

VHF 대역 선박 간 애드혹 네트워크에서 실측 해상채널에 기반한 채널 보상과 채널 부호화 기법의 성능분석

준회원 전 광 현*, 정회원 회 빙*, 종신회원 장 경 희*, 김 승 근**,
정회원 김 시 문**, 임 용 곤**

Performance Analysis of Channel Compensation and Channel Coding Techniques based on Measured Maritime Wireless Channel in VHF-band Ship Ad-hoc Network

KwangHyun Jeon* *Associate Member*, Bing Hui* *Regular Member*, KyungHi Chang*,
SeungGeun Kim** *Lifelong Members*, SeaMoon Kim**, YongKon Lim** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 차세대 해상 통신 시스템인 SANET (Ship Ad-hoc NETWORK)의 무선 전송 규격 파라미터를 설정하고, VHF 대역의 실측 해상 채널을 분석하여 SANET 채널 모델링을 수행한다. 또한, 프리앰블, guard time, 파일럿을 포함한 단일 및 다중 반송파 시스템을 위한 프레임 구조를 제안하며, 제안된 프레임 구조 하에서 채널 보상과 채널 부호화 기법에 의한 SANET 시스템의 BER (Bit Error Rate) 성능을 평가 및 분석한다. 결과로 $\pi/4$ -DQPSK와 $\pi/8$ -D8PSK를 적용한 단일 반송파와 SANET의 경우, differential 변조방식 채택에 의하여 별도의 채널 보상을 하지 않으며, 부호화 이득을 얻을 수 있는 컨볼루션 부호화를 적용하기로 한다. 다중 반송파와 SANET의 경우에는 해상환경, 파도에 의한 선박의 움직임 등에 의한 K값의 변화를 고려하여 시스템의 성능을 최대화 하도록 채널 보상 기법과 컨볼루션 부호화를 적용한다.

Key Words : Ship Ad-hoc Network, Maritime Communication, AIS, Channel Compensation, Channel Coding

ABSTRACT

In this paper, the parameters of the RTT (Radio Transmission Techniques) for SANET (Ship Ad-hoc NETWORK), which is considered for the next generation maritime communication systems, are set up. A channel model has been analyzed based on the practical measured maritime wireless channel in VHF (Very-High Frequency) for SANET system. Also, by considering the frame structure including preamble, guard time and pilots for both single and multi-carrier systems, the BER (Bit Error Rate) performances are evaluated and analyzed in the aspects of channel compensation and channel coding techniques. Based on the simulation results, optimal modulation & coding schemes are suggested for SANET. That is, in single-carrier system by using differential modulation schemes, channel compensation is not necessary. However, channel coding is helpful to achieve additional gain. On the other hand, when 16-QAM modulation is employed in multi-carrier system, the implementation of both channel compensation and channel coding techniques show huge performance gain for various of K values, which are related to different maritime environments, and the rolling effects of wave.

※ 본 논문은 국토해양부의 연구사업인 “해양 RF 기반 선박용 Ad-hoc 네트워크 개발”과제에서 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

* 인하대학교 전자공학과 이동통신연구소(connection83@naver.com, huibing_zxo@163.com, khchang@inha.ac.kr)

** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(sgkim@moeri.re.kr, smkim@moeri.re.kr, yklim@moeri.re.kr)

논문번호 : KICS2011-01-053, 접수일자 : 2011년 1월 24일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 11일

I. 서 론

현재 해상에서는 전송거리가 긴 MF/HF 대역과 VHF 대역을 주로 사용하여 선박 간, 또는 선박과 지상국 간의 통신을 수행하고 있다. MF/HF 대역의 경우 PACTOR-III 모뎀이 널리 사용되고 있으며, 일반적으로 4,000km에서 최대 40,000km의 전송 거리를 갖는다. LA에서 한국 간의 거리가 10,000km라는 점을 고려한다면, 한 홉으로 지상의 기지국과 연결이 가능하다. MF/HF 대역이 전송거리가 길다는 장점을 갖지만, 낮은 데이터 전송률의 단점이 있다. 이러한 전송거리와 데이터 전송률의 한계를 극복하기 위해 위성통신을 이용하기도 하지만, 이는 많은 비용이 들기 때문에 물류비를 증가 시키는 단점이 있다. VHF 대역에서 사용하는 AIS (Automatic Identification System)는 통신 장비가 아닌, 항해 장비로 분류되며 선박이 안전하게 운항을 하기 위한 정보만을 제공해주는 시스템이나, 최근 AIS는 가장 중요한 통신 장비로 주목받고 있다. 즉, 항해 장비의 기능뿐만이 아니라, 위성과의 통신, 레이더와의 연계 등 다양한 기능을 통합한 시스템으로, 차세대 해상 이동 통신의 기본 시스템으로 진화하고 있다.^[1,2]

최근의 발전된 통신 기술을 바탕으로 많은 국가들에서는 해상통신에 새로운 장비를 추가하거나 기존 장비를 업그레이드할 것을 요구하고 있다. IMO (International Maritime Organization)에서는 이러한 의견을 검토하여 새로운 시스템의 도입 여부를 결정하기 위해 ITU(International Telecommunication Union), IEC(International Engineering Consortium) 등 여러 국제기관들과 관련 규제 및 기술적 특성에 관한 협의를 하고 있다. 한 예로, World Radiocommunication Conference인 Resolution 342 (WRC-2000)에서는 해상이동업무에 분배된 VHF 대역에서 새로운 디지털 기술을 사용할 필요성이 증대되어, 해상이동업무를 위한 VHF 대역의 새로운 디지털 기술을 사용할 것을 고려하도록 결의하였다. 이를 위해, ITU-R M.1842-1에서는 4개의 Annex에서 해상이동업무를 위한 차세대 VHF 대역 디지털 통신에 사용할 VHF 데이터 시스템을 권고하고 있다.^[3]

프랑스는 500kHz 대역에서 운용하는 디지털 방송 시스템을 제안하였으며, 이 시스템의 대역은 오랫동안 전신 모드로 선박에서 조난 및 안전 통신을 위해 사용되어 왔고, 600km 정도의 전송 범위를 가진다. 이 시스템은 안전 및 보안과 관련된 정보를 해안에서 선박으로 방송하도록 설계된 것이다. ITU -R M.1842-1

권고안의 Annex 1을 따르는 특성을 갖는 노르웨이의 Telenor 해상 VHF 데이터 시스템은 수 년 동안 노르웨이 해역에서 운용되어 왔으며, 현재 노르웨이 전역 뿐만 아니라, 북해와 노르웨이 해 일부에서 서비스 되고 있다. 또한, 싱가포르에서는 해안에 RAS (Radio Access Station)를 설치하여 육상에서 최대 15km에 이르는 지역까지 고속 무선 통신을 제공하는 세계 최초의 Wireless-broadband- access for SEaPORT (WISEPORT) 서비스를 시작하였다.^[1,2,4]

이처럼 전송거리와 데이터 전송률에 대한 문제점을 해결하고 비용을 줄이기 위한 차세대 해상 통신 시스템의 개발 필요성이 높아지고 있다. 항만의 경우 RAS를 설치함으로써, 기존의 육상에 구성된 통신 시스템을 적용하는 것이 가능하지만, RAS의 전송 범위를 벗어나는 연안과 대양의 경우 직접적인 네트워크를 구성하는 것이 불가능하다. 이로 인해 애드혹을 이용한 선박 간 애드혹 네트워크 (Ship Ad-hoc NETWORK: SANET)의 개발이 필요하다.

