

다중 안테나를 이용한 전자 공격 신호 전송 시스템

장재원^{*,1)} · 류정호¹⁾ · 박주래¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

Electronic Attack Signal Transmission System using Multiple Antennas

Jaewon Chang^{*,1)} · Jeong Ho Ryu¹⁾ · Joo Rae Park¹⁾

¹⁾ The 2st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 17 September 2020 / Revised 26 January 2021 / Accepted 29 January 2021)

Abstract

In electronic warfare, beamforming using multiple antennas is applied for effective transmission of electronic attack signals. In order to perform an electronic attack against multiple threats using the same frequency resource, it is necessary to apply a multi-beam transmission algorithm that has been studied in wireless communication systems. For electronic attacks against multiple threats, this paper presents an MMSE(Minimum Mean-Squared Error) beam-forming technique based on the prior location information of threats and an optimization method for power allocation. In addition, the performance of the proposed method is evaluated and received signals of multiple threats are compared and analyzed.

Key Words : Electronic Warfare(전자전), Electronic Attack(전자 공격), Multiple Input Multiple Output Systems(다중 입출력 시스템), Minimum Mean-Squared Error(최소 평균 제곱 오차), Power Allocation(전력 할당)

1. 서론

전자전은 적의 전자기 스펙트럼을 제압하고 전장에 서의 우위를 점유하기 위하여, 아군이 운용 중인 전자기 스펙트럼 환경을 보호함과 동시에 적이 운용 중인 전자기 스펙트럼 상의 신호를 탐지 및 분석하고 적이 운용 중인 전자기 스펙트럼 환경을 공격 및 교란하는 것을 말한다. 전자전은 적 전자기 스펙트럼 환경을 방

해하고 공격하는 전자 공격(EA : Electronic Attack), 전자기 스펙트럼 환경을 보호하여 아군의 원활한 전장 활동을 보장하는 전자 보호(EP : Electronic Protection), 적의 전자기 스펙트럼 신호를 수집 및 분석하여 위협을 탐지하는 전자 지원(ES : Electronic Support)으로 세분화된다¹⁾.

전자 공격은 일반적으로 전자 지원을 통하여 획득된 적 위협 신호의 위치 정보를 이용하여 방향으로 고출력의 전자 방해(Electronic Jamming) 신호나 전자 기만(Electronic Deception) 신호 등을 송출하는 방법으로 수행된다. 이와 같은 전자 공격에는 고출력 신호를 원하

* Corresponding author, E-mail: jaewon28334@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 방향으로 전송하기 위한 다중 안테나 빔포밍 기법이 적용된다. 동일한 주파수 자원과 전력을 이용하면서 전자 공격 성능을 향상시키고 그 효과를 극대화하기 위한 방법으로 기존 통신 시스템에서 활발히 연구되고 있는 다중 입출력(MIMO : Multiple Input Multiple Output) 시스템의 활용이 가능하다^[2].

다중 입출력 시스템은 단일 송수신 안테나의 이용에서 탈피하여 N 개 송신 안테나와 M 개 수신 안테나를 채택함으로써 전송 효율을 향상시킬 수 있다^[3,4]. 이와 같은 다중 입출력 시스템은 N 개 송신 안테나를 이용한 전자 공격 장비와 M 개 대상체의 구성과 동일한 모델링으로 적용 가능하다. 다중 입출력 시스템 기술 중 하나인 빔포밍은 다중 안테나에서 채널 상태에 따른 가중치를 가하여 신호 대 간섭 잡음비(SINR : Signal to Interference plus Noise Ratio)를 증가시키는 것이 목적이며, 본 논문에서는 다수 개의 전자 공격 신호를 동시에 전송하기 위하여 MMSE(Minimum Mean-Squared Error) 빔포밍 기법^[5-11]과 함께 전자 공격 신호에 대한 전력 할당 최적화를 적용하여 전자 공격의 효과를 증가시키는데 활용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 전자 공격 신호 생성을 위하여 대상체 위치정보 기반의 빔포밍 기법과 전자 공격 신호 전력 할당을 위한 최적화 방법을 제안하고 설명한다. 4장에서는 제안 방식의 성능 평가를 위하여 전자 공격 신호 전송 시 대상체 수신 신호의 스펙트럼 결과를 비교 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

다중 안테나가 적용된 전자 공격 신호 전송 시스템은 동일한 주파수 대역을 사용하는 다수의 대상체에 전자 공격을 위한 빔을 Fig. 1과 같이 동시에 형성한다. 다수의 대상체로 다중 빔을 형성하여 동시에 전자 공격을 수행하기 위하여 구성되는 전자 공격 신호 전송 시스템의 블록다이어그램은 Fig. 2와 같다.

