

추적 파라미터를 고려한 주파수 도약신호 추적 잡음 재밍의 성능 분석

Performance Analysis of Follower Noise Jamming Considering Tracking Parameters
against Frequency Hopping Signals

이 치 호* 조 성 진* 류 정 호*
Lee, Chi-Ho Jo, Sung-Jin Ryu, Jeong-Ho

ABSTRACT

In this paper, we analyze the performance of Follower Noise Jamming(FNJ) considering three practical tracking parameters such as tracking bandwidth, tracking time and tracking success probability. The performance of FNJ is compared with that of Partial-Band Noise Jamming(PBNJ) in terms of Symbol Error Rate(SER) at the communication receiver under the assumed typical operation model. It is observed that the performance of FNJ is non-linearly dependent on the tracking bandwidth, the tracking time and the tracking success probability. As we can easily expect, it is also observed that the performance of FNJ is better than that of the PBNJ. Finally, it is shown that, for a fixed tracking bandwidth, the combinations of the required tracking time and the tracking success probability which satisfy a certain required SER.

주요기술용어(주제어) : Follower Noise Jamming(추적 잡음 재밍), Partial-Band Noise Jamming(부분대역 잡음 재밍), Tracking Bandwidth(추적 대역폭), Tracking Time(추적시간), Tracking Success Probability(추적 성공 확률), Average Symbol Error Rate(평균 심볼 오류율)

1. 머리말

군용 전술통신 시스템의 성능을 평가하는 지표로서 저피탐(LPI : Low Probability of Intercept)과 항재밍(AJ : Anti-Jamming) 능력을 이용하고 있다. 이때, 신호의 탐지는 (i) 탐색(Search) 단계 : 신호가

어느 주파수 또는 주파수 대역에 존재하는지 알아내는 단계, (ii) 검출(Detect) 단계 : 해당 주파수 또는 주파수 대역에 현재 신호가 전송 중인지 판단하는 단계, (iii) 탐지(Intercept) 단계 : 송신중인 신호의 순시 주파수, 신호 파형, 변조형태, 동기정보, 데이터 전송율 등의 신호 정보들을 추출하는 단계, 그리고 (iv) 복원(Exploit) 단계 : 위의 모든 정보들을 종합하여, 신호원(음성, 영상, 텍스트, 펌스 등)을 재생성 시키는 단계의 네 가지 단계로 나누어진다^[1]. 미지의 통신 신호를 찾아내서 필요한 정보를 추출하는 전자전 지원

† 2008년 2월 10일 접수~2008년 4월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : chilee@add.re.kr

(ES : Electronic warfare Support)의 입장에서는 위의 네 가지 단계가 모두 중요하지만, 고의로 통신을 교란하기 위한 전자공격(EA : Electronic Attack)의 입장에서는 탐색과 검출 단계가 주로 이용되고, 주파수 도약신호에 대하여는 일부 탐지 단계의 정보까지 이용된다.

앞에서 소개한 저피탐 및 항재밍 능력을 보유한 대표적인 통신방식이 확산대역 통신(Spread Spectrum Communication)이다^[1~5]. 확산대역 통신은 직접확산(DS : Direct Sequence) 방식, 주파수 도약(FH : Frequency Hopping) 방식, 시간 도약(TH : Time Hopping) 방식 그리고 복합(Hybrid) 방식 등이 있으나, 군용 통신에서는 주로 주파수 도약 방식이 이용되고 있고, 최근 직접 확산 방식에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

직접 확산 방식은 시간축에서 칩 시퀀스라 불리는 확산 코드를 신호에 직접 곱하여 신호를 확산하는 방식이고, 주파수 도약 방식은 신호의 반송파 주파수에 도약 주파수를 인가하여 매 홉별로 서로 다른 주파수 대역을 사용하도록 하여 신호를 확산시키는 방식이다. 확산대역 통신의 대역폭을 광대역화하여 신호의 저피탐 및 항재밍 성능을 향상시키고자 할 때, 주파수 도약 방식이 직접 확산 방식보다 유리하다. 왜냐하면, 직접 확산 방식의 경우 칩 시퀀스의 칩 지속시간을 무한히 줄일 수 없으나, 주파수 도약 방식에서는 도약 주파수만 광대역으로 발생시키면 광대역화가 가능하기 때문이다. 그러므로, 주파수 도약 방식이 직접 확산 방식에 비하여 군용 통신방식에 더 적합하다고 할 수 있으며, 현재 주파수 도약 방식의 무전기들은 세계 여러 나라에서 널리 이용되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 주파수 도약 방식에 대한 전자공격, 즉 재밍 기법으로서 주파수 도약신호 추적 재밍 기법의 성능에 대하여 분석하고자 한다.

