

전투무선체계(CNRS) VHF 협대역 전술음성통신 목표 성능 분석

김재욱^{*,1)} · 박준하¹⁾ · 이철호¹⁾ · 이병규¹⁾ · 정하연¹⁾

¹⁾LIG넥스원(주) C4I연구소

Target Performance Analysis of Tactical Voice Communication on VHF Narrow-band in Combat Network Radio System

JaeUk Kim^{*,1)} · Joonhah Park¹⁾ · Chulho Lee¹⁾ · Byungkyu Lee¹⁾ · Hayeon Jung¹⁾

¹⁾C4I R&D Center, LIG NEXI, Co., Ltd., Korea

(Received 1 September 2020 / Revised 4 January 2021 / Accepted 15 January 2021)

Abstract

By analyzing the voice communication performance of the existing tactical FM radios, the performance target of the newly developing TICN combat network radio system VHF band tactical voice communication waveform was derived. In addition, a vocoder and modulation method that can satisfy the performance target and additional requirements are presented, and the expected voice communication quality is analyzed.

Key Words : CNRS(전투무선체계), VHF(초단파), Narrow-band(협대역), Tactical Voice Communication(전술음성통신), TMMR(전술다대역다기능무전기)

1. 서론

전투무선체계 CNRS(Combat Network Radio System)는 전술정보통신체계 TICN(Tactical Information Communication Network)의 부체계로 야전 환경에서 전투지휘를 위한 음성지휘통제망 및 전술데이터망을 제공하는 역할을 수행한다. Fig. 1과 같이 전술다대역다기능무전기 TMMR(Tactical Multi-band Multi-role Radio)은 전투무선체계의 주장비로 데이터 전송속도 증대, 통신 효율성 보장, 작전 수행능력 확대 등을 고려하여

개발되었다^[1]. 즉, TMMR의 신규 웨이브폼은 현재 전술음성통신 성능을 유지하면서, 네트워크 중심전 NCW(Network-Centric Warfare)에 맞춰 증가한 데이터 전송량을 감당하기 위하여 개발된 것이다.

지금까지 TMMR 요구사항 분석 및 개발은 기존 성능을 유지하는 음성통신 보다 운용 개념부터 새로 정립하는 데이터 통신 중심으로 이루어졌다. 그러나 향상된 데이터 통신 성능과 네트워크 기능을 제공하면서 동시에 전술음성통신 성능을 유지하는 것은 새로운 기술적 과제이며, 상당히 어려운 목표임이 분명하다. 따라서 전투무선체계의 전술음성통신 목표 성능 분석 및 개발 방안 모색이 반드시 필요하다.

이 논문에서는 기존 FM 무전기의 전술음성통신 성

* Corresponding author, E-mail: jaeuk.kim@lignex1.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

능을 분석하고, 신규 개발될 전투무선체계 VHF 대역 웨이브폼의 전술음성통신 목표 성능을 도출하며, 이를 구현하기 위한 방안에 대해서 다루고자 한다.

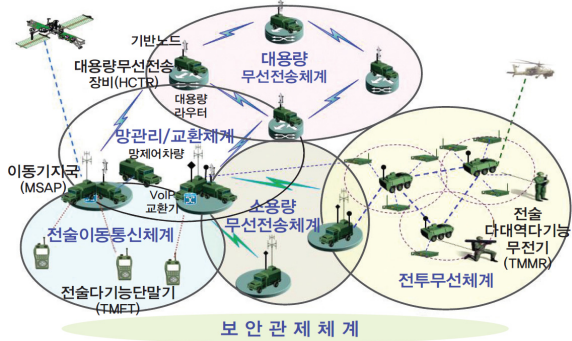


Fig. 1. TICN system configuration^[1]

2. 기존 FM 무전기를 이용한 VHF 전술음성통신

현재 우리 군의 전투무선망 VHF 대역 전술음성통신은 기존 FM 무전기로 이루어진다. 기존 FM 무전기는 CVSD(Continuously Variable Slope Delta Modulation) 음성 코덱을 사용하여 BER(Bit Error Rate) 1.0×10^{-1} 정도의 열악한 통신환경에서 저품질로 음성통화가 가능하다^[2]. 즉, 우리 군이 상정한 열악한 통신환경은 BER 1.0×10^{-1} 수준을 의미하고, 이 환경에서 제공되는 CVSD 16 kbps 음성 품질이 허용 가능한 최저 음성 품질임을 알 수 있다. 따라서 기존 FM 무전기를 대체할 신규 웨이브폼의 전술음성통신은 이 기준에 맞추어 개발되어야 할 것이다.