전자 공격 신호 전송 시스템과 다수 대상체 사이의 시스템 모델은 N 개 송신 배열 안테나를 갖는 전자 공격 신호 전송 시스템과 M 개의 대상체를 고려한다. M 개 대상체의 수신 신호는 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_M]^T$ 로 나타낼 수 있으며, 각 대상체의 수신 신호는 정상적인 수

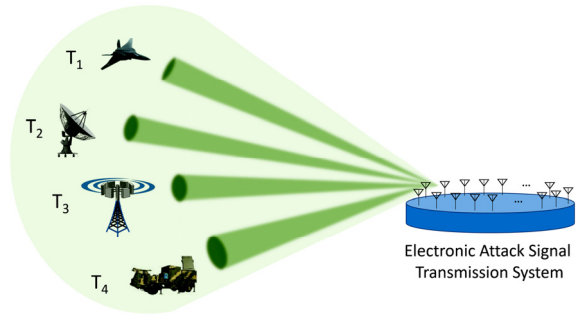


Fig. 1. Electronic attack signal transmission system

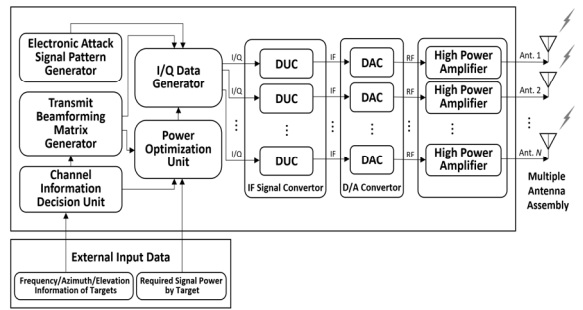


Fig. 2. Block diagram of electronic attack signal transmission system

신 신호 \mathbf{r}_s 와 전자 공격에 의하여 수신된 전자 공격 신호 \mathbf{r}_j , 열잡음 \mathbf{n} 의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}_s + \mathbf{r}_j + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{G}\mathbf{W}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_M \end{bmatrix} \mathbf{s} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{g}_M \end{bmatrix} [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_M] \mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1) \end{aligned}$$

대상체들이 수신한 정상적인 수신신호 벡터 \mathbf{r}_s 는 m 번째 대상체와 m 번째 송신원 사이의 채널 h_m 으로 구성된 $M \times M$ 채널 행렬 \mathbf{H} 와 송수신 신호 벡터 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$ 의 곱으로 이루어진다. 송수신 신호 벡터 \mathbf{s} 는 m 번째 송신원에서 m 번째 대상체로 전달된 신호 s_m 으로 구성된 $M \times 1$ 신호 벡터이다.

전자 공격에 의하여 수신된 신호 벡터 \mathbf{r}_j 는 M 개 대상체와 N 개 송신 배열 안테나 사이의 $M \times N$ 채널 행렬 \mathbf{G} , M 개 대상체에 다중 빔 형성을 위하여 N 개 송

신 배열 안테나에 적용되는 $N \times M$ 빔포밍 행렬 \mathbf{W} , M 개 대상체 전자 공격을 위하여 할당되는 $M \times M$ 전송 세기 행렬 \mathbf{P} , $M \times 1$ 전자 공격 신호원 벡터 \mathbf{x} 의 곱으로 이루어진다. 이때, 채널 행렬 \mathbf{G} 는 m 번째 대상체와 N 개 송신 배열 안테나 사이의 $1 \times N$ 채널 벡터 \mathbf{g}_m 으로 구성되며, 빔포밍 행렬 \mathbf{W} 는 m 번째 대상체를 위하여 N 개 송신 배열 안테나 빔형성에 적용되는 $N \times 1$ 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_m 으로 만들어진다. 전송 세기 행렬 $\mathbf{P} = \text{diag}[\sqrt{p_1}, \sqrt{p_2}, \dots, \sqrt{p_M}]$ 는 m 번째 대상체 전자 공격을 위하여 할당되는 전송 세기 p_m 으로 이루어지며, 전자 공격 신호원 벡터 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ 는 m 번째 대상체 전자 공격을 위하여 할당되는 전자 공격 신호원 x_m 으로 구성된다. 또한 $M \times 1$ 열잡음 벡터 $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_M]^T$ 은 m 번째 대상체 수신기의 열잡음 n_m 으로 이루어진다.

상기 기술된 M 개 대상체에 대한 수신 신호 벡터 모델 \mathbf{r} 을 통하여, m 번째 대상체의 수신 신호 r_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_m = h_m s_m + \mathbf{g}_m \sum_{j=1}^M \mathbf{w}_j \sqrt{p_j} x_j + n_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

대상체 사전 위치정보(방위각)를 이용하여 획득되는 N 개 송신 배열 안테나 사이의 위상 정보는 대상체와 배열 안테나 사이의 $1 \times N$ 채널 벡터 \mathbf{g}_m 으로 사용되며, 채널 벡터 \mathbf{g}_m 로 구성된 $M \times N$ 채널 행렬 $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1 \ \mathbf{g}_2 \ \dots \ \mathbf{g}_M]^T$ 를 이용하여 MMSE 빔포밍 기법을 아래와 같이 적용하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MMSE} &= [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_M] \\ &= (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \end{aligned} \quad (3)$$

해당 기법을 통하여 N 개 송신 배열 안테나에 적용되는 \mathbf{w}_j ($j=1, 2, \dots, M$) 빔포밍 벡터가 결정되며, 대상체 까지 거리에 따른 전파 경로 손실을 고려하여 전자 공격을 위하여 할당되는 p_j ($j=1, 2, \dots, M$) 전송세기가 결정된다. 전자 공격 신호원 x_j ($j=1, 2, \dots, M$)는 잡음 재밍 전자 공격을 수행할 경우 인위적으로 발생하여 사용되는 잡음 신호원에 해당되며, 수신기에서의 잡음 신호 n_m 은 σ_n^2 의 평균 전력을 갖는다.

