



Received: 2026/03/02  
Revised: 2026/03/12  
Accepted: 2026/03/20  
Published: 2026/03/31

**\*Corresponding Author:**

**Myunghoon Park**  
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,  
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea  
Tel: +82-31-5179-7267  
Fax: +82-31-5179-7086  
E-mail: pmh604god@gmail.com

# 해상 레이더 운용을 위한 동적 다중경로 Null 완화 기법 비교 연구

## Comparative Study on Mitigation Strategies for Dynamic Multipath Nulls in Maritime Radar Operations

박명훈\*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG넥스원 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park\*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Jinyong Go, Jaedeok Jang

Chief research engineer, M&S Team, LIG Nex1

**Abstract**

해상 환경에서 운용되는 레이더는 해면 반사에 의한 다중경로 간섭으로 특정 거리 구간에서 수신 전력이 급격히 감소하는 널(null) 현상을 경험한다. 실제 해상에서는 해면이 시간에 따라 변동하므로 널 위치 또한 이동하며, 이는 장거리 탐지 성능의 불안정성을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 지구 곡률을 고려한 2-ray 전파 모델과 시간 가변 해면 모델을 결합하여 동적 해상 환경에서의 수신 전력 분포를 분석하고, 운용 관점의 first-null band를 정의하였다. 이를 기반으로 고정 보조 주파수 운용과 매 dwell마다 재최적화하는 반응형 이중 주파수 운용의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 반응형 운용은 널 중심 이동에 효과적으로 대응하여 보다 안정적인 전력 개선 성능을 확보하는 것으로 나타났다.

Radar systems operating in maritime environments experience multipath interference caused by sea-surface reflections, resulting in significant power attenuation at specific ranges, known as null regions. Since the sea surface varies over time, the null location migrates and may degrade long-range detection stability. In this study, a dynamic two-ray propagation model incorporating Earth curvature and time-varying sea-surface effects was developed to analyze the spatio-temporal distribution of received power, and an operational first-null band was defined. The performance of a fixed secondary frequency scheme was compared with a dwell-based reactive adaptive scheme. Simulation results show that the reactive strategy provides more stable power improvement at the null center under dynamic conditions.

**Keywords**

다중경로 전파(Multipath Propagation),  
해상 레이더(Maritime Radar),  
해면 반사(Sea-Surface Reflection),  
First-Null 대역(First-Null Band),  
주파수 다이버시티(Frequency Diversity),  
반응형 적응 운용(Reactive Adaptive Operation)

### 1. 서론

해상 환경에서 운용되는 레이더는 해면 반사에 의해 형성되는 다중경로(multipath) 간섭의 영향을 필연적으로 받는다. 특히 송신 안테나와 표적이 비교적 낮은 고도에 위치하는 경우, 직접 경로와 해면 반사 경로가 결합하면서 특정 거리 구간에서 수신 전력이 급격히 감소하는 널(null) 현상이 발생한다[1,2]. 이러한 현상은 고전적인 2-ray 전파 모델로 설명될 수 있으며, 평탄한 해면을 가정할 경우 널의 위치는 송수신 고도와 주파수에 의해 결정되는 비교적 정적인 특성을 가진다[3-5].

그러나 실제 해상 환경에서는 해면이 시간에 따라 지속적으로 변동하며, 반사 경로 길이와 위상 조건이 실시간으로 변하게 된다. 그 결과, 정적 모델에서 예측되는 고정된 널 위치와 달리, 수신 전력의 최소 지점은 시간에 따라 이동하는 동적 특성을 보이게 된다. 이러한 널 이동 현상은 탐지 성능의 공간적 불균일성을 유발할 수 있으며, 특히 가시선(LOS) 한계 근처의 장거리 구간에서는 운용상 치명적인 성능 저하로 이어질 가능성이 있다. 따라서 해상 상태가 변화하는 환경에서 널의 이동 특성을 정량적으로 분석하고, 그 운용적 영향을 평가하는 것은 해군 레이더 체계의 성능 안정성 측면에서 중요한 연구 과제라 할 수 있다. 대표적으로 이중 주파수 운용(frequency diversity)가 널 구간을 완화하기 위한 대표적인 기법으로 알려져 있다. 서로 다른 두 주파수에서 형성되는 간섭 패턴의

차이를 활용하여, 특정 주파수에서 발생하는 전력 저하를 다른 주파수로 보완하는 방식이다. 기존 연구들은 주로 정적 환경을 가정하여 보조 주파수를 사전에 선택하거나 평균 전력 개선을 중심으로 효과를 평가하였다. 그러나 해면이 시간적으로 변동하는 경우, 특정 시점에 최적화된 주파수 조합이 이후에도 동일한 보완 효과를 유지한다는 보장은 없다. 이는 동적 환경에서의 주파수 운용 전략에 대한 재검토가 필요함을 의미한다.