2.1 기존 FM 무전기의 SNR 대비 BER 성능 분석

현재 한국군에서 운용중인 기존 FM 무전기는 미국의 SINCGARS-V(Single-Channel Ground and Airborne Radio System - Very High Frequency)와 경쟁하여 도입된 무전기이다. 따라서 SINCGARS-V를 비롯하여 현재 NATO 표준 STANAG 4204 전술음성통신에 쓰이는 25 kHz, Uncoded 16 kbps FSK(Frequency Shift Keying)의 성능을 분석하면, 기존 FM 무전기의 성능을 파악할 수 있다. NATO는 해당 변조방식의 SNR(Signal to Noise Ratio) 대비 BER 성능을 “Legacy 16 kbps FSK with Noncoherent Receiver”로 측정 및 제시하였으며, Fig. 2의 16 K FSK(Quotation)과 같다^[3].

AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경에서 Noncoherent 복조기를 가진 2-FSK의 BER 확률 P_e 는 수식 (1)로 표현할 수 있다. SNR과 E_b/N_0 의 관계인 수식 (2)에 따라 전송속도와 대역폭을 고려하면, 25 kHz, Uncoded 16 kbps FSK의 SNR 대비 BER 확률 P_e 는 수식 (3)으로 표현된다^[4]. 이것을 그래프로 도시하면 Fig. 2의 16 K FSK(Equation)이고, 앞서 NATO에서 제시한 16 K FSK(Quotation)과 유사한 것을 확인할 수 있다.

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}} \tag{1}$$

E_b/N_0 : Energy per bit to noise spectral density ratio

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{f_b}{B_w} \tag{2}$$

f_b : Bit Rate, B_w : Bandwidth

$$P_f = \frac{1}{2} e^{-\frac{25}{32} \frac{S}{N}} \tag{3}$$

우리 군은 기존 FM 무전기로 전술음성통신이 가능한 열악한 통신환경을 BER 1.0×10^{-1} 로 보았다^[2]. 기존 FM 무전기와 SINCGARS-V의 성능이 동등하다고 가정하면, 수식 (3)에 따라 기존 FM 무전기는 SNR 3 dB 일 때 BER 성능 기대치 9.9×10^{-2} 갖는다. 따라서 우리 군은 SNR = 3 dB 조건을 전술음성통신이 가능한 최악의 통신환경으로 고려하였음을 알 수 있다.

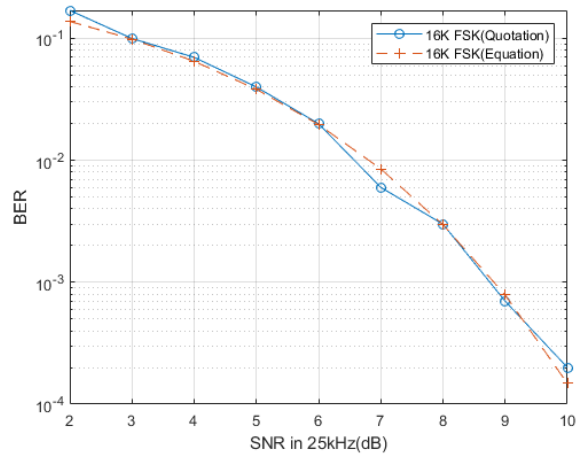


Fig. 2. Performance of legacy 16 kbps FSK

2.2 기존 FM 무전기의 음성 품질

앞 절에서 전술음성통화가 가능한 최악의 통신환경 기준을 도출하였다. 이번 절에서는 해당 통신환경에서 제공해야 할 최소한의 음성 품질을 분석하도록 한다.

우리 군은 음성 품질을 음성 감명도로 표시한다. 음성 감명도는 청취자가 주관적으로 느껴지는 음성 품질을 1~5로 판정하며 숫자가 커질수록 고품질을 의미한다. 이러한 측정 방식을 구체화 한 것이 “ITU-T Recommendation P.800”에 정의된 MOS(Mean Opinion Score)이며, 특히 MOS_{LE}(Mean Listening-Effort Opinion Score)가 음성 감명도 기준에 가깝다^[5]. 이것을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Opinion scales recommended by the ITU-T

Score	ITU-T P.800	
	MOS	MOS _{LE}
5	Excellent	Complete relaxation possible; no effort required
		아무런 노력 없이 편안한 상태에서 의미 이해 가능
4	Good	Attention necessary; no appreciable effort required
		눈에 띄는 노력이 필요하지 않으나 집중이 필요함
3	Fair	Moderate effort required
		적당한 노력이 필요함
2	Poor	Considerable effort required
		상당한 노력이 필요함
1	Bad	No meaning understood with any feasible effort
		아무리 노력해도 이해할 수 없음