3. 전자 공격 신호의 전력 할당 최적화

3.1 Lagrangian Multiplier Method를 이용한 최적화 대상체가 개별적으로 수신하는 $h_m s_m$ 을 정상적으로 수신하지 못하도록 M 개 대상체에 대한 전자 공격을 동시에 효과적으로 수행하기 위해서는, 주어진 조건하에 M 개 전자 공격 신호 전송 용량의 합이 최대화 될 수 있도록 전력 할당을 최적화해야만 한다.

전자 공격 신호를 수신하는 m 번째 대상체의 수신 신호 모델인 식 (2)를 통하여 전자 공격 신호 전송 시스템의 송신 빔포밍 적용 시, 최대 송신 출력을 효과적으로 배분하기 위해서는 m 번째 대상체 전자 공격을 위한 $\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m \sqrt{p_m} x_m$ 의 신호 세기를 최대화함과 동시에 전자 공격에 도움이 되지 않는 $\mathbf{g}_m \sum_{j \neq m} \mathbf{w}_j \sqrt{p_j} x_j$ 의 신호 세기를 최소화해야만 한다. 이와 같은 조건을 만족시킴과 동시에 모든 대상체에 대한 전자 공격 신호 전송 용량의 합이 최대화되기 위한 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \max \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{p_m |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2}{\sigma_n^2 + \sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{m=1}^M p_m \leq P_T \\ p_m \geq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

전자 공격 신호 전송 용량의 합이 최대화될 수 있도록 최적화할 때, 전자 공격 신호 전송 시스템의 최대 송신 전력 P_T 의 조건과 M 개 대상체 전자 공격을 위하여 할당되는 전송세기 p_m 의 조건을 식 (4)로 동시에 만족시켜야만 한다. 다수의 제약 조건이 포함되는 최적화 문제를 해결하기 위해서 Lagrangian multiplier method를 이용한 최적화^[12]가 활용될 수 있으며, 이를 식 (4)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L(\{p_m\}, \mu) \\ = \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{p_m |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2}{\sigma_n^2 + \sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2} \right) - \mu \left(\sum_{m=1}^M p_m - P_T \right) \\ \text{s.t.} \quad p_m \geq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (5)$$

특히 Lagrangian multiplier method를 이용한 최적화 문

제를 해결함에 있어서 부등식이 포함되는 조건부 최적화 문제는 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 조건^[13]이 다음과 같이 적용되는 것이 유용하다.

$$\frac{\partial L(\{p_m\}, \mu)}{\partial p_m} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{Stationarity} \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M p_m \leq P_T \quad \dots\dots\dots \text{Primal feasibility} \quad (7)$$

$$p_m \geq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

$$\mu \geq 0 \quad \dots\dots\dots \text{Dual feasibility} \quad (8)$$

$$\mu \left(\sum_{m=1}^M p_m - P_T \right) = 0 \quad \dots\dots \text{Complementary slackness} \quad (9)$$

해당 조건을 만족시키기 위한 식 (5)의 최적화 문제는 해당 식을 미분하여 제약 조건을 모두 만족하는 극값을 찾음으로써 M 개 대상체 전자 공격을 위하여 할당되는 전송세기 p_m 과 Lagrangian multiplier μ 를 구하는 최적화 문제로 다음과 같이 변환된다^[14,15].

$$\frac{\partial L(\{p_m\}, \mu)}{\partial p_m} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{p_m |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2 + \sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2}$$

$$- \sum_{j \neq m} \frac{p_j |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_j|^2 |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_m|^2}{\left(p_j |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_j|^2 + \sum_{l \neq j} p_l |\mathbf{g}_l \mathbf{w}_l|^2 + \sigma_n^2 \right) \left(\sum_{l \neq j} p_l |\mathbf{g}_l \mathbf{w}_l|^2 + \sigma_n^2 \right)}$$

$$- \mu = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{p_m |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2 + \sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2} = t_m + \mu$$

$$\Rightarrow p_m = \frac{1}{|\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2 (t_m + \mu)} - \frac{\sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2}{|\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2}$$

where

$$t_m = \sum_{j \neq m} \frac{p_j |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_j|^2 |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_m|^2}{\left(p_j |\mathbf{g}_j \mathbf{w}_j|^2 + \sum_{l \neq j} p_l |\mathbf{g}_l \mathbf{w}_l|^2 + \sigma_n^2 \right) \left(\sum_{l \neq j} p_l |\mathbf{g}_l \mathbf{w}_l|^2 + \sigma_n^2 \right)} \quad (10)$$