그림 1은 SANET 해상 무선 통신망을 구성하기 위하여 제안된 시스템 구조를 보여준다. 그림에 표시된 실선, 점선, 흰색선의 링크는 각각 UHF 대역, VHF 대역, MF/HF 대역을 나타낸다. 각각의 선박은 VHF 대역에서 애드혹 네트워크를 구성하게 되는데, 이로 인해 선박 간 필요한 정보를 주고받을 수 있다. 이러한 VHF 모뎀의 전송거리인 30km 안에 네트워크를

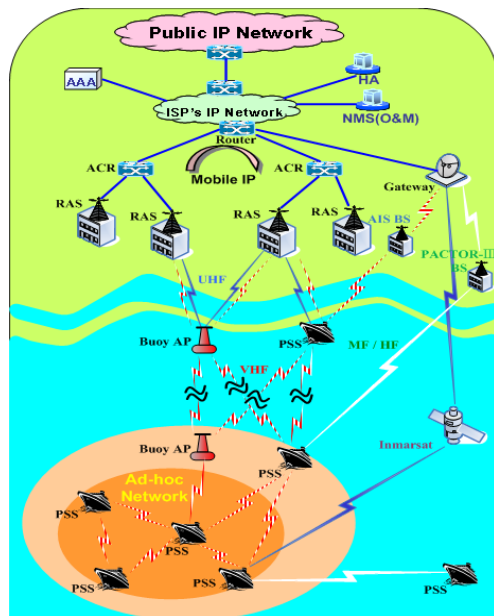


그림 1. SANET을 이용한 해상 무선 통신망 구조

구성할 다른 선박이 존재하지 않는 경우에는, 기존의 MF/HF 모뎀을 사용하여 통신을 한다. MF/HF 대역의 경우 전송거리가 4,000km에서 최대 40,000km까지 지원되기 때문에 육상의 MF/HF 시스템 기지국과 한 홉으로 통신이 가능하다.^[1]

II. MANET과 AIS의 무선 전송 규격

2.1 MANET 무선 전송 규격

MANET (Mobile Ad-Hoc Network)은 각 노드들이 기반 구조의 도움을 받지 않고 스스로 라우터의 역할과 각 통신의 주체들의 역할을 해내는 노드로 구성된 네트워크를 말한다. 이러한 네트워크는 전쟁, 천재지변 등과 같이 기반 구조가 없거나 파괴되어지는 경우, 신속하게 네트워크를 구축 할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 현재 활발히 연구가 진행되고 있지만, MANET에서는 끊임없이 이동하는 노드들에 의하여 고정된 네트워크 토폴로지를 구성할 수 없다. 그러므로 통신을 하기 위하여 경로를 설정하는 새로운 라우팅 프로토콜이 필요하게 되고, 동시에 노드 간의 정확한 동기가 요구되어 진다. 그림 2는 MANET 구성의 한 예를 나타낸다.^[5]

MANET의 개념은 블루투스, WLAN 등에서 이용되고 있으며, 각 무선 전송 규격은 IEEE 802.15, IEEE 802.11 등에서 규정하고 있다. 그 한 예로 IEEE 802.11 기반 표준인 WLAN에서는 DCF (Distributed Coordination Function)를 통하여 AP(Access Point) 제어 없이 단말 간 직접적인 통신이 가능한 애드 혹 모드를 지원하고 있다.^[6] 그림 3은 IEEE 802.11의 PPDU(Physical layer convergence procedure Protocol Data Unit) 구조를 나타낸다.

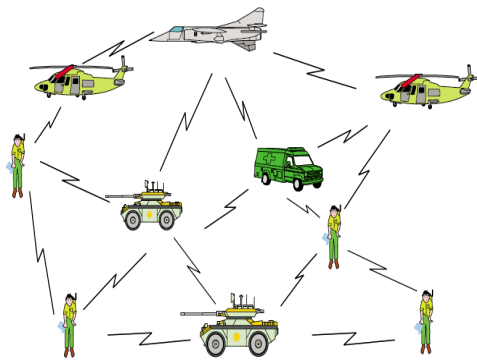


그림 2. MANET 구성의 한 예

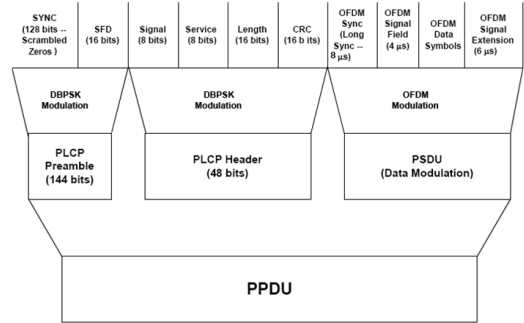


그림 3. IEEE 802.11 PPDU 구조

2.2 AIS의 무선 전송 규격

AIS는 VTS (Vessel Traffic Service) 데이터 통신을 이용하여, 인접한 선박 및 VTS 기지국과 선박의 위치, 속도, 방향등의 정보를 교환함으로써 선박 사고를 예방해주는 시스템이며, 국제해사기구 IMO의 SOLAS (Safety Of Life At Sea) 국제회의에서 300톤 이상의 화물선과 모든 여객선에 AIS의 사용을 요구하고 있다.

AIS의 무선 전송 규격은 ITU-R M.1371에서 정의하고 있으며, 표 1은 AIS의 주파수 관련 규격을 나타낸다. AIS는 ITU-R RR (Radio Regulations) Appendix18과 ITU-R M.1084-4에 준수하여 VHF 대역에서 12.5kHz와 25kHz 두 개의 대역을 허용한다.^[7] 대역폭에 따라 협대역과 광대역으로 구분하고, 각 RF 주파수는 156.025MHz와 162.025MHz를 사용한다. 또한, ITU-R RR Appendix18에서는 해상 VHF 대역을 이용한 새로운 무선 통신 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으며, 국제해사기구 IMO는 각 1997년과 2007년에 열린 WRC-97와 WRC-07에서 표 1과 같이 양방향 VHF 대역 중 161.975MHz와 162.025MHz를 AIS 전용 채널로 지정하고, 새로운 해상 VHF 데이터 시스템을 수용할 수 있도록 RR Appendix18의 채널들을 재 할당하였다.^[2]

표 2는 AIS의 무선 전송 방식을 나타낸다. 원천 부호화는 NRZI, 변조 방식은 각 대역마다 변조의 주파수 기준이 다른 GMSK와 FM방식을 채택한다. 반면에, FEC, 인터리빙, 스크램블링 기법은 사용하지 않는다. AIS는 2개의 채널을 가지고 있으며, 그림 4(a)와 같이 1분 길이의 프레임과 2250개의 패킷들로 구성되어, 1분 동안 4500번의 데이터 교환이 가능하다.^[7,8] 그림 4(b)는 AIS의 패킷 구조를 나타내고 있다. 한 패킷의 총 길이는 256비트이며, 표3에 각 구조의 길이와 특징을 정리하였다. 패킷 구조에서 프리앰블은 혼련

표 1. AIS의 주파수 관련 규격

Symbol	Parameter Name	Low Setting	High Setting
PH.RFR	Regional frequencies (range of frequencies within RR Appendix 18) ⁽¹⁾ (MHz)	156.025	162.025
PH.CHS	Channel spacing (encoded according to RR Appendix 18 with footnotes) ⁽¹⁾ (kHz)	12.5	25
PH.AIS1	AIS 1 (default channel 1) (ch 87B), (2087) ⁽¹⁾ (see § 2.4.3) (MHz)	161.975	161.975
PH.AIS2	AIS 2 (default channel 2) (ch 88B), (2088) ⁽¹⁾ (see § 2.4.3) (MHz)	162.025	162.025
PH.CHB	Channel bandwidth (see § 2.1.3)	Narrow	Wide
PH.BR	Bit rate (bit/s)	9600	9600
PH.TS	Training sequence (bits)	24	24
PH.TST	Transmitter settling time (ms): Transmit power within 20% of final value, Frequency stable to within ±1.0 kHz of final value	≤ 1.0	≤ 1.0
PH.TXP	Transmit output power (W)	2	12.5

(1) See Recommendation ITU-R M.1084, Annex 4.

