

부분 대역 재밍 환경에서 SFH(Slow Frequency Hopping) 위성 통신 방식을 사용하는 A-NED(Adaptive NED) 알고리즘 항재밍 성능 분석

A Study of Anti-Jamming Performance using A-NED(Adaptive NED) Algorithm of SFH(Slow Frequency Hopping) Satellite Communication Systems in PBNJ

김 성 호* 신 관 호** 김 희 중*** 김 영 재*
Sung Ho Kim Kwan Ho Shin Hee Jung Kim Young Jae Kim

Abstract

As of today, Frequency Hopping techniques are widely used for over-channel interference and anti-jamming communication systems. In this paper, analysis the performance of robustness on the focus of some general jamming channel. In FH/SS systems, usually SFH(Slow Frequency Hopping) and FFH(Fast Frequency Hopping) are took up on many special communication systems, the SFH, FFH are also combined with a channel diversity algorithm likes NED(Normalized Envelop Detection), EGC(Equal Gain Combines) and Clipped Combines to overcome jammer's attack. This paper propose Adaptive-NED and shows A-NED will be worked well than the others in the some general jamming environments.

Keywords : AJM(항재밍), NED(Normalized Envelope Detection), FFH(Fast Frequency Hopping), SHF(Slow Frequency Hopping), A-NED(Adaptive-NED)

1. 서 론

오늘날 위성통신은 지형적 제한이 없어 통신가능 구역이 넓어지고 재해가 발생해도 통신의 제약을 받지

않으며 고주파수대의 전파를 이용한 초고속 전송이 가능하여 세계적으로 많이 사용되고 있다. 특히, 적도상공 약 36,000km에서 정지하여 있는 것처럼 보이는 정지궤도 위성통신망은 바로 이러한 지형적인 제약을 극복할 수 있는 가장 능률적인 수단이다. 이러한 지형적인 제한 없이 쉽게 위성 통신망을 액세스 할 수 있다는 장점은 재밍 환경에 쉽게 노출되는 문제점 또한 단점으로 존재하게 된다.

우리나라 최초의 항재밍 기능을 보유한 위성 통신 체계는 무궁화 5호의 군용 중계 주파수 대역이며 의도

† 2009년 10월 15일 접수~2010년 1월 8일 게재승인
* 삼성탈레스 종합연구소(SIAT, Samsung Thales Co. Ltd)
** 국방과학연구소(ADD)
*** 국방기술품질원
책임저자 : 김성호(zeulja.kim@samsung.com)

적인 통신 교란 및 감청과 방해 신호(Jamming Signal) 등도 극복할 수 있도록 설계되어 졌다. 이러한 재밍 환경이라는 채널 환경에 대처하기 위한 특수 목적의 통신에서는 대역확산방식(Spread Spectrum)으로 DS/SS(Direct Sequence Spread Spectrum)와 FH/SS(Frequency Hopping Spread Spectrum)를 주로 고려하게 되며 실제 설계에 적용하고 있다.

참고로 재밍 신호의 경우 재밍 행위 자체가 유효성을 가지기 위해서 제한된 에너지(J_0)와 제한된 대역폭(W_j)을 가지게 되는데, W_{ss} (확산 대역폭)가 재밍 대역폭(W_j)보다 작은 경우($W_j > W_{ss}$)는 확산된 신호가 재밍 신호와 충돌확률이 $P_{hit}=1$ 이기 때문에, W_{ss} 값이 작은 경우 통신이 거의 어렵다고 볼 수 있지만 W_{ss} 가 넓은 경우 재밍 신호(J_0)의 파워도 약해지므로 효과적인 재밍이 되지 않을 수도 있다. 그 외 W_{ss} 가 W_j 에 비해 한없이 큰 경우는 충돌 확률^[2]이 낮아 FEC 혹은 DC(Diversity Combines 이하 DC)를 통하여 어느 정도의 오율을 극복하면서 통신이 가능하게 된다.

