

# Anti-Jamming 기반 전술통신 기술

이두호 | 고병훈 | 김광순  
연세대학교

## 요약

최근 들어 차세대 전술통신 체계인 전술 종합 정보 통신 체계 (TICN: tactical information communication network) 구축 사업이 진행되고 있다. 전술통신 환경에서 고속의 데이터 통신을 위해서는 상용 통신 시스템과는 달리 고려해야 할 점이 많다. 본고에서는, 전술통신에서 반드시 고려해야 할 위협 요소인 재밍 (jamming)에 대해서 이제까지 알려진 몇 가지 재밍 신호 모형과 재밍 신호를 효과적으로 탐지해 내고 제거할 수 있는 항재밍 (anti-jamming) 기법들에 대해 알아본다.

## 1. 서론

전술통신 환경은 상용 통신 시스템에서 고려하는 환경과는 다른 점이 많다. 이제까지의 상용 통신 시스템의 성능 개선에 대한 연구가 주로 셀룰러 네트워크에 대해 이루어진 반면에, 전술통신 시스템은 전장에서 부대간, 전투기 편대간 등의 애드혹 (ad-hoc) 네트워크로 구성되는 것이 대부분이다. 또한, 저속의 보병부터 초고속의 전투기까지 다양한 이동 속도를 가지는 터미널이 존재하는 환경이다. 이러한 여러 차이점 중에서도 가장 확연한 것은 악의적인 재밍 (jamming) 신호의 존재 유무일 것이다.

전술통신 환경에서는 적군의 통신을 교란시킴으로써 전투에서 유리한 위치를 차지하기 위한 재밍 신호가 존재하게

되며, 이러한 재밍 신호가 존재하는 상황에서도 신뢰성 있는 통신을 할 수 있는 항재밍 기술이 필요하게 된다.

군사력이 가장 발달한 미국의 경우, 전술통신이 체계화되기 시작한 것은, 1860년 통신단 (signal corps)이 설립된 때부터이다. 이를 시작으로, 1960년대까지 수동 및 아날로그 기반이던 전술통신 체계가 1970년대에는 자동화되기 시작하였고, 1980년대에는 디지털화되기 시작하였다. 또한 1970년대에는 군사용 위성 통신도 상용화 되기 시작했다. 1990년대 들어서 유선 및 무선의 사용자에게 보안성이 있는 음성, 데이터, 팩스 등의 전송을 가능하게 하고 완전히 디지털화된 MSE (mobile subscriber equipment) 시스템을 개발하여 사용중이며, 최근에는 네트워크 중심전 (NCW: network centric warfare)에 대비하기 위한 고속의 차세대 전술통신 체계 개발에 박차를 가하고 있다.

한편, 우리나라는 기존 아날로그 기반의 음성 통신 위주이던 전술통신 체계를 현대화하기 위해 1980년부터 25년에 걸쳐 진행된 스파이더 (spider) 체계 구축 사업이 시행되었다 [1]. 이로써 우리나라는 기존의 수동 및 아날로그 방식이던 전술통신 체계를 벗어나서 음성, 전신타자 (teletypewriter), 팩스, 데이터 등의 통신을 제공하는 디지털 자동화 통신망을 갖추게 되었고, 대전자전 능력도 갖추게 되었다.

또한, 기존의 트리 (tree) 형태이던 통신망 구조를 격자형으로 구성함으로써 더욱 신뢰성 있는 통신이 가능해지고, 유선과 무선이 분리되어 있던 것을 유무선 통합망으로 교체하였다. 하지만, 이제 다시 세계적 흐름에 맞추어서 네트워크 중심전에 대비하기 위해 전술 종합 정보 통신 체계 (TICN: tactical information communication network) 구축

사업을 새로이 시작하고 있다.

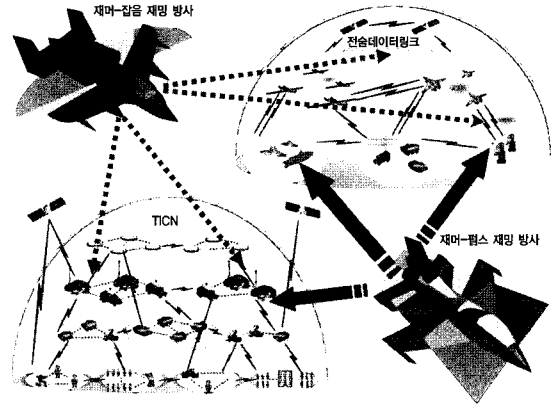
전술통신 환경에서 전자 공격은 재밍, 전자 기만 (ED: electronic deception), 전자 폭탄 (e-bomb) 등 그 목적에 따라 여러 가지 형태가 존재하고, 또한 그에 대한 대비책 역시 다양하다. 본고에서는 이 가운데 통신교란을 목적으로 하는 재밍과 이를 극복하기 위한 항재밍 기술에 대해 초점을 맞추어 이제까지 알려진 재밍 모형과 항재밍 기법에 대해 알아본다.

