

최적화된 전파교란 환경 하에서 다양한 변조 방식의 성능 분석

고준영*, 이동학*, 최동열**, 이충희***, 박형원***, 김재현°

Performance Analysis of Various Modulation Schemes under Optimized Sweep Jamming

Jun-Young Ko*, Dong-Hak Lee*, Dong-Yeol Choi**,
Choog-Hee Lee***, Hyung-Won Park***, Jae-Hyun Kim°

요 약

현재 무선통신시스템은 전파교란신호로 인해 성능이 크게 감퇴하는 현상이 발생하여 여러 분야에서 큰 피해를 받고 있다. 본 논문에서는 전파교란신호에 정확히 대응하기 위해서 전파교란신호가 무선통신시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 음성을 송수신하는 무선통신시스템으로 AM (amplitude modulation), FM (frequency modulation), MPSK (M-array phase shift keying), MFSK (M-array frequency shift keying), MSK (minimum shift keying) 그리고 GMSK (gaussian minimum shift keying) 변조방식을 모델링하였다. 또한 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), chirp 전파교란환경을 모델링하여 전파교란신호의 파라미터를 최적화한 환경에서 무선통신시스템의 성능 저하 현상을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 최적화된 각 전파교란환경에서 PCM (pulse code modulation) 음성 코덱을 사용하는 변조방식 별 CNR (carrier to noise ratio), BER (bit error rate)의 성능과 수신된 신호의 음성품질을 STOI (short time objective intelligibility)로 분석하였다.

Key Words : Jamming signal, STOI, Analog modulation, Digital modulation

ABSTRACT

Wireless communication is used in various applications and the number of wireless devices also increased over the past several decades. However, wireless communication systems may be significantly affected by the interference signal. So, the accurate analysis of the effects of jamming in the efficiency of data transmissions is required to find an adequate anti-jamming method. In this paper, we optimized the parameter of OFDM and chirp sweep jamming. Then the bit error rate (BER) or carrier to noise ratio (CNR) performance of amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM), M-array phase shift keying (MPSK), M-array frequency shift keying (MFSK), minimum shift keying (MSK) and gaussian minimum shift keying (GMSK) using pulse code modulation (PCM) have been evaluated under optimized sweep jamming as an intended interference signal. In addition, we measure quality of received audio signal by short time objective intelligibility (STOI).

- First Author : (ORCID:0000-0001-6538-5062)Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, kdb2658@ajou.ac.kr, 학생회원
- ° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-4716-6916)Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 중신회원
- * Samsung Electronics, donghak.olee@samsung.com, 학생회원
- ** Solvit system, scdy@solvitsystem.co.kr, 학생회원
- *** LIG NEX1, choonghee.lee@lignex1.com, hyungwon.park@lignex1.com, 정회원

논문번호 : 201806-A-157-RN, Received December 21, 2017; Revised September 18, 2018; Accepted September 27, 2018

I. 서 론

현재 다양한 무선통신기기가 보급되어 여러 분야에서 활용되고 있다. GNSS (global navigation satellite system)와 같은 무선통신시스템은 전파교란신호에 의한 성능이 크게 감퇴하는 현상이 발생하여 여러 분야에서 큰 피해를 받고 있다. 예로, 2010년 8월 서해안 일부 지역에서 북한의 GPS (global positioning system) 전파교란신호로 인해 181곳의 통신기지국과 민항기 15대, 군함 1척에서 GPS 수신 장애를 발생시켜 교통 시스템의 안전을 위협하였다. 기존의 무선통신 방식은 특정 대역뿐만 아니라 전 대역에 걸쳐 발생하는 전파교란신호를 극복하기 어렵기 때문에 이에 정확히 대응하기 위해서 전파교란신호가 무선통신시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다¹⁻³⁾.

본 논문에서 전파교란기는 chirp 신호와 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 방사하도록 설정하였다. 또한 다양한 주파수대역을 사용하는 불특정 다수의 무선통신시스템에 대해 영향을 주기 위해 시간에 따라 전파교란신호의 중심주파수를 선형적으로 증가시켜 전파교란신호를 방사하는 형태인 sweep 전파교란기로 설계하였다. 무선통신시스템의 모델은 음성을 송수신하는 시스템을 모델링하였으며, 음성 코덱으로는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위해 널리 사용되는 PCM (pulse code modulation)을 사용하였다. 무선통신시스템의 변조방식으로서 아날로그 변조방식은 AM (amplitude modulation), FM (frequency modulation)과 디지털 변조방식의 MPSK (M-array phase shift keying), MFSK (M-array frequency shift keying), MSK (minimum shift keying), GMSK (gaussian minimum shift keying)를 고려하여 전파교란환경에서의 변조방식 별 성능을 분석하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

제2장에서는 무선통신시스템 모델에 대하여 설명한다. 제3장에서는 전파교란신호로 사용되는 OFDM 신호와 chirp 신호에 대해 설명한다. 제4장에서는 전파교란환경에서의 무선통신시스템 별 성능에 대한 시뮬레이션 결과에 대해 분석한다. 제5장에서는 전파교란환경에서 무선통신시스템의 성능분석 결과에 대해 정리한다.

