

군 소부대 전술통신망에서 특이값 분해 기반 널스티어링 항재밍 성능 분석

정용석*, 윤동원**

Analysis of Null Steering Anti-jamming Performance based on SVD in Tactical Communication Network for Small Military Unit

Yongseok Jung*, Dongweon Yoon**

요 약

2000년대 발생한 아프가니스탄전과 이라크전을 기점으로 현대전에서 전자전의 중요성이 날로 증대되고 있다. 전자전에서 전술통신망에 가장 위협적인 요소 중 하나는 재밍으로, 전장에서의 재밍공격은 우리군 전술통신망에 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 이 논문에서는 먼저, 현재 단일채널 기반으로 운영되는 우리나라 소부대 전술통신망의 제약 사항에 대해 분석하고, 이를 해결하기 위하여 다중채널 기반 전술통신망으로의 확장을 제안한다. 제안된 다중채널 기반 소부대 전술통신망에서 전자전에 의한 재밍공격에 효율적으로 대응하기 위하여 특이값 분해 기반 널스티어링(null steering) 기법을 통해 재밍신호를 상쇄하여 항재밍 능력을 향상하는 방안을 제안하고 재밍채널 추정 오류가 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석한다.

Abstract

The importance of electronic warfare in modern warfare is increasing rapidly, through the Afghanistan and Iraq wars in the 2000s. One of the biggest threats to the TCN in electronic warfare is jamming, and a jamming attack on the battlefield can cause fatal damage to the TCN. In this paper, we examine the limitations of the TCN for small military unit of ROK forces, which is currently operated on the single-channel based TCN, and propose an extension to the multi-channel based TCN to solve the limitations. In order to effectively counteract jamming attacks in the multi-channel based TCN, we propose a method to improve the anti-jamming capability by canceling the jamming signal through a null steering based on SVD and analyze the effects of jamming channel estimation error on the anti-jamming performance.

Keywords

tactical communication network, singular value decomposition, null steering, anti-jamming

* 한양대학교 융합전자공학과

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8612>

** 한양대학교 융합전자공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9631-3500>

• Received: Apr. 14, 2021, Revised: Jun. 23, 2021, Accepted: Jun. 26, 2021

• Corresponding Author: Dongweon Yoon

Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

Tel.: +82-2-2220-2183, Email: dwyoon@hanyang.ac.kr

1. 서 론

우리나라 국방 전술통신 시스템은 1990년대 스파이더(SPIDER) 체계를 거쳐, 현재 네트워크 중심전(NCW, Network Centric Warfare) 기반의 전술정보통신(TICN, Tactical Information Communication Network) 체계가 2016년 말부터 전력화되고 있다[1]. 이러한 국방 전술통신 시스템의 기저에는 대대급 이하 소부대 전술통신망이 완벽히 구축되어 있다는 가정이 내포되어 있기 때문에 국방 전술통신 시스템의 성패는 소부대 전술통신망의 안정적인 구축에 있다고 해도 과언이 아니다.

현재 국방 전술통신 시스템이 가장 발달한 미국은 네트워크 중심전 체계에 대비하기 위하여 다중채널을 기반으로 한 차세대 국방 전술통신 시스템을 개발하여 사용하고 있으며, 대대급 이하 소부대에도 이러한 다중채널 기반 전술통신망을 구축하여 운용하고 있다[2][3]. 또한, 공개되어 있지는 않지만 우리 주변국인 러시아, 중국, 일본 등도 이러한 기술을 채용하고 있는 것으로 예측되고 있다.

한편, 2000년대를 기점으로 아프가니스탄전과 이라크전을 통해 현대전에서 전자전의 중요성이 부각되고 있다. 전자전에서 전술통신망에 가장 위협적인 요소 중 하나는 재밍으로, 전장에서 재밍공격은 우리군 전술통신망에 치명적인 피해를 입힐 수 있어 국방 전술통신 시스템의 항재밍 능력의 중요성이 날로 증대되고 있다. 특히 안정적인 국방 전술통신 시스템 구축과 운용은 현대전의 핵심인데, 국방 전술통신 환경은 상용통신 환경과는 달리 통신을 교란시키기 위한 적성국의 악의적인 재밍신호가 존재할 수 있다[4]. 우리나라에서도 2010년대 초반부터 수도권 일대에서 수차례 원인불명의 GPS 교란 재밍이 발생하고 있는 등 물리적 타격보다는 비물리적 타격으로 우리의 통신 시스템을 교란하려는 외부적 시도가 증가하고 있다.