결국 항재밍 성능을 직접적으로 연결할 수 있는 물리적인 파라미터는 W_{ss} 가 얼마나 큰가 인데, DS/SS의 경우 현재까지의 고속 신호처리 속도를 감안 하더라도 50MHz 이상의 확산이 어려운 단점이 있다. DS/SS 방식의 이러한 점은 통상적인 재밍 환경을 극복하기에는 무리가 있어 재밍 환경이 저위협 모드인 경우에 한하여 일부 사용하고 있다.

이러한 확산 대역폭의 제한적인 단점을 극복하기 위해 주파수 도약 확산 방식을 사용함으로써 500MHz 이상의 광대역 도약 신호를 만들 수 있게 되다. 이러한 시스템은 주로 코드 발생기 및 주파수 합성기로 구성되며 광대역 확산을 통해 재밍 충돌 확률에 근간이 되는 $\rho=W_j/W_{ss}$ 값을 작게 만들 수 있고 이 값은 Diversity Combine을 통해 식 (1)의 형태로 낮아지게 되어 항재밍 성능이 좋아지게 된다.

본 논문에서는 주파수 도약 방식으로 대역확산 하는 시스템에서 기존 Diversity Combine 방식 중에서 성능이 뛰어난 NED(Normalized Envelope Detection) 알고리즘을 사용하는 기존 시스템의 항재밍 성능을 분석하고 나아가 수신된 NED 심볼의 재밍 충돌 여부를 판별하는 JSD(Jammed Signal Discriminator)를 사용하여 재밍된 신호를 제거하는 Adaptive-NED 알고리즘을 적용한 제안된 시스템의 항재밍 성능을 분석한다.

2. 본 문

주파수 도약 방식의 통신 방법은 기 알려진 바와 같이 하나의 주파수에 여러 심볼을 전송하는 SFH 방식과 하나의 심볼을 여러 주파수로 전송하는 FFH 방식으로 나누어진다. 이를 Fig. 1에서 나타내고 있다. 현재 까지 개발된 시스템에서는 항재밍 측면에서 한번 재밍 당했을 때 Loss되는 심볼의 수가 SFH에 비해 상대적으로 적은 FFH시스템을 선호해 왔으며, 재밍의 위협으로부터 생존성을 극대화하기 위해 상대적으로 높은 오율에서 통신이 가능한 음성위주의 저속 데이터 전송을 고려한 네트워크의 설계가 이루어 졌다. 이런 통신 시스템들은 주로 non-coherent detection이 가능한 M-ary FSK 방식의 변복조를 채택하고 FFH전송을 통해 Diversity Combine을 수행하여 항재밍 성능이 최대화 될 수 있도록 구현되고 있다^[2].

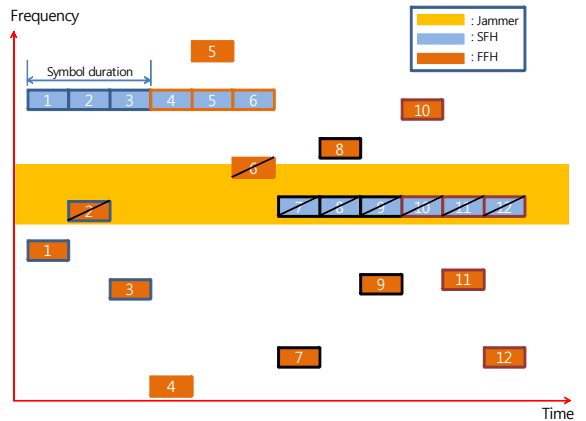


Fig. 1. SFH 시스템과 FFH 시스템

하지만 FFH라는 특징으로 변복조 방식이 M-ary FSK등으로 제한되기 때문에 대역 효율이 낮고 고속 데이터 전송이 어려워 향후 지속적으로 요구되는 고용량 멀티미디어 데이터통신에 심각한 제약과 가지고 있다.

그 외에도 FFH 시스템은 Fig. 1에서 도시한 바와 같이 하나의 주파수에 하나의 심볼만을 전송하기 때문에 주파수 도약을 통해 Diversity Combine하는 과정에서 특정 개수 이상의 재밍에 영향을 받는 경우 복원이 불가능하다는 단점이 있다.