II. 무선통신시스템 모델링

2.1 변조방식

본 논문에서의 음성 신호는 64 kbps PCM 코덱을 사용하였으며 이때 표본화 주파수 (Sampling Frequency)는 8000 samples/sec, 양자화 레벨 (Quantization Level)은 256 levels/sample 이다. 이러한 음성신호를 송수신 하는 무선통신시스템 모델로서, 아날로그 변조방식 AM, FM과 디지털 변조방식 MPSK, MFSK, MSK, GMSK를 고려하였다⁴⁻⁵⁾. 또한 각 변조신호의 중심주파수는 900MHz로 가정하였다. 다음 표 1은 각 변조방식 별 파라미터를 나타낸다.

표 1. 변조방식 별 파라미터
Table 1. Parameters of modulation schemes

Modulation Schemes	Parameter	Value
AM	Modulation index	0.5
FM	Frequency shift	75 kHz
MPSK	Bits/Symbol	2, 4
MFSK	Bits/Symbol	2, 4
	Frequency Separation	6 Hz
MSK	Bits/Symbol	2
GMSK	Bits/Symbol-3dB	2
	bandwidth of Gaussian filter	0.3

2.2 성능평가지표

아날로그 및 디지털 변조방식의 성능을 분석하기 위해 CNR (carrier to noise ratio)과 BER (bit error rate)을 고려하였다. 또한 수신된 음성신호의 품질을 측정하기 위한 STOI (short time objective intelligibility)를 고려하였다. 모의실험에 사용된 wav 파일은 음성 신호만 포함되어있으며 길이는 4초이다. 성능 평가를 위한 BER과 STOI는 음성 신호가 있는 부분에서만 측정 되었다. 모의실험은 100회를 진행하여 평균값을 도출하였다.

음성 품질에 대한 평가는 주관적 평가와 객관적 평가 두 가지 방법이 있다. 먼저, 주관적 음질평가란 음성이 명료한 정도와 잡음 정도를 실제로 사람이 듣고 심리적 평가 결과에 근거하여 음성 품질을 0에서 5점 까지 점수를 평가하는 방식이다. 점수가 높을수록 원음과 가깝다. 하지만 이러한 주관적 음질평가방법인 MOS(mean opinion score)는 여러 사람들의 평가가 직접 반영되어 신뢰성이 높지만 많은 시간과 비용이 소모된다. 이를 해결하기 위해 사람들이 평가한 MOS

값을 예측하여 비슷한 결과 값을 얻는 것을 목표로 만들어진 음질 평가 방법이 객관적 음질 평가 방법이다. STOI는 객관적 음질 평가방법 중 하나이다⁶⁾. STOI는 원 음성과 노이즈 음성을 비교하여 시간 및 주파수 상에 노이즈가 더해진 음성의 명료도에 대한 상관관계를 나타낸다. STOI의 값은 원 음성신호와 노이즈 음성신호의 1/3 옥타브 밴드의 성분에 대해 상관관계 (correlation) 평균값으로 나타내며, 0과 1 사이의 값을 가진다. STOI의 값이 0.5 이하일 때 노이즈 음성품질이 크게 저하되어 음성의 내용을 인지하기 어렵다⁷⁾.

III. 전파교란신호 모델링

넓은 대역에 다양한 무선통신 신호를 차폐하기 위해 시간에 따라 주파수를 선형적으로 증가시키는 형태의 sweep 전파교란신호를 설계하였다⁸⁻⁹⁾. 또한 각 전파교란신호의 sweep 방법에 대한 설명과 PCM 음성 코덱을 사용하는 변조신호를 차폐하기 위한 OFDM 및 chirp 전파교란신호의 파라미터를 최적화하는 과정에 대해 설명하였다.

3.1 OFDM 전파교란신호

최근 이동통신시스템의 전송방식으로 사용되는 OFDM방식은 고속 데이터 전송에 적합한 방식으로, 다중의 채널로 동시에 데이터를 전송한다. OFDM 방식의 다수의 부반송파는 상호 직교성이 있어서 주파수의 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 송수신부에서 번복조할 때 IFFT (inverse fast fourier transform) 및 FFT (fast fourier transform)의 수식적 연산을 통해 고속으로 구현할 수 있다.

그림 1은 OFDM 전파교란신호의 sweep 방식을 나타낸 것이다. T_{rad} 는 OFDM 신호의 한 개의 심볼을 방사하는 시간이다. T_{PLL} 은 OFDM신호의 반송파 주파수를 변경하기 위한 시간이다. OFDM 전파교란기의 경우 T_{rad} 동안 OFDM 신호를 방사한 이후

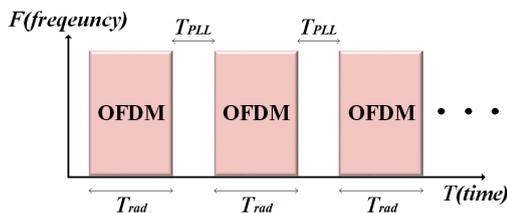


그림 1. OFDM 전파교란신호의 sweep 방식
Fig. 1. Sweep method of OFDM jamming signal

T_{PLL} 동안 OFDM 신호의 대역폭만큼 주파수를 도약한 이후 다시 T_{rad} 동안 OFDM 신호를 방사하는 방식으로 전파교란신호를 생성한다. OFDM 전파교란신호 sweep 할 주파수 대역 내에서 작은 주파수에서 큰 주파수로 일정하게 주파수 도약을 하며 sweep을 마칠 경우 sweep 할 주파수 대역 내에 작은 주파수에서부터 주파수 도약을 다시 시작한다.