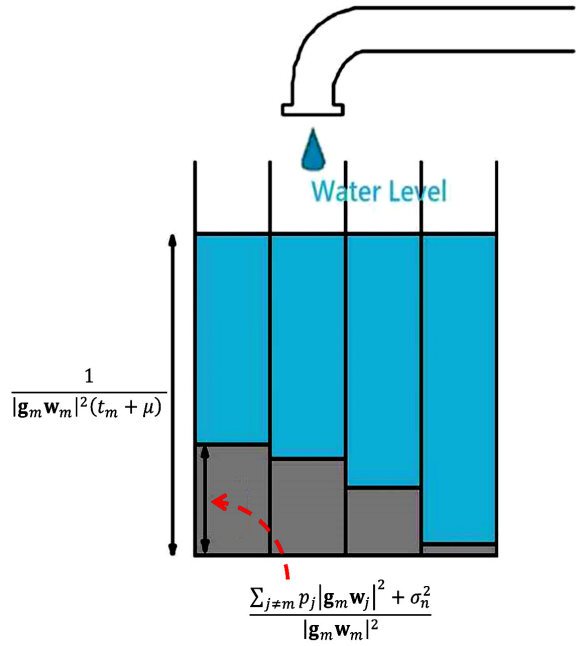


Fig. 3. Water-filling algorithm

위 과정을 통하여 결정된 전송 세기 p_m 는 water-filling algorithm을 통하여 결정될 수 있고 모든 p_m 은 Fig. 3과 같이 $1/|\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2(t_m + \mu)$ 의 동일한 water-level에 최적화되어 결정된다.

3.2 Modified Multi-Level Water-Filling Algorithm

대상체까지 거리에 따른 전파 경로 손실을 고려하여 대상체 별로 요구되는 각기 다른 레벨의 전송 세기를 할당하기 위해서, 식 (10)의 과정에서 결정된 전송 세기 p_m 을 다양한 레벨 요구에 맞는 각기 다른 water-level을 이용하여 최적화를 수행해야만 한다.

대상체 별 요구되는 전자 공격 신호의 전송 세기 최적화 값은 전자 공격 신호 전송 시스템에서 사용 가능한 최대 송신 전력 P_T 조건을 고려하여 다음의 modified multi-level water-filling algorithm을 통하여 결정하는 것이 가능하다.

$$p_m = \left(\frac{P_m^{Level}}{|\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2 (t_m + \mu)} - \frac{\sum_{j \neq m} p_j |\mathbf{g}_m \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2}{|\mathbf{g}_m \mathbf{w}_m|^2} \right)^+$$

where $P_T = \sum_{m=1}^M P_m^{Level}$ (11)

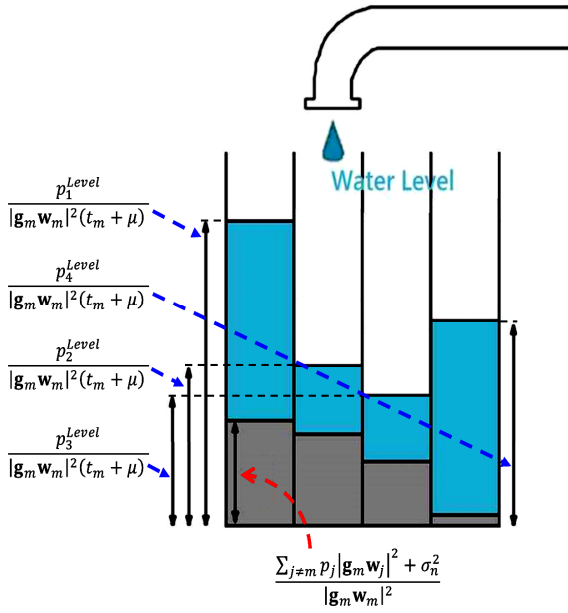


Fig. 4. Modified multi-level water-filling algorithm

Water-filling algorithm을 통하여 식 (11)의 p_m 을 결정함에 있어서 $x^+ = \max(x, 0)$ 이 적용되며, 요구되는 각기 다른 multi-level에 해당되는 $p_m^{Level} / [|g_m w_m|^2 (t_m + \mu)]$ 에 전력 할당 최적화가 적용된다. 제안하는 Modified multi-level water-filling algorithm은 Fig. 4와 같이 도식화하여 표현될 수 있다.

전자 공격 신호 전송 시스템의 빔포밍을 위한 전력 할당 최적화는 앞서 설명된 대상체 사전 위치 정보 (방위각)를 이용하여 획득되는 $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2 \cdots \mathbf{g}_M]^T$ 채널 행렬, 획득된 채널 행렬을 활용하여 다중 빔을 생성하기 위한 MMSE 송신 빔포밍 행렬 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2 \cdots \mathbf{w}_M]$, 대상체까지 거리에 따른 전파 경로 손실을 고려하여 요구되는 전자 공격 신호 전력 상한 값 $p_m^{Level} (m=1,2,\dots,M)$ 의 사전 정보들을 활용하게 된다. 이와 같은 사전 정보들을 통하여 Fig. 5와 같이 모든 대상체에 대한 전력 할당 최적화는 반복적으로 iterative하게 수행된다. 최대 송신 전력 P_T 조건을 만족하는 Lagrangian multiplier μ 를 이용하여 연산된 p_m 이 반복적 연산을 통하여 $|\dot{p}_m - p_m^{(n-1)}| < \epsilon^p \sim 0$ 을 만족함과 동시에 사전 정보와 p_m 연산 결과로 결정되는 t_m 값이 수렴하여 $|t_m^{(n)} - t_m^{(n-1)}| < \epsilon^t \sim 0$ 을 만족할 경우 최적화된 전력 할당 값이 결정된다.