FFH에 비해 SFH 시스템의 경우 Fig. 1에서 보듯 하나의 주파수에 다수의 심볼 전송이 가능하기 때문에

변복조 방식에 제한이 없어 대역효율이 좋은 PSK 계열의 적용이 가능하다. 이 때문에 고속 대용량 데이터 전송이 가능한 장점이 있지만 재밍 신호와 충돌하는 경우 한 번에 다수의 심볼이 오염되는 문제도 존재한다.

하지만 이러한 단점도 몇 가지 하드웨어적인 부담(다수의 심볼 저장을 위한 큰 메모리, 고속의 NED 연산을 위한 신호처리 등)을 극복하고 NED 알고리즘을 SFH시스템에 적용하게 되는 경우 항재밍 성능은 FFH 시스템과 크게 달라지지 않는다.

결국 SFH에서 NED를 적용하는 경우 항재밍 성능을 개선할 수 있고 현재 요구되고 있는 항재밍 통신 시스템의 경우 항재밍 기능을 일부 지원하는 범위에서 고속 데이터 전송이 요구 되고 있기 때문에 이를 수용하기 위해서는 SFH시스템의 디자인이 필수적이라고 볼 수 있다.

SFH시스템에 NED와 같은 Diversity Combine 알고리즘을 적용하기 위해서 FFH시스템에서 이루어지는 Diversity Combine을 방식의 일부를 살펴본다.

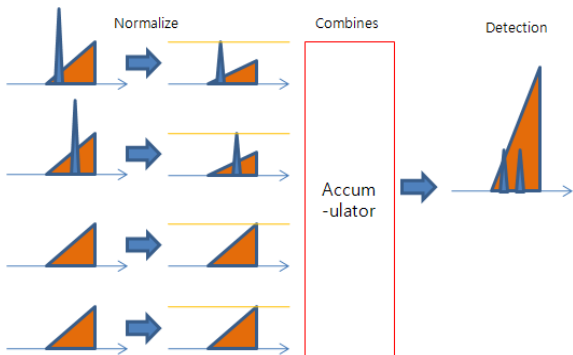


Fig. 2. SFH 시스템과 FFH 시스템에서의 NED 알고리즘 동작

FFH시스템에서 Diversity Combines 방식으로 수신되는 심볼의 MJ(majority vote), Energy Clipped Combines, HDMV, NED등의 알고리즘을 주로 사용하며 홀수개의 개수를 가지는 시스템을 디자인해야 하는 단점이 있는 MJ를 제외하고 NED, Clipper, HDMV 알고리즘 등이 선호 되고 있다^[3,4]. Fig. 2에서는 하드웨어 설계가 간단하면서도 좋은 항재밍 성능을 가지는 NED의 처리과정을 나타낸다. 전송되는 신호는 정해진 N번의 frequency diversity를 통해 송신되어 지며 partial band jammer가 전체 도약 대역폭의 10%의 점유 대역을 가

지고 신호보다 큰 파워로 방해 전파를 방사하고 있다면(도약 시퀀스의 balance 특성이 균일하다고 볼 때) 송신되는 심볼중 10%는 재머의 영향을 받아 수신될 것이다. 수신기에서는 일반적인 수신 심볼별 AGC 같은 방식으로 수신신호 레벨의 관점에서 normalize하고 N개의 수신 신호의 에너지를 합친 뒤 복조해내는 알고리즘이다.

이 NED와 같은 알고리즘을 사용하는 Diversity Combine 방식의 항재밍 waveform의 경우 최소 반 이상의 심볼들이 재밍당하지 않는 경우 생존 확률이 굉장히 높으며 이를 구체적으로 재밍 대역폭의 증가에 따라 분석해볼 경우, $\rho=W_j/W_{ss}$ 값의 변화는 DC시 다수 심볼(N)전송에서 반 이상의 심볼이 재밍을 맞을 확률을 식 (1)과 같이 정의해 볼 수 있다.

