 공간적인 자원 재사용이 거의 불가능

하지만, 홉 영역 2의 경우에는 다수의 송신 선박국이 동시에 전송을 시도하더라도 수신 선박국이 서로 다른 곳에 위치하기 때문에 공간적으로 자원 재사용이 가능하다. 따라서, 홉 영역 2에 존재하는 다수의 송신 선박국들이 동시에 그들의 수신 선박국들에게 전송을 시도했을 때 홉 영역 1에 존재하는 수신 선박국 중에 평균 η 명이 각각 하나의 패킷을 정상적으로 수신하였다고 하자. 홉 영역 1에 존재하는 전체 수신 노드들은 한 프레임 동안 자신의 홉에서 발생된 트래픽 S_1 과 인접 홉에서 전달받은 평균 트래픽 ηN_2^{UL} 의 합을 처리해야 한다. 여기서, η 를 구하기 위해서 별도의 분석이 필요하며, 4장에서 다룬다.

η 가 주어지면 영역 2에 할당해야 하는 자원의 양과 트래픽에 대한 가용 자원의 비율을 각각 $N_2^{UL} = (2250 - S_1)/\eta$ 과 $\rho_2^{UL} = (2250 - S_1)/\eta S_2$ 의 자원을 할당해야 한다. 이때, 홉 영역 1을 제외한 모든 홉의 상향링크에서 $\rho_1 = \rho_2$ 을 유지했을 때 upper 대역의 자원을 모두 사용할 수 있게 된다. 상하 및 하향 링크의 채널 사용률을 최대로 하기 위해 상향 링크에 할당하고 남은 자원을 하향 링크에 할당하는 방식을 사용할 때, 각 홉 영역의 하향 링크에 대한 최적의 offered load를 결정하는 문제를 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max \left\{ N_i^{DL} | i=1,2,\dots,N_{SF} \right\} x \\ & s.t. \sum_{i=1}^{N_{SF}} N_i^{DL} = 2250 - \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \rho_2^{UL} \\ & x \leq \rho_i^{DL}, i=1,2,\dots,N_{SF} \end{aligned} \quad (9)$$

경부하일 때의 부하균형 방법과 동일하게 Lagrange 함수를 정의하고, KKT를 만족하는 최적의 해를 계산하면 다음과 같다.

$$x = \left(2250 - \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \rho_2^{UL} \right) / \sum_{i=1}^{N_{SF}} D_i \quad (10)$$

그리고, 각 홉 영역의 하향 링크에 할당될 부프레임의 크기는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$N_i^{DL} = \left(2250 - \sum_{j=2}^{N_{SF}} S_j \rho_2^{UL} \right) D_i / \sum_{i=1}^{N_{SF}} D_i \quad (11)$$

IV. 자원 재사용률 분석

3.2절에서 논의한 바와 같이 ASO-TDMA MAC 프로토콜에 의해, 동일한 홉에 존재하는 2개 이상의 수신 선박국이 공간적 자원 재사용을 통해 패킷을 정상적으로 수신할 수도 있게 된다. 이때 다수의 수신 노드들 중에 동시에 패킷을 수신 가능한 평균 선박국의 수를 자원 재사용률 η 로 3.2절에서 논의한 바와 같이 ASO-TDMA MAC 프로토콜에 의해, 동일한 홉에 존재하는 2개 이상의 수신 선박국이 공간적 자원 재사용을 통해 패킷을 정상적으로 수신할 수도 있게 된다. 이때 다수의 수신 노드들 중에 동시에 패킷을 수신 가능한 평균 선박국의 수를 자원 재사용률 λ_2' , 홉 영역 2의 면적($\Omega_2 = 3\pi d_h^2$), 수신 선박국이 메시지를 성공적으로 수신할 확률 p_c 가 주어지면, 자원 재사용률은 메시지를 정상적으로 수신하는 평균 선박국의 수이므로 $\eta = \lambda_2' \Omega_2 p_c$ 로 나타낼 수 있다.