T_{PLL} 은 하드웨어적인 시간으로, 이 시간동안 무선통신시스템에 아무런 영향을 줄 수 없기 때문에 T_{PLL} 이 작을수록 무선통신신호에 크게 영향을 미친다. 따라서 무선통신시스템에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 T_{rad} 와 OFDM 신호의 대역폭을 찾아야 한다.

그림 2는 OFDM 전파교란신호의 대역폭에 따라 BPSK 변조방식의 BER 성능을 분석한 결과이다. BER 성능을 측정된 BPSK의 대역폭은 40MHz이며, 송신신호의 전력은 10dBm이다. 전파교란신호의 전력이 0~30dBm에서는 대역폭이 10MHz일 때 가장 BER이 높게 나타나지만, 전파교란신호의 전력이 30dBm 이상일 때 각 대역폭에 따른 BPSK의 BER 성능은 거의 유사하게 나타난다. 이 결과를 통해 전파교란신호의 전력이 매우 크 다면 무선통신시스템에 미치는 영향은 OFDM 전파교란신호의 대역폭과 상관없이 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한, OFDM 전파교란신호의 대역폭이 클수록 전파교란신호의 sweep 주기가 짧아지기 때문에 무선통신시스템의 대역에 머무는 시간이 길어질 수 있으며, 이로 인해 무선통신시스템의 성능을 크게 저하시킬 수 있다.

OFDM 전파교란신호의 T_{rad} 파라미터는 수신된

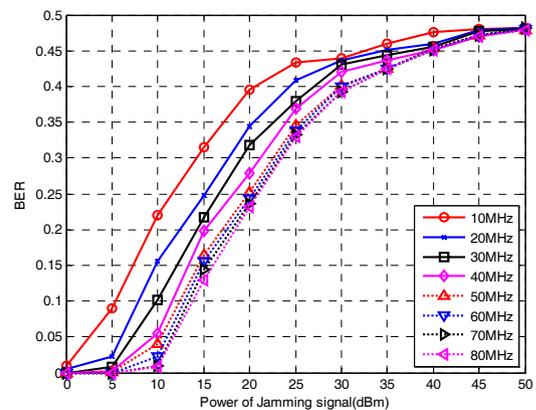


그림 2. OFDM 전파교란신호의 대역폭에 따른 디지털 변조 방식 별 BER 성능
Fig. 2. BER performance of digital modulation schemes according to bandwidth of OFDM jamming signal

음성의 품질을 평가하기 위한 STOI를 이용하여 최적화하였다. 먼저, 음성신호의 샘플에 대한 영향 대해서 STOI로 분석하였다.

표 2는 음성신호의 샘플에 대한 STOI 성능분석 결과이다. Period 1은 각 음성샘플의 8비트 중 4비트의 비트오류가 나타날 경우, Period 2는 두 개의 음성샘플 중 한 샘플의 8비트의 오류가 나타날 경우, Period 0은 음성샘플의 오류가 나타나지 않을 경우이다. 세 가지 경우에 대한 STOI 분석 결과 오류가 나타나지 않을 경우 STOI의 값이 1로 음성의 품질이 매우 우수하다. 두 개의 샘플의 16비트 중 한 개의 샘플 8비트를 모두 오류로 나타내었을 때에도 약 0.76 으로 잡음이 섞이긴 하지만 음성인지가 가능하다. 하지만 한 샘플에 4개 비트의 오류가 발생할 경우 0.45 정도로 수신된 음성의 품질이 크게 저하되어 음성의 내용을 인지하기 어렵다. 따라서 전파교란신호는 한 샘플 내에 영향을 주어야 음성의 품질을 크게 저하할 수 있다. 무선통신시스템에서 PCM 음성 코덱을 사용할 경우 한 샘플 당 전송시간이 $125\mu s$ 이기 때문에 전파교란신호의 주기는 $125\mu s$ 이하로 설계되어야 한다. 또한 BPSK 변조신호의 한 비트오류를 나타내기 위해 T_{rad} 는 한 비트를 전송하기 위한 시간 $15.625\mu s$ 이상이 필요하다.

표 2. 음성신호의 샘플에 대한 STOI 성능분석
Table 2. STOI performance analysis of samples of voice signal

Period	1	2	0
STOI	0.448239	0.758716	1

3.2 Chirp 전파교란신호

Chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 신호로써, 짧은 펄스폭 내에 넓은 대역폭을 가질 수 있다. Chirp 신호는 일정하게 주파수가 증가하는 특성을 가지기 때문에 LFM (linear frequency modulation)신호라고도 불리며, 시간영역에서 다음 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sin \left[\phi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 초기위상 ϕ_0 , 초기 주파수 f_0 를 가지며 순시주파수(instantaneous frequency)는 $f_0 + kt$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 chirp의 신호는 k , 칩률(chirp

rate)의 값에 따라 주파수 변화를 제어할 수 있다.

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T} \quad (2)$$

k 는 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다. k 는 단위시간 당 증가하는 주파수의 비율을 의미하며, chirp의 최고 주파수 f_1 , 초기 주파수 f_0 , sweep 하는 시간 T 로 수식적으로 표현할 수 있다.