MOS는 판단자의 주관적인 소견이므로, 평가하는 인원을 늘려 객관성을 확보하도록 권고하고 있다^[5]. 군에서 쓰이는 음성 감명도는 개인이 평가한 주관적인 값이므로, 즉각적인 음질 판단 및 직관적 전달에는 유용하나 CVSD와 같은 음성 코덱에 대한 평가용으로는 적절하지 않다. 따라서 본 논문에서는 “ITU-T Recommendation P.862”에 정의된 PESQ(Perceptual

Evaluation of Speech Quality)^[6]로 측정된 값을 “ITU-T Recommendation P.862.1”에 제시된 MOS-LQO(Mean Opinion Score - Listening Quality Objective)로 변환하여 활용한다^[7]. 해당 변환 수식은 (4)와 같다. 본 논문에서 MOS로 표시된 음성 품질은 PESQ 표준 제정 전에 얻어진 값이고, MOS-LQO로 표시된 음성 품질은 PESQ 표준 제정 이후 측정된 값이다. 이 값은 P.862.1 표준에 따라 상호 직접적인 비교가 가능하다^[7].

$$y = 0.999 + \frac{4.999 - 0.999}{1 + e^{-1.4945x + 4.6607}} \quad (4)$$

x : PESQ raw score by P.862

y : Mapped MOS-LQO by P.862.1

기존 FM 무전기에서 쓰이는 CVSD 16 kbps의 BER 대비 MOS-LQO 성능을 분석하면, 기존 FM 무전기의 통신환경 대비 음성 품질을 객관적인 수치로 구체화할 수 있다. United States Naval Research Laboratory에서 SINGARS의 음성 품질을 측정하기 위하여 CVSD 16 kbps의 BER 대비 음성 품질을 PESQ 기준으로 측정하였다^[8]. 이를 MOS-LQO로 변환한 값을 정리하면 Table 2와 같다^[8].

Table 2. Voice quality of CVSD according to BER

기준		BER [$\times 10^{-1}$]				
		0	0.1	0.2	0.5	1.0
CVSD 16 kbps	MOS -LQO	2.252	1.873	1.670	1.467	1.290 (추정치)

BER 0인 상태에서 CVSD 16 kbps의 MOS-LQO 값이 2.252인 것을 확인할 수 있다. 이것은 1997년 미국 국방부에서 제시한 이상적인 환경에서의 CVSD 16 kbps 음성 품질인 MOS 2.177과 유사한 값이다^[9]. 기존 FM 무전기의 음성 감명도가 3이하로 표현되는 것은 이러한 CVSD 16 kbps의 음성 품질로 인한 것이다. 기존 FM 무전기의 열악한 통신환경 기준은 BER 1.0×10^{-1} 로, 이 때 CVSD의 MOS-LQO는 그래프를 통해 1.29로 추정할 수 있다^[8]. 이 분석 결과에 의해 우리 군은 MOS-LQO 2.25 수준의 음성 품질을 의사소통이 원활한 수준으로, MOS-LQO 1.29 수준의 음성 품질을 의사소통이 가능한 최소 수준으로 판단하였음을 알 수 있다.

3. TICN 전투무선체계 전술음성통신 목표 성능

TICN 전투무선체계에서 VHF 대역 전술음성통신을 지원할 신규 웨이브폼은 기존 FM 무전기와 동등한 전술음성통신 성능을 제공해야 한다. 야전 운용자가 직관적으로 경험하는 무전기의 전술음성통신 성능은 통신 거리 대비 음성 감명도이다. 따라서 신규 웨이브폼은 기존 FM 무전기와 동일한 거리에서 동등한 음성 품질을 제공해야 한다.

통신 시스템의 채널 용량(Channel Capacity)은 샤논 제3정리 (5)에 따라 가용 대역폭과 SNR로 결정된다. 신규 웨이브폼과 기존 FM 무전기가 동일한 가용 대역폭과 송신출력으로 동일한 지역에서 운용될 경우, 둘은 같은 채널 용량을 가진다. 동일한 지역이면 거리에 따른 SNR 변화도 같을 것이므로, 통신 거리 대비 음성 감명도를 SNR 대비 MOS-LQO로 표현할 수 있다. 즉, 신규 웨이브폼은 기존 FM 무전기와 동일한 SNR에서 동등한 MOS-LQO 성능을 제공해야 한다.

$$C = B_w * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (5)$$

C : Channel Capacity, B_w: Bandwidth

앞 절에서 기존 FM 무전기의 통신 성능을 확인하기 위하여 SNR 대비 BER을 도출하였고, 음성 품질을 확인하기 위하여 BER 대비 MOS-LQO를 도출하였다. 분석 결과를 종합하면, 기존 FM 무전기의 SNR 대비 MOS-LQO를 확인할 수 있고, 결과는 Fig. 3과 같다.