ASO-TDMA MAC 프로토콜은 송신 선박국이 미리 자원을 예약한 후에 전송을 시도하는 방식이므로 송신 선박국으로부터 δ 이내에 존재하는 모든 선박국은 전송을 시도하지 않으며, 이러한 특성은 **Martern Hardcore Process (MHP)**로 모델링이 가능하다. 그러나 MHP는 수학적으로 분석하는데 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 [9]에 제시된 바와 **Poisson Point Process**에서 선박국간의 평균 거리가 δ 가 되도록 밀도를 조절하는 **thinning** 방법을 적용한다. 즉, 홉 영역 2의 선박국 밀도는 λ_2 이지만 특정 시간 슬롯에 전송을 시도하는 선박국의 밀도는 $\lambda_2' = \lambda_2 p_\delta$ 로 나타낼 수 있으며, **thinning** 후에도 PPP의 성질은 그대로 유지된다. 시간 슬롯에서 선박국이 전송을 시도할 확률 p_δ 은 다음과 같다.

$$p_\delta = \int_0^1 \exp(-\lambda_2 \pi \delta^2 t) dt = \frac{1 - \exp(-\lambda_2 \pi \delta^2)}{\lambda_2 \pi \delta^2} \quad (12)$$

한편, 그림 4에 도시된 바와 같이 홉 영역 1에 위치하는 임의의 수신 선박국이 육상 기지국과 송신 선박국으로부터 각각 l 과 z 만큼 떨어져 있다고 하자. 그리고, 수신 선박국이 받는 간섭 신호의 총합과 총 간섭 신호의 확률 밀도 함수를 각각 I 와 $f_I(\alpha)$ 로 나타내자. 이때 신호대 간섭비(SIR: Signal to Interference Ratio)가 임계 값보다 클 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \Pr[SIR \geq T|l, z] \\ &= E_I[\Pr[g > Tz^\beta | l, z, I]] \\ &= \int_0^\infty \Pr[g > T\alpha z^\beta | l, z, \alpha] f_I(\alpha) d\alpha \quad (13) \\ &= \int_0^\infty e^{-T\alpha z^\beta} f_I(\alpha) d\alpha = L_I(Tz^\beta | l) \end{aligned}$$

여기서 $L_I(s|l)$ 는 수신 선박국이 육상 기지국으로부터 l 만큼 떨어졌을 때 간섭 신호의 Laplace transform을 나타낸다. 선박국이 성공적으로 데이터 패킷을 수신할 확률 p_c 는 다음과 같이 육상 기지국과 수신 선박국간의 거리 l 와 송신 선박국과 수신 선박국간의 거리 z 의 평균으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_c &= E_{l,z}[\Pr[SIR(z) > T|l, z]] \\ &= \int_{d_{hop}-l}^w \int_0^{d_{hop}} L_I(Tz^\beta | l) f_l(l) f_z(z) dl dz \quad (14) \end{aligned}$$

이때, 수신 선박국은 홉 영역의 전체 넓이 중에 육상국으로부터 반경 l 만큼 떨어진 원 위에 존재하므로 $f_l(l)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_l(l) = \begin{cases} 2\pi l / \pi d_{hop}^2, & l \leq d_h \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

마찬가지로 송신 선박국은 수신 선박국의 위치를 기준으로 최대 송수신 거리 w 이내에 존재하므로 반지름 w 인 원과 홉 영역 2의 교차 영역의 전체 넓이 $\int_{d_{hop}-l}^w 2\pi - \theta_1(ul) - \theta_2(ul) du$ 중에 수신 노드로부터 반경 z 만큼 떨어진 호 위에 존재하므로 $f_z(z)$ 와 p_c 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_z(z) &= \begin{cases} \frac{2\pi - \theta_1(ul) - \theta_2(ul)}{\int_{d_h-l}^w 2\pi - \theta_1(ul) - \theta_2(ul) du}, & d_h - l \leq z \leq w \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_c &= E_{l,z}[\Pr[SIR(z) > T|l, z]] \\ &= \int_{d_h-l}^w \int_0^{d_h} \left(L_I(Tz^\beta | l) \frac{2\pi l}{\pi d_h^2} \times \frac{2\pi - \theta_1(ul) - \theta_2(ul)}{\int_{d_h-l}^w 2\pi - \theta_1(ul) - \theta_2(ul) du} \right) dl dz \quad (17) \end{aligned}$$

(17)에서 $L_f(s|l)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, $L_f(s|l)$ 은 부록 A의 유도 과정을 통해 다음과 같이 주어진다.