그림 3은 chirp 전파교란신호의 sweep 방식을 나타낸 것이다. Chirp 신호는 시간에 따라 선형적으로 주파수가 증가하는 신호이지만, 하드웨어 구현상의 문제로 인하여 Δf (frequency step size)만큼 일정하게 주파수를 도약하는 형태로 구현된다. Δf 는 주파수 도약 크기를 나타낸다. Δt (dwell time)는 일정한 주파수를 가지는 펄스형태의 chirp 신호를 방사하는 시간으로 Δt 이후에 Δf 만큼 주파수 도약하여 다시 Δt 동안 chirp 신호를 방사한다. OFDM 전파교란기와 마찬가지로 sweep할 주파수 대역 내에서 작은 주파수에서 큰 주파수로 일정하게 주파수 도약을 하며 sweep을 마칠 경우 sweep할 주파수 대역 내에 작은 주파수에서부터 주파수 도약을 다시 시작한다 [9].

Δf 는 주파수 도약 크기로서, chirp 전파교란신호가 한 주파수에서 머무르는 시간, Δt 가 동일할 때 Δf 가 커진다면 전파교란신호의 sweep 주기는 짧아질 수 있다. Δf 가 매우 커지면 무선통신신호의 대역폭 내에 영향을 미치지 않을 수도 있다. 따라서 무선통신시스템의 대역폭에 적절히 영향을 주기 위해 Δf 의 크기를 최적화해야 한다.

그림 4는 chirp 전파교란신호의 Δf 에 따른 무선

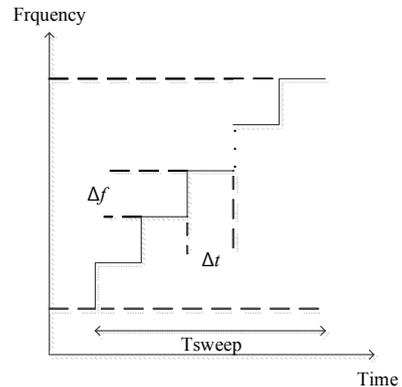


그림 3. Chirp 전파교란신호의 sweep 방식
Fig. 3. Sweep method of chirp jamming signal

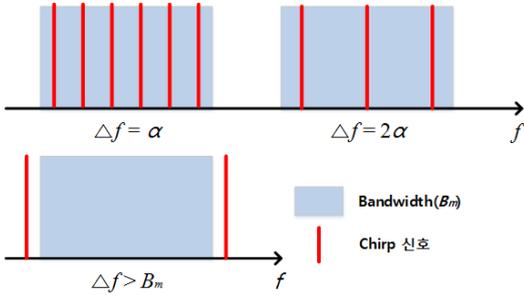


그림 4. Chirp 전파교란신호의 Δf 파라미터 최적화
Fig. 4. Δf optimization of chirp jamming signal

통신 시스템에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Δf 가 α 일 때, 무선통신 대역폭 내에 오랜 시간동안 전파교란신호를 방사할 수 있으나 sweep 주기는 길어진다. Δf 가 2α 일 때에는 sweep 주기가 Δf 가 α 일 때보다 두 배 짧아져 자주 영향을 미칠 수 있으나 sweep 할 때의 무선통신신호의 대역폭 영향을 주는 시간 또한 줄어들 수 있다. Δf 가 무선통신의 대역폭보다 크게 될 경우 전파교란신호가 sweep 할 때 무선통신시스템에 전혀 영향을 주지 않는 경우가 생길 수 있기 때문에 Δf 는 무선통신신호의 대역폭보다는 작게 설계해야한다.

그림 5는 chirp 전파교란신호의 Δf 에 따른 BPSK 변조방식의 BER 성능을 분석한 결과다. Chirp 전파교란신호의 Δf 는 5, 10, 20, 30, 64kHz로 설정하였고 BPSK의 대역폭은 64kHz 이다. Chirp 전파교란신호는 $fc+n*(\Delta f/2) \sim fc+n*(\Delta f/2)$ 대역 범위에서 n 번 sweep 한다. 여기서 fc는 중심주파수, n은 BPSK

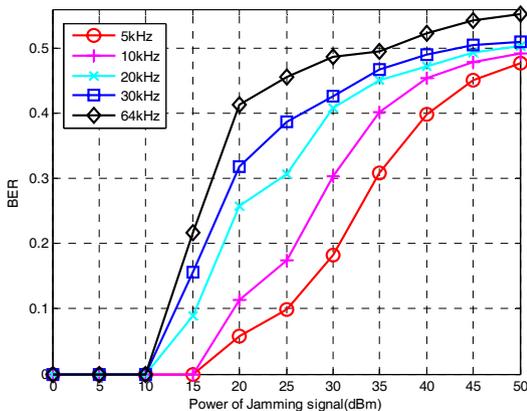


그림 5. Chirp 전파교란신호의 Δf 에 따른 BPSK 변조방식의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of BPSK according to Δf of chirp jamming signal