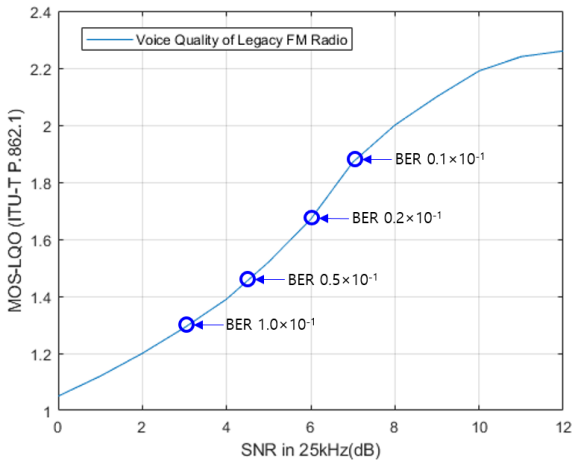


Fig. 3. Voice quality of legacy FM radio

기존 FM 무전기에서 사용하는 음성 감명도와 SNR 대비 MOS-LQO를 정리하면, 새로 개발될 TICN 전투무선체계의 전술음성통신 목표 성능이 나오고, 이 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Target performance of CNRS voice quality

음성 감명도	MOS-LQO	SNR [dB]	음성 품질
3	≥2.25	>11	소통 원활
2	2.0	8	소통 가능
1	<1.29	<3	소통 불가

TICN 전투무선체계 VHF 대역 신규 웨이브폼의 전술음성통신 목표 성능은 SNR 11 dB 이상에서 MOS-LQO 2.25 이상의 음성 품질을 제공하고, SNR 3 dB 일 때에도 MOS-LQO 1.29 수준의 음성 품질을 제공하여 최소한의 의사소통이 가능하도록 하는 것이다.

4. TICN 전투무선체계 전술음성통신 구현 방안

TICN 전투무선체계 신규 웨이브폼의 전술음성통신 목표 성능은 기존 FM 무전기와 동등한 수준이나, 기존에 적용된 CVSD 16 kbps 음성 코덱과 FSK 변조 방식을 그대로 적용할 수 없다. 그 이유는 신규 웨이브폼은 기존 FM 무전기에 비하여 동일한 자원으로 더 많은 기능을 제공해야 하기 때문이다.

TICN 전투무선체계 신규 웨이브폼은 부대규모 및 작전의 형태 등에 따라 다양한 네트워크를 구성하여 원활한 데이터 전송이 가능하도록 개발될 것이다^[1]. 이렇게 성능이 향상된 데이터 통신과 음성 통신을 동시에 할 수 있어야 하고, 네트워크를 활용하여 주파수 자원 추가 없이 자동 증계로 음성 멀티홉 전송이 가능해야 한다. 따라서 기존 FM 무전기에 비하여 개선된 음성 코덱과 변조방식을 적용해야 한다.

4.1 MELP 2400 bps 음성 코덱 적용

1996년, 미국 국방부의 디지털 음성 처리 컨소시엄(DDVPC)은 MELP(Mixed-Excitation Linear Prediction) 음성 코덱을 선택하여, 연방 음성 통신 표준으로 권고하였다^[9]. MELP는 미국 표준 MIL-STD-3005에 정의되어 있으며, NATO 표준 STANAG 4591에도 정의되

어 있다.

자동 증계를 통한 음성 멀티홉 전송 기능을 구현하려면, 음성 코덱의 데이터 전송량이 작을수록 유리하다. 가용 대역폭과 송신 출력이 그대로인 상태에서 전송속도를 획기적으로 늘리는 것은 샤논 제3정리 (5)에 의해 어렵기 때문이다. 따라서 음성 압축 효율을 증가시켜 전송 효율을 증가시키는 것이 합리적이다. MELP는 2.4 kbps로 CVSD의 16 kbps에 비하여 적은 데이터 전송량을 필요로 하므로, TICN 전투무선체계에 적용하기 유리하다.

동일 조건에서 MELP 2.4 kbps와 CVSD 16 kbps의 최대 음성 품질을 비교하기 위하여, 앞 장에서 CVSD 16 kbps의 음성 품질을 측정할 때 쓰인 것과 동일한 음성 샘플로 MELP 2.4 kbps의 음성 품질을 측정할 결과는 Table 4와 같다^[8]. MELP 2.4 kbps는 이상적인 환경에서 MOS 3.3, MCE(Mobile Command Environment) 환경에서 MOS 2.579의 음성 품질을 갖는 것으로 알려져 있으나^[9], SINCGARS의 TSVICIS(The Tactical Secure Voice Cryptographic Interoperability Specification)에 맞춰 실제 운용한 결과는 그보다 낮은 결과를 보였다^[8].