따라서, 안정적인 국방 전술통신 시스템을 구축하기 위해서는 재밍신호가 존재하는 상황에서 신뢰성 있는 통신을 하기 위한 항재밍 기술이 요구된다. 그러나 국방 전술통신 시스템의 근간인 대대급 이하 소부대 전술통신망의 안정적인 구축 및 항재밍

능력 향상에 관한 연구는 다소 미흡한 것이 현실이다.

이 논문에서는 이러한 대대급 이하 소부대 전술통신망의 안정적 구축 및 항재밍 능력 향상을 위한 방안에 대해 제안한다. 이를 위해 먼저, 현재 단일채널 기반으로 운영되는 우리나라 소부대 전술통신망의 제약 사항에 대해 분석하고, 이를 해결하기 위하여 다중채널 기반 전술통신망으로의 확장을 제안한다. 제안된 다중채널 기반 소부대 전술통신망에서 전자전에 의한 재밍공격에 효율적으로 대응하기 위해 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition) 기반 널 스티어링(Null steering) 기법을 통해 재밍신호를 제거하여 항재밍 능력을 향상하는 방안을 제안하고 페이딩 환경에서 재밍채널 추정 오류가 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 현재 단일채널 기반으로 운영되는 소부대 전술통신망의 현황과 제약 사항을 분석한 후 이를 극복하기 위한 다중채널 기반 전술통신망으로의 확장을 제안한다. 3장에서는 제안된 다중채널 기반 소부대 전술통신망에서 전자전에 의한 재밍공격에 효율적으로 대응하기 위해 SVD를 이용하여 재밍신호의 영향을 상쇄하는 널스티어링 기법을 통하여 항재밍 성능을 향상하는 방안을 제안한다. 4장에서는 모의실험을 통해 재밍채널 추정 오류가 널스티어링 기법의 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

우리나라 소부대 전술통신망은 3개 또는 4개의 중대급(Company) 단위부대가 하나의 대대급(Battalion) 단위부대와 교신하는 단일채널 기반의 반이중(Half-duplex) 통신 네트워크로 구성되어 있다. 이러한 단일채널 기반의 소부대 전술통신망은 각 사용자들 간 간섭이 발생할 가능성이 있으며, 주파수 할당도 이루어지지 않아 안정적인 전송환경을 보장하지 못 할 뿐만 아니라 재밍에도 취약하다는 단점이 있다. 2010년대에 들어 수차례 발생하고 있는 원인불명의 GPS 교란 재밍 사례에서도 알 수

있듯이 재밍환경에서 통신의 신뢰성과 보안성을 유지하며 안정적인 데이터 전송을 위한 대책이 반드시 필요한 시점이다.

현재 운용되고 있는 단일채널 기반 소부대 전술통신망은 각 사용자간 간섭이 발생할 확률이 크며, 주파수가 분리되어 있지 않기 때문에 중대급 부대에서 대대급 부대로 연결되는 통신 네트워크 한 곳에만 재밍공격을 가하더라도 네트워크 전체가 마비된다는 치명적인 취약점이 존재한다. 이러한 취약점을 해결하기 위한 하나의 방안은 현재 단일채널 기반으로 운용되고 있는 소부대 전술통신망을 다중채널 기반 통신망으로 확장하는 것이다.

그림 1에는 다중채널 기반 소부대 전술통신망 블록도를 나타내었다. 그림 1에서 \mathbf{s} 는 송신신호, \mathbf{y} 는 수신신호를 나타내고, 송-수신기간 총 N_{Tx} 개의 송신안테나와 N_{Rx} 개의 수신안테나를 갖는 $N_{Tx} \times N_{Rx}$ 다중채널 시스템을 가정하며 여기에 재머가 N_{Rx} 개의 수신안테나에 영향을 미치는 상황을 가정한다. 단일채널 기반 소부대 전술통신망을 다중채널 기반 전술통신망으로 확장할 경우 다이버시티 이득을 얻을 수 있으며 향상된 항재밍 능력을 확보할 수 있어 보다 안정적인 통신망 구축이 가능하다[5]-[9]. 이러한 장점들을 바탕으로 미군은 이미 2010년대 초반부터 다중채널 기반의 소부대 전술통신용 무전기를 생산하여 운용하고 있다.