군용 전술통신에 대한 재밍 기법으로서 다양한 재밍 기법들이 제안되고 분석되었다^[2,3]. 재밍 기법은 재밍 신호원의 종류에 따라 잡음 재밍(Noise Jamming)과 톤 재밍(Tone Jamming)으로 나누어진다. 잡음 재밍은 다시 잡음의 대역폭에 따라 광대역 잡음 재밍(Wide-band Noise Jamming)과 부분대역 잡음 재밍(Partial-band Noise Jamming) 그리고 협대역 잡음

재밍(Narrow-band Noise Jamming)으로 나누어지고, 톤 재밍은 톤의 개수에 따라 단일톤 재밍(Single-Tone Jamming)과 다중톤 재밍(Multi-Tone Jamming)으로 구분된다. 주파수 도약신호에 대한 효율적인 재밍 기법으로서 부분대역 잡음 재밍과 다중톤 재밍이 주로 분석되어 이용되고 있다^[6].

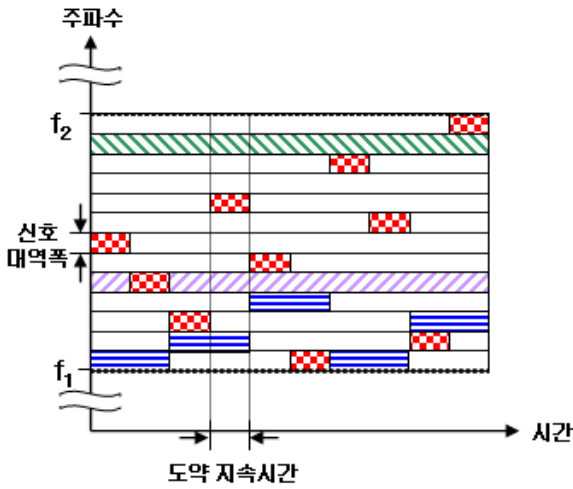
앞에서 설명한 재밍 기법은 일반적으로 주파수 도약신호의 확산 대역폭이 커질수록 재밍효과가 감소하는 특징이 있다. 주파수 도약 신호의 광대역화에 따라서 보다 효율적인 재밍을 위하여 주파수 도약신호 추적 재밍(Follow Jamming) 기법이 착안되었다^[7~9]. 그러나, 최근의 연구에서는 추적 재밍의 구체적인 추적 파라미터에 대한 고려가 미흡하여 추적 재밍의 성능을 분석하는 데에 한계가 있었다. 본 논문에서는 주파수 도약신호에 대한 추적 재밍의 세 가지 추적 파라미터, 즉 추적 대역폭, 추적 시간, 그리고 추적 성공 확률을 고려하여 추적 재밍의 성능을 분석하고자 한다. 그리고, 추적 재밍의 재밍효과를 최적 부분대역 재밍의 재밍효과와 비교함으로써, 추적 재밍의 우수성에 대하여 논의하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 주파수 도약신호에 대한 추적 재밍의 개념에 대하여 소개하고, 추적 재밍의 추적 파라미터에 대하여 설명한다. 그리고, 재밍효과 비교를 위하여 부분대역 잡음 재밍에 대하여 소개한다. 3장에서는 추적 잡음 재밍과 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과를 분석한다. 4장에서는 분석을 위하여 가정한 시스템 모델 및 파라미터를 정의하고, 재밍효과 분석결과를 제시한다. 마지막으로, 5장에서는 본 논문의 결론을 맺고, 추후 연구 방향을 제시하기로 한다.

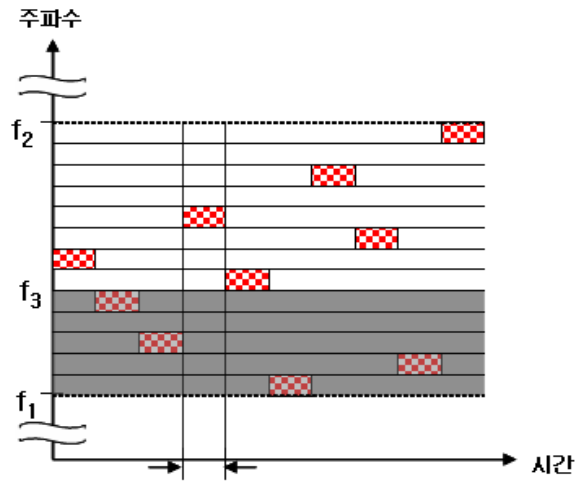
2. 주파수 도약신호에 대한 추적 재밍의 개념

가. 일반화된 신호 수신 모델

그림 1은 무선 전술통신 환경에서 임의의 시간 구간에 대한 신호수신 모델을 일반화하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 고정 주파수 통신의 경우, 미리 정해진 특정 주파수에 신호가 계속 전송되는 반면, 주파수 도약통신의 경우, 매 도약



[그림 1] 일반화된 신호수신 모델



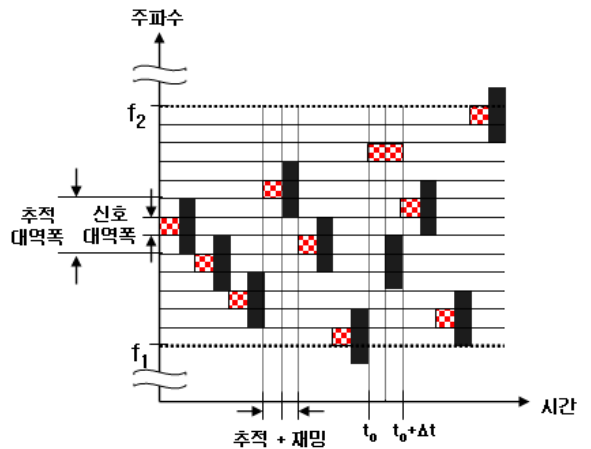
[그림 2] 부분대역 재밍의 개념도

지속시간 마다 주파수를 변경하며 신호를 전송한다. 본 논문에서는 확산 대역폭, 즉 도약 대역폭이 f_1 부터 f_2 까지 인 주파수 도약신호에 대하여 추적 재밍의 성능을 분석하기로 한다.