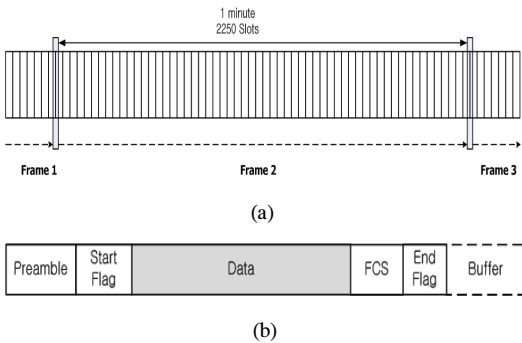


그림 4. AIS의 (a) 프레임 구조 (b) 패킷(슬롯) 구조

표 2. AIS의 무선 전송 방식

Symbol	Parameter Name	Value
PH.DE	Data Encoding	NRZI
PH.FEC	FEC	Not used
PH.IL	Interleaving	Not used
PH.BS	Bit Scrambling	Not used
PH.MOD	Modulation	Bandwidth adapted GMSK/FM

NRZI: Non-Return to Zero Inverted.

표 3. AIS의 패킷 구성

Components	Length	Description
Ramp up	8 bits	T0 to T1
Training Sequence	24 bits	Necessary for synchronization
Start Flag	8 bits	In accordance with HDLC (7E _h)
Data	168 bits	Default
CRC	16 bits	In accordance with HDLC
End Flag	8 bits	In accordance with HDLC (7E _h)
Buffer	24 bits	Bit stuffing distance delays, repeater delay and jitter
Total	256 bits	

HDLC: High-level Data Link Control

시퀀스로 구성되어 있고, 비트 패턴은 NRZI로 변조되어 start flag 전에 전송된다. start flag와 end flag는 패킷의 시작과 끝을 알려주며, 16진수 7E 값을 사용한다. 또한, 데이터와 구분하기 위하여 비트 스테핑은 사용하지 않는다. FCS (Frame Check Sequence)는 검사 합을 구하기 위해 CRC 16-bit polynomial을 사용하고, 버퍼는 비트 스테핑을 위한 4비트, 거리 지연 시간을 위한 12비트, 리피터 지연시간을 위한 2비트, 동기화 지터를 위한 6비트로 구성되며, 총 24비트의 길이를 가지고 있다.

III. SANET 채널 환경

3.1 해상 VHF 채널 분석

VHF 파는 대기층을 투과하므로 대기에서 반사파가 존재하지 않기 때문에 직접파 및 지면파 해수면에서의 반사파와 빌딩 등과 같은 장애물에 의한 산란파 등으로 전파된다. VHF 전파 속도는 온도, 압력, 수증기압의 함수로서, 일반적으로 고도가 증가할수록 전파 속도가 증가하며 하향 굴절 현상이 발생한다. 따라서, 그림 5와 같이 실제 가지거리보다 멀리 전파되는 증가된 지구반경에 의한 등가 지구 반경으로 모델링 될

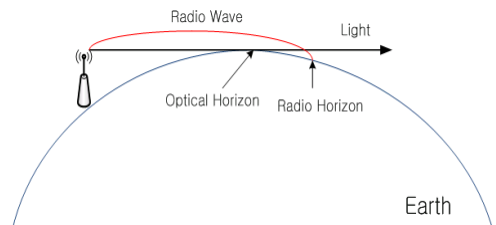


그림 5. VHF 채널의 전파 특성

수 있다. 표준 기상 조건에서의 등가 지구 반경은 식 (1)과 같다.^[9]

$$r_{eq} = \frac{4}{3} \times r_{earth} \quad (1)$$

3.2 VHF 대역 해상 채널 측정

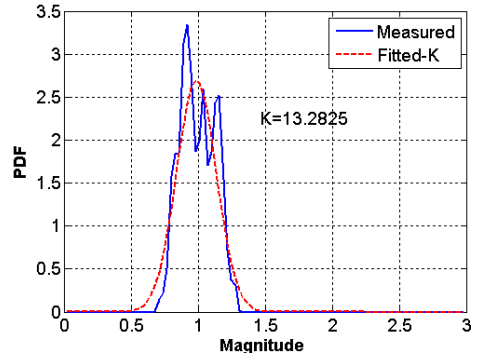
그림 6의 경남 거제시 남부면 갈곶리에서 해상 VHF 대역 채널 모델링을 위한 채널 측정을 실시하였다. 측정 조건은 표 4와 같이 안테나는 송수신기 모두 수직 whip 안테나를 사용하며, 송신기는 육지에 고정, 수신기는 선박에 고정하여 측정한다. 송신 신호는 단일 톤 신호를 사용하며, 송수신기 사이의 거리를 각 5km, 10.6km로, 데이터 처리구간은 10초로 설정한다. 그림 7은 표 4의 조건에서 측정한 확률밀도함수와 K 값에 따른 라이시안 확률밀도함수를 비교한 결과를 나타낸다. 실선은 실측한 확률밀도함수를, 점선은 커브 피팅을 위한 K값에 따른 이론적인 확률밀도함수를 나타낸다. 측정거리가 5km인 경우 K값은 13dB, 10.6km인 경우의 K값은 17dB에 근사한 값을 보인다. 측정 결과 K값은 해상 환경, 파도에 의한 선박의 움직임 등에 따라 10dB에서 20dB까지 변화하나, 반드시 거리에 비례하는 경향을 보이지는 않음을 확인하였다.