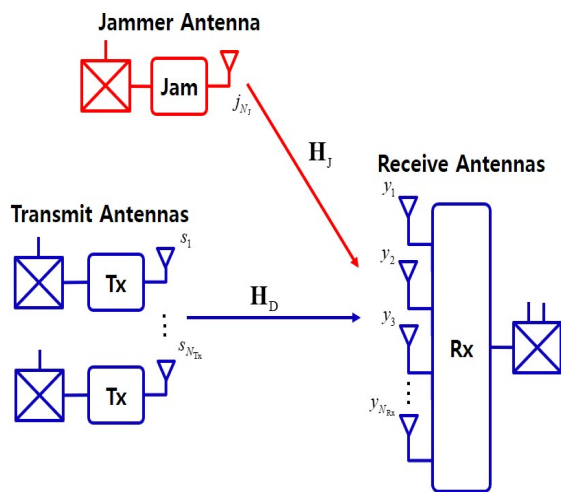


그림 1. 소부대 전술통신망 블록다이어그램(멀티채널)
Fig. 1. Block diagram of tactical communications network for small military unit(multi channels)

그림 1의 다중채널 기반 전술통신망 해석을 위해 우리가 전송하고자 하는 송신신호의 전송채널을 \mathbf{H}_D 라 하고 재밍신호가 수신기에 영향을 미치는 채널을 \mathbf{H}_J 라 하면, \mathbf{H}_D 의 (i, k) 성분은 $h_{i,k} (i \in \{1, \dots, N_{Rx}\}, k \in \{1, \dots, N_{Tx}\})$ 로 나타낼 수 있고, \mathbf{H}_J 의 (j, l) 성분은 $h_{j,l} (j \in \{1, \dots, N_J\}, l \in \{1, \dots, N_J\})$ 로 나타낼 수 있다. 이를 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{H}_D \in \mathbb{C}_D^{N_{Rx} \times N_{Tx}}, \mathbf{H}_J \in \mathbb{C}_J^{N_J \times N_J} \quad (1)$$

여기서 \mathbb{C}_D 는 송신신호 전송채널, \mathbb{C}_J 는 재밍신호 전송채널을 나타낸다. 이때, 수신신호 \mathbf{y} 는 통신하고자 하는 링크 \mathbf{H}_D 를 통해 전송된 송신신호 \mathbf{s} 와 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 통해 전송된 재밍신호 \mathbf{J} , 그리고 잡음이 더해진 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{P_{Tx}}{N_{Tx}}} \mathbf{H}_D \mathbf{s} + \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \mathbf{H}_J \mathbf{J} + \mathbf{n} \quad (2)$$

여기서, P_{Tx} 는 송신전력, P_J 는 재밍전력, α 는 재밍대 신호 전력비, N_J 는 재밍채널 수를 나타낸다.

일반적으로 \mathbf{H}_D 통신채널에 대하여는 부가적인 채널 추정 정보 등을 이용하여 채널 추정이 가능하다. 그러나 \mathbf{H}_J 재밍채널에 대하여는 블라인드 환경에서 채널 추정이 이루어져야 하기 때문에 추정 오류가 존재한다. 따라서, 2장에서 제안한 시스템 모델을 바탕으로 3장과 4장에서는 SVD 기반 널스티어링 기법을 이용한 소부대 전술통신망 항재밍 성능 향상 방안을 제안하고 재밍채널 추정 오류가 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석한다.

III. 소부대 전술통신망 재밍신호 상쇄를 위한 SVD 기반 널스티어링 기법

SVD는 주어진 행렬을, 특이값(Singular value) λ 를 대각원소로 갖는 대각행렬 Σ 와 유니터리 행렬 \mathbf{U} 및 \mathbf{V}^H 를 이용하여 $\mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H$ 의 형태로 분해하는 방식으로 잡음제거, 영상복원 등의 신호처리 분야에

서 활용될 수 있다[10].

SVD를 통해 분해된 재밍채널의 성분 중 0의 값을 갖는 특이값에 해당하는 특이벡터(Singular vector)를 수신필터로 사용하여 재밍신호를 널링(Nulling)하는 널스티어링은 우선 각 송신벡터간 상호간섭 발생을 방지하기 위해 송신신호 \mathbf{s} 가 통신하고자 하는 링크 \mathbf{H}_D 를 통해 전송될 시 채널의 영향을 제거 한다. 이를 위해 영-강제(Zero Forcing, ZF) 형태의 전처리 \mathbf{P} 를 곱해주며 전처리 \mathbf{P} 는 식 (3)으로 정의 할 수 있다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}_D^{-1} \mathbf{q}^* \quad (3)$$