나. 주파수 도약 신호에 대한 부분대역 잡음 재밍

주파수 도약신호에 대한 재밍 기법으로 광대역 잡음 재밍과 부분대역 잡음 재밍이 있다. 광대역 잡음 재밍은 주파수 도약신호가 도약 가능한 모든 주파수 대역에 재밍 신호를 인가하는 방법으로서, 전대역 잡음 재밍(Full-band Noise Jamming)이라고도 부른다. 주파수 도약신호에 대한 도약 대역폭 탐색은 유사잡음(Pseudo Noise) 코드를 도약 코드로 사용하는 경우, 코드주기의 20% 정도의 관찰 시간으로 전체 도약 대역폭의 90% 이상을 탐색할 수 있는 것으로 분석된 바 있다^[10]. 그러나, 광대역 잡음 재밍의 경우, 주파수 도약신호의 도약 대역폭이 선형적으로 증가할 때, 단위 대역폭당 재밍 전력이 선형적으로 감소하게 되어, 도약 대역폭이 커지는 경우 재밍효과가 급격히 줄어드는 단점이 있다.

이러한 광대역 잡음 재밍의 단점을 보완하고자 착안된 것이 부분대역 잡음 재밍이다. 그림 2는 부분대역 잡음 재밍의 개념을 도시한 그림이다. 부분대역 잡음 재밍은 그림 2에서와 같이 주파수 도약신호가 도약 가능한 도약 대역폭 중 일부의 대역에만 재밍



[그림 3] 추적 재밍의 개념도

신호를 송신한다. 즉, 광대역 잡음 재밍과 비교할 때, 부분대역 잡음 재밍은 잡음 대역폭이 줄어드는 반면 재밍 신호가 인가되는 대역폭에서는 잡음 밀도가 증가하게 된다. 그 결과로 재밍 신호가 인가되는 대역폭 내로 도약되는 신호에 대하여 신호의 성공적 전송을 보다 효율적으로 차단할 수 있다. 도약 대역폭이 커지는 경우, 일반적으로 부분대역 잡음 재밍이 광대역 잡음 재밍에 비하여 큰 수신 심볼 오류율(SER : Symbol Error Rate)을 야기시키는 것으로 알려져 있다. 이 때, 최적 부분대역 잡음 재밍은 가장 높은

심볼 오류율을 야기시키는 재밍 대역폭을 갖는 부분 대역 잡음 재밍을 의미한다.

다. 주파수 도약 신호에 대한 추적 잡음 재밍

그림 3은 추적 잡음 재밍의 개념을 도시한 그림이다. 주파수 도약신호에 대한 추적 재밍을 위하여 전자공격 장비는 먼저 도약 지속시간 이내에 도약된 주파수를 찾아내는 추적 과정을 수행하고, 추적된 주파수 또는 주파수 대역에 잡음 신호를 인가하는 재밍 과정을 수행한다. 광대역 잡음 재밍이나 부분대역 잡음 재밍의 경우, 도약 대역폭에 대한 정보만을 이용하여 전자공격을 실시하는 반면, 추적 잡음 재밍에서는 매 도약에 대한 도약 시작시각 정보와 도약 지속시간 정보를 추가로 요구하게 된다.

그림에서 예상할 수 있는 것처럼, 추적 잡음 재밍의 성능은 다음의 세 가지 요소에 의하여 결정된다. 첫 번째로 도약된 주파수를 다시 찾아내는 데 소요되는 추적 시간이 있다. 이는 얼마나 빨리 도약된 주파수를 찾아내어, 재밍 신호를 인가할 수 있는 시간을 확보할 수 있는가에 연관된다. 두 번째로 도약된 주파수를 주파수 축에서 얼마나 정교한 해상도로 찾아내는가에 해당하는 추적 대역폭이 있다. 이는 전자공격 장비의 수신 장치의 복잡도와 직접적으로 연관된다. 마지막으로 주어진 도약된 주파수에 대한 추적이 얼마나 성공적으로 이루어지는가에 대한 추적 성공 확률이 있다. 그림 3의 예에서는 도약된 주파수를 찾아내는 데 소요되는 추적 시간이 도약 지속시간의 50%인 경우에 대하여, 추적 대역폭이 신호 대역폭의 3배인 경우에 대하여 추적 잡음 재밍의 개념을 도시한 그림이다. 그림에서 $(t_0, t_0 + \Delta t)$ 구간에는 추적에 실패하여, 신호가 존재하지 않는 대역폭에 재밍 신호를 인가한 예를 나타내고 있다. 본 논문에서는 위에서 소개한 세 가지 추적 파라미터에 대하여 추적 잡음 재밍과 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과에 대하여 비교·분석하고자 한다.