## II. 전술통신 환경

전술통신은 지형 제한이 있는 다양한 통신 환경에서 생존성, 이동성, 신뢰성 있는 통신을 요구한다. 지형 제한을 최소화 하기 위하여 이동 통신과 위성 통신 체계가 적극 활용된다 [2]. 이동 통신은 터미널의 다양한 이동 속도를 지원할 수 있도록 설계되어야 하며, 위성 통신 체계는 취약한 지형뿐 아니라 적의 통신 방해를 극복하는 방법이 될 수 있다. 또한 고정된 기간 시설이 없는 전장의 통신 환경을 극복할 수 있도록 무선 통신 체계와 전술 노드 (node) 체계가 구축된다. 전술 노드는 상용 통신의 중계기에 해당하는 것으로 전장 환경에서 통신의 사각 지역을 해결하는 역할을 한다 [1]. 또한 군사 정보의 안전한 통신을 위하여 다단계 보안기능과 효율적인 전송 대역 관리와 같은 보안 관리 체계가 구축된다 [2].

네트워크 중심전은 정보화 시대의 새로운 전쟁이론으로써, 전장의 여러 전투 요소들을 효과적으로 연결하는 네트워크 구축을 통하여 지리적으로 분산된 여러 전투 요소들이 전장의 상황을 서로 공유함으로써 통합적이고 효율적인 전투력을 만들어내는 새로운 전투 개념이다 [3].

이와 같은 네트워크 중심전을 수행하기 위해서는 다원화된 군 통신망을 일원화시키고 고속 대용량 전술 정보를 적시적소에 전달하기 위하여 All IP기반의 격자형 네트워크로 운용되는 새로운 전술 종합 정보 통신 체계와 전술 정보 교환을 통해 여러 전투 요소들을 연동하는 실시간 디지털 통신망인 전술 데이터 링크 (data link) 체계 구축이 필요하다 [4].



(그림 1) 재미 (jammer)가 존재하는 전술통신 환경

전술통신 환경에는 (그림 1)과 같이 적의 무선 통신, 데이터 링크 등의 신호를 수신하거나 교란시키기 위한 다양한 형태의 전자 공격이 존재한다. 재밍은 전자 공격의 한 형태로서 수신자의 전자파 수신을 저하시키거나 방해하기 위해 고의적으로 전자파를 방사하여 원하지 않는 전자 신호의 수신을 강요하는 활동이다.

재밍의 한 예로 잡음 재밍은 잡음 신호를 방사시켜 적의 통신 채널을 교란시키거나 적의 레이더를 포화 상태로 만들어 표적을 탐지하지 못하게 한다. 재밍의 다른 예로 펄스 재밍 송신기를 갖춘 항공기는 펄스 송신기를 통해 변조된 적 외선 펄스 재밍 신호를 방사함으로써 적외선 유도 미사일의 유도 기능을 저하시켜 항공기의 안전을 증대시킬 수 있다 [5]. 또한, 재밍 자원을 효과적으로 활용하기 위하여 주파수 대역 분할 또는 시분할에 의한 재밍 자원 할당, 공간 분할을 이용한 빔 조향 기술 등 고출력 재밍을 얻기 위한 기술이 발전하고 있다 [6].

또한, 디지털 주파수 기억 (DRFM: digital radio frequency memory) 기술을 사용한 효율적인 재밍 기법이 연구되고 있다 [7]. 디지털 주파수 기억 기술의 기본 작용은 수신된 무선 신호를 사용하여 기저 대역 (baseband)의 원래 신호를 얻은 후 저장하고 입력 신호와 동일한 무선 주파수 신호로 출력하는 것이다 [8]. 위와 같은 디지털 주파수 기억 장치의 특성을 이용하여 적의 레이더 신호를 복사한 후 거짓된 표적 정보나 잡음을 통하여 적의 레이더 성능을 저하시키는 레이더 재밍을 할 수 있다.

### III. 재밍 모형

공격 대상이 어떤 시스템이나에 따라서 재밍도 여러 가지 모형이 존재한다. 본 절에서는 이러한 재밍 모형에 대해서 각각의 특징을 알아본다. (그림 2)는 각 재밍 모형을 도식화한 것이다.

#### 1. 톤 (Tone) 재밍

특정 주파수의 사인파 또는 코사인파는 주파수 축에서 하나의 톤으로 나타난다. 따라서 하나 또는 여러 개의 톤으로 이루어진 재밍 신호를 톤 재밍 신호라 하고, 다음과 같이 표현된다 [9].

$$j(t) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \cos(\omega_i t - \theta_i)$$

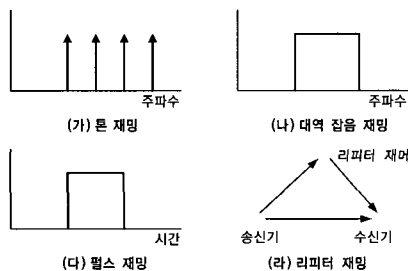
여기서  $K$ ,  $\alpha_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\theta_i$  는 각각 톤의 개수,  $i$  번째 톤의 크기, 주파수, 그리고 위상을 나타낸다. 톤 개수에 따라 단일 톤 재밍과 다중 톤 재밍으로 나눌 수 있다.

#### 2. 대역 잡음 (Band Noise) 재밍

대역 잡음 재밍은 주파수의 특정 대역에 걸쳐서 스펙트럼 밀도  $N_j$ 를 갖는 신호를 이용해서 재밍하는 것을 말한다. 공격 대상 신호의 대역폭 전체가 재밍 대역폭 내에 들어오는 경우를 전대역 잡음 재밍이라 하고, 일부분만이 재밍되는 경우를 부분 대역 잡음 재밍이라 한다.

#### 3. 펄스 (Pulse) 재밍

펄스 재밍은, 공격 대상 신호의 한 심볼 구간 내에서 일정



(그림 2) 각종 재밍 모형

시간 동안만 재밍 신호가 존재하는 경우를 말하고, 부분 시간 재밍이라고도 한다. 주파수 축에서 보면 전 대역에 걸쳐 재밍 신호가 존재하게 되므로, 대역 잡음 재밍의 한 종류로 분류할 수도 있다 [10].