대역폭을 Δf 로 나눈 몫이다. Δf 를 최적화하기 위해 무선통신대역 이외의 대역에 존재하는 chirp 전파교란신호의 영향을 없애기 위해 무선통신 대역폭 내에서만 sweep하는 형태로 전파교란신호를 설계하여 시뮬레이션 하였다. 그림 6의 성능분석 결과를 통해 Δf 를 BPSK의 대역폭의 크기와 같게 설정하고 변조신호의 중심주파수에 위치하였을 때, BPSK 변조방식의 가장 높은 BER 값을 얻는다. 그림 6은 Δf 가 BPSK의 대역폭과 같다고 할 때, BPSK의 중심주파수에 Chirp신호가 위치해있을 때와 15, 30kHz 떨어져있을 때의 전파교란신호가 BPSK 변조방식의 BER 성능에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 분석한 결과 전파교란신호의 전력이 30dBm 일 때 전파교란신호가 중심주파수에 있을 때와 중심주파수에서 30kHz 떨어져있을 때의 BER 성능은 약 0.4 정도의 차이를 보인다. 따라서 chirp 전파교란신호의 Δf 가 무선통신신호의 대역폭과 같을 때 무선통신시스템의 주파수 대역 내에 전파교란신호의 주파수의 위치에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 무선통신시스템에서 BPSK 변조방식에 대해 chirp 전파교란신호의 Δf 파라미터는 무선통신대역폭의 절반인 30kHz가 가장 최적의 값이다.

Chirp 전파교란신호는 Δf 만큼 주파수 도약하고 Δt 동안 chirp 신호를 방사한다. 전파교란신호의 주파수 sweep 주기는 Δt 와 비례한다. 음성을 전송하는 무선통신시스템의 성능을 크게 저하시키기 위한 chirp 전파교란신호의 Δt 에 대한 최적화 또한 필요하다. 무선통신시스템에서 64kHz의 대역폭을 가지는 BPSK

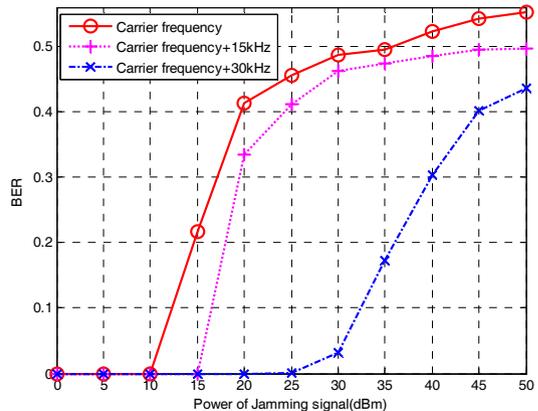


그림 6. Chirp 전파교란신호의 Δf 에 따른 BPSK 변조방식의 BER 성능
Fig. 6. BER performance of BPSK according to Δf of chirp jamming signal

변조방식을 사용하고 OFDM 전파교란신호와 마찬가지로 무선통신시스템에서의 하나의 음성샘플의 전송 시간은 $125\mu s$ 이고, 하나의 비트 전송시간은 $15.625\mu s$ 이다. 따라서 하나의 비트 오류를 나타내기 위해서는 하나의 비트 전송시간만큼 무선통신시스템의 대역폭 내에 chirp 전파교란신호를 방사해야 한다. Chirp 전파교란신호의 Δf 가 30kHz로 설정하였을 때, BPSK 변조방식을 사용하는 무선통신시스템에서는 $5\mu s$ 이상의 Δt 가 필요함을 알 수 있다.

IV. 전파교란환경에서 변조방식 별 성능분석

4장에서는 OFDM 및 chirp 전파교란환경에서 변조방식 별 성능평가 결과를 분석한다. 전파교란신호의 전력에 따라 무선통신시스템 모델로서 고려한 아날로그 변조방식의 CNR 성능과 디지털 변조방식의 BER 성능을 분석하였다. CNR과 BER 성능은 기준 음성신호의 입력 비트와 수신된 신호의 수신 비트를 비교하여 오류가 발생한 비트의 비율을 계산한다. BER 수식은 다음 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$BER = \frac{N_{error\ bit}}{N_{bit}} \quad (3)$$

또한 수신된 음성의 품질을 STOI를 통해 분석하였다. 먼저 음성 신호를 시간 축 상에서 프레임 단위로 나눈다. 한 프레임은 256개의 음성 샘플로 구성되며 원 음성과 노이즈 음성의 각 프레임의 상호관계 평균값으로 STOI 값을 도출한다^[7].

4.1 OFDM 전파교란환경에서 변조방식 별 성능 분석

표 3은 OFDM 전파교란신호의 파라미터를 나타낸다. 무선통신시스템의 변조방식 별 파라미터는 표 1과 같다. 그림 7과 8은 OFDM 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별 CNR과 STOI 성능을 나타낸 것이다. OFDM 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별

표 3. OFDM 전파교란신호의 파라미터
Table 3. Parameters of OFDM jamming signal

T_{rad}	16 μs
T_{PLL}	0 μs
Bandwidth	40 MHz
Sweep frequency range	320 MHz

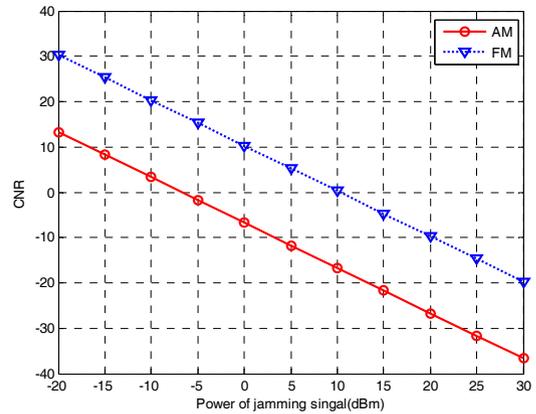


그림 7. OFDM 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별 CNR 성능
Fig. 7. CNR performance of analog modulation schemes under OFDM jamming