3. 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석

전자공격 장비에 주어진 전체 잡음 재밍 전력이 P_j

인 경우, 통신용 수신기에 도달하는 잡음 재밍 전력, $P_{rec,j@Rx}$ 는 2선 지구반사 모델을 고려할 때 다음과 같이 표현할 수 있다^[3].

$$P_{rec,j@Rx} = P_{j,eff} G_{jr} G_{rj} h_j^2 h_r^2 d_{jr}^{-4} \tag{1}$$

여기서, $P_{j,eff}$ 는 추적 대역폭을 고려한 추적 잡음 재밍의 유효 수신 재밍 전력으로, $P_{j,eff} = P_j \cdot BW_{signal} / BW_{FNJ}$ 으로 정의된다. 이 때, P_j 는 전자공격 장비의 전체 재밍 전력을 의미하고, BW_{signal} 은 신호 대역폭을 의미하며, BW_{FNJ} 는 추적 잡음 재밍의 추적 대역폭을 의미한다. G_{jr} 과 G_{rj} 는 각각 전자공격 장비에서 통신용 수신기로의 안테나 이득과 통신용 수신기에서 전자공격장비로의 안테나 이득을 의미한다. 그리고, h_j 와 h_r 은 각각 전자공격 장비와 통신용 수신기의 안테나 높이를 나타낸다. 마지막으로, d_{jr} 은 전자공격 장비와 통신용 수신기 사이의 거리를 의미한다.

같은 방법으로, 통신용 수신기에 도달하는 신호 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{rec,s@Rx} = P_s G_{tr} G_{rt} h_t^2 h_r^2 d_{tr}^{-4} \tag{2}$$

여기서, P_s 는 송신 신호 전력을 의미한다. G_{tr} 과 G_{rt} 는 각각 통신용 송신기에서 통신용 수신기로의 안테나 이득과 통신용 수신기에서 통신용 송신기로의 안테나 이득을 의미한다. 그리고, h_t 는 통신용 송신기의 안테나 높이를 나타내고, d_{tr} 은 통신용 송신기와 통신용 수신기 사이의 거리를 의미한다.

재밍 구간동안 수신된 신호의 심볼당 신호대 잡음비, $(E_s/N_0)_{jam}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{E_s}{N_0} \right)_{jam} = \frac{P_{rec,s@Rx} \cdot T_s}{P_{rec,j@Rx} + N_0} \tag{3}$$

여기서, T_s 는 통신신호의 심볼 지속시간을 의미하고 심볼 전송율의 역수가 된다. 그리고, N_0 는 배경잡음 밀도를 나타낸다.

재밍 신호가 인가되기 전, 즉 추적 구간동안 수신된 신호의 심볼당 신호대 잡음비, $(E_s/N_0)_{unjam}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{E_s}{N_0}\right)_{unjam} = \frac{P_{rec,s@Rx} \cdot T_s}{N_0} \quad (4)$$

통신 신호에 대하여 2진 주파수 편이 방식의 디지털 통신과 비동기 검출(Non-coherent Detection)을 가정하면, 심볼당 신호대 잡음비(E_s/N_0)에 대한 평균 심볼 오류율은 표현된다^[4].

$$P_s = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{E_s}{N_0}\right) \quad (5)$$

그러면, 통신용 수신기에 대한 추적 잡음 재밍의 평균 심볼 오류율, $P_{s,FNJ}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{s,FNJ} = \left\{ \left(\frac{T_h - T_F}{T_h} \right) P_{hit} \right\} P_{s,jam} + \left\{ 1 - \left(\frac{T_h - T_F}{T_h} \right) P_{hit} \right\} P_{s,unjam} \quad (6)$$

여기서 T_h 와 T_F 는 각각 도약 지속시간과 추적 시간을 의미하고, P_{hit} 는 추적 성공 확률을 의미한다. 그리고, $P_{s,jam}$ 과 $P_{s,unjam}$ 은 각각 재밍 구간과 추적 구간동안 수신된 심볼의 심볼 오류율로서, 식 (3)과 식 (4)를 식 (5)에 대입하여 얻을 수 있다.

추적 잡음 재밍과 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과를 비교하기 위하여, 부분대역 잡음 재밍에 대한 평균 심볼 오류율, $P_{s,PBNJ}$ 을 표현하면 다음과 같다^[2,3].

$$P_{s,PBNJ} = \rho \cdot P_{s,jam} + (1 - \rho) \cdot P_{s,unjam} \quad (7)$$

여기서, ρ 는 부분대역 재밍비로서 도약 대역폭과 재밍 대역폭의 비를 나타낸다. 이 때, 최적의 ρ 값, 즉 ρ_{opt} 은 $P_{s,PBNJ}$ 을 최소화시키는 도약 대역폭과 재밍 대역폭의 비를 의미한다^[2,3].