#### 4. 주파수 추적 (Frequency Follower) 재밍

주파수 추적 재밍은 광대역 수신기를 가지고 있어서, 공격 대상 신호의 주파수 대역을 모니터링하고 이에 맞춰서 재밍 신호를 발생시키는 것으로, 리피터 (repeater) 재밍이라고도 하고, 반송파 주파수가 계속 바뀌는 주파수 도약 (FH: frequency hopping) 기법에 알맞은 재밍 모형이다 [11,12]. 반면, 직접 수열 대역 확산 (DSSS: direct sequence spread spectrum) 시스템에도 리피터 재밍을 적용할 수 있다. DSSS 시스템은 확산 부호의 자기상관 (autocorrelation) 특성 때문에 일반적인 재밍은 효과적이지 못하다. 따라서 리피터 재밍에서는 공격 대상 신호를 가로채서 잡음을 추가하거나 위상을 바꿔서 높은 전력으로 재전송함으로써, 수신기 입장에서 봤을 때 시간적으로 지연된 송신 신호처럼 보이게 한다. 이렇게 보낸 재밍 신호가 원래의 송신 신호와 섞여서 효과적인 재밍이 가능하다 [13].

#### 5. 링크 계층 (Link Layer) 재밍

앞서 알아본 재밍 모형은 모두 물리 계층에서 본 모형이다. 만약 재밍을 하는 쪽에서 상위 계층의 정보를 알고 있다면 쓸모 없는 재밍 신호를 줄임으로써, 물리 계층 재밍에 비해서 전력 사용면에서 효율적인 재밍이 가능하다 [14,15].

IEEE 802.11 기반 MAC 프로토콜은 가상 반송파 감지 (virtual carrier sensing) 기법을 사용한다 [16].

따라서 RTS (request to send)/CTS (clear to send) 프레임과 NAV (network allocation vector) 필드를 이용한 공격이 가능하다. RTS/CTS를 수신한 노드는 프로토콜에서 정해진 대로 자신의 전송을 연기한다. 따라서 허위 RTS/CTS를 대량으로 전송해서 블록킹 오류 (false blocking)를 일으킴으로써 공격 대상 네트워크의 채널 사용률을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 또한, 중간에서 NAV의 RTS/CTS 보유 시간 (reservation time)을 길게 바꿈으로써 공격 대상 노드가 채널을 낭비하도록 만들 수 있다.

## IV. 항재밍 기법

과거의 군통신 및 상용 통신 시스템은 DSSS 또는 FHSS 시스템이 주를 이루었기 때문에 항재밍 기법에 관한 연구는 대부분 이들 시스템을 기반으로 하는 것이었다 [17-23]. 그러나 최근의 상용 통신 시스템은 IEEE 802.11, IEEE 802.16e [24] 등과 같이 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 또는 OFDMA (orthogonal frequency division multiple access)를 기반으로 연구 및 표준 개발이 진행되고 있다. 또한 군통신에서 이들 상용 시스템을 전술통신 환경에 맞게 개량해서 사용하는 방안이 연구되고 있다 [25]. 따라서 OFDM/OFDMA 기반 시스템에서의 항재밍 기법에 대한 연구도 최근 들어 많아지고 있다. 본 절에서는 그동안 연구되어 온 항재밍 기법에 대해 알아보도록 한다.

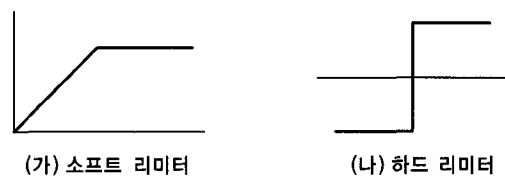
### 1. DSSS, FHSS

DSSS 및 FHSS 기법은 잘 알려진 대로 그 자체로서 항재밍 성질을 갖기 때문에 20세기 초반부터 군 통신을 위한 용도로 연구되고 실제 시스템이 개발되어 왔다 [17,18]. SS 기법은 주파수 축에서 신호를 넓게 퍼뜨렸다가 다시 모으는 과정에서 잡음 및 간섭 신호를 평균화 (averaging) 하는 효과를 얻는다. 각 재밍 모형 별 DSSS 및 FHSS 시스템의 오류 확률 성능이 여러 연구를 통해 수식적으로 유도되었다 [9,19-22]. AWGN (additive white Gaussian noise) 채널에서 BPSK (binary phase shift keying)의 경우, DSSS 시스템은 대역 잡음 재밍이 있을 때는 오류 확률이 Q 함수 형태로 주어져서 효과적으로 완화시키는 반면 [19], 펄스 재밍이 있을 때는 오류 확률이 SNR (signal to noise ratio)의 역수에 비례하는 형태로 주어져서 펄스 재밍에는 취약하다 [20]. 반면, FHSS 시스템은 펄스 재밍에는 강인하지만, 부분 대역 잡음 재밍의 경우 오류 확률이 SNR의 역수로 주어져서 취약한 성능을 보인다 [18].