여기서 \mathbf{q} 는 후처리 수신필터이다. 다음으로 수신신호 \mathbf{y} 에서 재밍신호의 영향을 제거하기 위해, 후처리 과정인 SVD를 수행하여 후처리 수신필터 \mathbf{q} 를 구한다. 이렇게 전처리와 후처리가 된 수신신호는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{q} \mathbf{y} = \mathbf{q} \sqrt{\frac{P_{Tx}}{N_{Tx}}} \mathbf{H}_D \mathbf{P} \mathbf{s} + \mathbf{q} \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \mathbf{H}_J \mathbf{J} + \mathbf{q} \mathbf{n} \quad (4)$$

일반적으로 재머는 단일안테나 기반이므로 이 논문에서는 재밍환경을 단일 재머안테나 상황으로 가정한다. 이 경우 재밍채널 \mathbf{H}_J 는 식 (5)와 같이 $J_{N_{Rx}}$ by 1 벡터로 나타 낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_J = \begin{pmatrix} h_{J_1} \\ h_{J_2} \\ \vdots \\ h_{J_{N_{Rx}-1}} \\ h_{J_{N_{Rx}}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 $h_{J_{N_{Rx}}}$ 는 N_{Rx} 번째 수신안테나로 수신되는 재밍채널이다. 이때, 후처리 수신필터 \mathbf{q} 는 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 널링 시키는 벡터들의 집합으로 식 (6)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\mathbf{q} \in \text{Null}(\mathbf{H}_J) \quad (6)$$

따라서, 후처리 수신필터 \mathbf{q} 는 식 (5)와 곱해져 0을 만드는 형태로 다음과 같이 1 by $J_{N_{Rx}}$ 벡터로 구성 할 수 있다.

$$\mathbf{q} = \left(1, -\frac{h_{J_1}}{h_{J_2}}, \dots, \frac{h_{J_1}}{h_{J_{N_{Rx}-1}}}, -\frac{h_{J_1}}{h_{J_{N_{Rx}}}} \right) \quad (7)$$

재밍신호의 영향을 없애기 위해 수신단에서 널스티어링을 수행한다. 이를 위해 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 SVD를 통해 분해해야 하는데 이는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_J &= \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (8) \\ &= (\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_{N_{Rx}}) \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0^H \\ \mathbf{v}_1^H \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{N_{Rx}}^H \end{pmatrix} \end{aligned}$$

식 (8)과 같이 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 SVD하여 분해하면 \mathbf{H}_J 는 좌 특이벡터(left singular vector) \mathbf{u}_x , 특이값(Singular value) λ , 그리고 우 특이벡터(Right singular vector)인 \mathbf{v}_x 로 분해된다.

만약 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 정확히 추정할 수 있다고 가정하면 식 (8)에서 가운데 $\mathbf{\Sigma}$ 의 대각성분 중 λ 를 제외한 0으로 구성된 특이값에 해당하는 벡터를 수신필터 \mathbf{q} , 즉 후처리 수신필터로 사용하여 재밍채널 \mathbf{H}_J 를 널링 시킬 수 있다. 이 경우 재밍신호의 영향을 제거할 수 있으며 우리가 전송하고자 하는 송신신호를 수신단에서 안전하게 수신할 수 있으며 이는 식 (9)와 같이 나타난다.

$$\mathbf{q} \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \mathbf{H}_J \mathbf{J} = \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} 0 \times J = 0 \quad (\because \mathbf{q} \mathbf{H}_J = 0) \quad (9)$$

따라서, 재밍채널을 정확히 추정할 수 있다면 식 (9)와 같은 특성에 의해 전처리와 후처리 된 수신신호 $\mathbf{q} \mathbf{y}$ 의 식 (4)는 다음과 같이 재밍성분이 제거된 형태로 나타나 재밍의 영향을 없앨 수 있다.

$$\mathbf{q}\mathbf{y} = \mathbf{q} \sqrt{\frac{P_{Tx}}{N_{Tx}}} \mathbf{H}_D \mathbf{P}\mathbf{s} + \mathbf{q}\mathbf{n} \quad (10)$$

일반적으로 우리가 통신하고자 하는 링크에 대해서는 파일럿 신호 등의 부가적인 정보를 이용하여 채널 추정이 가능하다. 그러나 재밍채널에 대한 정보는 알 수 없기 때문에 재밍채널에 대하여는 블라인드 환경에서 채널 추정이 이루어져야 하고 따라서 추정 오류가 존재하게 된다.