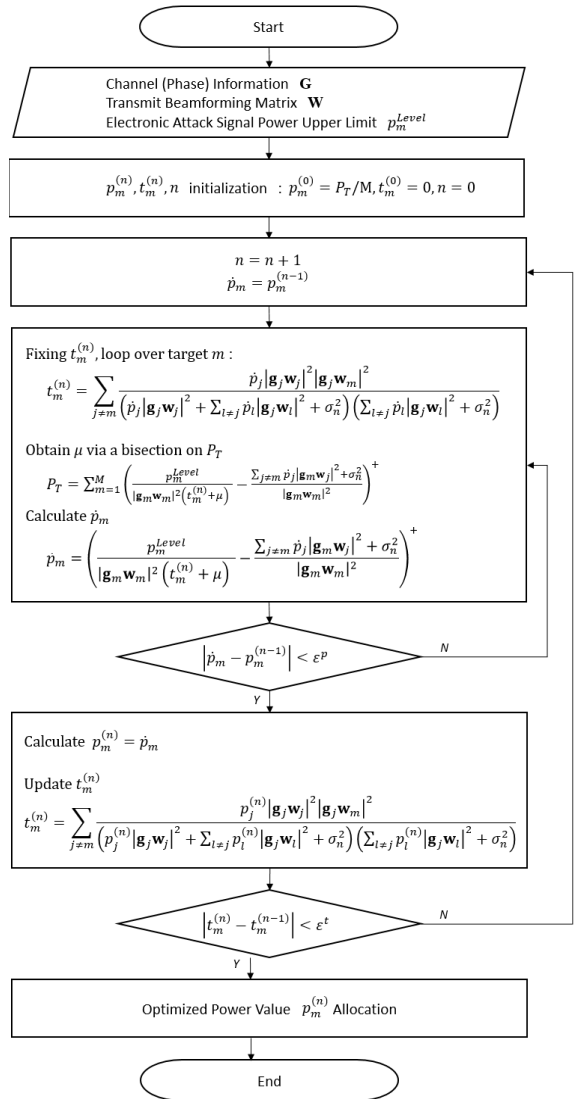


Fig. 5. Flow chart of Modified multi-level water-filling algorithm

4. 제안 방식의 성능 평가

전자 공격 신호 전송 시스템에서 제안된 방식의 전력 할당 최적화를 통한 다중 안테나 빔포밍을 수행할 경우 대상체에 대한 전자 공격 신호의 빔형성 패턴을 확인한다. 또한 최적화를 통하여 할당된 송신 출력 결과를 확인하고 해당 전자 공격 신호 전송에 따른 대상체 별 수신신호 스펙트럼을 비교 분석한다. Table 1

Table 1. System parameters

Parameters	Value
# of Tx antennas	64 개
Array antenna placement	Circular array antenna (Radius $r = 0.4$ m)
Antenna spacing : max, min	80 cm, 3.92 cm
Target activity frequency	f MHz
# of targets	4
Target azimuth	10° 20° 50° 80°
Required transmission power ratio by target (dB)	10 1 0.1 7

은 제안 방식의 성능 평가를 위하여 사용된 시스템 파라미터를 정리한 표이다. 전자 공격 신호 전송을 위하여 $N = 64$ 개의 송신 안테나를 사용하는 반지름 0.4 m 인 원형 배열 안테나를 적용하였으며, 10°, 20°, 50°, 80° 방위각에 위치한 f MHz 주파수 대역을 사용하는 $M = 4$ 개의 대상체를 고려하였다. 각 대상체 별 전자 공격 신호 전송 시 전자 공격 신호 전송 시스템의 요구 송신 출력 비는 10 : 1 : 0.1 : 7 (dB) 를 적용하였다.

전자 공격 신호 전송을 위하여 식(3)의 MMSE 빔포밍 기법을 사용하였으며, Table 1의 시스템 파라미터 적용 시 전력 할당 최적화를 위하여 2704회 iteration이 적용되었다. 전력 할당 최적화를 위한 iteration 횟수는 전자 공격 신호의 개수, 주파수 대역, 방위각 및 대상체 별 요구 송신 출력 비 등의 파라미터 값에 따라서 변화할 수 있으며 약 2000 ~ 2800회의 iteration이 필요함을 확인하였다.

제안한 modified multi-level water-filling algorithm을 이용하여 전자 공격 신호 전력 할당 최적화가 적용된 MMSE 빔포밍 신호의 빔패턴은 Fig. 6과 같다. 전 방위각에 대한 전자 공격 신호의 빔패턴은 Fig. 6의 (a)에서 확인할 수 있으며, MMSE 빔포밍을 통하여 대상체가 위치한 해당 방위각으로 다중 빔이 정확하게 형성된 것을 확인할 수 있다. 대상체 방위각이 아닌 범위에서 발생하는 전력 피크는 MMSE 빔포밍 및 전력 할당 최적화 수행 뒤 발생하는 의도하지 않은 전력 패턴이며, 빔 부역 레벨 평탄화를 위한 추가적인 알고리즘^[6]의 적용이 가능하다.