### 2. 채널 부호화 및 인터리빙 (Interleaving)

채널 부호를 사용하지 않는 경우에는 재밍 신호에 의해 한번 오류가 생기면 그대로 성능 열화로 이어지지만, 채널 부호를 사용하면 전송률에서 손해를 보는 대신 채널 부호의

오류 정정 능력 내에서는 재밍 신호에 의해 발생한 오류를 복구함으로써 성능 열화를 막을 수 있다 [18]. 또한, 시간 또는 주파수 축에서 인터리빙을 함으로써, 부호어 (codeword)의 특정 부분에 오류가 몰려서 발생하는 것을 방지하여 마치 재밍 신호를 시간 또는 주파수 축에서 넓게 퍼뜨리는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다 [23]. 채널 부호화와 인터리빙도 원래 신호에 부가적인 정보를 보내고, 신호를 뒤섞음으로써 SS 기법처럼 평균화 효과를 얻을 수 있으며, SS와는 달리 부호화 이득을 추가적으로 얻을 수 있다. 또한, SS와 부호화/인터리빙을 결합하여 재밍 신호를 더욱 평균화하고 성능을 높일 수 있다. 하지만 이들 기법은 원하는 신호를 필요한 것보다 훨씬 더 많은 무선 자원 (주파수, 시간)을 사용하는 대신에 그만큼의 재밍 전력 감소 이득을 얻을 수 있으나, 재밍 신호를 적극적으로 제거하지는 못하므로 항재밍 능력에 한계가 있다. 따라서 재밍 신호를 탐지하거나 통계적 정보 등을 이용해서 재밍 신호를 적극적으로 제거하는 기법들에 대해 알아보도록 한다.



(그림 3) 소프트 리미터와 하드 리미터

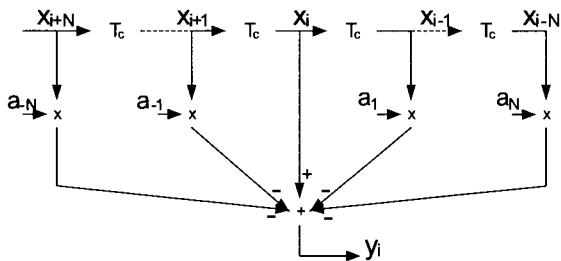
### 3. 클리핑 (Clipping) 및 이레이징 (Erasing)

클리핑 또는 리미팅 (limiting) 기법은 항재밍 기법 중에서 가장 간단하면서도 좋은 성능을 가지기 때문에 많은 연구가 이루어졌다 [29-33]. 클리핑은 (그림 3-(가))처럼, 단순히 정해진 임계치를 넘는 신호를 강제로 임계치로 제한하는 기법이다. 이의 극한적인 형태로, 임계치를 넘는 신호를 결합 (combining) 또는 복호 과정에서 제외시켜서 신뢰성이 떨어지는 정보를 이용하지 않는 것이 이레이징이다.

[26]에서는 BPSK를 사용하는 DS-SSMA (spread spectrum multiple access) 시스템에서 하드 리미팅 (hard limiting)을 이용해서 AWGN 채널에서 협대역 재밍을 극복할 수 있음을 보였다. 하드 리미팅은 (그림 3-(나))처럼 수신기의 정합 필터 (matched filter) 출력을 부호 검파기를 통해 +1/-1로 만들

고 이를 가지고 역확산 (despreading)을 하는 기법이다. 이를 통해 단일 사용자인 경우 일반 선형 상관 수신기보다 향상된 항재밍 성능을 얻을 수 있다. 재밍이 없는 다중 사용자 상황에서는 선형 상관 수신기보다 성능이 떨어지지만 재밍 신호가 매우 큰 경우에는 다시 하드 리미팅 기법이 더 좋아진다. [27]에서는 소프트 리미팅 기법 (그림 3(가))을 M-ary FSK (frequency shift keying)에 적용했을 때의 성능을 분석하였다. 이 기법은 재밍에 대한 특별한 부가 정보 없이 간단한 수신기 구조를 통해 효과적으로 재밍을 완화시킬 수 있다는 것이 장점이다. [28]에서는 소프트 리미팅 기법을 부호화된 DPSK (differential phase shift keying) 기반 DSSS 시스템의 레이크 (rake) 수신기에 적용했을 때 다중 경로 감쇄 (multi-path fading) 채널에서의 성능을 분석하였고, 펄스 재밍이 있을 때 리미팅만으로는 항재밍 효과가 적지만, SS 또는 안테나 다이버시티와 결합되면 항재밍 성능이 향상되고, 재밍 정보를 완벽히 알 때의 소프트 디지전 ML (maximum likelihood) 수신기의 성능에 견줄 수 있을 정도의 성능을 갖는 것을 보였다.

이레이징은 재밍이 걸린 신호를 결합 또는 복호 과정에서 완전히 배제함으로써 신뢰성이 떨어지는 정보가 시스템 성능을 악화시키는 것을 막는 방법으로 [29-30], 채널 부호에 적용하는 경우 이레이저 복호 (erasure decoding)라고 한다. [29]에서는 부분 대역 재밍이 존재하는 감쇄 채널에서 부호화된 FH 시스템에 이레이징을 적용하는 기법을 연구하였다. 이 연구에서는 이레이징을 하는 기준으로 베이지안 검사 (Bayesian test)를 사용함으로써, 일반 복호 기법 및 이레이징의 임계치를 비율을 통해 정하는 Viterbi의 RIT (ratio threshold test) 기법보다 좋은 성능을 얻었다. [30]에서는



(그림 4) 양측 트랜스버설 필터 [32]

LDPC (low density parity check) 부호를 사용하는 셀룰러 FH-OFDMA 시스템에서 이레이저 복호 기법을 적용해서 셀간 간섭 신호로 인한 영향을 완화시켰다. 셀간 간섭 신호는 재밍 신호와 다른 점이 많지만, 셀간의 상호 협력을 통한 사전 정보 없이 수신 신호만으로 간섭 신호를 제거한다는 점에서 재밍 신호에도 적용 가능하다.