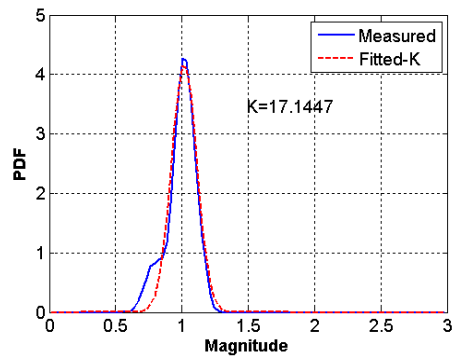
그림 6. VHF 채널 측정 장소

표 4. 해상 VHF 채널 측정 조건

	측정 조건
측정 장소	경남 거제시 남부면 갈곶리
안테나	수직 Whip 안테나 / Tx:육지에 고정 / Rx:선박에 고정
전송신호	Sing-tone 신호
송수신기 거리	5 km, 10.8 km
데이터 처리구간	10 sec



(a)



(b)

그림 7. 해상환경에서 실측한 확률밀도함수와 K 값에 따른 이론적인 라이시안 확률밀도함수 (a) 5 km (b) 10.6 km

3.3 SANET 채널 모델링

해상 VHF 채널에서 해수면에 의한 다중경로 영향을 분석하기 위하여 그림 8(a)와 같은 2-ray 모델을 가정한다. 이는 선박이 해상에서 항해 중 주위에 전파를 반사하는 구조물이 존재하지 않기 때문에, 해상 통신 채널환경에 적합한 채널 모델로 판단된다. 본 논문에서 선박 간의 거리는 VHF의 최대 통신 거리인 50km, 안테나의 높이는 20m로 하여 직접 경로에 대한 간접 경로의 전파 지연 시간 5.33×10^{-10} s을 계산하였고, ITU-R M.1842-1 권고안의 각 Annex 중 심볼구간이 가장 짧은 Annex 4의 시스템과 비교하여도 지연시간이 심볼구간의 10^4 배 이상 작기 때문에, 경로 간 지연 시간을 무시한 그림 8(b)와 같은 1-path 라이시안 채널로 모델링 할 수 있다. 라이시안 페이딩 채널은 송신된 신호가 반사, 산란, 굴절 등에 의하여 손실되지 않고, 직접 수신되는 신호가 존재할 경우에 해당된다. 이 때, 확률 변수 x에 대하여 라이시안 확률밀도함수는 식 (2)와 같다.

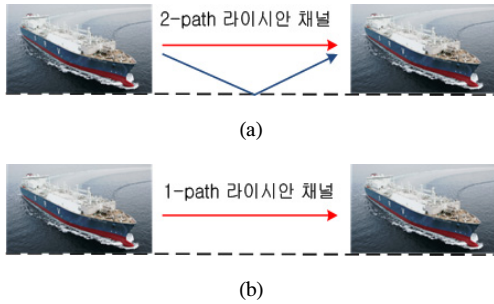


그림 8. 해상 채널 모델 (a) 지연시간을 고려한 채널 모델 (b) 지연 시간을 고려하지 않은 채널 모델

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

여기서, $I_0(\cdot)$ 는 수정된 제1종 0차 베셀함수를 나타내며, v^2 은 직접경로 전력성분을, $2\sigma^2$ 은 레일레이 확률 밀도함수에서 산란 성분들의 합을 나타낸다. 그림 9에 σ 값을 1로 고정할 후, v 에 따른 라이시안 분포의 변화를 나타낸다.^[10]

Flat 라이시안 채널은 직접 경로 성분과 간접 경로 성분을 가지는 라이시안 페이딩 채널로 모델링된다. 라이시안 페이딩 채널 모델은 식 (3)과 같이 직접 경로 성분의 신호전력과 간접 경로 성분의 신 전력 비인 K-factor를 선택하여 채널의 특성을 변경 할 수 있다.^[11]

$$\sqrt{\frac{K}{K+1}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \times (\text{레일레이 페이딩 모델}) \quad (3)$$

여기서, 라이시안의 K-factor는 식 (4)와 같이 표현 된다. 총 전력이 1인 경우, K가 0이면 직접경로가 존재하지 않기 때문에 크기 분포는 레일레이 확률밀도 함수를 갖게 되며, K가 증가 할수록 가우시안 분포에

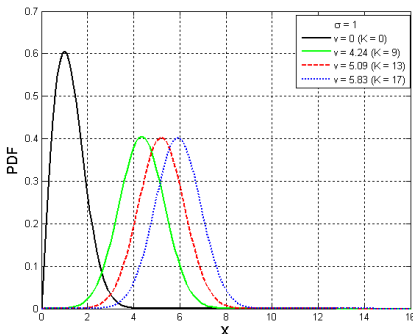


그림 9. 라이시안 분포 변화

접근한다. 일반적으로 K값이 -40dB 정도이면 레일레이 채널로 가정하고, 15dB 이상이면 가우시안 채널로 가정할 수도 있다.

$$K = \frac{v^2}{2\sigma^2} \quad (4)$$

본 논문에서 레일레이 페이딩 모델은 도플러 확산을 표현할 수 있는 Jake 모델을 사용하여 구성하고, K 값은 3.2절에서 측정된 두 가지의 K값인 21dB와 56dB를 기준으로 사용한다. 또한, 육상 통신 라이시안 채널 모델에서 일반적으로 사용하는 K값인 9dB 경우와 비교하여 성능을 분석한다. 선박의 이동성은 유속의 저항을 고려하여 최대 60km/h (약 32knot)로 설정한다. 그림 10에 식 (5)의 라이시안 채널 하에서 QPSK BER 성능의 이론값과 시뮬레이션 결과를 비교한다.^[12] 각 K값에 따라 이론치와 시뮬레이션 결과가 일치하며, -40dB일 경우 레일레이 페이딩 채널 특성을 보이고, 13dB, 17dB일 경우 AWGN 채널과 거의 유사한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

$$P_e = \frac{3}{4} - \sqrt{\frac{1}{\pi}} \left\{ T_1 + \sqrt{\frac{1}{\pi}} T_2 \right\} \quad (5)$$

여기서, T_1, T_2 는 식 (6), (7)과 같다.

$$T_1 = \exp(-K) \sqrt{\frac{\gamma}{1+K+\gamma}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Gamma(m+\frac{3}{2})}{(m!)^2} \left(\frac{K(1+K)}{1+K+\gamma}\right)^m {}_2F_1\left(1, m; \frac{3}{2}; -\frac{\gamma}{1+K}\right) \quad (6)$$

$$T_2 = \exp(-K) \sqrt{\frac{\gamma}{1+K+2\gamma}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{K^m}{m!} \sum_{j=0}^m \left(\frac{K(1+K)}{1+K+2\gamma}\right)^j {}_2F_1\left(1, j+1; \frac{3}{2}; -\frac{\gamma}{1+K+2\gamma}\right) \quad (7)$$

여기서, K는 라이시안 K-factor를 나타내며, ${}_2F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$ 는 쿠머함수 (Kummer function), γ 는 평균 SNR을 나타낸다.

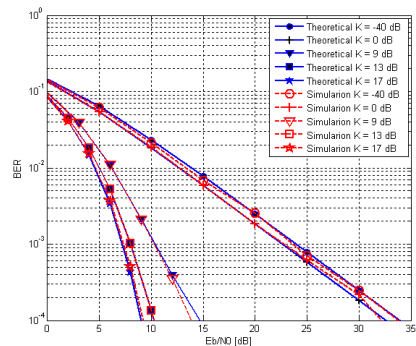


그림 10. Rician 페이딩 채널에서 QPSK의 BER 성능 분석

IV. SANET 무선 전송 규격

4.1 ITU-R M.1842-1

World Radiocommunication Conference인 Resolution 342 (WRC-2000)에서는 해상이동업무에 분배된 VHF 대역에서 새로운 디지털 기술을 사용할 필요성이 증대되어, 해상이동업무를 위한 VHF 대역의 새로운 디지털 기술을 사용할 것을 고려하도록 결의하였다. 이를 위해, ITU-R M.1842-1에서는 4개의 Annex에서 해상이동업무를 위한 차세대 VHF 대역 디지털 통신에 사용할 VHF 데이터 시스템을 권고하고 있다. 표 5는 ITU-R M.1842-1의 각 Annex에 존재하는 VHF 데이터 시스템의 파라미터를 나타낸다.