Table 4. Voice quality of MELP by MOS-LQO

기준		BER [$\times 10^{-3}$]	
		0	1.9
MELP 2.4 kbps	MOS-LQO	2.291	2.306

MELP 2.4 kbps의 BER 0일 때 MOS-LQO는 2.291로 CVSD 16 kbps의 2.252에 비하여 상대적으로 더 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 오류정정 부호를 제외한 데이터 전송량은 CVSD 16 kbps 대비 0.15배로 작기 때문에, 변조 방식과 오류정정 방식을 유연하게 선택할 수 있으며, 다양한 기능을 지원하기에 유리하다. BER 1.9×10^{-3} 일 때 MOS-LQO가 2.306으로 BER 0인 경우보다 높은 것은 측정 오차로 보이며, BER 1.9×10^{-3} 환경에서도 음질 저하가 없는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 BER 대비 MOS-LQO의 저하가 허용 가능한 수준이라면, 신규 웨이브폼의 음성 코덱으로 MELP 2.4 kbps를 적용하는 것이 합리적이다.

CVSD 16 kbps는 16 kHz, Signed 16 bit로 샘플링 된 음성을 압축하여, 1개 Sample 마다 1 bit 결과를 출력

한다^[10]. MELP 2.4 kbps는 8 kHz, Signed 16 bit로 샘플링 된 음성을 압축하여 22.5 ms 마다 54 bit 크기의 프레임을 출력한다^[11]. CVSD 결과물은 Bit-stream 형태여서 수신 시점에 구애받지 않고 디코딩이 가능한 반면, MELP는 정해진 프레임 구조에 맞춰야만 디코딩 가능한 형태이다. 또한 신규 웨이브폼은 음성과 데이터를 동시 전송해야 하므로, 기존 FM 무전기처럼 음성을 서킷 방식으로 전송할 수 없고, 헤더를 갖춘 패킷 방식으로 전송해야 한다. MELP 2.4 kbps는 서킷 방식으로 전송하여 프레임 유실이 없을 경우, BER 1.0×10^{-2} 상황에서 MOS 2.075의 음성 품질을 갖는 것으로 알려져 있다^[9]. 이것은 CVSD 16 kbps의 BER 1.0×10^{-2} 일 때 MOS-LQO 1.873보다 큰 값이다. 그러나 신규 웨이브폼은 패킷 전송 방식을 적용해야 하므로, 헤더 오류로 인한 패킷 유실과 이에 따른 음성 품질 저하를 고려하여야 한다.

음성을 패킷 형태로 전송하는 가장 일반적인 방법은 VoIP(Voice over Internet Protocol)이다. VoIP 방식을 적용하면 음성이 데이터와 동일한 패킷 구조를 갖게 되어, 음성과 데이터를 동시에 전송하기에 유리하다.

School of Electrical and Computer Engineering Oklahoma State University에서 Error Checksum의 적용 방식을 변경하여 패킷 유실 확률 PLR(Packet Loss Rate)에 변화를 주면서 MELP 2.4 kbps의 BER 대비 PESQ를 측정된 값을 참고하여 VoIP 환경에서 MELP의 음성 품질을 확인할 수 있다^[12].

Table 5. Packet structure for MELP frame

Ethernet	IP	UDP	RTP	MELP
18 [byte]	20 [byte]	8 [byte]	12 [byte]	27 [byte] 4 [Frames]

Table 5와 같이 Ethernet, UDP/IP, RTP(Real-time Transport Protocol) 헤더를 적용하고, MELP 4개 프레임을 하나의 패킷으로 만들어 전송하였을 때, BER 대비 MOS-LQO는 Fig. 4와 같다^[12]. 실선 그래프는 인용한 값이며 점선 그래프는 PLR를 통해 추정된 값이다. VoIP 시험의 BER 0일 때 MOS-LQO는 2.82로^[12], Office 환경에서 제시된 MOS 2.958과 유사한 값이다^[9]. 이것은 우수한 환경에서 여러 회 녹음하여 선택된 음성 샘플을 시험한 결과로^[12], 앞서 야전 운용에 가까운 TSVICIS에서 시험한 결과보다 높은 점수이다.

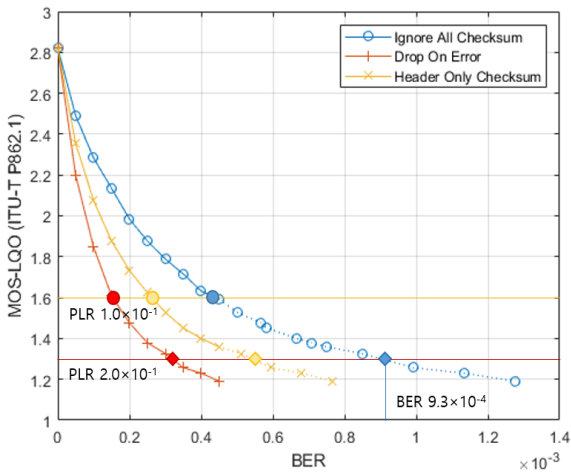


Fig. 4. Voice quality of MELP according to BER

Error Checksum에서 모든 오류를 무시하더라도 목 적지 주소, 패킷 길이, Sequence Number와 같이 오류 가 발생하면, 수신이 불가능하거나 응용 계층에서 음 성 재생이 불가능한 항목이 존재하며 이것을 Sensitive Bit라 칭한다^[2].