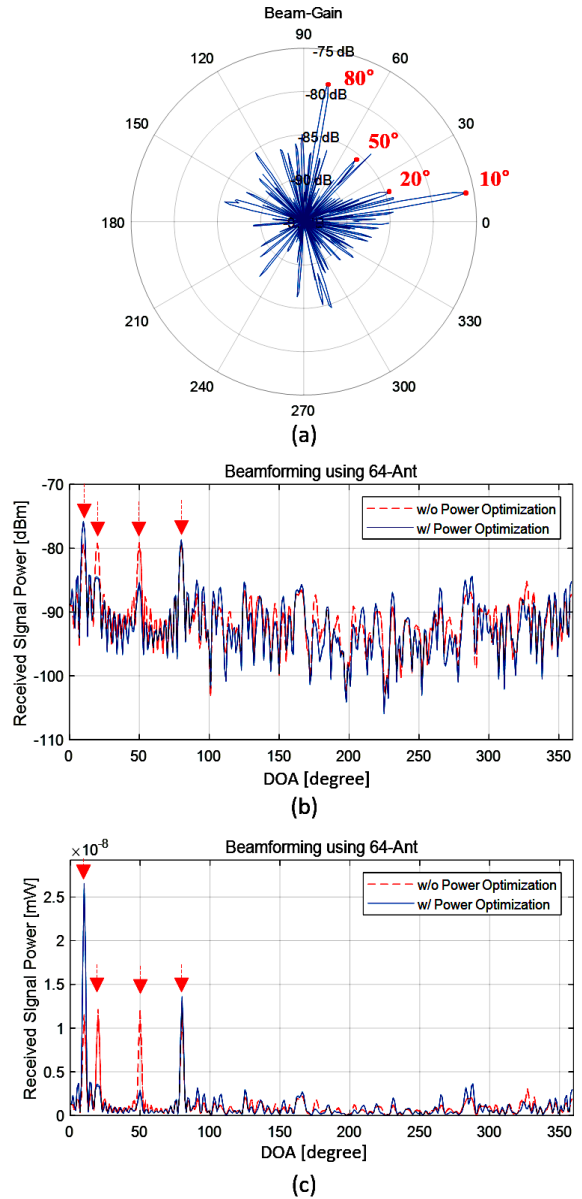


Fig. 6. Beam pattern of electronic attack signal : (a) Beam pattern at omnidirectional angle, (b) Log-scale, (c) Linear-scale

다중 빔을 통한 전자 공격 수행 시, 대상체가 수신하는 전자 공격 신호의 log-scale 수신 전력 세기는 Fig. 6의 (b)이고, linear-scale 수신 전력 세기는 Fig. 6의 (c)이다. 대상체가 수신한 전자 공격 신호의 log-scale 수신 전력 세기는 Fig. 6의 (b)를 통하여 대상체

Table 2. Required transmission power values vs. optimized power values

Item	Comparison value			
Target azimuth	10°	20°	50°	80°
Required transmission power				
Log-scale (dB)	10	1	0.1	7
Linear-scale ($\times 10^{-9}$ mW)	10	1.259	1.023	5.012
Ratio of normalized linear-scale value (a)	$p_1^{Level} = 0.578$	$p_2^{Level} = 0.073$	$p_3^{Level} = 0.059$	$p_4^{Level} = 0.290$
Optimized power				
Log-scale (dBm)	-75.83	-84.80	-92.34	-78.70
Linear-scale ($\times 10^{-9}$ mW)	26.1	3.31	0.58	13.5
Ratio of normalized linear-scale value (b)	$p_1 = 0.600$	$p_2 = 0.076$	$p_3 = 0.013$	$p_4 = 0.310$
Normalized linear-scale value ratio error				
$\epsilon = (b) - (a) $ (%)	2.185	0.331	4.574	2.058

방위각 순서로 약 -75.83 dBm, -84.80 dBm, -92.34 dBm, -78.70 dBm 로 확인할 수 있으며, linear-scale 수신 전력 세기는 Fig. 6의 (c)를 통하여 약 2.61×10^{-8} mW, 3.31×10^{-9} mW, 0.58×10^{-9} mW, 1.35×10^{-8} mW 임을 알 수 있다.

전자 공격 신호 전송 시스템의 요구 송신 출력과 전력 할당 최적화를 통한 수신 전력 세기를 정규화된 linear-scale 비율로 비교 분석하기 위하여 Table 2에 정리하였다. 대상체 방위각 순서로 요구 송신 출력의 정규화 된 linear-scale 비율은 0.578, 0.073, 0.059, 0.290 이고 최적화 된 전력 세기의 정규화 된 linear-scale 비율은 0.600, 0.076, 0.013, 0.310 이며, 비율 간 오차 ϵ 는 2.185 %, 0.331 %, 4.574 %, 2.058 % 로 5 % 이내로 최적화가 이루어짐을 확인할 수 있다.