예를 들어 N=8인 diversity combines 값을 가지고 $\rho=0.1$ 인 채널 환경을 가정하면 대역폭이 5배 증가했다고 가정할 때 도약 대역폭의 증가는 재밍 대역의 상대적인 감소로 이어 지며 channel diversity를 하지 않는 경우 단순히 5배정도 증가로 인해 $\rho=0.02$ 로 미세한 변화를 가지지만 N번 diversity가 이루어지고 반 이상의 심볼이 재밍 당한 경우 심볼 에러 확률은 아래와 같은 확률 수식을 적용하여 계산 할 수 있다.

$$P_{error} = \sum_{l=N/2+1}^N \binom{N}{l} C_l * ((1-\rho)^{N-l} * (\rho)^l) \tag{1}$$

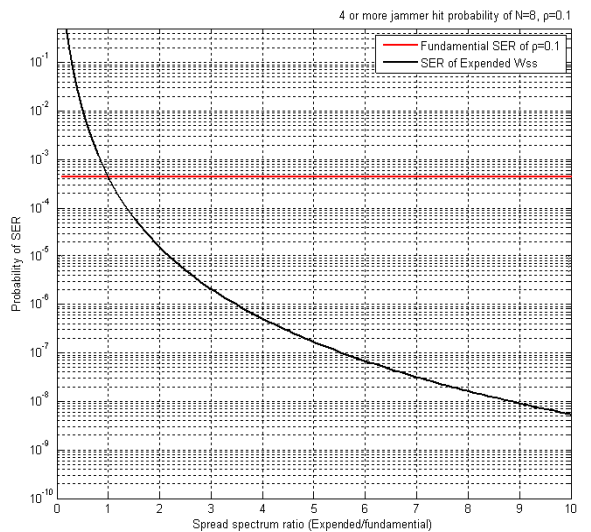


Fig. 3. 도약 대역폭 변경에 따른 HIT에 따른 에러 확률(N=8, $\rho=0.1$)

$\rho=0.1$ 이 인 경우 $p_{\text{error}}=4.3172e-04$ 이 되지만, 도약 대역이 5배 증가한 값 $\rho'=0.02$ 에 대해 $p'_{\text{error}}=1.7039e-07$ 이 되어 항재밍 성능이 개선된다.(이 값은 수신기 성능을 배제한 물리적 채널 상황에서의 충돌로 인한 에러 확률임, 실제 에러 확률은 충돌확률에 비해 더 좋아짐)

제안된 A-NED 시스템

FFH시스템의 경우 기존 언급된 바와 같이 재밍에 의해 오염되어 수신되는 심볼의 오염 정도에 대한 패킷 검사 과정이 어렵기 때문에 NED의 수신 패킷당 weight를 가중 시킬 수 없고 이 때문에 A-NED적용이 어렵다. Fig. 4에서는 A-NED를 사용하는 SFH 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