재밍채널 추정 오류를 반영하기 위해, 재밍채널 \mathbf{H}_J 에 β 라는 추정 오류가 존재한다고 가정하면, 식 (5)는 다음과 같이 \mathbf{H}'_J 로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}'_J = \begin{pmatrix} h_{J_1} + \beta_1 \\ h_{J_2} + \beta_2 \\ \vdots \\ h_{J_{N_{Rx}-1}} + \beta_{N_{Rx}-1} \\ h_{J_{N_{Rx}}} + \beta_{N_{Rx}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

이 경우, 식 (11)을 SVD 하게 되면 재밍채널 \mathbf{H}'_J 는 다음과 같이 분해된다.

$$\mathbf{H}'_J = \mathbf{U}' \boldsymbol{\Sigma}' \mathbf{V}'^H \quad (12)$$

$$= (\mathbf{u}'_0, \mathbf{u}'_1, \dots, \mathbf{u}'_{N_{Rx}}) \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda'} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}'_0^H \\ \mathbf{v}'_1^H \\ \vdots \\ \mathbf{v}'_{N_{Rx}}^H \end{pmatrix}$$

식 (12)에서 $\boldsymbol{\Sigma}'$ 의 대각성분 중 λ' 를 제외한 0으로 구성된 특이값에 해당하는 벡터를 이용하여 후처리 수신필터 \mathbf{q}' 로 사용하면 재밍채널 \mathbf{H}'_J 를 널링($\mathbf{q}'\mathbf{H}'_J = 0$)시킬 수 있다. 그러나, \mathbf{q}' 은 재밍채널 \mathbf{H}_J 의 후처리 수신필터가 아니기 때문에 재밍채널 \mathbf{H}_J 는 널링 되지 않고($\mathbf{q}'\mathbf{H}_J \neq 0$), 다음과 같이 재밍성분 \mathbf{s}'_J 가 남게 된다.

$$\mathbf{s}'_J = \mathbf{q}' \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \mathbf{H}_J \mathbf{J} \quad (13)$$

$$= \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \times (-\mathbf{q}') \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{N_{Rx}-1} \\ \beta_{N_{Rx}} \end{pmatrix} \times \mathbf{J} \neq 0$$

이 경우, 전처리와 후처리가 이루어진 수신신호 $\mathbf{q}'\mathbf{y}$ 는 다음과 같이 재밍성분이 완벽히 제거되지 않게 된다.

$$\mathbf{q}'\mathbf{y} = \mathbf{q}' \sqrt{\frac{P_{Tx}}{N_{Tx}}} \mathbf{H}_D \mathbf{P}\mathbf{s} + (-\mathbf{q}') \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{N_{Rx}-1} \\ \beta_{N_{Rx}} \end{pmatrix} \sqrt{\frac{\alpha P_J}{N_J}} \mathbf{J} + \mathbf{q}'\mathbf{n} \quad (14)$$

채널 추정 오류가 없을 때($\beta=0$), 식 (14)는 식 (10)으로 돌아간다.

이 장에서는 소부대 전술통신망에서 재밍신호 제거를 통한 항재밍 성능 향상을 위하여 SVD 기법 널스터어링 기법을 제안하고 이를 수식적으로 분석하였다. 제안한 기법은 재밍 신호를 상쇄할 수 있을 뿐만 아니라 다중입출력 송신 채널 간 간섭도 제거할 수 있다. 한편, 제안하는 방식은 재밍 채널에 대한 블라인드 추정이 필요하며 추정 오류가 존재할 수 있다. 4장에서는 식 (14)를 바탕으로 채널 추정 오류 β 가 SVD 널스터어링의 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석한다.

IV. 항재밍 성능분석

이 장에서는 재밍채널 추정 오류 β 가 널스터어링 기법의 항재밍 성능에 미치는 영향을 모의실험을 통해 살펴본다. 이를 위해 β 를 식 (15)와 같이 $|\mathbf{H}_J|$ 의 ϵ 라는 일정 범위에서 채널 추정 오류가 존재한다고 가정한다.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\beta_i| \leq \epsilon \times |\mathbf{H}_J| \quad (15)$$

모의실험에서는 채널 추정 오류가 없을 때($\epsilon=0$), 추정 오류가 각각 10% ($\epsilon=0.1$), 20% ($\epsilon=0.2$) 일 때 페이딩 채널에서 널스터어링의 항재밍 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 또한, 소부대 전술통신망에 대하여 단일채널에서 다중채널로의 확장을 통한 다이버시티 이득을 얻기 위해 최대비 합성 기법(MRC, Maximal Ratio Combining)을 적용하여 수신 성능을 향상시킨다. 일반적으로 다이버시티 경로가 4 이상

일 때 이득이 포화되는 경향이 있기 때문에 이 논문에서는 수신안테나가 4인 경우로 모의실험을 진행한다[11]. 채널은 나카가미(Nakagami) 페이딩을 겪는다고 가정하며 이 경우 수신신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)의 확률밀도 함수는 식 (16)과 같다[12].

$$f_D(\gamma_i) = \frac{\gamma_i^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_i}\right)^m \exp\left(-\frac{m}{\gamma_i}\right), \gamma \geq 0 \quad (16)$$

여기서 γ_i 는 i 번째 채널의 SNR 이고 $\bar{\gamma}_i$ 는 평균 SNR이며 m 은 페이딩 지수이다.