4. 시스템 모델 및 재밍효과 분석결과

가. 시스템 모델 및 파라미터

주파수 도약신호에 대한 추적 잡음 재밍의 성능을

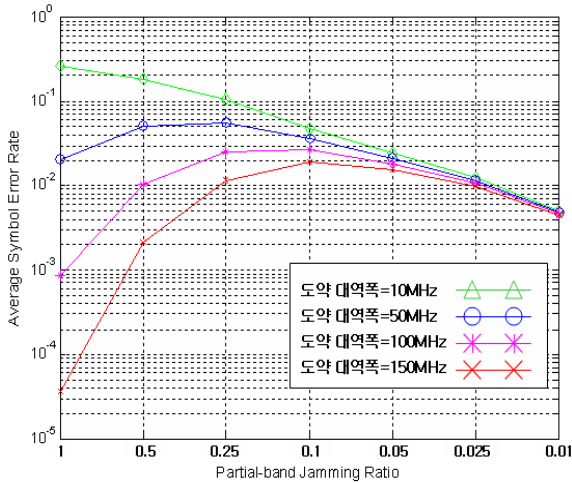
평가하기 위하여 다음과 같은 시스템 모델과 파라미터를 가정하기로 한다.

통신용 송신기에서의 송신 신호 전력은 5W이고, 심볼율은 10ksymbols/sec이다. 신호의 대역폭은 20kHz이고, 도약 대역폭은 100MHz이다. 즉, 도약 가능한 채널의 개수는 5,000개이다. 도약율은 초당 100홉이고, 도약 지속시간은 10msec이다. 전자공격 장비의 송신 재밍 전력은 100W이고, 추적 대역폭, 추적 시간, 추적 성공 확률을 파라미터로 이용하여 추적 잡음 재밍의 성능을 평가한다.

통신용 송신기에서 통신용 수신기로의 안테나 이득과 통신용 수신기에서 통신용 송신기로의 안테나 이득은 각각 3dB이고, 통신용 송신기 및 통신용 수신기에서 전자공격 장비로의 안테나 이득은 각각 -3dB이다. 즉, 통신용 송신기와 통신용 수신기는 방향성 안테나를 이용하고, 전자공격 장비는 통신용 송신기와 통신용 수신기의 부엽(Side-Lobe)에서 통신 신호를 전송받고 재밍 신호를 전송한다고 가정한다. 전자공격 장비의 통신용 송신기와 통신용 수신기로의 안테나 이득은 3dB로 가정한다. 통신용 송신기와 통신용 수신기의 안테나 높이는 각각 3m이고, 전자공격 장비의 안테나 높이는 6m이다. 통신용 송신기와 통신용 수신기 사이의 거리는 5km이고, 전자공격 장비와 통신용 송신기 및 통신용 수신기 사이의 거리는 각각 20km이다. 배경잡음 밀도는 -174dBm/Hz로 가정한다.

나. 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석결과

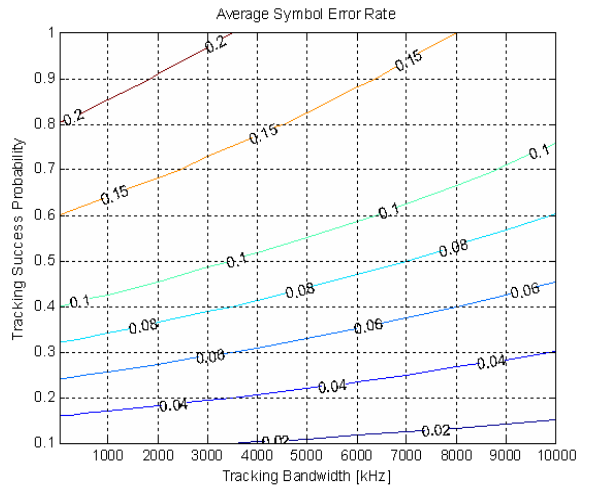
그림 4는 추적 잡음 재밍과의 재밍효과 비교를 위하여 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과를 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율로 나타낸 그림이다. 그림에서 도약 대역폭을 10MHz, 50MHz, 100MHz, 150MHz로 변화시키면서, 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과를 관찰하였다. 그림에서 부분대역 재밍비란 전체 도약 대역폭 중 부분대역 잡음 재밍시 재밍신호가 인가되는 재밍 대역폭의 비로서, 부분대역 재밍비가 1인 경우가 전대역 잡음 재밍과 같다. 앞에서 언급한 것처럼, 전대역 잡음 재밍은 도약 대역폭이 커질수록 재밍효과는 급격히 줄어든다. 그러나, 부분대역 잡음 재밍의 경우에는 부분대역 재밍비를 적절히 유지함으로써 재밍효과의 급격한 열화를 완화할 수 있다. 그