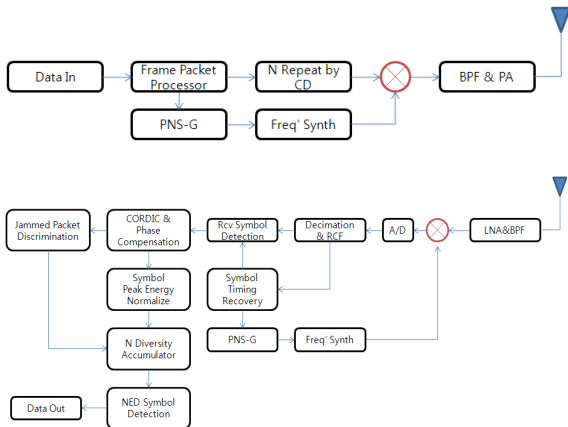


Fig. 4. A-NED를 사용하는 SFH 시스템의 송수신 블록도

제안된 시스템에서는 수신시 동기 획득을 위한 Preamble 구간을 Jammed Packet Discrimination(이하 JPD)구간으로 잡고 이 부분에 대한 에러율을 검사한 뒤 NED Accumulator에 누적 여부를 결정한다. 기존의 수동적 NED 방식의 경우 N회 diversity시 N/2회 이상 충돌이 나는 경우 복원이 어려운 문제점이 있고 이를 jammed packet 판별 과정을 통해 개선하면 재밍 당하지 않은 심볼들에 대한 NED 누적이 확률적으로 높아짐으로써 N개의 diversity symbols 중 정상적인 심볼들 중 하나만 이라도 재밍을 피하기만 한다면 복조 확률을 굉장히 높일 수 있다. 실제 JPD의 알고리즘은 일부 지속적 연구가 이루어져야 되겠지만 단순히 본 논문에서 사용한 방법과 같은 수신 패턴 검사를 통한

jammed packet을 구분하여 제거 가능하다고 가정한다면 N회 A-NED가 이루어지는 시스템에서의 전송 에러 확률은 식 (2)와 같이 된다.

$$PER_{\text{lower}} = \sum_{l=N-1}^N (N C_l * ((1 - P_{\text{hit}})^{N-l} * (P_{\text{hit}})^l) \tag{2}$$

여기서 P_{hit} 는 ρ 값을 따른다. 앞서 언급한 바와 같이 $\rho=0.02$ 에 대해 NED알고리즘의 충돌 확률에 따른 에러율은 $p_{\text{error}}=1.7039e-07$ 이 되지만 A-NED를 적용하는 경우를 대략 계산해 보면 $p_{\text{a_ned_error}}=1.0240e-011$ 으로 개선되게 된다.

3. 성능 분석

SFH 시스템에서 k symbols/hop 시스템을 가정하고 k개의 심볼 중 30%에 해당하는 n 심볼들을 preamble 및 JSD의 pattern check block으로 사용한다. JSD에서 정해진 PE%이상의 패턴이 불일치하는 경우 jammed packet으로 판정, 해당 수신된 주파수내의 심볼들을 Accumulator 내에 누적하지 않는 A_NED를 사용한다. 만약 Diversity Combine이 2회인 경우 NED=2에서 수신된 심볼들이 모두 재머에 맞는 경우 두 수신된 심볼을 합하여 판단하는 것으로 가정한다. 이를 통해 나온 성능을 기존 NED와 비교 분석 한다.

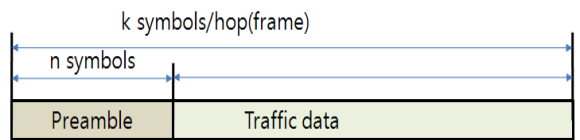


Fig. 5. 일반적인 SFH 시스템의 프레임 구조

주파수 도약 시스템에서는 일반적인 고정 주파수 통신 시스템과 달리 도약 시퀀스 검색을 통한 동기 획득 시나리오를 진행 하게 되는데 이와 관련된 과정은 시뮬레이션에서 생략하기로 한다. 결국 도약 동기가 일치 한다는 가정 아래에서 SFH 시 매 주파수 마다 수신되는 다수의 심볼들에 대해 frame별 재 동기과정을 진행하기 위해 필요한 preamble 구간은 전체 $k=100 \text{ symbols/frame}$ 중에서 $n=30\text{symbols}$ 의 이라고 정의 하였으며 이를 채널에 전송하고 수신된 값을 JPD에서 preamble 구간 내 3%, 20%, 40%이상 에러인

경우에 대해 partial band jammer 환경에서 Eb/J0관점에서 BER 성능을 분석하여 보았다.