Annex 1의 VHF 데이터 시스템은 RR Appendix 18에 규정된 25kHz의 협대역 단일 반송파 $\pi/4$ -DQPSK와 $\pi/8$ -D8PSK 변조방식을 사용하고, CS-TDMA (Carrier Sense Time Division Multiple Access) 다중접속방식을 사용한다. $\pi/4$ -DQPSK와 $\pi/8$ -D8PSK일 경우, 각기 28.8kbps와 43.2kbps의 전송률을 갖는다. Annex 2의 VHF 데이터 시스템은 RR Appendix 18에 규정된 25kHz의 협대역 단일 반송파 4-level GMSK 변조방식을 사용하고, 21.1 kbps의 전송률을 갖으며, 다중접속방식은 TDMA (Time Division Multiple Access)를 사용한다. Annex 3의 VHF 데이터 시스템은 RR Appendix 18에서 규정된 2개의 협대역을 50kHz의 광대역으로 사용하여 구성한다. 16개의 다중반송파 16-QAM 변조기를 사용하고, 다중접속방식은 CS-TDMA를 사용하며, 153.6kbps의 전송률을 갖는다. Annex 4의 VHF 데이터 시스템은 RR Appendix 18에서 규정된 4개의 협대역으로 구성된 100kHz의 광대역을 사용하고, 32개의 다중반송파 16-QAM 변조기를 사용하며, 307.2kbps의 전송률을 갖는다. 또한, 다중접속 방식으로 CS-TDMA를 사용한다.^[3]

표 5. ITU-R M.1842-1의 Annex별 시스템 파라미터

	Annex 1	Annex 2	Annex 3	Annex 4
대역폭	25 kHz	25 kHz	50 kHz	100 kHz
전송률	28.8 kbit/s or 43.2 kbit/s	21.1 kbit/s	153.6 kbit/s	307.2 kbit/s
다중접속 방식	CS-TDMA	TDMA	CS-TDMA	CS-TDMA
변복조기	$\pi/4$ -DQPSK or $\pi/8$ -D8PSK	4-level GMSK	16-QAM	16-QAM
부반송파 수	1	1	16	32

4.2 SANET을 위한 시스템 파라미터 및 프레임 구조 제안

본 논문에서는 ITU-R M.1842-1에서 권고하는 4개의 Annex중, 표 6과 같이 Annex 1, 3, 4의 VHF 데이터 시스템을 기초로 하여 SANET 시스템을 구성한다.

협대역을 사용하는 단일 반송파 $\pi/4$ -DQPSK 변조 방식의 특징은 심볼 간의 위상 차이를 측정하여 변조하는 방식으로, 위상의 궤적이 원점을 지나지 않기 때문에 복소 포락선의 신호의 최대전력 대 평균전력 비가 감소한다. 또한, 비동기식 시스템이기 때문에 동기식 시스템과 비교하여 수신단의 복잡도가 낮다는 장점이 있는 반면, 동기 수신기에 비교하여 열화된 BER (PER) 성능을 보인다. 단일 반송파 $\pi/8$ -D8PSK 변조 방식은 $\pi/4$ -DQPSK와 유사한 특성을 갖는다.

광대역을 사용하는 다중 반송파 16-QAM 변조방식의 특징은 OFDM을 사용하며 한 심볼에 4비트를 전송함으로써, 높은 전송 효율을 보장하는 장점이 있다. 50kHz와 100kHz의 광대역에서는 RR Appendix 18에서 규정된 협대역을 통합하여 사용하며, 대역을 통합하는 방법에는 근접한 연속적인 대역을 사용하는 방법과 분산된 대역을 사용하는 방법이 있다. 또한, 모든 시스템은 다중 접속 방식으로 ASO-TDMA (Ad-hoc Self Organizing TDMA)를 사용하며, 이중화 방식은 반이중화 방식을 사용한다.^[13]

ASO-TDMA 다중접속방식은 애드혹 통신을 사용하는 SANET을 위해 제안된 다중접속방식이다. IP (Initialization Phase), NEP (Network Entry Phase), DTP (Data Transmission Phase)의 3단계로 구성되고, 기본적으로 한 프레임의 길이는 1분, 각 프레임 패킷은 2250개로 구성된다. 데이터 전송 방식은 SO-TDMA (Self Organizing TDMA)와 CS-TDMA를 혼합한 특징을 갖으며, 한 프레임이 여러 개의 서브 프레임으로 구성된다. 서브 프레임 수는 기지국의 거리에 따라 구분된 홉의 수와 동일하며, 각 홉 안에

표 6. SANET 시스템 파라미터

대역폭	단일 반송파		다중 반송파
	25 kHz	25 kHz	50 kHz 100 kHz
전송률	28.8 kbps	43.2 kbps	153.6 kbps 307.2 kbps
다중접속 방식	ASO-TDMA	ASO-TDMA	ASO-TDMA
이중화 방식	Half-Duplex	Half-Duplex	Half-Duplex
변복조기	$\pi/4$ -DQPSK	$\pi/8$ -D8PSK	16-QAM
부반송파 수	1	1	16 32

존재하는 선박들은 배정된 서브 프레임을 사용하여 에드후프 통신을 하게 된다.

본 논문에서는 SANET을 위한 채널 보상 기법을 제안하기 위하여, 그림 10의 단일 반송파용 프레임 구조와 그림 11의 다중 반송파용 프레임 구조를 사용한다.

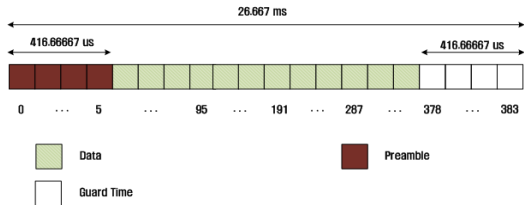


그림 10. 단일 반송파용 SANET을 위한 프레임 구조

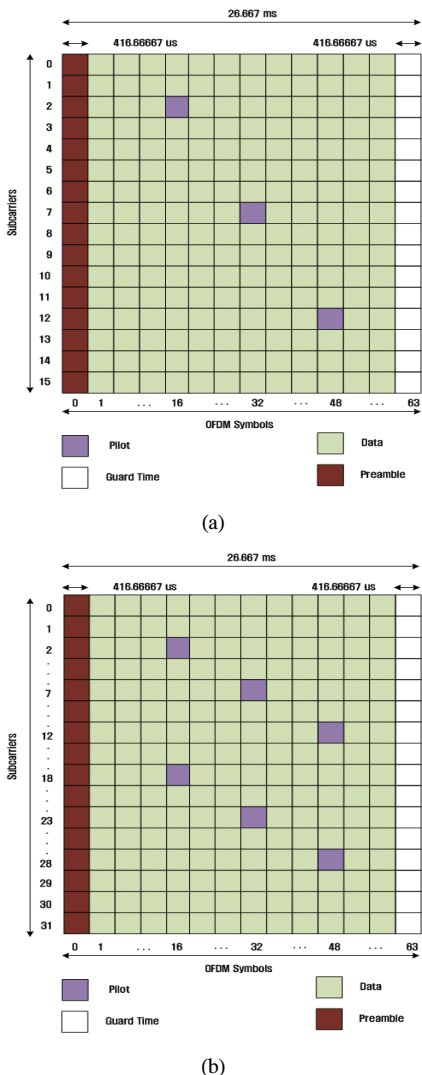


그림 11. 다중 반송파용 SANET을 위한 프레임 구조 (a) 50 kHz 대역 (b) 100 kHz 대역

다. 단일 반송파용 프레임 구조 중, 처음 4개의 심볼은 동기화를 위한 프리앰블이고, 마지막 4개의 심볼은 전송 지연을 고려하기 위한 guard time이다. 그림 11(a)에서 보이는 50kHz의 광대역을 위한 다중 반송파용 프레임 구조 중 각 부반송파의 첫 번째 심볼은 동기화 채널 측정을 위한 프리앰블, 마지막 심볼은 전송지연 등을 위한 guard time을 나타낸다. 트래픽 영역의 3개 심볼은 채널 측정을 위한 파일럿이다. 그림 11(b)는 50kHz의 광대역 프레임 구조의 확장형으로 100kHz의 광대역을 위한 프레임 구조를 보인다.