제안된 방식으로 전력 할당이 최적화된 MMSE 빔포밍을 통하여 전자 공격 신호가 전송되고 대상체가 신호를 수신할 경우, 각 대상체 별 수신 신호 스펙트럼 결과의 스냅 샷을 M&S(Modelling and Simulation)를 통하여 Fig. 7 ~ Fig. 10과 같이 확인할 수 있다. 전

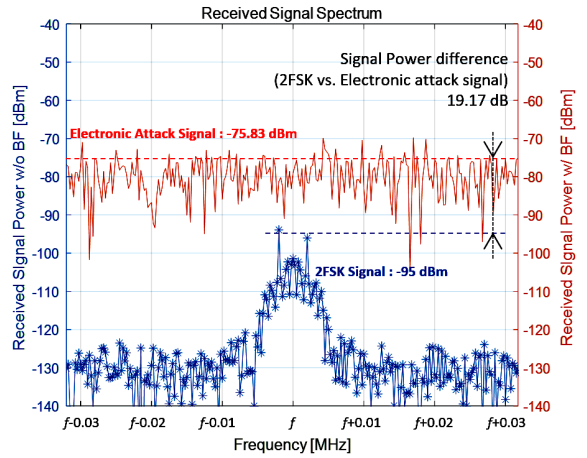


Fig. 7. Received signal spectrum when transmitting electronic attack signal(Azimuth : 10°)

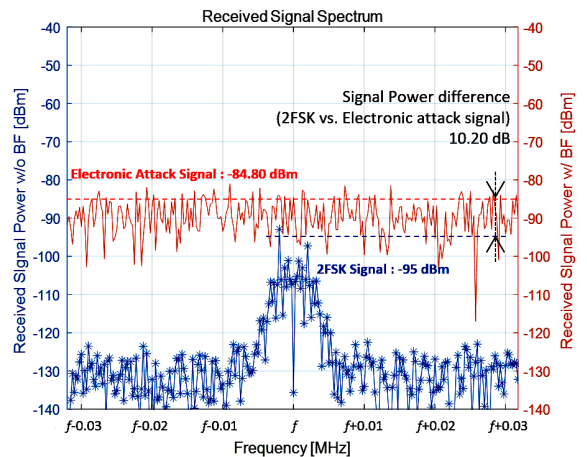


Fig. 8. Received signal spectrum when transmitting electronic attack signal(Azimuth : 20°)

자 공격 신호가 존재하지 않는 환경에서 m 번째 대상체와 m 번째 송신원 사이에 정상적으로 식 (2)의 $h_m s_m$ 신호를 수신하는 경우 약 -95 dBm의 2FSK 신호를 정상적으로 수신할 수 있으며, 잡음 재밍 신호가 적용된 전자 공격 신호가 존재할 경우 2FSK 신호보다 높은 신호 세기로 수신된 전자 공격 신호로 인하여 대상체는 정상적인 2FSK 신호를 수신할 수 없는 것을 확인할 수 있다.

방위각 10°에 위치한 대상체의 수신 신호 스펙트럼의 스냅 샷은 Fig. 7이며, 방위각 20°에 위치한 대상체

의 수신 신호 스펙트럼의 스냅 샷은 Fig. 8 이다. 방위각 10°의 전자 공격 신호에 10 dB의 요구 송신 출력 비를 적용하여 빔포밍을 수행할 경우, 정상적인 수신신호 대비 19.17 dB 높은 -75.83 dBm 신호세기의 전자 공격 신호가 수신되는 것을 Fig. 7의 결과로 확인할 수 있다. 또한 방위각 20°의 전자 공격 신호에 1 dB의 요구 송신 출력 비를 적용하여 빔포밍을 수행할 경우, 정상적인 수신 신호 대비 10.20 dB 높은 -84.80 dBm 신호 세기의 전자 공격 신호가 수신되는 것을 Fig. 8을 통하여 알 수 있다.

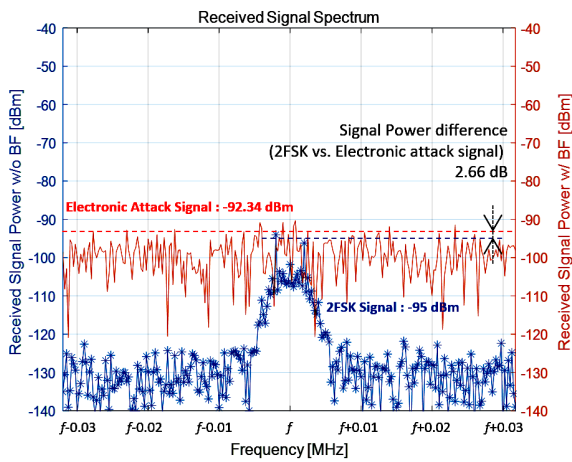


Fig. 9. Received signal spectrum when transmitting electronic attack signal(Azimuth : 50°)

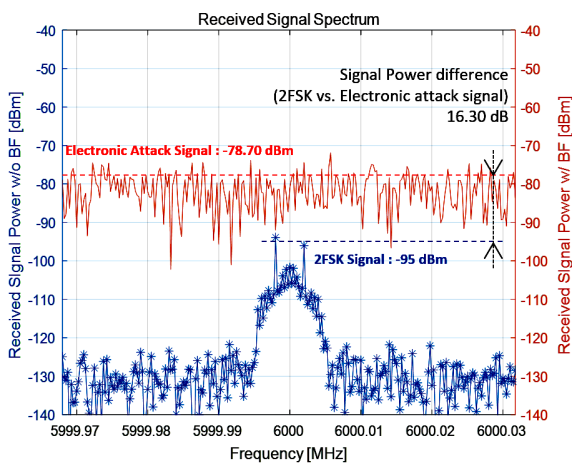


Fig. 10. Received signal spectrum when transmitting electronic attack signal(Azimuth : 80°)

방위각 50°의 전자 공격 신호에 요구 수신 출력 비 0.1 dB를 적용하여 빔포밍을 수행할 경우, 정상적인 수신 신호 대비 2.66 dB 높은 -92.34 dBm 신호 세기의 전자 공격 신호가 수신되는 것을 Fig. 9로 확인되었고, 방위각 80°의 전자 공격 신호에 요구 수신 출력 비 7 dB를 적용하여 빔포밍을 수행할 경우, Fig. 10 결과를 통하여 정상적인 수신 신호 대비 16.30 dB 높은 -78.70 dBm 신호 세기의 전자 공격 신호가 수신되는 것을 알 수 있다.