Table 1. 시뮬레이션 파라미터

항목	내용	비고
FH mode	SHF	
Diversity method	NED/A-NED	
Modulation scheme	QPSK	
No. of NED	2	
symbols/frame	100	
No. of preamble	30	
A-NED 적용 시	JPD=3%, 20%, 40% 구간에서 Simulation	
Jamming 환경	$\rho=1,0.5,0.1,0.05,0.01$	$\rho=W_j/W_{ss}$

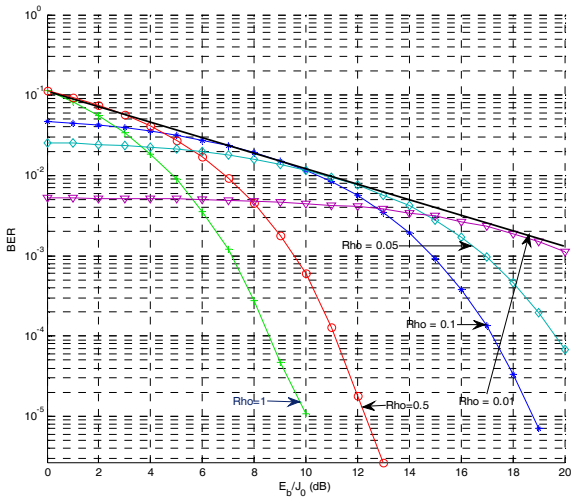


Fig. 6. NED알고리즘 적용 전 ρ 값에 따른 Eb/J0 성능

Fig. 6은 worst case partial-band jammer 성능 그래프를 나타내며 일반적으로 알려진 바와 같이 낮은 ρ 값 즉 $\rho=0.01$ 에서 제한된 재머 에너지로 효과적인 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

음성 통화가 가능한 $Pe(\text{Bit})=10^{-3}$ 을 기준으로 볼 때, NED 2를 사용하는 경우 $\rho=0.1$ 인 재밍 환경 하에서 NED를 하지 않는 경우에 비해 3dB정도의 성능 개선이 이루어지며 A-NED를 사용하는 경우 Eb/J0이 낮은 값을 가질 때 NED 보다 성능이 나아지는 것으로 보

이지만 JPD값에 따른 판단에 의해 Eb/J0이 15dB이상에서 오히려 일반적인 NED보다 좋지 못한 성능을 보이게 되는 현상이 발생한다. 이는 수신된 신호가 모두 재밍을 당했음에도 불구하고 JSD의 관점에서 둘 중 하나의 패킷만 재밍 당했다고 판단하여 두 프레임을 NED Accumulator 하지 못하고 하나만 하는 경우라고 볼 수 있다.

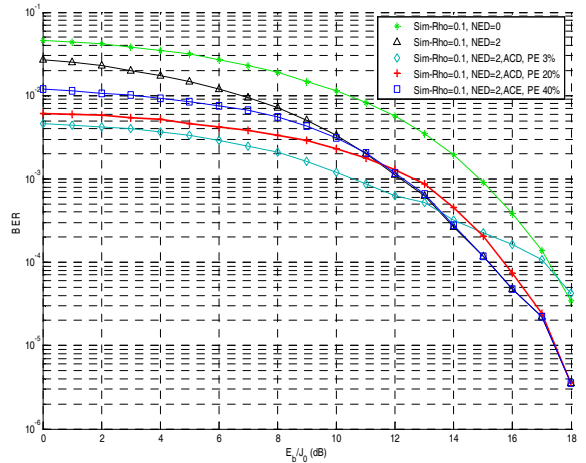


Fig. 7. NED 2 적용 및 A-NED 적용 후 $\rho=0.1$ 에 Eb/J0 성능(JPD=3%, 20%, 40% 구간설정)

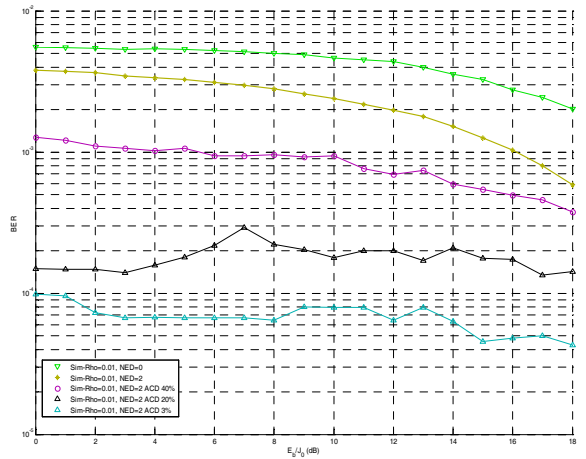


Fig. 8. NED 2 적용 및 A-NED 적용 후 $\rho=0.01$ 에 Eb/J0 성능(JPD=3%, 20%, 40% 구간설정)