$$P_{PLR} = 1 - (1 - BER)^{N_{SB}} \quad (5)$$

P_{PLR} : Packet Loss Rate

N_{SB} : the Number of Sensitive Bit

PLR은 수식 (5)와 같이 BER과 Sensitive Bit의 값에 따라 결정된다. Fig. 4의 “Ignore All Checksum”은 240 bits를 Sensitive Bit로 보았을 때 결과이고, “Drop On Error”는 680 bits 패킷 전체가 Sensitive Bit인 경우일 때 결과이며, “Header Only Checksum”은 Ethernet, UDP/IP Header 368 bits와 RTP Header 32 bits를 합쳐 400 bits를 Sensitive Bit로 보았을 때의 결과이다^[2].

앞서 MELP는 BER 1.9×10^{-3} 수준에서 음질 저하가 없는 것을 확인하였으며, 각 Error Checksum 방식의 PLR 1.0×10^{-1} 일 때 MOS-LQO가 약 1.6으로 유사하므로 VoIP 환경에서 MOL-LQO는 PLR에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 앞 장에서 분석한 최소한의 의사소통이 가능한 음성 품질은 MOS-LQO 1.29로 “Drop On Error” 방식 PLR 2.0×10^{-1} 일 때 값이다. “Ignore All Checksum” 방식도 PLR 2.0×10^{-1} 일 때 유사한 값을 가질 것이며 이때 BER은 9.3×10^{-4} 이다. 따라서 MELP 2.4 kbps를 적용하기 위한 열악한 통신환경은 “Ignore All Checksum”

방식에서 BER 9.3×10^{-4} 이하이다.

4.2 신규 웨이브폼의 변조방식 및 채널코딩 설계

앞 절에서 MELP 2.4 kbps를 적용하는데 필요한 통신환경을 도출하였다. MELP 2.4 kbps 음성 코덱은 패킷 유실에 의한 음질 저하가 심각하므로, 이를 최소화 하기 위하여 “Ignore All Checksum” 방식을 선택하였 다. 이 경우 PLR 2.0×10^{-1} 이하를 만족하려면 BER 9.3×10^{-4} 이하여야 한다.

MELP 2.4 kbps는 1개 프레임에 22.5 ms 분량의 음 성이 포함되므로^[11], 4개 프레임을 하나의 패킷으로 전송하는데 필요한 전송속도는 $680 \text{ bits} / 90 \text{ ms} = 7.6 \text{ kbps}$ 이다. 음성 멀티홉 자동 중계를 고려하면, 2배인 15.2 kbps 이상의 전송 속도가 필요하다. 앞 장에서 도 출한 열악한 통신환경 조건은 SNR 3 dB이다. 즉, 신규 웨이브폼은 SNR 3 dB 환경에서 전송속도 15.2 kbps 이상, BER 9.3×10^{-4} 이하의 성능을 가져야 한다.

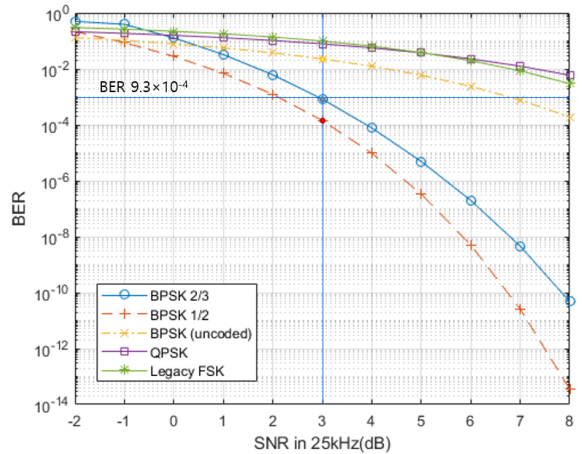


Fig. 5. Performance of various modulation methods

Fig. 5는 Matlab을 이용하여 AWGN 채널에서 다양 한 변조 방식의 SNR 대비 BER 성능을 그래프로 도 시한 것이다. BPSK(Binary Phase Shift Keying) 외 다른 변조 방식은 요구사항을 만족시키기 힘든 수준이 므로, BPSK에 채널 코딩을 적용한 방식을 중점적으로 분석한다. Fig. 5에서 “BPSK 2/3” 그래프는 2/3 부호화 율(Coding Rate) Convolution Code에 Soft decision 디코 디ング을 적용한 BPSK의 성능이다. “BPSK 1/2” 그래프는 1/2 부호화 율의 Convolution Code에 Soft decision 디코 디ング을 적용한 BPSK의 성능이다. “BPSK(uncoded)” 그래

프는 채널 코딩을 적용하지 않았을 때 성능이다. 전송 속도 및 SNR 3 dB일 때의 BPSK 부호화율 별 BER 성능을 정리하면 Table 6과 같다.