[그림 4] 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과

리고, 도약 대역폭이 커질수록 최적 부분대역 재밍비는 점차로 줄어들을 알 수 있다. 즉, 도약 대역폭이 10MHz인 경우는 최적 부분대역 재밍비가 1이고, 이때 전대역 잡음 재밍이 가장 우수한 재밍효과를 야기한다. 그러나, 도약 대역폭이 50MHz, 100MHz, 150MHz로 커지면, 최적 부분대역 재밍비는 각각 0.25, 0.1, 0.1로 관찰되며, 이 때 재밍 대역폭은 각각 12.5MHz, 10MHz, 15MHz가 된다. 결론적으로, 도약 대역폭이 커짐에 따라 전대역 잡음 재밍은 재밍효과가 급격히 줄어들고, 부분대역 잡음 재밍은 부분대역 재밍비를 이상적으로 조정함으로써 재밍효과가 급격한 열화는 막을 수 있으나 전체적인 재밍효과 열화 현상은 필수적으로 발생한다. 아래에 분석할 추적 잡음 재밍의 경우에는 도약 대역폭의 광대역화에 따른 재밍효과 상의 변화는 없으며, 추적 잡음 재밍의 재밍효과는 추적 대역폭, 추적 시간 그리고 추적 성공 확률에 영향을 받는다. 추적 잡음 재밍과 최적 부분대역 잡음 재밍의 성능을 비교하기 위하여, 도약 대역폭이 100MHz인 경우의 최적 부분대역 잡음 재밍의 평균 심볼 오류율, 약 2.6×10^{-2} 을 성능 비교의 기준으로 이용하기로 한다.

그림 5부터 그림 7까지는 각각 추적 잡음 재밍의 세 가지 파라미터, 추적 대역폭, 추적 시간, 추적 성공 확률 중 하나의 파라미터를 고정한 후, 다른 두 가지 파라미터에 대한 재밍효과를 분석한 그림이다.

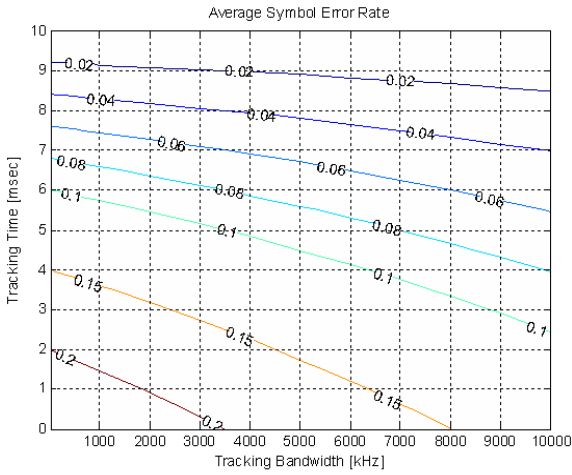


[그림 5] 추적 시간이 일정한 경우(5msec), 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석

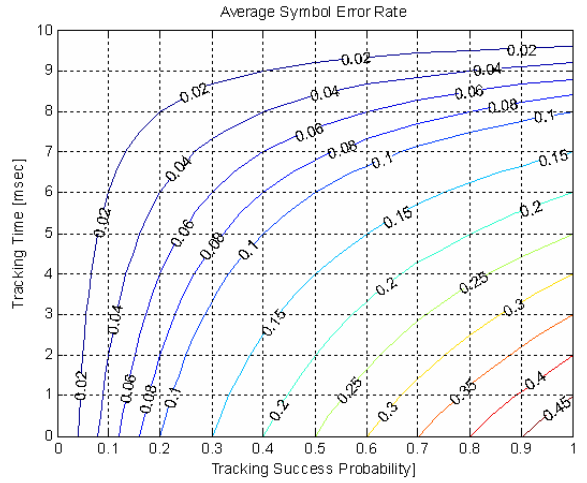
먼저 그림 5는 추적 시간을 5msec로 고정한 후, 추적 대역폭과 추적 성공 확률에 대한 추적 잡음 재밍의 재밍효과를 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율로 도시한 그림이다. 그림에서, 추적 성공 확률이 커질수록 그리고 추적 대역폭이 작아질수록 재밍효과가 커짐을 알 수 있다. 그리고, 추적 성공 확률이 커질수록, 추적 대역폭에 대한 재밍효과를 민감도가 증가함을 알 수 있다. 즉, 추적 성공 확률이 큰 경우, 추적 대역폭에 대한 재밍효과 변화가 추적 성공 확률이 작은 경우보다 더 큼을 알 수 있다.

그림 6은 추적 성공 확률을 50%로 고정한 후, 추적 대역폭과 추적 시간에 대한 추적 잡음 재밍의 재밍효과를 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율로 도시한 그림이다. 그림에서, 추적 시간이 작을수록 그리고 추적 대역폭이 작아질수록 재밍효과가 커짐을 알 수 있다. 그리고, 그림 5에서와 같이 추적 시간이 작을수록, 추적 대역폭에 대한 재밍효과를 민감도가 증가함을 알 수 있다.