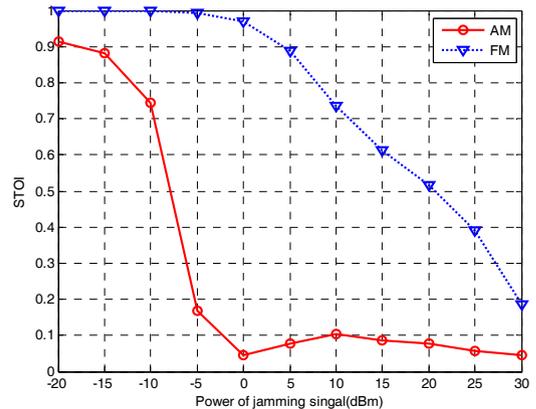


그림 8. OFDM 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별 STOI 성능
Fig. 8. STOI performance of analog modulation schemes under OFDM jamming

CNR 성능은 전파교란신호의 전력이 증가함에 따라 CNR의 값은 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. OFDM 전파교란환경에서 AM의 CNR 성능은 FM에 CNR 값에 비해 17dB 낮게 나타난다. 또한 수신된 음성신호의 품질을 나타내는 STOI의 경우 변조방식 별 CNR 값이 0dB 이하일 때 STOI의 성능감쇠가 크게 나타난다. AM, FM의 수신된 음성신호는 전파교란신호의 전력이 각각 -5dBm, 25dBm일 때 STOI의 값이 0.5이하로 나타난다. AM에서 전파교란신호의 전력이 0, 5dBm에서의 STOI의 값이 10dBm일 때 보다 작게 나타난다. 이는 전파교란신호의 전력이 0dBm 이상일 때 수신된 음성의 품질이 크게 저하되어 STOI의 값이 0.1 이하로 나타나며, 실제 음성을

들어보았을 때 0에서 30dBm의 전파교란신호의 전력이 작용하였을 때 수신된 음성품질의 차이가 사람이 인지할 수 있을 정도로 크게 나타나지 않는다. OFDM 전파교란환경에서는 신호의 전력에 영향을 미치어 AM의 성능 감쇠가 FM에 비해 크게 나타난다.

그림 9와 10은 OFDM 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER과 STOI 성능을 나타낸 것이다. OFDM 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER 성능은 전파교란신호의 전력이 증가함에 따라 BER의 값도 높아지는 것을 확인할 수 있다. 보통 음성의 경우 BER이 0.2 이상일 때 음성의 품질이 크게 저하된다. OFDM 전파교란환경에서 BER 0.2를 기준으로 GMSK와 MSK 성능이 유사하게 나타나며 다른 디지털 변조방식에 비해 안정한 것을 확인할 수 있다.

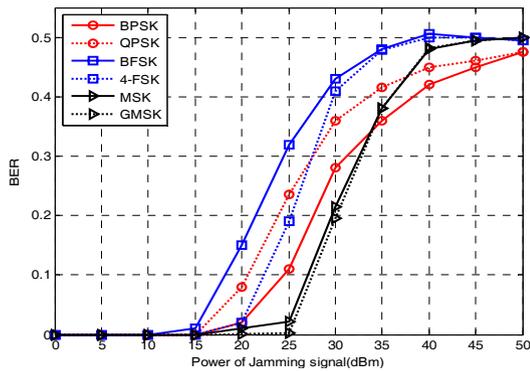


그림 9. OFDM 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER 성능
Fig. 9. BER performance of digital modulation schemes under OFDM jamming

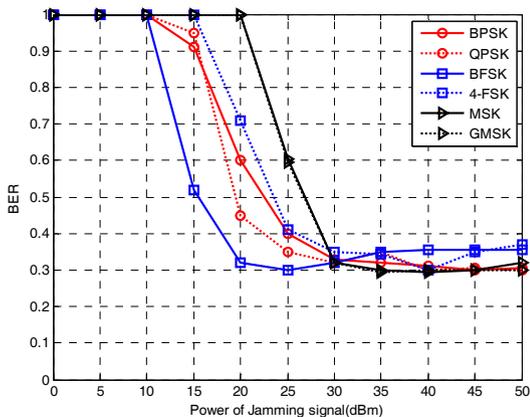


그림 10. OFDM 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 STOI 성능
Fig. 10. BER performance of digital modulation schemes under OFDM jamming

OFDM 전파교란신호의 전력이 30dBm이상일 때 디지털 변조방식의 BER은 0.2 이상으로 나타난다. 아날로그 변조방식에 비해 안정적인 것을 확인할 수 있다. 또한 수신된 음성신호의 품질을 나타내는 STOI의 경우 BER의 값이 증가함에 따라 STOI의 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 각 디지털 변조방식의 STOI 성능 또한 OFDM 전파교란신호의 전력이 30dBm 이상일 때 0.5 이하로 나타나 수신된 음성신호의 품질이 크게 저하되는 것을 확인할 수 있다.

4.2 Chirp 전파교란환경에서 변조방식 별 성능분석

표 4는 chirp 전파교란신호의 파라미터를 나타낸다. 또한 무선통신시스템의 변조방식 별 파라미터는 표 1과 같다. 그림 12와 13은 chirp 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별 CNR과STOI 성능을 나타낸 것이다.