표 1에는 세부적인 모의실험 환경을 나타내었으며 비교를 위해 널스티어링을 하지 않은 경우는 최소평균제곱오차(MMSE, Minimum Mean Square Error) 디코더를 기준으로 하였다.

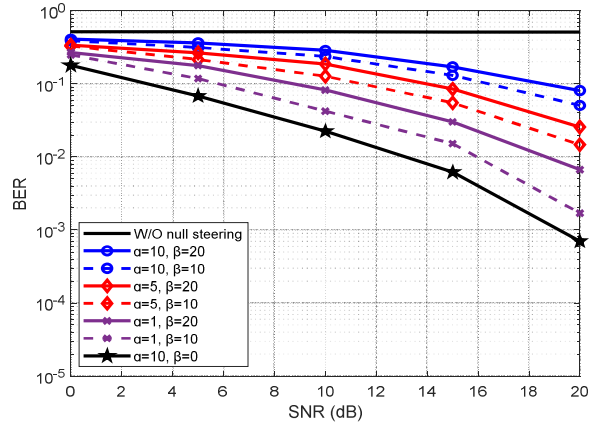
표 1. 모의실험 환경

Table 1. Simulation environments

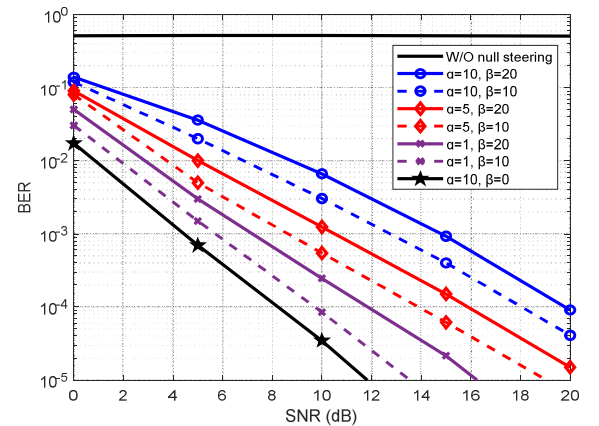
Parameter	Value
Number of transmit and receive antennas	2, 4
Number of jammer antennas	1
Signal-to-noise ratio	0 ~ 20 [dB]
Jamming-to-signal power ratio(α)	1, 5, 10
Jamming channel estimation error(β)	0, 10, 20 (%)
Channel	Nakagami fading
Modulation type	4-QAM
Number of iterations	10,000

그림 2에는 페이딩 지수 m 이 4 일 때 단일채널과 다중채널에서 재밍 대 신호 전력비 α , 재밍채널 추정 오류 β , 다이버시티 이득에 따른 BER 성능을 나타내었다. 널스티어링이 적용되지 않은 경우는 $\alpha = 10, \beta = 0$ 을 적용하였다.

그림 2에서 널스티어링이 적용되지 않은 경우는 재밍에 의하여 의미 있는 수신 성능이 확보되지 않음을 확인 할 수 있다. 그러나 다중채널에서 널스티어링을 적용하면 송신신호보다 각각 5배와 10배가 큰 재밍환경에서도 채널 추정 오류를 20% 이하로 유지할 경우 널스티어링과 다이버시티 이득을 통해 각각 SNR 약 16dB 및 20dB 이하에서 10^{-4} 의 uncoded BER 성능을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.



(a) Single channel



(b) Multi channels

그림 2. 나카가미 페이딩 채널에서 재밍 대 신호 전력비 및 재밍채널 추정 오류에 따른 BER 성능($m=4$)
Fig. 2. BER performance for jamming-to-signal power ratios and jamming channel estimation errors for Nakagami fading channels($m=4$)

또한, 주어진 재밍 대 신호 전력비에서 재밍채널 추정 오류가 2배가 될 경우 동일한 BER 성능을 유지하기 위해서 SNR은 약 2dB 정도 더 소요됨을 알 수 있다.