$$L_f(s|l) = e^{-3\lambda\pi d_h^2 \left(1 - \int_0^\infty \left(\frac{r}{1+sr^{-\beta}} \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\lambda\pi d_h^2} \right) dr \right)} \quad (18)$$

V. 성능 분석

본 장에서는 ASO-TDMA 기반 다중-홉 데이터 통신 시스템에서 선박국의 밀도와 송수신 선박국간 최대 거리의 변화에 따라 홉 영역 1에서 얻을 수 있는 재사용률을 확인하고자 한다. 또한 자원 재사용률에 따라 부프레임 자원을 할당하였을 때 홉 영역간 부하 균형 및 자원 효율성을 확인한다. 성능 분석을 위해 적용된 파라미터를 표 2에 요약하였다.

그림 6은 홉 영역 2에 존재하는 송신 선박국의 수에 따라 변화하는 홉 영역 1의 자원 재사용률을 보이는 그래프이다. 홉 영역 2에 존재하는 송신 선박국의 수가 적을 경우에는 수신 선박국에게 도달하는 간섭 신호의 세기가 약하지만 공간적으로 충분한 자원 재사용을 하지 못하기 때문에 자원 재사용률이 낮다. 그러나 송신 선박국의 수가 증가하면 자원 재사용률이 거의 일정한 값으로 수렴함을 확인할 수 있다. 송신 선박국이 미리 자원을 예약한 후에 전송을 시도하는 ASO-TDMA는 송신 선박국간의 평균 거리를 δ 로 유지시켜 주기 때문에 송신 노드와 가까운 간섭원의 부

표 2. 성능 분석을 위한 파라미터
Table 2. Parameters for performane analysis

Frequency band	160 MHz
Tx power	25 watt
Pathloss exponent, β	2.5
Fading model	Rayleigh
Slots per frame	2250 slots/min
Hop distance, d_h	30 km
Average inter-ship distance, δ	30 km
Ship intensity, λ	variable
c	0.1
TO_MIN	3
TO_MAX	8
Routing	Random routing with variable

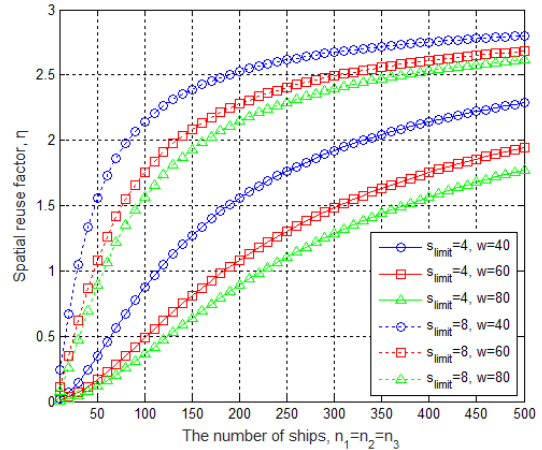


그림 6. 송신 선박국의 수의 변화에 따른 자원 재사용률. 전송률과 랜덤 라우팅 변수별 비교
Fig. 6. spatial reuse factor vs. the number of ships for varying the transmission rate and random routing parameters

재로 인해 송신 선박국의 수가 늘어나더라도 높은 재사용률을 확보할 수 있다.

추가적으로 그림 6을 통해 송수신단 최대 거리 w 의 변화에 따른 홉 영역 1의 자원 재사용률을 확인할 수 있다. 송수신단 최대 거리가 짧을수록 송신 선박국보다 수신 선박국에 가까운 간섭원이 존재할 확률이 낮아지는 것을 의미한다. 따라서, 홉 영역 2에 존재하는 송신 선박국이 홉 영역 1에 존재하는 수신 선박국을 결정하는 라우팅 경로를 설정할 때 거리상으로 가장 가까운 선박국을 설정하는 것이 자원 재사용률을 최대화하는 방법임을 확인할 수 있다.