Chirp 전파교란환경에서 아날로그 변조방식별 CNR 성능은 OFDM 전파교란환경과 같이 전파교란신호의 전력이 증가함에 따라 CNR의 값은 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 OFDM 전파교란환경과 달리 AM이 FM보다 CNR의 값이 5dB 정도 크게 나타난다. 또한 수신된 음성신호의 품질을 나타내는 STOI도 AM이 FM보다 안정적이다. AM, FM의 수신된 음성신호는 전파교란신호의 전력이 각

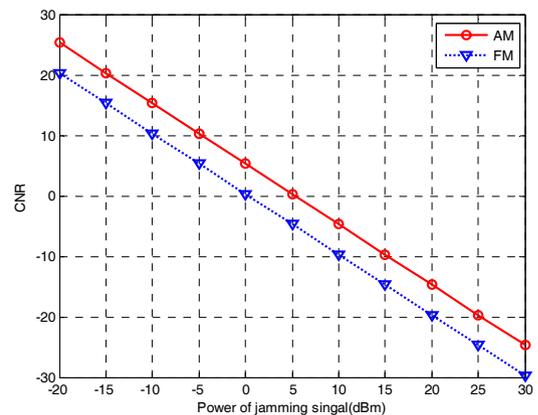


그림 11. Chirp 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 별 CNR 성능
Fig. 11. CNR performance of analog modulation schemes under chirp jamming

표 4. Chirp 전파교란신호의 파라미터
Table 4. Parameters of chirp jamming signal

Δf	30 kHz
Δt	16 μs
Sweep frequency range	1 MHz

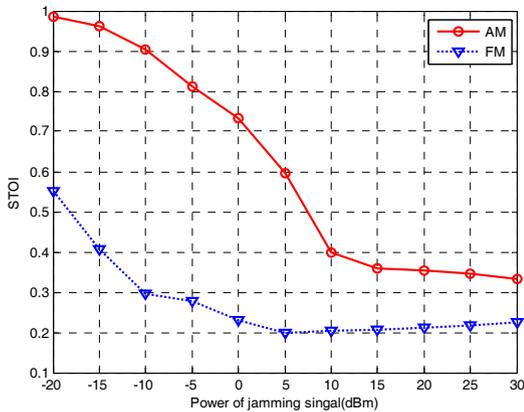


그림 12. Chirp 전파교란환경에서 아날로그 변조방식 STOI 성능
Fig. 12. STOI performance of analog modulation schemes under chirp jamming

각 10dBm, -15dBm일 때 STOI의 값이 0.5이하로 나타난다. 이는 chirp 전파교란환경에서 무선통신신호의 주파수에 크게 영향을 미치어 FM의 성능 감쇠가 AM에 비해 크게 나타난다.

그림 13과 14는 chirp 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER과 STOI 성능을 나타낸 것이다. Chirp 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER 성능은 OFDM 전파교란환경과 마찬가지로 전파교란신호의 전력이 증가함에 따라 BER 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. OFDM 전파교란환경에서와 마찬가지로 BER 0.2를 기준으로 하였을 때 MSK와 GMSK가 안정적인 것을 확인할 수 있다. Chirp 전파교란환경에서의 디지털 변조방식 별 STOI 성능 또한 MSK와

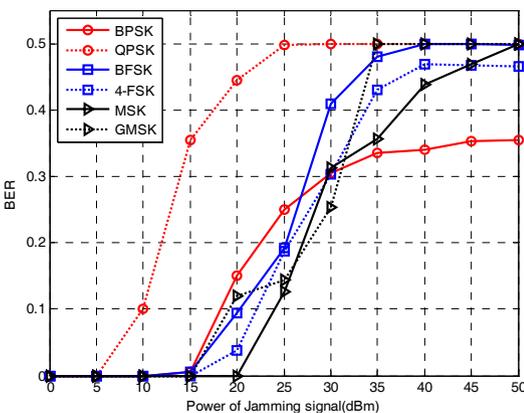


그림 13. Chirp 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 BER 성능
Fig. 13. BER performance of digital modulation schemes under chirp jamming

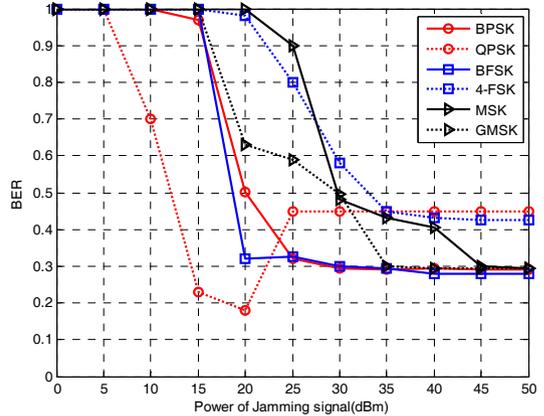


그림 14. Chirp 전파교란환경에서 디지털 변조방식 별 STOI 성능
Fig. 14. STOI performance of digital modulation schemes under chirp jamming