그림 3에는 다이버시티 경로 N_{Rx} 가 4, 페이딩 지수 m 이 1(Rayleigh 채널), 3 그리고 ∞ (AWGN 채널) 일 때, 재밍 대 신호 전력비 α 와 추정 오류 β 에 따른 BER 성능을 나타내었다. 일반적으로 재밍 대 신호 전력비는 재머의 위치 노출을 고려하면 약 5 이하가 현실적일 수 있다. 재밍 대 신호 전력비가 5 일 때 채널 환경이 가장 열악한 Rayleigh 페이딩 상황($m=1$)에서는 추정 오류를 10% 이하로 유지하고 다이버시티 이득을 고려하더라도 SNR 20dB 이상에서 약 10^{-2} 의 BER을 보이며 성능이 열화 된다는 것을 확인 할 수 있다.

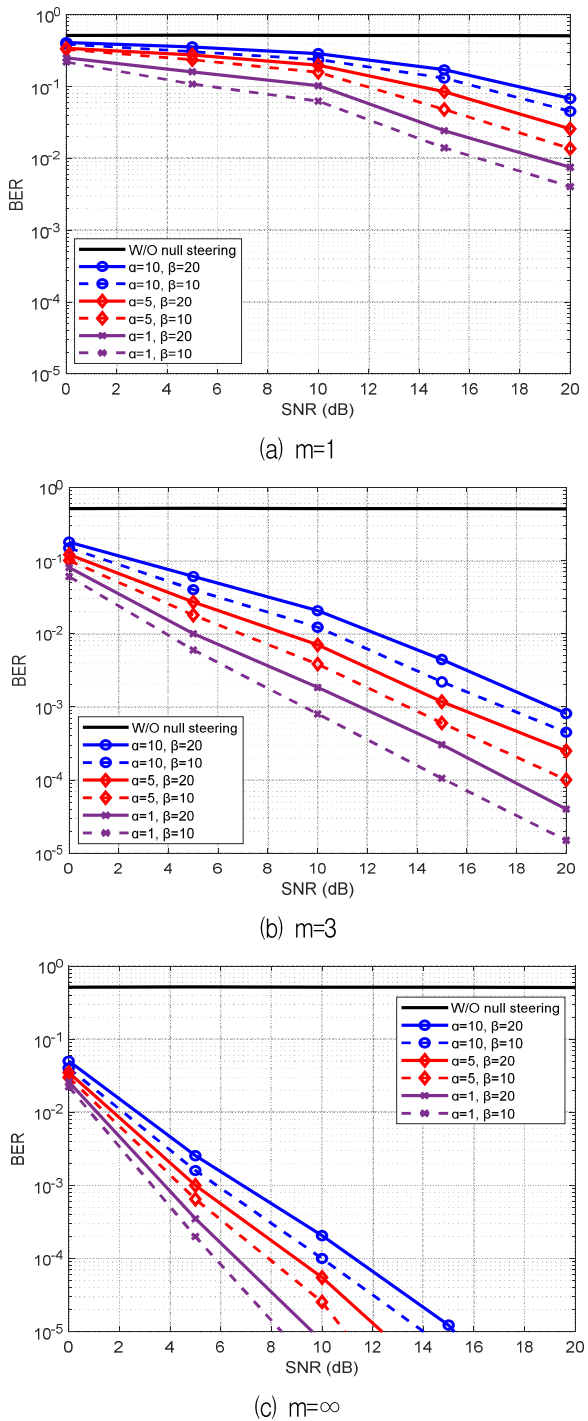


그림 3. 수신안테나가 4개 일 때 나카가미 페이딩 채널에서 재밍 대 신호 전력비 및 재밍채널 추정 오류에 따른 BER 성능

Fig. 3. BER performance for jamming-to-signal power ratios and jamming channel estimation errors in Nakagami fading channels when $N_{tx}=4$

그러나 가장 열악한 Rayleigh 페이딩 환경을 제외하고, 예를 들어 m 이 3인 나카가미 페이딩 환경에서는 채널 추정 오류를 10% 이하로 유지할 경우

널스티어링과 다이버시티 이득을 통해 SNR 약 20 dB 이하에서 10^{-4} 의 BER 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 보다 실제적인 상황에서는 재밍 대 신호 전력비가 보통 1에 가까울 것이므로 이 경우 m 이 3인 나카가미 페이딩 환경에서 채널 추정 오류가 10%와 20% 일 때 SNR 약 15dB와 17.5dB 이하에서 각각 10^{-4} 의 BER 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