Table 6. BPSK performance with various code rates

구분	BPSK (uncoded)	BPSK 2/3	BPSK 1/2
전송속도	25 [kbps]	16.6 [kbps]	12.5 [kbps]
BER (SNR = 3 dB)	2.3×10^{-2}	8.3×10^{-4}	1.4×10^{-4}

25 kHz 대역폭에 25 kbps의 전송속도를 갖는 이상적인 BPSK 통신 시스템을 가정하면, “BPSK(uncoded)” 방식은 SNR 3 dB일 때 BER 성능이 9.3×10^{-4} 에 미치지 못하고, “BPSK 1/2” 방식은 전송속도가 15.2 kbps 미만이므로, 요구 성능을 만족하지 못한다. 이에 비해 “BPSK 2/3” 방식은 전송속도와 BER 성능 모두 만족하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 신규 웨이브폼은 전술음성통신 시, 부호화율 2/3 Convolution Code를 적용한 BPSK 변조 방식에 Soft decision 디코딩을 적용해야 요구하는 성능과 전송속도를 만족할 수 있다.

4.3 신규 웨이브폼의 전술음성통신 성능 분석

앞 절에서 분석한 MELP 2.4 kbps의 BER 대비 MOS-LQO 성능과 “BPSK 2/3”의 SNR 대비 BER 성능을 종합하면, 신규 웨이브폼 전술음성통신의 성능을 예측할 수 있다. Table 7은 PLR을 기준으로 하여 “BPSK 2/3”의 BER 대비 SNR 성능과 MELP 2.4 kbps의 SNR 대비 MOS-LQO 성능을 정리한 것이다. 이것을 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

Table 7. Expected voice quality of CNRS

항목	분석 결과					
	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
PLR [$\times 10^{-1}$]	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
BER [$\times 10^{-4}$]	0	0.42	0.84	2.1	4.4	9.3
SNR [dB] (BPSK 2/3)	-	4.2	4.0	3.5	3.3	2.9
MOS-LQO (MELP 2.4 kbps)	2.82	2.50	2.32	1.95	1.60	1.30

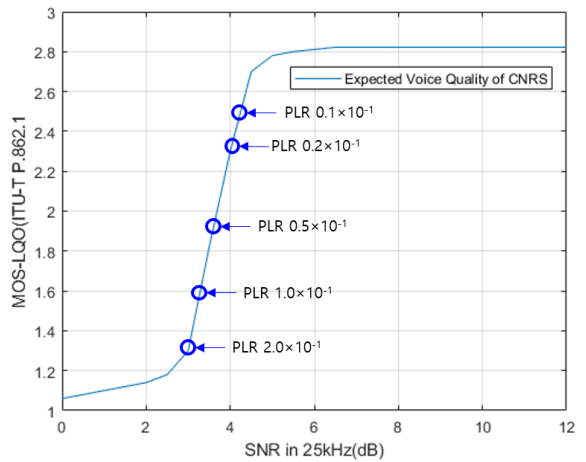


Fig. 6. Expected voice quality of CNRS

앞 장에서 제시한 전투무선체계 전술음성통신의 목표 성능은 최악의 통신환경인 SNR 3 dB에서 MOS-LQO 1.29 수준, SNR 8 dB 이상일 때 MOS-LQO 2.0 이상, SNR 11 dB 이상일 때 MOS-LQO 2.25 이상의 음성 품질을 제공하는 것이다. 예측되는 음성 품질은 이러한 목표 성능을 충분히 상회하며, SNR 6 dB 만 되어도 MELP 2.4 kbps 최고 음성 품질을 기대할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 현재 운용중인 기존 FM 무전기의 전술음성통신 성능을 분석하여, 신규 개발될 TICN 전투무선체계 VHF 대역 전술음성통신 웨이브폼의 목표 성능을 도출하였다. 그리고 해당 목표 성능과 추가 요구사항을 만족할 수 있는 음성 코덱 및 변조방식과 채널코딩을 제시하고, 해당 통신 시스템의 전술음성통신 성능을 분석하였다.