V. SANET 적용을 위한 채널 보상 방식과 채널 부호화 방식

5.1 SANET 적용을 위한 채널 보상 기법 제안

본 논문에서는 ZF (Zero-Forcing) 채널 보상 기법을 사용하여, SANET 시스템의 채널 보상에 대한 성능을 분석한다. ZF 채널 보상 기법은 ZF 채널추정 기법과 ZF 등화기로 구성된다. ZF 채널추정 기법은 송수신단에서 알고 있는 참조 신호를 전송하여 식 (5)와 같이 참조 신호의 채널 값 $\hat{H}_p(k)$ 을 추정한다.

$$\hat{H}_p(k) = \frac{Y_p(k)}{X_p(k)} \quad (5)$$

여기서, k 는 부반송파의 인덱스이고, $X_p(k)$, $Y_p(k)$ 는 송수신된 참조 신호의 전력이다. 그 다음에, 식(6)과 같은 선형 보간법을 이용하여 참조 신호가 존재하지 않는 bin의 채널 값 $\hat{H}(k)$ 을 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{H}(k) &= \hat{H}(pN_{occupied} + v) \\ &= [\hat{H}_p(p+1) - \hat{H}_p(p)] \frac{v}{N_{occupied}} + \hat{H}_p(p) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, p 는 참조 신호의 인덱스이고, $N_{occupied}$ 는 참조 신호를 가진 부반송파의 수이며, v 는 참조 신호의 간격을 나타낸다. ZF 등화기는 추정된 채널 값 $\hat{H}(k)$ 을 이용하여 식 (7)과 같이 보상된 $\hat{X}(k)$ 값을 구한다.^[14]

$$\hat{X}(k) = \frac{Y(k)}{\hat{H}(k)} \quad (7)$$

단일 반송파 시스템의 경우, differential 변조방식 채택에 의하여 별도의 채널추정 및 보상을 하지 않는다

다. 반면에 다중 반송파 시스템의 경우에는 그림 12와 같이 $K=9$ 에서 채널 보상을 하지 않으면 error-floor가 발생하고, 모든 K 값에서 채널 보상을 하지 않으면 error-floor가 발생하여, target BER 10^{-4} 에서 원하는 E_b/N_0 값을 얻을 수 없다. 따라서 다중 반송파 시스템의 경우에는 ZF 채널보상 방식을 적용하기로 결정한다.

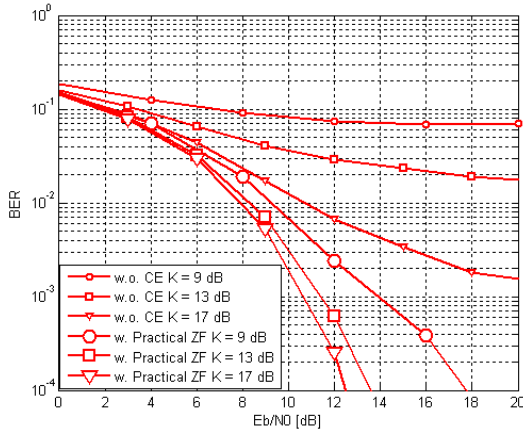


그림 12. 다중 반송파와 SANET을 위한 채널 보상 기법의 BER 성능 분석

5.2 SANET 적용을 위한 채널 부호화 기법 제안

본 논문에서는 AWGN 환경과 랜덤오류 정정에 좋은 성능을 보이는 컨볼루션 부호화 기법과, 육상 통신 시스템에서 간단한 구조로 손쉽게 좋은 부호화 이득을 얻을 수 있는 반복 부호화를 적용하여 SANET 시스템의 채널 부호화에 대한 성능을 분석한다. 컨볼루션 부호화기는 구조길이 9의 1/2 부호율 컨볼루션 부호화기를 사용하며, 반복 부호화기는 1/2, 1/3 부호율을 갖는 2가지 부호화 기법을 적용한다. 또한, 5.1절에서의 결론에 의하여 단일 반송파 SANET에서는 채널 보상을 적용하지 않고, 다중 반송파 SANET의 경우에는 ZF 채널 보상 방식을 적용하여 성능을 분석한다.

컨볼루션 부호화는 레지스터를 사용하여, 현재 입력과 과거 입력의 조합으로 부호화하는 기법이다. 컨볼루션 부호화의 특징은 AWGN 채널과 랜덤오류 정정에 좋은 성능을 보이며, 쉽게 연관성 복호화를 구현할 수 있다는 것이다. 컨볼루션 부호를 복호화하기 위한 비터비 복호기법은 2개의 이전 노드만을 사용하여 각 상태 노드들에 도달할 수 있도록 단순화하고, 각 노드에 수신된 수열과 가장 일치하는 최소 거리 경로만 유지하도록 함으로서, 최대 가능성을 계산하도록

한다. 비터비 복호기는 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)를 사용하여 최대 성능 이득을 얻을 수 있고, 하드웨어 구현이 쉽다는 장점을 가지고 있다.

반복 부호화는 한 비트를 여러번 반복하여, 전송하는 부호화 기법이다. 반복 부호의 가장 큰 장점은 부호화기를 쉽게 구현할 수 있다는 것이다. 반복 부호의 복호화를 위하여 가장 많이 사용되는 Majority Logic Decoding을 적용한다. $(n, 1)$ 의 부호 워드를 갖는 반복 부호화기에서 n 은 $2t+1$ 로 표현 할 수 있고, 식 (8)과 같이 해밍 가중치 w 값과 t 값을 비교하여, w 가 t 보다 크면 1로, 작거나 같으면 0으로 복호화한다. 그러나, 이 방법은 n 이 홀수일 경우에만 적용할 수 있다. n 이 짝수일 경우, 식 (9)와 같이 I 채널 신호 전력과 Q 채널 신호 전력 값을 합하여 2로 나누고, 이 값을 기준 전력과 비교하여 크거나 같으면 1로, 작으면 0으로 복호화 하는 기법을 사용하며, 이 외 별도의 복조기가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 반면에 반복 부호화는 AWGN 환경과 Flat 페이딩 채널 환경에서는 오류 정정능력이 없기 때문에 부호화의 경우 더 열화된 성능을 보인다.^[15]

$$\text{Decoding Rule } \begin{cases} 1, & w > t \\ 0, & w \leq t \end{cases} \quad (n = \text{홀수}) \quad (8)$$

$$\text{Decoding Rule } \begin{cases} 1, & \frac{I+Q}{2} \geq \text{Reference Power} \\ 0, & \frac{I+Q}{2} < \text{Reference Power} \end{cases} \quad (n = \text{짝수}) \quad (9)$$