Fig. 6에서 극복하기 어려운 재머 환경인 $\rho=0.01$ 에서 A-NED를 사용하는 경우 Fig. 8에서와 같이 JPD 3% 결과는 상당히 낮은 Eb/J0에서 좋은 Pe(bit)에서 출발

하여 성능이 개선되어 지지만 일정한 오율을 지속적으로 이어나가는 그래프 형상을 보인다.

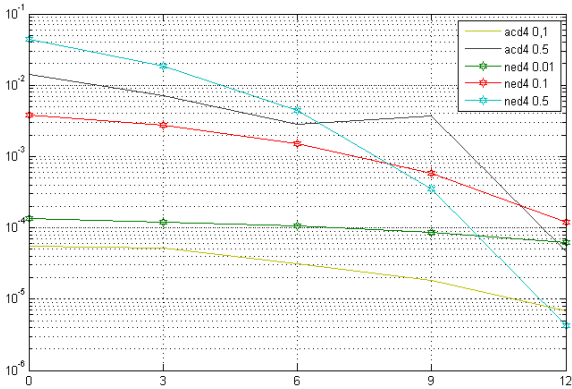


Fig. 9. NED 4 Vs A-NED 4 AJ 성능

Diversity Combines의 값이 커질수록 항재밍 성능은 보완할 수 있지만 전송 효율(DC loss, 전송속도, 대역 효율)을 고려할 때 가장 많이 사용하는 N=4인 경우에 대해 NED와 ANED 성능을 Fig. 9에서 ρ 값을 변경해가면서 비교해 보았다.(참고로 $\rho=0.01$ 인 경우 A-NED는 시뮬레이션 동안 에러가 발생하지 않아 생략 되었음)

4. 결론

항재밍 waveform에서 가장 많이 사용하던 NED 알고리즘의 경우 ρ 값이 낮고 출력이 높은 재밍 환경에서 diversity combines 횟수의 증가 없이는 성능 개선이 어려운 단점이 존재 하였으며 이를 개선하기 위해 제안

된 A-NED 알고리즘은 기존 NED에 비해 같은 충돌 확률을 가지지만 보다 높은 항재밍 성능을 보여 주었으며 시뮬레이션 결과에서 나타난 바와 같이 SFH 시스템의 A-NED가 4이상 되는 경우 BER 성능이 월등히 개선되는 것을 볼 수 있다.

앞으로 A-NED 알고리즘에 큰 영향을 미치는 JPD 결정 알고리즘의 보다 깊은 연구와 개선을 통해 실제 항재밍 waveform 설계에 현실적이고 효과적으로 적용 될 수 있을 것으로 기대 된다. 이외에도 다양한 jamming 채널과 결합된 낮은 E_b/N_0 조건에서의 성능 분석을 추후 진행 할 예정이다.

Reference

- [1] BERNARD SKLAR, "Digital Communications", Prentice Hall, Section 12.4, pp. 738~745, 2001.
- [2] John G. Proakis, "Digital Communications", MacGraw Hill, Section 12.3, pp. 807~813.
- [3] Gulliver, T. A., "The Performance of Diversity Combining for Fast Frequency Hopped NCMFSK in Rayleigh Fading", Military Communications Conference, 1992. MILCOM '92, Conference Record. 'Communications - Fusing Command, Control and Intelligence', IEEE, Vol. 2, pp. 452~457, 11~14 Oct. 1992
- [4] K. S. Gong, "Performance of Diversity Combining Techniques for FH/MFSK in Worst Case Partial Band and Multi-Tone Jamming", Proc. IEEE Milcom, Vol. SAC-4, pp. 216~233, Mar 1986.