5.1 전투무선체계 전술음성통신 성능목표 결론

현 전투무선망의 VHF 대역 전술음성통신을 담당하는 기존 FM 무전기는 CVSD 16 kbps 음성 부호화기를 적용하여 BER 1.0×10^{-1} 의 열악한 통신환경에서도 음성 통화 가능하다. 이 때, SNR은 3 dB, 음성 품질은 MOS-LQO 기준 1.29 이다. 따라서 기존 FM 무전기를 대체할 전투무선체계 신규 웨이브폼은 SNR 3 dB 조건에서 MOS-LQO 1.29 이상의 음성 품질을 제공해야 한다.

5.2 전투무선체계 전술음성통신 구현방안 결론

기존 FM 무전기를 대체할 신규 웨이브폼은 TICN 전투무선체계에서 요구하는 다양한 기능을 지원해야 한다. 따라서 최고 음성 품질은 CVSD 16 kbps 보다 좋고 데이터 전송량이 작은 MELP 2.4 kbps를 적용하는 것이 합리적이다. MELP는 PLR 20 %일 때 MOS-LQO 1.3 이므로 SNR 3 dB일 때, BER 9.3×10^{-4} 이상을 유지하여야 한다. BPSK에 2/3 Convolution Code 채널 코딩과 Soft decision 디코더를 적용하면 해당 성능을 만족할 수 있다.

5.3 종합 결론

기존 FM 무전기를 대체할 신규 웨이브폼은 음성/데이터 동시 전송 및 자동중계를 통한 음성 멀티홉 전송을 지원해야 한다. 이로 인해 서킷 방식이 아닌 패킷 방식을 적용해야 하며, 헤더로 인한 오버헤드 증가와 패킷 유실로 인한 음 탈락이 발생하게 된다. 또한 음성 자동중계 기능을 고려하면, 최소 두 배 이상의 데이터 전송량이 필요하다. 결과적으로 같은 채널용량에서 SNR 대비 BER 성능이 1.0×10^{-1} 에서 9.3×10^{-4} 으로 100배 이상 향상되어야만 기존과 동등 수준의 음성통신이 가능한 것이다. 이것은 대단히 어려운 구현 목표로 개발 과정에서 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

차후 연구에서는 Fading 채널 모델에서 전술음성통신의 성능목표를 분석하고, 해당 성능목표를 충족하기 위한 구현방안을 모색할 예정이다. 또한 오버헤드를 감소시키기 위한 음성 패킷 구조 설계 개선 및 헤더 압축 방안을 연구하고, 이를 통해 감소한 데이터 전송량을 바탕으로 더 강력한 오류정정 기법을 적용하여 AWGN 대비 열악한 Fading 채널을 극복할 방안을 찾을 것이다.

References

[1] Soo-Yeon Jo, "Combat Network Radio System (TMMR) Development Status and Impact Analysis on Other Systems," Korea Defense Industry Association, Defense & Technology(446), pp. 92-98, 2016.
 [2] Seong-Min Lee, Joo-Hee Han, "A Frequency Resource Assignment Algorithm for FH Radio Using Isotropic Multi Dimension Array," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology,

Vol. 9 Issue 4, pp. 24-31, 2006.
 [3] Enrico Casini, Michael Street, Philip Vigneron, Rick Barfoot, "SDR-Ready Standardized Waveforms for Tactical VHF and UHF Communications for NATO," NATO C3 Agency, The Hague NETHERLANDS, 2010.
 [4] Richard A. Paradise, "Modeling and Simulation of the Physical Layer of the Single Channel Ground and Airborne Radio System(SINCGARS)," Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, 2005.
 [5] ITU-T Recommendation P.800, "Methods for Subjective Determination of Transmission Quality," 1996.
 [6] ITU-T, Recommendation P.862, "Perceptual Evaluation of Speech Quality(PESQ): An Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrow-Band Telephone Networks and Speech Codecs," 2001.
 [7] ITU-T, Recommendation P.862.1, "Mapping Function for Transforming P.862 Raw Result Scores to MOS-LQO," 2003.
 [8] P. Shahan, D. A. Heide and A. E. Cohen, "Comparison of TSVCIS Voice at 8000 and 12000 bps VERSUS CVSD at 16000 bps," MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference, Orlando, FL, pp. 1-4, 2012.
 [9] M. A. Kohler, "A Comparison of the New 2400 bps MELP Federal Standard with Other Standard Coders," 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, Vol. 2, pp. 1587-1590, 1997.
 [10] MIL-STD-188/113, "Interoperability and Performance Standards for Analog-to-Digital Conversion Techniques," 1987.
 [11] MIL-STD-3005, "Analog-to-Digital Conversion of Voice by 2,400 Bit/Second Mixed Excitation Linear Prediction(MELP)," 1999.
 [12] B. Gavula, G. Scheets, K. Teague and J. Weber, "The Perceptual Quality of Melp Speech over Error Tolerant IP Networks," 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, NV, pp. 1633-1636, 2008.