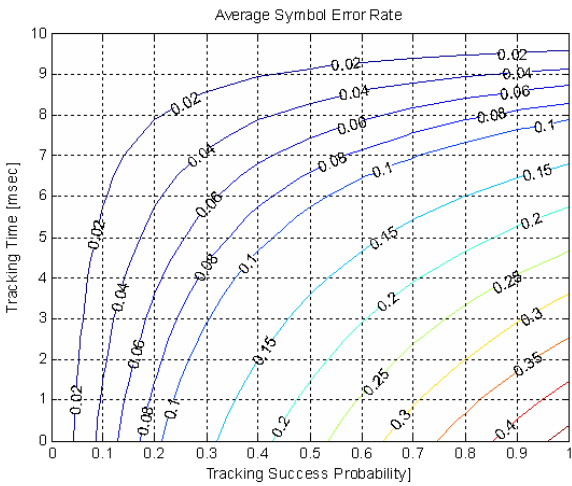
그림 7은 추적 대역폭을 1MHz로 고정한 후, 추적 시간과 추적 성공 확률에 대한 추적 잡음 재밍의 재밍효과를 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율로 도시한 그림이다. 그림에서, 추적 시간이 작을수록 그리고 추적 성공 확률이 커질수록 재밍효과가 커짐을 알 수 있다. 일반적으로 추적 대역폭은 전자공격 장



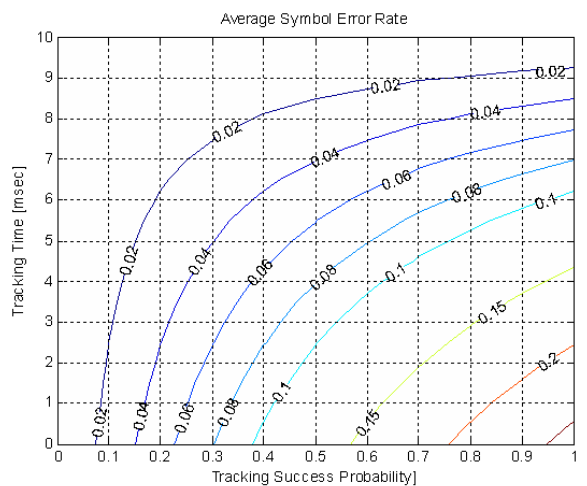
[그림 6] 추적 성공 확률이 일정한 경우(50%), 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석



[그림 8] 추적 대역폭이 일정한 경우(20kHz), 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석



[그림 7] 추적 대역폭이 일정한 경우(1MHz), 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석



[그림 9] 추적 대역폭이 일정한 경우(10MHz), 추적 잡음 재밍의 재밍효과 분석

비의 수신기에서 하드웨어적으로 결정되는 사항이므로, 그림 7을 이용하여 추적 대역폭이 주어진 경우, 요구되는 재밍효과를 만족하기 위한 추적 시간과 추적 성공 확률의 조합을 미리 찾아낼 수 있다는 데에 그림 7의 의의가 있다고 할 수 있다. 즉, 추적 대역폭이 1MHz로 주어진 경우, 10%의 평균 심볼 오류율을 만족하기 위한 추적시간과 추적 성공 확률의 조합은 (3msec, 30%), (5.7msec, 50%), (7msec, 70%) 등이

된다.

그림 8과 그림 9는 추적 대역폭을 각각 20kHz와 10MHz로 변경하여, 추적 시간과 추적 성공 확률에 대한 추적 잡음 재밍의 재밍효과를 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율로 도시한 그림이다. 그림 8의 추적 대역폭 20kHz는 신호 대역폭과 동일한 값이며, 이 때 전자공격 장비의 수신기는 5,000개의 수신기 열(Receiver Bank)를 필요로 하게 된다. 그림 7에서

추적 대역폭이 1MHz인 경우에는 수신기 열의 개수가 100개이고, 그림 9에서 추적 대역폭이 10MHz인 경우에는 수신기 열의 개수가 10개가 된다. 즉, 추적 대역폭은 전자공격 장비의 수신기에 필요로 되는 수신기 열의 개수에 직접 관계된다.

그림 7과 그림 8을 비교하면, 추적 대역폭이 20kHz인 경우와 1MHz인 경우에 대하여, 전자공격 장비의 수신기 복잡도는 1/50로 감소한 반면에 재밍효과 측면에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 최대로 얻을 수 있는 평균 심볼 오류율은 추적 대역폭이 20kHz인 경우와 1MHz인 경우, 모두 0.45 정도임을 알 수 있다. 그림 8에서 추적 대역폭이 20kHz인 경우에 대하여, 10%의 평균 심볼 오류율을 만족하기 위한 추적시간과 추적 성공 확률의 조합은 (3.4msec, 30%), (6msec, 50%), (7.2msec, 70%) 등이 된다. 즉, 추적 대역폭을 작게하면, 전자공격 장비의 수신기 복잡도가 증가하지만, 동일한 추적 성공 확률을 얻는데 이용 가능한 추적 시간에 조금 더 여유가 생김을 알 수 있다. 그리고, 추적 시간을 증가시킨다 할지라도, 추적 대역폭이 작아 잡음 대역폭 역시 작게 유지할 수 있으므로, 전체 재밍효과에는 열화를 발생시키지 않음을 알 수 있다.