그림 13(a)는 $\pi/4$ -DQPSK를 적용한 단일 반송파 SANET의 1/2 컨볼루션 부호화에 대한 BER 성능 곡선을 나타내며, 표 7에 정리한 것과 같이 $K=13$ dB와 17dB의 경우, 3bit-SOVA는 10^{-4} target BER에서 각기 2.4dB와 2.7dB의 부호화 이득을 보인다. 반면, 육상 통신에서 일반적으로 사용하는 $K=9$ dB에서 경관성 부호화를 한 경우, 오히려 부호화를 하지 않은 경우와 비교하여 1.9dB의 열화된 성능을 보인다. 그림 13(b)는 $\pi/8$ -D8PSK를 적용한 단일 반송파 SANET의 1/2 컨볼루션 부호화에 대한 BER 성능 곡선을 나타낸다. 표 8에 정리한 것과 같이 $K=13$ dB와 17dB의 경우, 3bit-SOVA는 10^{-4} target BER에서 각기 4dB와 3.6dB의 부호화 이득을 보인다. 따라서 단일 반송파 SANET 시스템에서는 1/2 컨볼루션 부호화 기법을 사용하기로 결정한다.

그림 14는 16QAM을 적용한 다중 반송파 SANET의 1/2 컨볼루션 부호화에 대한 BER 성능 곡선을

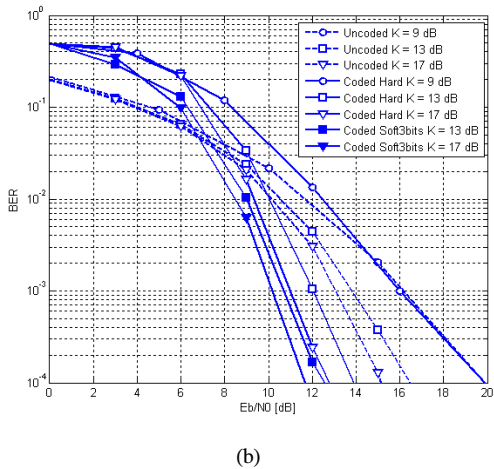
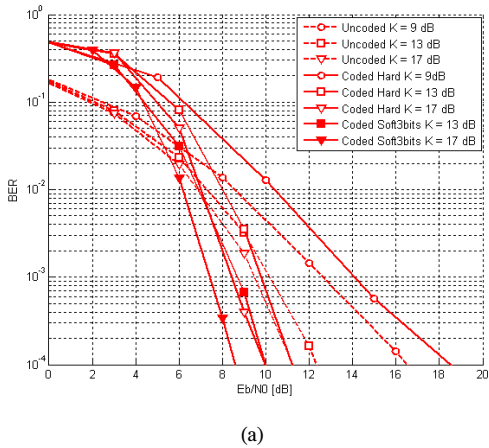


그림 13. 단일 반송파 SANET에 1/2 컨볼루션 부호화 기법을 적용한 경우의 BER 성능 분석 (a) $\pi/4$ -DQPSK (b) $\pi/4$ -D8PSK

나타낸다. 표 9에 정리한 것과 같이 $K=13\text{dB}$ 와 17dB 의 경우, 3bit-SOVA는 10^{-4} target BER에서 각기 4.4dB와 5.3dB의 부호화 이득을 보인다. 따라서 다중 반송파 SANET 시스템에도 1/2 컨볼루션 부호화 기법을 사용하기로 한다

모든 경우의 5bit-SOVA 적용에 의한 성능개선은 3bit-SOVA의 경우에 비하여 무시할 정도로 작아 3bit-SOVA를 채택하기로 한다.

$K=9\text{dB}$ 에서 부호화 이득이 없거나 오히려 열화된 성능을 보이는 이유는 SANET 채널 특성 상 시간에 대한 변화가 느린 Flat 페이딩 특성을 가지고 있어 시간 축에서 다이버시티 이득을 얻지 못하여 작은 부호화 이득 만을 얻는 반면, 부호화의 잉여 신호에 인한 신호 전력 손실에 의하여 결론적으로 부호화 이득이 발생하지 않기 때문이다.

표 7. $\pi/4$ -DQPSK를 적용한 단일 반송파 시스템의 BER 성능 분석

Target BER= 10^{-4}	K=9 dB	K=13 dB	K=17 dB
부호화 적용 안 한 경우	16.5 dB	12.3 dB	11.2 dB
경관정 복호기	18.6 dB	11.2 dB	9.9 dB
3bit-SOVA		9.9 dB	8.5 dB

표 8. $\pi/8$ -D8PSK를 적용한 단일 반송파 시스템의 BER 성능 분석

Target BER= 10^{-4}	K=9 dB	K=13 dB	K=17 dB
부호화 적용 안 한 경우	19.92 dB	16.5 dB	15.1 dB
경관정 복호기	19.94 dB	13.9 dB	12.8 dB
3bit-SOVA		12.5 dB	11.5 dB

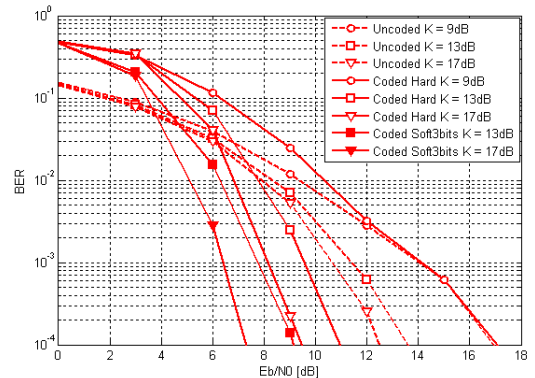
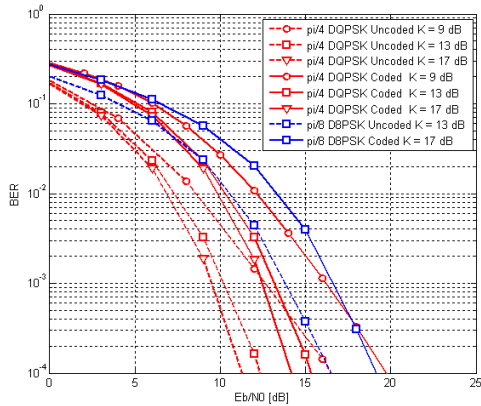


그림 14. 다중 반송파 SANET에 1/2 컨볼루션 부호화 기법을 적용한 경우의 BER 성능 분석

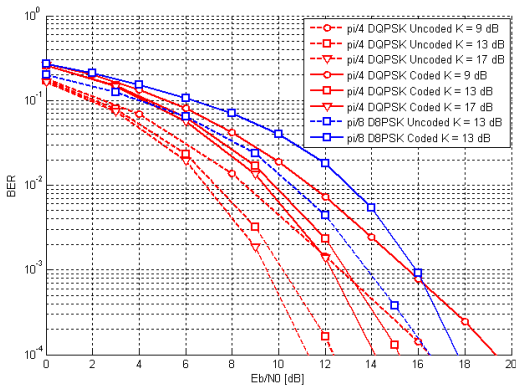
표 9. 16-QAM을 적용한 다중 반송파 시스템의 BER 성능 분석

Target BER= 10^{-4}	K=9 dB	K=13 dB	K=17 dB
부호화 적용 안 한 경우	16.9 dB	13.5 dB	12.5 dB
경관정 복호기	17.1 dB	10.8 dB	9.3 dB
3bit-SOVA		9.1 dB	7.2 dB