#### 4. 필터링

클리핑과 이레이징은 재밍 신호에 대한 사전 정보가 거의 없어도 사용할 수 있으며, 간단하게 구현할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 재밍 신호에 대한 통계적인 정보를 알 수 있다면 이를 이용하는 필터링 기법을 통하여 항재밍 성능을 향상시킬 수 있다. 필터링은 수신 신호 성분 중에서 원하는 신호 성분은 통과시키고 그렇지 않은 신호 성분은 제거하는데 그 목적이 있다 [31]. 즉, 필터링을 통하여 재밍이 포함되어 있는 수신 신호에서 수신 신호와 통계적 특성이 다른 재밍 신호를 제거하려는 것이다.

확산된 신호 성분과 열잡음 성분은 주파수 축에서 낮은 크기로 넓게 퍼뜨려 분포되어 있는 반면 부분 대역 재밍은 좁은 주파수 대역에 높은 크기를 가지고 밀집하여 분포하게 된다. 시간 축에서 해석된 수신 신호를 푸리에 변환을 이용하여 주파수 축에서 해석하면 위와 같은 부분 대역 재밍의 특성을 확인할 수 있다. 따라서 푸리에 변환 후 노치 필터 (notch filter) [32]나 비선형 특성을 가지는 중앙값 필터 (median filter) [33] 등을 사용하여 높은 스펙트럼 밀도를 가지고 있는 재밍 성분을 제거할 수 있다. 하지만 위와 같은 방법은 확산된 신호 성분이 재밍 성분과 주파수 축에서 겹쳐 있는 경우 신호 성분이 손상될 수 있다는 한계점을 가지고 있다.

(그림 4)와 같이 탭 지연 선로 (tapped delay line) 구조를 가지는 트랜스버설 필터 (transversal filter)를 사용하여 수신 신호에 포함되어 있는 재밍을 추정하고 수신 신호에서 추정된 재밍을 제거함으로써 항재밍 성능을 얻을 수 있다 [34]. 확산된 신호 성분과 열잡음 성분은 샘플링 시간에 따른 상호 상관 (cross-correlation) 값이 작은 특성을 가지고 있기 때문에 트랜스버설 필터를 통한 추정이 어렵다. 위와 같은 특성을 이용하여 수신 신호를 트랜스버설 필터에 통과시킴으로써 재밍 신호의 추정이 가능하다. 또한, 트랜스버설 필터

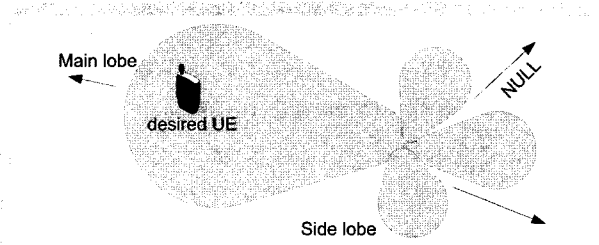
의 탭 간격을 제밍 환경에 적응적으로 조절하여 필터의 복잡도를 낮추면서 항재밍 성능을 향상시키는 연구가 진행되었다 [35].

### 5. 다중 안테나 기법

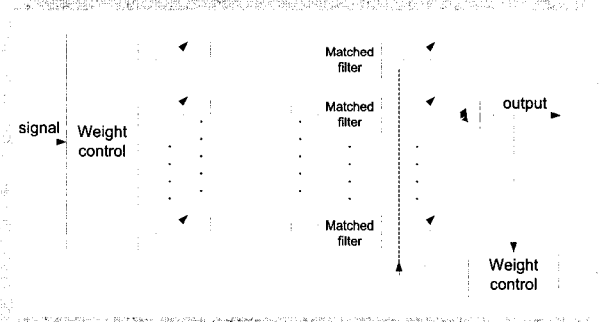
지향성 안테나 (directional antenna)는 (그림 5)와 같이 원하는 방향으로 신호의 세기를 증가시켜 송신하거나 특정한 방향으로부터 오는 신호를 잘 수신할 수 있도록 하는 기법으로써, 군사 통신 환경과 같은 무선 애드혹 네트워크에서 공간 재사용, 송신 전력 제어를 통하여 채널 용량 (channel capacity)과 신호 전달 범위를 향상시킬 수 있다.

또한 송신 신호가 발산되는 방향을 제어하여 항재밍 성능을 증대시킬 수 있는 방법으로 관심이 증대되고 있다 [36]. (그림 6)에는 빔형성 기법을 사용하는 송신기와 수신기의 개략적인 블록도를 보였다.