그림 7과 8은 각각 홉 영역 2에 존재하는 송신 선박국의 수에 따라 변화하는 lower 및 upper대역의 트래픽에 대한 가용 자원의 비율 ρ 를 관찰한 것이다. 그림 7은 다수의 홉 영역이 자원을 분할하여 사용하고 있기 때문에 각 홉 영역의 ρ 중에서 최소값을 보이고 있다. 식 (8)을 적용한 경우에는 모든 홉 영역의 ρ 가 동일하지만, 식 (11)을 적용한 경우에는 upper 대역 자원의 사용률을 최대화하기 위해 의도적으로 하향 및 상향 링크의 ρ 를 비대칭적으로 적용하였다. 따라서, 이때 ρ 의 최소값은 하향링크에 해당하며, 모든 하향링크의 ρ 는 동일함을 확인할 수 있다. 부하 임계값 (Load threshold)를 기준으로 위쪽은 보낼 트래픽의 양보다 사용 가능한 자원의 양이 더 많은 경부하 상태를 나타내며, 반대로 아래쪽은 과부하 상태를 나타낸다.

과부하 상태가 되면 upper 대역 자원의 사용률을 최대화하기 위해 상향 링크에 더 많은 자원을 할당하

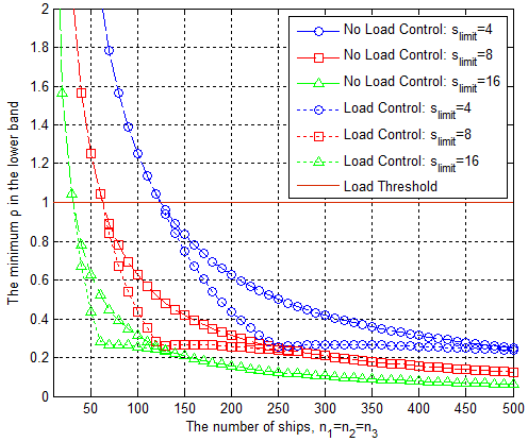


그림 7. 전송률 별로 송신 선박국의 수에 따른 lower 대역의 최소 가용자원 비율 ρ 값 비교

Fig 7. Minimum available resource ratio ρ of lower frequency vs. the number of ships for varying the transmission rate

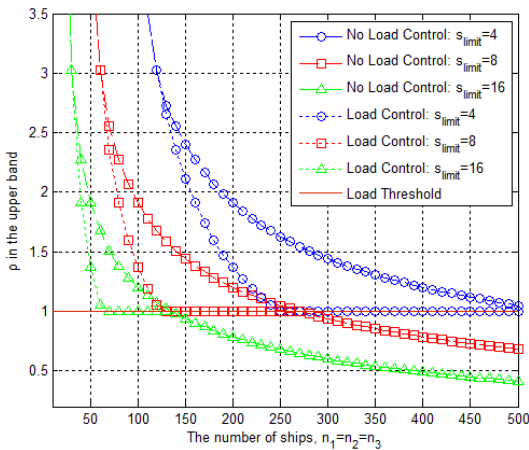


그림 8. 전송률 별로 송신 선박국의 수에 따른 upper 대역의 가용자원 비율 ρ 값 비교

Fig. 8. Available resource ratio ρ of upper frequency vs. the number of ships for varying the transmission rate

도록 부하를 제어한다. 따라서, 상대적으로 적은 자원을 할당 받은 하향링크는 과부하 현상이 심화되어 ρ 가 더 낮아짐을 확인할 수 있다. 한편 upper대역은 상향링크를 통해 더 많은 트래픽을 전달받게 되어 경부하 자원할당 방법에 비해(즉, 부하 제어를 적용하지 않은 경우) 더 빠르게 1에 접근하게 된다. 이때 바로 upper 대역의 ρ 가 바로 1이 되지 않는 이유는 상향링크의 트래픽이 upper 대역의 자원량보다 적기 때문이며, 선박국의 수가 늘어나 upper 대역을 과부하로 만드는 상황에 도달하면 상향 링크에 비대칭적으로 자

원을 할당해야 하는 필요성이 없어지므로 경부하 상태와 동일하게 식(8)을 이용하여 lower 대역의 자원을 결정한다.