GMSK 변조방식에서 다른 변조방식들 보다 우수하게 나타났다. 4-FSK 변조방식의 STOI의 성능은 GMSK 보다 높은 값을 가지나 실제 음성을 확인하였을 때, 수신된 음성의 품질은 GMSK가 4-FSK보다 약간 우수하게 나타난다. 이는 STOI 알고리즘 또한 음성의 품질을 객관적으로 평가하기 때문에 나타나는 한계점이다. 수신된 음성의 품질이 크게 저하되어 STOI의 값의 오류가 발생한 것이다. Chirp 전파교란 환경에서는 전파교란신호의 전력이 35dBm 이상일 때 모든 디지털 변조방식의 수신된 음성신호의 품질을 나타내는 STOI의 값이 0.5 이하임을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 무선통신시스템에서 널리 사용되는 변조 및 복조방식과 OFDM, chirp 전파교란환경을 모델링하였다. 또한 가장 안정적인 변조방식인 BPSK를 기준으로 전파교란신호의 파라미터를 최적화하였다. 각 전파교란신호의 파라미터에 따른 BPSK 변조방식의 BER 성능과 수신된 음성의 품질을 STOI로 분석하여 OFDM 전파교란신호의 파라미터(T_{rad} , OFDM 신호의 대역폭)과 chirp 전파교란신호의 파라미터 (Δf , Δt)를 최적화하였다.

전파교란신호의 파라미터에 따른 전파교란환경에서의 무선통신시스템의 변복조방식 별 CNR, BER의 성능과 수신된 신호의 음성품질은 OFDM 전파교란신호에 의해 포락선에 대한 영향을 크게 받아 FM에 비해 수신된 음성의 품질 저하가 크게 나타나며, chirp 전파교란신호는 FM 변조신호의 주파수 성분의 영향

을 크게 주어 STOI의 값이 AM에 비해 매우 낮게 나타났다. 디지털 변조방식의 경우 GMSK가 OFDM 및 chirp 전파교란신호 환경에서 BER 성능이 가장 우수하였고, 수신신호의 음성품질 또한 가장 높게 나타났다. 분석 결과를 통해 항재밍 시스템의 개발 단계에서 성능평가도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] K. Y. Kim, "Analysis of anti-jamming techniques for satellite navigation systems," *J. KICS*, vol. 38C, no. 12, pp. 1216-1227, 2013.

[2] D. Y. Choi, W. K. Kim, H. R. Cho, and J. H. Kim, "Performance of analog and digital modulation schemes under sweep jamming," *2016 8th Int. Conf. Ubiquitous and Future Netw.*, pp. 13-15, 2016.

[3] W. Dal, C. Qiao, Y. Wang, and C. Zhou, "Improved anti-jamming schemes for direct-sequence spread spectrum receivers," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 2, 2016.

[4] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University, 2005.

[5] S. Bernard, *Digital Communications*, PrenticeHall, 2004

[6] C. H. Taal, R. C. Hendriks, R. Heusdens, and J. Jensen, "A short-time objective intelligibility measure for time-frequency weighted noisy speech," *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.*, pp. 4214-4217, Mar. 2010.

[7] C. H. Taal, R. C. Hendriks, R. Heusdens, and J. Jensen, "An algorithm for intelligibility prediction of time-frequency weighted noisy speech," *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 19, pp. 2125-2136, 2011.

[8] S. Mighani, M. Mivehchy, and M. F. Sabahi, "Evaluating sweep noisy barrage jamming effect on tracking radar based on functioning destruction time," *2014 7th Int. Symp. Telecommun.*, pp. 400-404, 2014.

[9] I. Harjula, J. Pinola, and J. Prokkola, "Performance of IEEE 802.11 based WLAN devices under various jamming signals," *2011 Military Commun. Conf.*, pp. 2129-2135, 2011.

고 준 영 (Jun-Young Ko)



2017년 2월 : 아주대학교 전자공학부 졸업
 2017년~현재 : 아주대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 디지털 통신 시스템, 이동통신, 신호처리, 인공지능

이 동 학 (Dong-Hak Lee)



2016년 2월 : 아주대학교 전자공학부 졸업
 2018년 2월 : 아주대학교 전자공학과 석사
 2018년 7월~현재 : 삼성전자 네트워킹사업부

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 디지털 통신 시스템, WLAN 등

최 동 열 (Dong-Yeol Choi)



2015년 2월 : 아주대학교 전자공학부 졸업
 2017년 2월 : 아주대학교 전자공학과 석사
 2017년 3월~현재 : Solvit system Inc.

<관심분야> 무선통신, 차세대 이동통신 시스템, 디지털 통신 시스템

이 충 희 (Choong-Hee Lee)



2006년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
 2015년 3월~현재 : LIG넥스원 통신체계PM 선임연구원

<관심분야> 전송통신, 이동통신, QoS, QoE

박 형 원 (Hyung-Won Park)



2003년 2월 : 아주대학교 정보
및 컴퓨터공학과 학사
2005년 2월 : 아주대학교 정보
통신공학과 석사
2009년 8월 : 아주대학교 정보
통신공학과 박사
2009년 9월~현재 : LIG넥스원
통신체계PM 팀장

<관심분야> 기술데이터링크, 군 위성통신, 이동통신

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 : 한양대학교 전
산과 학사 및 석/박사 졸업
1997년~1998년 : 미국 UCLA
전기전자과 박사 후 연수
1998년~2003년 : Bell Labs,
NJ, USA, 연구원
2003년~현재 : 아주대학교 전자
공학과 교수

<관심분야> QoS/QoS, 무선 MAC 프로토콜,
IEEE 802.11/15, B5G 통신 시스템, 국방 기술네
트워크, 위성시스템 등