그림 7과 그림 9를 비교하면, 추적 대역폭이 1MHz인 경우와 10MHz인 경우에 대하여, 전자공격 장비의 수신기 복잡도는 1/10로 감소한다. 그러나, 그림 7에서 추적 대역폭이 1MHz인 경우 최대로 얻을 수 있는 재밍효과는 평균 심볼 오류율 측면에서 0.45인 반면, 그림 9에서 추적 대역폭이 10MHz인 경우 최대로 얻을 수 있는 재밍효과는 평균 심볼 오류율 측면에서 0.25로 열화됨을 관찰할 수 있다. 그림 9에서 추적 대역폭이 10MHz인 경우에 대하여, 10%의 평균 심볼 오류율을 만족하기 위한 추적시간과 추적 성공 확률의 조합은 (2.5msec, 50%), (4.6msec, 70%) 등이 된다. 즉, 추적 대역폭이 증가하면, 짧은 시간 내에 적정한 추적 성공 확률 이상으로 주파수 도약 신호를 추적할 수 있어야지만 요구되는 재밍효과를 얻을 수 있다. 그러나, 일반적으로 추적 대역폭이 증가하면, 전자공격 장비의 수신기 성능이 열화되어 높은 추적 성공 확률을 얻기가 어려워지는 단점이 있다.

5. 맺음말 및 추후 연구 방향

본 논문에서는 주파수 도약 신호에 대하여 추적 잡음 재밍의 성능을 통신용 수신기에서의 평균 심볼 오류율 측면에서 분석하고, 최적 부분대역 잡음 재밍의 재밍효과와 비교하였다. 추적 잡음 재밍의 성능을 평가하기 위하여 추적 대역폭, 추적 시간, 추적 성공 확률의 세 가지 요소에 대하여 추적 잡음 재밍의 재밍효과를 분석하였다. 그리고, 전자공격 장비의 수신기 복잡도가 하드웨어적으로 주어진다든 측면에서 추적 대역폭을 변화시키면서 추적 잡음 재밍의 성능을 평가하고, 요구되는 평균 심볼 오류율을 만족하기 위한 추적 시간과 추적 대역폭의 조합에 대하여 논의하였다. 위의 결과는 추적 잡음 재밍을 구현할 시, 추적 대역폭에 대한 추적 시간과 추적 성공 확률의 조합을 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어 그리고 시스템 운용 환경적 측면을 고려하여 추적 잡음 재밍을 성능을 미리 예측할 수 있는 성능 지표로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

추후 연구 방향으로서 전자공격 장비의 구체적인 수신기 구조에 대하여 고려할 필요가 있다. 즉, 에너지 검출 수신기, FFT 수신기, 그 외의 광대역 신호 탐지 수신기에 대하여 추적 시간과 추적 성공 확률의 관계에 대하여 보다 구체적으로 고려할 필요가 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 추적 대역폭이 변화할 때, 전자공격 장비의 수신기 성능 변화를 추적 성공 확률 측면에서 관찰하고, 이를 최종적인 재밍효과 분석과 연결하여 고찰할 필요가 있다. 마지막으로, 본 논문에서는 부분대역 잡음 재밍과 추적 잡음 재밍에 대하여 재밍효과를 분석하고 비교하였으나, 재밍 신호원으로 톤 신호를 이용하는 부분대역 톤 재밍과 추적 톤 재밍에 대한 분석이 필요하며, 그 결과를 부분대역 잡음 재밍 및 추적 잡음 재밍과 비교하여야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] R. Dillard, Detectability of Spread Spectrum Signals, Artech House, 1989.
- [2] M. Simon, J. Omura, R. Scholtz and B. Levitt,

- Spread Spectrum Communications Handbook, McGraw-Hill, 1994.
- [3] R. Poisel, Modern Communications Jamming Principles and Techniques, Artech House, 2004.
- [4] B. Sklar, Digital Communications : Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, 1988.
- [5] R. Scholtz, "The Spread Spectrum Concept", IEEE Trans. Commun., Vol. 25, No. 8, pp. 748~755, Aug. 1977.
- [6] Q. Wang, "Performance of Fast Frequency Hopped Noncoherent MFSK with a Fixed Hop Rate Under Worst Case Jamming", IEEE Trans. Commun., Vol. 38, No. 10, pp. 1786~1798, Oct. 1990.
- [7] D. Torriani, "Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency-Hopping Communications", J. Select. Areas Commun., Vol. 7, No. 4, May 1989.
- [8] E. Felsted, "Follower Jammer Considerations for Frequency Hopped Spread Spectrum", IEEE MILCOM'98, Vol. 2, pp. 474~478, 1996.
- [9] K. Burda, "The Performance of the Follower Jammer with a Wideband-Scanning Receiver", J. Electronical Eng., Vol. 55, No. 1-2, pp. 36~38, Jan. 2004.
- [10] 이치호, 조성진, 류정진, 이광일, "주파수 도약신호에 대한 도약대역 탐지율 분석", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 118~121, 2006년 8월.