VI. 결론

본 논문은 송수신단의 종류에 따라 상이한 주파수 채널을 사용하는 VDES에서 ASO-TDMA기반 다중-홉 통신으로 인해 발생될 수 있는 홉 영역간 병목 현상을 방지하기 위한 자원 할당 방법을 최적화 이론 (optimization theory)의 관점에서 분석하고, 통계적 기하(stochastic geometry)를 통해 공간적 자원 재사용률을 도출하였다. 또한, 시스템의 성능 분석을 통해 다양한 시스템 변수에 따라 변화하는 자원 재사용률과 홉 영역의 부하를 확인할 수 있었으며, 본 논문의 분석 결과를 적용하였을 때, 경부하 상태에서 lower 대역의 모든 채널이 균등한 부하를 가질 수 있음을 확인하였다. 과부하 상태에서도 lower 대역의 모든 채널이 균등한 부하를 가지게 할 수 있으나 VDES의 특성상 평균적으로 낮은 부하를 가지는 upper 대역의 사용률을 높이기 위해 하향 및 상향 링크에 비대칭적인 부하를 설정하는 방법을 사용할 수 있으며 적절하게 동작하고 있음을 확인하였다.

부록 A. 간섭 신호의 Laplace Transform

육상국으로부터 l 만큼 떨어진 곳에 위치한 수신 선박국에 대해, 간섭 신호의 합에 대한 Laplace transform $L_I(s|l)$ 을 유도하기 위해 임의의 위치에 존재하는 단일 간섭 신호에 대한 확률 분포를 고려해보자. 홉 영역 2에 존재하는 임의의 송신 선박국 i 가 수신 선박국에게 미치는 간섭 신호 S_i 의 누적 분포 함수 (CDF: Cumulative Distribution Function)는 다음과 같이 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr[S_i < X|l] &= \int_0^\infty \Pr[g < Xr^\beta | r, l] \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\pi d_{hop}^2} r dr \\ &= 1 - \int_0^\infty \exp(-Xr^\beta) \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\pi d_{hop}^2} r dr \end{aligned} \quad (A.1)$$

여기서 $\theta_1(r|l)$ 와 $\theta_2(r|l)$ 은 각각 그림 4에서 표현된 것 같이 수신 선박국과 육상 기지국의 거리가 l 로 주

어저 있을 때 송신 선박국이 존재할 수 있는 영역에 대한 적분을 수행할 때 사용되는 변수이며, 적분 변수 r 에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_1(r|l) = \begin{cases} 2\pi, & r \leq d_{hop} - l \\ \left(\frac{2\cos^{-1} \left(\frac{r^2 + l^2 - d_{hop}^2}{2rl} \right)}{2rl} \right), & d_{hop} - l \leq r \leq d_{hop} + l \\ 0, & d_{hop} + l \leq r \end{cases}$$

$$\theta_2(r|l) = \begin{cases} 0, & r \leq 2d_{hop} - l \\ \left(\frac{2\pi - 2\cos^{-1} \left(\frac{r^2 + l^2 - 4d_{hop}^2}{2rl} \right)}{2rl} \right), & 2d_{hop} - l \leq r \leq 2d_{hop} + l \\ 2\pi, & 2d_{hop} + l \leq r \end{cases}$$

(A.2)

S_i 에 대한 확률 밀도 함수(PDF)는 식 (A.1)을 미분 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{S_i}(x|l) = \int_0^\infty e^{-Xr^\beta} r^{\beta+1} \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\pi d_{hop}^2} dr$$

(A.3)

위의 식을 통해서 송신 선박국로부터 수신되는 간섭 신호의 Laplace transform을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{S_i}(s|l) = \int_0^\infty e^{-sx} \int_0^\infty \left(e^{-xr^\beta} r^{\beta+1} \times \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\lambda\pi d_{hop}^2} \right) dr dx$$

$$= \int_0^\infty \frac{r}{1+sr^{-\beta}} \times \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\lambda\pi d_{hop}^2} dr$$

(A.4)

수신 선박국에게 간섭을 미치는 송신 선박국의 수는 포아송 분포를 따르므로, total probability theorem에 따라 간섭 신호의 합에 대한 PDF는 다음과 같이 표현되며,

$$f_I(x|l) = \sum_{n=0}^N f_I(x|n,l) f_N(n)$$

(A.5)

간섭의 총합 I 에 대한 Laplace transform은 다음과 같이 정리된다.

$$L_I(s|l) = \int_0^\infty e^{-sx} \left(\sum_{n=0}^N f_I(x|n,l) f_N(n) \right) dx$$

$$= \sum_{n=0}^N \int_0^\infty \left(e^{-sx} (f_{S_0}(x|l) * f_{S_1}(x|l) * \dots * f_{S_n}(x|l)) \right) dx f_N(n)$$

$$= \sum_{n=0}^N \left\{ L_{S_i}(s|l) \right\}^n \frac{(3\lambda\pi d_h^2)^n}{n!} e^{-3\lambda\pi d_h^2}$$

$$= e^{-3\lambda\pi d_h^2} \left(1 - \int_0^\infty \frac{r}{1+sr^{-\beta}} \times \frac{2\pi - \theta_1(r|l) - \theta_2(r|l)}{3\lambda\pi d_h^2} dr \right)$$