그림 15는 단일 반송파 SANET의 1/2, 1/3 반복 부호화에 대한 BER 성능 곡선을 나타낸다. 반복 부호화의 경우, 변복조기의 구조와 상관없이 오히려 더욱 열화된 성능을 보인다. 이는 반복 부호화의 특성상 AWGN 환경이나 Flat 페이딩 환경에서는 오류정정 능력이 없기 때문에, AWGN 환경과 유사한 특성을 가지고 있는 Flat 라이시안 페이딩으로 채널 모델링한



(a)



(b)

그림 15. 단일 반송파와 SANET에 반복 부호화 기법을 적용한 경우의 BER 성능 분석 (a) 1/2 반복 부호화를 (b) 1/3 반복 부호화를

SANET 채널 환경에서는 부호화의 잉여신호로 인하여 원하는 신호의 전력 손실을 가져오기 때문이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 VHF 대역 차세대 해상 통신 SANET을 위한 해상 채널의 측정 및 모델링 결과에 관하여 논하며, 이러한 해상 채널 하에서 채널 보상과 채널 부호화를 적용한 SANET 시스템의 성능을 평가하여 적용 가능한 기법을 제안하였다. 이를 위하여 프리앰블, guard time, 파일럿을 포함한 단일 및 다중 반송파 시스템을 위한 프레임 구조를 제안한다. 결과적으로 $\pi/4$ -DQPSK와 $\pi/8$ -D8PSK를 적용한 단일 반송파와 SANET의 경우, differential 변조방식 채택에 의하여 별도의 채널추정 및 보상을 하지 않으며, 부호화 이득을 얻을 수 있는 컨볼루션 부호화를 사용하기로

한다. 16-QAM을 적용한 다중 반송파와 SANET의 경우, 해상환경, 파도에 의한 선박의 움직임 등을 고려하여 ZF 채널 보상 기법을 적용하며, 단일 반송파 시스템에서와 같이 컨볼루션 부호화를 사용하여 부호화 이득을 얻도록 한다. 반면, 반복 부호화는 AWGN 환경이나 Flat 페이딩 환경에서는 오류정정 능력이 없기 때문에, AWGN 환경과 유사한 특성을 가지는 Flat 라이시안 페이딩으로 채널 모델링한 SANET 채널 환경에서는 오히려 더욱 열화된 성능을 보인다.

참 고 문 헌

- [1] 김영범, 김종훈, 왕우봉, 장경희, 박종원, 임용곤, “해상 환경에서의 무선 이동 통신을 위한 선박용 Ad-hoc 네트워크 운용 시나리오,” *한국해양정보통신학회 논문지*, Vol.13, No.10, pp.2097-2104, 2009. 10.
- [2] 장동원, “차세대 해상이동통신 국제 표준화 동향 연구,” *한국해양정보통신학회 추계종합학술대회*, 2010. 10, Session 4A-1.
- [3] Recommendation ITU-R M.1842-1, *Characteristics of VHF radio systems and equipment for the exchange of data and electronic mail in the maritime mobile service RR Appendix 18 channels*. 2009.
- [4] 장동원, 이영환, “유비쿼터스 해상통신망 구축을 위한 기술 동향 연구,” *주간기술동향*, No.1364, pp.14-27, 2008. 09.
- [5] Imrich Chlamtac, Marco Conti, and Jennifer J.-N. Liu, “Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges,” *Ad Hoc Networks*, Vol.1, No.1, pp.13-64, July 2003.
- [6] 이병진, 유상조, “애드 혹 네트워크에서 소스기반 다중 게이트웨이 선출 라우팅 프로토콜,” *한국통신학회지*, Vol.30, No.8A, 2005. 05.
- [7] Recommendation ITU-R M.1084-4, *Interim solutions for improved efficiency in the use of the band 156-174 MHz by stations in the maritime mobile service*. 2001.
- [8] Kazuhiko Hasegawa, Kojiro Hata, Kazuhisa Niwa, and Junji Fukuto, “Transmission evaluation of ship-borne automatic identification system (AIS) in congested waterways,” in *Proc. International Conference on ITS Telecommunications*, Oct. 2008, pp.18-23.

- [9] Peter Hoehner and Erik Haas, "Aeronautical channel modeling at VHF-band," in *Proc. Vehicular Technology Conference-Fall*, Sept. 1999, pp.1961-1966.
- [10] 조용수, 김재권, 양원경, *MIMO-OFDM 무선통신과 MATLAB*. 홍릉과학출판사, 2008.
- [11] Jan Sijbers, Arnold J. den Dekker, Paul Scheunders, and Dirk Van Dyck, "Maximum-likelihood estimation of Rician distribution parameters," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol.17, No.3, pp.357-361, June 1998.
- [12] Aniruddha Chandra, "Studies in error probability of coherent communication in rician fading channel," *MS Thesis, National Institute of Technology, India*, June 2007.
- [13] Marvin K. Simon and Mohamed-Slim Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [14] 칭양, 휘빙, 장경희, "Novel pilot-assisted channel estimation techniques for 3GPP LTE downlink with performance-complexity evaluation," *한국통신학회 논문지*, Vol.35, No.7, pp.623-631, 2010. 07.
- [15] Bernard Sklar, *Digital Communications*. Prentice Hall PTR, 2002.

전 광 현 (KwangHyun Jeon) 준회원



2009년 2월 강원대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2010년~현재 인하대학교 전자공학과 대학원 석사과정
 <관심분야> 4세대 이동통신, Mobile Ad-hoc Network, RFID/USN Systems

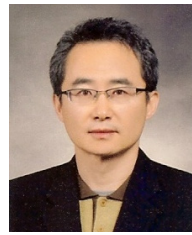
회 빙 (Bing Hui) 정회원



2005년 7월 중국 동북대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2009년 8월 인하대학교 정보통신 (공학석사)
 2009년~현재 인하대학교 정보통신 대학원

<관심분야> OFDM/MIMO Systems, MIMO Detection algorithm, WiMAX, 3GPP LTE

장 경 희 (KyungHi Chang) 종신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
 1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
 2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
 <관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID/USN Systems, Mobile Ad-hoc Network, 해상/수중 통신 등

김 승 근 (SeungGeun Kim) 종신회원



1995년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)
 2002년 8월 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
 2002년~현재 한국해양연구원 선

임연구원

<관심분야> 수중무선통신시스템 설계 및 구현, 해상디지털 통신 시스템 설계 및 구현

김 시 문 (Sea-Moon Kim) 정회원



1992년 KAIST 기계공학과 (공학사)
 1994년 KAIST 기계공학과 (공학석사)
 2001년 KAIST 기계공학과 (공학박사)
 2001년~현재 한국해양연구원 선임연구원

2004년~현재 UST 해양정보통신공학과 겸임교수
 <관심분야> 수중통신, 채널모델링

임 용 곤 (YongKon Lim)

정회원



1979년 2월 충남대학교 전기공
학과 (공학사)

1984년 2월 충남대학교 전력전
자공학과 (공학석사)

1994년 2월 아주대학교 전자공
학과 (공학박사)

1980년~현재 한국해양연구원 해
양시스템기술연구본부 책임연구원/소장

2004년~현재 과학기술연합대학원대학교 해양정보
통신공학과 정교수/겸임교수

<관심분야> 수중통신 및 네트워크, 해양통신, 선박
IT-융합 시스템, 해운 물류 등