이와 같은 빔형성을 이용하여 백색 잡음 형태의 제밍을 방사하는 제머가 존재하는 환경에서 방향성 안테나에 적합한 프로토콜을 적용한 경우 무지향성 안테나 (omni antenna)를 사용한 경우보다 제밍의 간섭을 줄이고 송신 전력을 효율적으로 사용함으로써 패킷 수신율을 높일 수 있다. 그리고 이러한 성능 차이는 제밍의 전력이 커질수록 더욱 크게 나타난다 [37]. 또한 [38, 39]에서는 다중 안테나 수신 기법과 자기



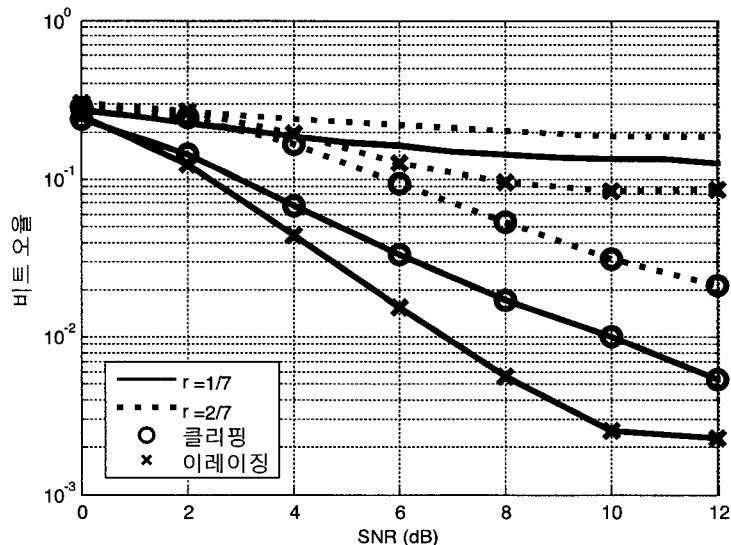
(그림 5) 지향성 안테나 모형



(그림 6) 빔형성 기법의 송수신기 구조

상관 함수 축에서의 해석을 이용한 블라인드 필터링 기법을 이용하여 일정한 범위 내에서 신호 대 잡음 비와 신호 대 제밍 비에 상관없이 동일한 비트 오류율 성능을 낼수 있는 기법을 연구하였다.

다중 안테나 기술은 지향성 안테나 이득을 얻기 위한 빔형



(그림 7) 부호화된 OFDM에서 클리핑과 이레이징의 항재밍 성능

성 (beamforming) 연구의 한 부분으로 시작되었다. 이후 다중 안테나 기법은 빔형성뿐 아니라 공간 다중화 (spatial multiplexing) 기법, 시공간 부호 (space time coding) 등을 사용하여 채널 용량을 증대시키고 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기술로 많은 연구가 진행되었고, 항재밍 기법에 대한 연구 또한 진행되고 있다 [40-42]. [40]에서는 부분 대역 재밍이 존재할 때 다중 안테나 시스템의 채널 용량을 구했다. [41]에서는 OFDMA 시스템에서 SFC (space-frequency coding)를 사용함으로써 부분 대역 재밍에 대한 항재밍 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 그리고 [42]에서는 다중 안테나 MC-CDMA 시스템에서 부분 대역 및 펄스 재밍을 효과적으로 제거하기 위한 소프트칩 결합 (soft-chip combining) 기법을 연구하였다. 성능 향상을 위해 복호기 출력을 역확산, 심볼 디매핑 (demapping), 복호 과정에 되먹임 시키는 반복 수신기 구조를 사용하였다. 또한, 이를 재밍 상태 추정 과정에도 되먹임 시킴으로써 반복적인 재밍 상태 추정 기법을 제안하였다. 또한, 이렇게 추정된 소프트 재밍 상태 정보를 이용해서 역확산 과정에 이용하는 소프트칩 결합 방법을 제안하였다. 이를 통해 부분 대역 재밍과 펄스 재밍에 강인한 시스템을 만들었다.

## 6. 다중 반송파 (Multicarrier) 기법

고속의 데이터 통신에 대한 필요성이 증대됨에 따라 주파수 효율이 높은 OFDM 등의 광대역 통신이 주목을 받게 되었다. 하지만, OFDM 기법 자체만으로는 재밍에 대해 매우 취약하여 재밍이 존재할 때 심각한 성능 열화가 생긴다 [43-46]. 따라서 전술통신에서 OFDM 기술을 사용하기 위해서는 재밍을 극복할 수 있는 보완 기술이 반드시 필요하다. 이를 위해, 앞서 알아보았던 여러 항재밍 기법들을 OFDM/OFDMA 기반 시스템에 적용하는 연구가 진행되었다 [30,43]. (그림 7)은 부분 대역 재밍 ( $\rho$  = 재밍신호대역폭/본신호대역폭)이 있을 때 부호화된 OFDM 시스템의 오류 확률 성능이다. 결과로부터, 재밍 대역폭이 작아도 성능 열화가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 재밍 대역폭이 작을 때는 이례 이징이 효과적이지만, 클 때는 신호 성분을 완전히 배제하지 않는 클리핑이 더 효과적인 것도 볼 수 있다.

보다 근본적으로 OFDM/OFDMA의 약점을 보완하기 위해 여러 다중 반송파 기법이 연구되었다 [47-57]. [48-50]에서는

시간 축에서의 DSSS기법을 다중 반송파 기법에 적용한 MC-DS-CDMA 가 연구되었다. 그리고 [51-54]에서는 다중 반송파 기법에 주파수 축에서의 DSSS 기법을 결합한 MC-CDMA 가 연구되었다. 두 가지 모두 DSSS 기법으로 인해 항재밍 성능을 갖게 된다. [55]에서는 MC-CDMA 시스템의 확산 부호로 CI (carrier interferometry) 부호를 사용하는 것을 연구하였다. 이 기법을 통해 채널 부호가 적용되었을 때, 일반 OFDM 시스템보다 재밍에 강인하다는 것이 확인되었다 [44,46,56]. [57]에서는 MC-CDMA 시스템에 복소 2차 수열 (complex quadratic sequence)을 확산 부호로 사용함으로써, 시간과 주파수 축 모두에서 일정한 포락선 (envelope)을 가지는 기법을 연구하였다. 이를 통해 다중 반송파 시스템의 PAPR (peak to average power ratio) 문제를 해결할 수 있고, 재밍 신호를 추정하고 완화시키는데 유리해진다. 실험을 통해 부분 대역 재밍에 매우 강인하다는 것이 확인되었다.