이 논문에서는 현재 단일채널 기반으로 운영되는 우리나라 소부대 전술통신망의 제약 사항에 대해서 분석하고 이를 극복하기 위한 다중채널 기반 소부대 전술통신망으로의 확장을 제안하였다. 제안된 다중채널 기반 소부대 전술통신망에서 재밍공격에 효율적으로 대응하기 위하여 SVD 기반 널스티어링 기법을 통해 재밍신호를 상쇄시켜 항재밍 능력을 향상시키는 방안을 제안하고 페이딩 환경에서 재밍 채널 추정 오류가 항재밍 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 재밍채널에 대한 정보는 알 수 없기 때문에 블라인드 환경에서 채널 추정이 이루어져야 한다. 모의실험 결과, 재밍신호가 송신신호 보다 몇 배나 큰 상황에서도 재밍채널 추정과 널스티어링 및 다이버시티 이득을 통해 일정 수준 이상의 항재밍 수신 성능을 확보 할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 보다 구체적으로는 재밍신호가 송신신호 보다 5배가 큰 상황에서도 채널 추정 오류를 20% 이하로 유지할 경우 널스티어링과 다이버시티 이득을 통해 SNR 약 16dB이하에서 10^{-4} 의 BER 성능을 확보 할 수 있었다.

이 논문에서 제안한 방법을 소부대 전술통신망에 적용한다면 향후 미래 전자전 상황에서 항재밍 성능 측면에서 유의미한 향상이 기대되며, 소부대 전술통신망의 안정적인 운용에 기여가 가능할 것이다.

References

[1] W. T. Lim et al., "Military Electronic Communication", Gold Egg Press, pp. 209-216, Feb. 2016.

[2] J. B. Hudson et al., "US Army FM 6-02.72, Tactical Radios", Air Land Sea Application Center, pp. 11-23, Jun. 2002.

[3] K. S. Miller et al., "US Army ATP 6-02.53, Techniques for Tactical Radio Operations", Headquarters, Department of the Army, pp. 13-20, Feb. 2020.

[4] M. S. Vassiliou, J. R. Agre, S. Shah, and T. MacDonald, "Crucial Differences Between Commercial and Military Communications Technology Needs", MILCOM 2013 - 2013 IEEE Military Communications Conference, San Diego, CA, USA, pp. 342-347, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2013.66>

[5] K. H. Lee, "Study on Target Direction Estimation in Multi Input Multi Output Array Antenna System", Journal of KIIT, Vol. 10, No. 3, pp. 65-70, March, 2012.

[6] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, "Introduction to Space-time Wireless Communications", Cambridge University Press, pp. 86-111, May 2003.

[7] J. M. Lee et al., "Military Communication System", Hong Neung Science Press, pp. 122-125, Jan. 2014.

[8] C. A. Cole, C. Shahriar, and T. C. Clancy, "An Anti-jam Communications Technique via Spatial Hiding Precoding", 2014 IEEE Military Communications Conference, Baltimore, MD, USA, pp. 490-494, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.88>.

[9] V. Ramaswamy, J. R. Fevold, J. T. Correia, and T. E. Daughters, "Design of Anti-jamming Application for LTE-based Military Communications", MILCOM 2016 - 2016 IEEE Military Communications Conference, Baltimore, MD, USA, pp. 230-235, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2016.7795331>.

[10] D. C. Lay, S. R. Lay, and J. J. McDonald, "Linear Algebra and Its Applications", 5th ed.,

Pearson, pp. 416-426, Dec. 2014.

[11] K. M. Hyun, D. Yoon, and S. K. Park, "Performance Analysis of MRC Diversity for Arbitrary Rectangular QAM Signals over Nakagami Fading Channels", IEICE Transactions on Communications, Vol. E87-B, No. 5, pp. 1297-1305, May 2004.

[12] M. Nakagami, "The m-Distribution—A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading", in Statistical Methods in Radio Wave Propagation, ed. W. G. Hoffman, Pergamon Press, pp. 3-36, Jun. 1960.

저자소개

정 용 석 (Yongseok Jung)



2008년 3월 : 육군사관학교(학사)
 2018년 2월 : 연세대학교
 전기전자공학과(공학석사)
 2020년 3월 ~ 현재 : 한양대학교
 융합전자공학과 박사과정
 관심분야 : 국방통신, 신호정보

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교
 전자통신공학과(공학사)
 1992년 2월 : 한양대학교
 전자통신공학과(공학석사)
 1995년 8월 : 한양대학교
 전자통신전파공학과(공학박사)
 2004년 3월 ~ 현재 : 한양대학교

융합전자공학부 교수

관심분야 : 무선통신, 위성 및 우주통신, 신호정보