(A.6)

References

- [1] ITU, *Characteristics of VHF radio systems and equipment for the exchange of data and electronic mail in the maritime mobile service RR Appendix 18 channels*, Recommendation ITU-R M.1842-1, Jun. 2009.
- [2] B. Hui, K. H. Jeon, K. H. Chang, S. G. Kim, J. W. Park, and Y. K. Lim, "Design of radio transmission technologies for VHF band ship ad-hoc network," in *Proc. Int. Conf. ICT Convergence 2011 (ICTC 2011)*, pp. 626-629, Seoul, Korea, Sept. 2011.
- [3] C. H. Yun and Y. K. Lim, "ASO-TDMA: Ad-hoc self-organizing TDMA protocol for shipborne ad-hoc networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 1, pp. 626-629, Dec. 2012.
- [4] K. Cho, C. H. Yun, and C. G. Kang, "Throughput analysis of ASO-TDMA in multi-hop maritime communication network," *J. KICS*, vol. 37B, no. 9, pp. 741-749, Sept. 2012.
- [5] K. Cho, C. H. Yun, and C. G. Kang, "Transmission rate control of ASO-TDMA in multi-hop maritime communication network," in *Proc. ICTC 2012*, pp. 85-86, Oct. 2009.
- [6] K. Cho, C. H. Yun, Y. K. Lim, and C. G. Kang, "A MAC protocol for integrated service in the multi-hop ad-Hoc maritime communication network," *J. KICS*, vol. 38A, no. 7, pp. 603-611, Jul. 2013.
- [7] K. Cho, C. H. Yun, Y. K. Lim, and C. G. Kang, "Real-time transmission scheme for ad Hoc self-organizing (ASO) TDMA in

multi-hop maritime Communication,” *J. KICS*, vol. 39B, no. 5, pp. 260-270, May 2014.

- [8] ITU, *Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band*, Recommendation ITU-R M.1371-2, Mar. 2006.
- [9] S. Cho and W. Choi, “Energy-efficient repulsive cell activation for heterogeneous cellular networks,” *IEEE J. Sel. Area in Commun.*, vol. 31, no. 5, pp. 870-882, May 2013.

조 구 민 (Kumin Cho)



2009년 8월 : 명지대학교 통신 공학과 학사
 2010년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 무선통신 시스템

이 준 만 (Junman Lee)



2014년 2월 : 고려대학교 전기 전자전파공학과 학사
 2014년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 이동통신 네트워크

윤 창 호 (Changho Yun)



1999년 2월 : 창원대학교 메카트로닉스학과 학사
 2004년 2월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과석사
 2007년 8월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과박사
 2007년 11월~2008년 12월 :

North Carolina State Univ. 전산학과 박사후과정
 2008년 12월~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박 해양플랜트 연구소 선임연구원
 2009년~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양공학과 전임교수
 <관심분야> 수중 네트워크, 해양 선박 네트워크

임 용 곤 (Yong-Kon Lim)



1979년 : 충남대학교 전기공학 학사
 1984년 : 충남대학교 전기공학 석사
 1994년 : 아주대학교 전자공학 박사
 1980년~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소 책임연구원
 2004년~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 정교수/겸임교수
 <관심분야> 수중음향 통신 시스템 및 네트워크, 네트워크 프로토콜

강 충 구 (Chung G. Kang)



1987년 6월 : Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사
 1993년 3월 : Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사
 1992년 7월~1993년 6월 : (미) Aerospace Corp. 연구원
 1993년 3월~1994년 2월 : (미) Rockwell International 연구원
 1994년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자공학부 교수
 2006년 1월~현재 : 한국통신학회 상임이사/부회장
 2008년 2월~현재 : TTA PG702 IMT-WiBro 프로젝트 그룹 의장/TTA PG906 IMT 프로젝트 부의장
 2014년 3월~현재 : 5G Forum 무선기술분과 분과장
 <관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용 서비스