## V. 결 론

본고에서는 여러 가지 재밍 신호 모형을 알아보고, 그 동안 연구되어 왔던 항재밍 기법들을 분류하여 알아보았다. 이제까지의 연구 결과를 통해 알 수 있듯이, 재밍 신호의 성질에 따라 항재밍 기법의 성능이 달라지므로, 여러 항재밍 기법을 적용적으로 운용할 수 있는 적응 항재밍 기술에 대한 연구가 필요하다. 또한, 고속의 데이터 통신을 위해 다중 반송파 기술과 다중 안테나 기술 등이 주로 상용 통신 환경에서 많이 연구되고 발전되어 왔다. 하지만 앞으로 개발될 전술 종합 정보 통신 체계와 전술 데이터 링크에 이러한 기술을 접목하여 사용하려면 이에 맞는 항재밍 기법에 대한 연구가 더욱더 활발히 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITA-2006-(C1090-0602-0011))

## 참고 문헌

- [1] 방위사업청, 지휘통제·통신 무기체계([http://www.dapa.go.kr/open\\_content/internet/html/atg/hi\\_atg\\_007\\_01.jsp](http://www.dapa.go.kr/open_content/internet/html/atg/hi_atg_007_01.jsp)).
- [2] 박영봉, "미래 전장에 필요한 통신체계 발전방향," *합참*, 11호, pp. 153-165, 1998년 1월.
- [3] 김한욱, "NCW 구현을 위한 지휘통제·통신 발전방향," *합참*, 31호, pp. 89-93, 2007년 4월.
- [4] 김승춘, "한국적 전술데이터 링크 발전방향," *합참*, 24호, pp. 280-288, 2005년 1월.
- [5] 국방과학연구소, "전자전 시스템 개발 동향," *국방기술*, 2004년 12월.
- [6] 합동참모본부, 무기체계소개, 정보/전자전 (<http://www.jcs.mil.kr/main.html>).
- [7] Y. Zhu *et al.*, "Research on SAR jamming technique based on man-made map," *Proc. ICR*, pp. 1-4, Oct. 2006.
- [8] Q. Cheng *et al.*, "Application of DRFM in high frequency ground wave radar," *Proc. ICASIC*, pp. 774-777, Oct. 2005.
- [9] L. Milstein *et al.*, "The effect of multiple-tone interfering signals on a direct sequence spread spectrum communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, pp. 436-446, Mar. 1982.
- [10] Q. Ling and T. Li, "Modeling and detection of hostile jamming in spread spectrum systems," *Proc. SAFE*, pp. 1-5, Apr. 2007.
- [11] D. Torrieri, "Fundamental limitations on repeater jamming of frequency-hopping communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 7, pp. 569-575, May 1989.
- [12] A. Hassan *et al.*, "On a follower tone-jammer countermeasure technique," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 754-756, Feb.-Apr. 1995.
- [13] W. Hang *et al.*, "Performance of DSSS against repeater jamming," *Proc. ICECS*, pp. 858-861, Dec. 2006.
- [14] Y. Law *et al.*, "Link-layer jamming attacks on S-MAC," *Proc. WSN*, pp. 217-225, Feb. 2005.
- [15] G. Thamarasu *et al.*, "A cross-layer approach to detect jamming attacks in wireless ad hoc networks," *Proc. MILCOM*, pp. 1-7, Oct. 2006.
- [16] IEEE 802.11, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications*, Nov. 1997.
- [17] R. Scholtz, "The spread spectrum concept," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, pp. 748-755, Aug. 1977.
- [18] R. Pickholtz *et al.*, "Theory of spread-spectrum communications-a tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, pp. 855-884, May 1982.
- [19] D. Schilling *et al.*, "Optimization of the processing gain of an M-ary direct sequence spread spectrum communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, pp. 1389-1398, Aug. 1980.
- [20] M. Simon *et al.*, *Spread Spectrum Communications*, Computer Science Press, 1985.
- [21] R. Pettit, "A susceptibility analysis of frequency hopped M-ary NCPSK - partial-band noise on CW tone jamming," *Proc. SST*, May 1979.
- [22] L. Milstein *et al.*, "Optimization of the processing gain of an FSK-FH system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, pp. 1062-1079, Jul. 1980.
- [23] J. Proakis, "Interference suppression in spread spectrum systems," *Proc. ISSSTA*, vol. 1, pp. 259-266, Sep. 1996.
- [24] IEEE 802.16e, *Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*, Nov. 2004.
- [25] J. S. Lee *et al.*, "Wibro usage scenarios and requirements in tactical environment," *Proc. MILCOM*, pp. 1-5, Oct. 2006.
- [26] B. Aazhang and H. Poor, "Performance of DS/SSMA communications in impulsive channels-part II: hard limiting correlation receivers," *IEEE Trans. Commun.*,