각 대상체 별 수신 신호 스펙트럼의 스냅 샷 결과를 통하여, 전자 공격 신호의 요구 송신 출력 비 10 : 1 : 0.1 : 7 대비 전력 할당 최적화에 의하여 -75.83 : -84.80 : -92.34 : -78.70 (dBm) \approx 10 : 1.39 : 0.22 : 5.16 비율의 전력 할당이 이루어짐을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 동일한 주파수 자원을 사용하는 다수개의 대상체가 존재할 경우, 대상체 사전 위치 정보(방위각)를 이용하여 획득되는 N개 송신 배열 안테나 사이의 위상 정보 기반 MMSE 빔포밍과 그에 따른 전력 할당 최적화 기법을 적용한 전자 공격 신호 전송 시스템을 제시하였다.

제안 방식 적용에 따른 성능 확인 및 대상체의 수신 결과의 비교 분석을 통하여 MMSE 빔포밍이 적용된 전자 공격 신호들의 다중 빔 패턴이 대상체가 위치한 원하는 방위각으로 형성되었고, modified multi-level water-filling algorithm을 통하여 요구되는 송신 출력 비 대비 5 % 이내 오차의 송신 출력이 적용되는 것을 확인하였다.

References

- [1] D. Adamy, "EW102: A Second Course in Electronic Warfare," Artech House, Norwood, MA, USA, 2004.
- [2] O. Shmuel, O. Gurewitz, and A. Cohen, "Multi-Antenna Jamming in Covert Communication," IEEE ISIT, Paris, France, pp. 987-991, July 2019.
- [3] G. J. Foschini and G. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When using Multiple Antennas," Wireless Pers. Commun.,

- Vol. 6, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [4] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bölcskei, "An Overview of MIMO Communications - A Key to Gigabit Wireless," in Proc. IEEE, Vol. 92, No. 2, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [5] M. Joham, K. Kusume, M. H. Gzara, W. Utschick, and J. A. Nossek, "Transmit Wiener Filter for the Downlink of TDD DS-CDMA Systems," in Proc. IEEE ISSSTA, Vol. 1, Prague, Czech Rep., pp. 9-13, Sept. 2002.
- [6] R. L.-U. Choi and R. D. Murch, "New Transmit Schemes and Simplified Receivers for MIMO Wireless Communication Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 2, No. 6, pp. 1217-1230, Nov. 2003.
- [7] S. Serbetli and A. Yener, "Transceiver Optimization for Multiuser MIMO Systems," IEEE Trans. Signal Process., Vol. 52, No. 1, pp. 214-226, Jan. 2004.
- [8] Z. Pan, K. Wong, and T. Ng, "Generalized Multiuser Orthogonal Space Division Multiplexing," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 3, No. 6, pp. 1969-1973, Nov. 2004.
- [9] J. Zhang, Y. Wu, S. Zhou, and J. Wang, "Joint Linear Transmitter and Receiver Design for the Downlink of Multiuser MIMO Systems," IEEE Commun. Lett., Vol. 9, No. 11, pp. 991-993, Nov. 2005.
- [10] M. Stojnic, H. Vikalo, and B. Hassibi, "Rate Maximizing in Multi-Antenna Broadcast Channels with Linear Preprocessing," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 5, No. 9, pp. 2338-2342, Sept. 2006.
- [11] A. D. Dabbagh and D. J. Love, "Multiple antenna MMSE based Downlink Precoding with Quantized Feedback or Channel Mismatch," IEEE Trans. Commun., Vol. 56, No. 11, pp. 1859-1868, Nov. 2008.
- [12] B. Beavis and I. Dobbs, "Optimization and Stability Theory for Economic Analysis," Cambridge University Press, New York, pp. 40-48, 1990.
- [13] A. Ruszczyński, "Nonlinear Optimization," Princeton NJ, Princeton University Press. pp. xii+454, 2006.
- [14] J. Huang, R. Cendrillon, M. Chiang, and M. Moonen, "Autonomous Spectrum Balancing(ASB) for Frequency Selective Interference Channels," in Proc. IEEE ISIT, Seattle, U.S.A., pp. 610-614, July 2006.
- [15] J. Yuan and W. Yu, "Distributed Cross-Layer Optimization of Wireless Sensor Networks: A Game Theoretic Approach," in Proc. IEEE GLOBECOM, San Francisco, U.S.A., Nov. 2006.
- [16] P. Patel, G. Kumari, and P. Saxena, "Array Pattern Correction in Presence of Antenna Failures using Metaheuristic Optimization Algorithms," in Proc. IEEE ICCSP, India, pp. 695-700, Apr. 2019.