- vol. 36, pp. 88-97, Jan, 1988.
- [27] C. Keller and M. Pursley, "Clipped diversity combining for channels with partial-band interference-part I: clipped-linear combining," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, pp. 1320-1328, Dec. 1987.
- [28] I. Chang and G. Stüber, "Soft-limiter RAKE receivers for coded DS/DPSK systems over pulse jammed multipath-fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 1163-1172, Sep. 1996.
- [29] C. Baum and M. Pursley, "Erasure insertion in frequency-hop communications with fading and partial-band interference," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, pp. 949-956, Nov. 1997.
- [30] Y. H. Kim *et al.*, "Erasure decoding for LDPC-coded FH-OFDMA system in downlink cellular environments," *Electr. Letters*, vol. 40, pp. 1433-1434, Oct. 2004.
- [31] A. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989.
- [32] L. Milstein, "Interference rejection techniques in spread spectrum communications," *Proc. IEEE*, vol. 76, pp. 657-671, Jun. 1988.
- [33] T. Kasparis *et al.*, "Non-linear filtering techniques for narrow-band interference rejection in direct sequence spread-spectrum systems," *Proc. MILCOM*, pp. 360-364, Nov. 1991.
- [34] L. Li and L. Milstein, "Rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum systems using transversal filters," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, Part 2, pp. 925-928, May 1982.
- [35] E. Panayirci and Y. Bar-Ness, "Rejection of multiple tone interference in DS spread-spectrum systems employing minimum redundant transversal filters," *IEEE Commun. Letters*, vol. 1, pp. 140-142, Sep. 1997.
- [36] S. Wang *et al.*, "Performance of anti-jamming ad hoc networks using directional beams with group mobility," *Proc. WOCN*, Apr. 2006.
- [37] Z. Zhang *et al.*, "Performance of all-directional transmission and reception algorithms in wireless ad hoc networks with directional antennas," *Proc. MILCOM*, pp. 225-230, Oct. 2005.
- [38] R. Ying *et al.*, "Decision feedback for autocorrelation matching anti-jamming filter," *Proc. CASSET*, pp. 33-36, Jun. 2004.
- [39] R. Liu and R. Ying, "Anti-jamming filtering in the autocorrelation domain," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no 6, pp. 525-528, Jun. 2004.
- [40] A. Hammons Jr., "Effects of partial-band jamming on space-time coded systems," *Proc. MILCOM*, pp. 1623-1627, Oct. 2004.
- [41] C. Eşli and H. Deliç, "Antijamming performance of space-frequency coding in partial-band noise," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, pp. 466-476, Mar. 2006.
- [42] M. Asadullah and G. Stüber, "Soft-chip combining MIMO multicarrier CDMA antijam system," *Proc. MILCOM*, pp. 1-7, Oct. 2006.
- [43] F. Block, "Comparison of jamming robustness of airborne networking waveforms," *Proc. MILCOM*, pp. 2119-2125, Oct. 2005.
- [44] Z. Wu and C. Nassar, "Narrowband interference rejection in OFDM via carrier interferometry spreading codes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 1491-1505, Jul. 2005.
- [45] J. H. Park *et al.*, "Effect of partial band jamming on OFDM-based WLAN in 802.11g," *Proc. ICASSP*, pp. IV-560-563, Apr. 2003.
- [46] C. Patel *et al.*, "Analysis of OFDM/MC-CDMA under imperfect channel estimation and jamming," *Proc. WCNC*, pp. 954-958, Mar. 2004.
- [47] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, pp. 126-133, Dec. 1997.
- [48] V. DaSilva and E. Sousa, "Performance of orthogonal CDMA codes for quasi-synchronous communication systems," *Proc. ICUPC*, pp. 995-999, Oct. 1993.
- [49] S. Kondo and L. Milstein, "Performance of multicarrier DS CDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44,

pp. 238-246, Feb. 1996.

- [50] H. Liu and H. Yin, "Receiver design in multicarrier direct-sequence CDMA communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, pp. 1479-1487, Aug. 2001.
- [51] N. Yee *et al.*, "Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks," *Proc. PIMRC*, pp. 109-113, Sep. 1993.
- [52] K. Fazel and L. Papke, "On the performance of convolutionally-coded CDMA/OFDM for mobile communication system," *Proc. PIMRC*, pp. 468-472, Sep. 1993.
- [53] A. Chouly *et al.*, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems," *Proc. GLOBECOM*, pp. 1723-1728, Nov. 1993.
- [54] S. Hara and R. Prasad, "Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, pp. 1584-1595, Sep. 1999.
- [55] B. Natarajan *et al.*, "High-performance MC-CDMA via carrier interferometry codes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, pp. 1344-1353, Nov. 2001.
- [56] A. Best and B. Natarajan, "The effect of jamming on the performance of carrier interferometry/OFDM," *Proc. WiMob*, pp. 66-70, Aug. 2005.
- [57] J. Tan and G. Stüber, "Multicarrier spread spectrum system with constant envelope: antijamming, jamming estimation, multiuser access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 1527-1538, Jul. 2005.

약 력



이 두 호

2004년 연세대학교 전기전자공학과 학사  
 2006년 연세대학교 전기전자공학과 석사  
 2006년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 관심분야: 적응 전송, 항재밍



고 병 훈

2006년 연세대학교 전기전자공학과 학사  
 2006년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정  
 관심분야: 협력통신, 항재밍



김 광 순

1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사  
 1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사  
 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사  
 1999년 ~ 2000년 Dept. ECE, UC San Diego, 박사후연구원  
 2000년 ~ 2004년 한국전자통신연구원 선임연구원  
 2004년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수  
 2006년 ~ 현재 한국통신학회 논문지 편집위원  
 관심분야: 다중안테나 시스템, 채널부호, 계층간 최적화, 협력통신