본 연구는 동적 해상 상태에서 발생하는 다중경로 널의 시간적 이동 특성을 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 기반으로 분석하고, 이를 바탕으로 고정 보조 주파수 운용 방식과 해상 상태에 반응하여 주파수를 재설정하는 반응형 운용 방식을 비교 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 지구 곡률을 고려한 2-ray 기하 모델과 시간 가변 해면 모델을 결합하여 수신 전력의 시공간 분포를 계산하고, 단순한 국소 최소값이 아닌 운용 관점에서 의미 있는 first-null band를 정의하여 그 중심 위치와 폭의 시간 변화를 추적한다. 또한 널 중심에서의 보완 이득과 시간-거리 전 영역에서의 적응 이득 분포를 분석함으로써, 이중 주파수 운용의 실제 적용 가능성과 한계를 체계적으로 고찰한다.

본 연구를 통한 결과는 해상 감시 레이더 운용 시 주파수 선택 전략 수립과 성능 예측의 현실성을 제고하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 모델링 및 분석 방법

본 연구는 동적 해상 환경에서 발생하는 다중경로 널의 시간적 이동 특성을 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 이중 주파수 운용 방식의 효과를 비교하기 위한 시뮬레이션 기반 모델을 구성하였다. 분석 모델은 지구 곡률을 고려한 기하학적 2-ray 전파 구조와 시간에 따라 변동하는 해면 모델을 결합하여 구성되며, 거리-시간 영역에서의 수신 전력 분포를 계산한다. 이후 운용 관점에서 first-null band를 정의하고, 고정 보조 주파수 운용과 매 dwell마다 재최적화하는 반응형 운용의 성능을 비교한다. 모든 수신 전력은 정적 평탄 해면 조건에서의 기준 최대 전력으로 정규화하여 dB 단위로 표현하였다.

### 2.1 지구 곡률을 고려한 동적 2-Ray 다중경로 전파 모델

해상 환경에서 레이더 전파는 직접 경로(direct path)와 해면 반사 경로(reflected path)의 중첩에 의해 수신점에서 간섭 패턴을 형성한다. 평탄한 해면을 가정하는 고전적 2-ray 모델에서는 두 경로의 기하학적 길이 차이에 의해 위상차가 결정되며, 이 위상차가  $\pi(\text{rad})$ 의 홀수배가 되는 거리에서 상쇄 간섭이 발생하여 수신 전력이 급격히 감소하는 널이 형성된다. 그러나 장거리 해상 감시 환경에서는 지구 곡률이 가시선 한계를 결정하므로, 단순 평면 기하 구조가 아닌 곡률 기반 거리 모델을 적용해야 한다. 송신 안테나 고도, 표적 고도, 지구 반지름을 통해 송수신 간 가시선 한계 거리는 식(1)과 같이 근사할 수 있다. 이 식은 지구 곡면 위에서 각 고도에서의 접선 길이를 합산한 형태로, 대기 굴절을 고려하지 않은 순수 기하학적 가시선 조건을 의미한다.

$$R_{LOS} \approx \sqrt{2R_e h_{tx}} + \sqrt{2R_e h_{tgt}} \quad (1)$$

여기서,  $R_e$ : 지구 반지름(m),  
 $h_{tx}$ : 송신 안테나 고도(m),  
 $h_{tgt}$ : 표적 고도(m).

수평 거리  $R[\text{m}]$ 에서의 직접 경로 길이와 반사 경로 길이를 정의하면 직접 경로는 송신기와 표적 사이의 기하학적 거리이므로 식(2)와 같이 표현된다.

$$L_d = \sqrt{R^2 + (h_{tx} - h_{tgt})^2} \quad (2)$$

반사 경로는 해면에서의 반사를 가정하여 표적을 해면에 대해 대칭 위치에 존재하는 가상 표적으로 치환하는 방법을 적용한다. 해면이 시간에 따라 높이  $\eta(t)[\text{m}]$ 만큼 변동한다고 하면, 반사 경로 길이는 식(3)과 같이 표현된다.

$$L_r = \sqrt{R^2 + (h_{tx} + h_{tgt} + 2\eta(t))^2} \quad (3)$$

여기서  $\eta(t)$ 는 시간  $t[\text{s}]$ 에서의 해면 변위이며, 해상 상태에 따라 확률적으로 변동하는 시계열이다. 해면

높이 변화는 반사 경로의 유효 고도를 변화시키고, 이는 곧 경로 길이 차이 및 위상 조건을 시간적으로 변동시키는 원인이 된다.

전파의 위상은 경로 길이에 비례하며, 주파수  $f$ [Hz]에서의 파장은  $\lambda=c/f$  [m], 파수는  $k=2\pi/\lambda$  [rad/m]로 정의된다. 여기서  $c$ 는 광속 [m/s]이다. 반사 계수를  $\Gamma$ 라 할 때, 수신점에서의 합성 전계는 식 (4)와 같이 두 경로 전계의 선형 합으로 표현된다.

$$E(R,t) = \frac{1}{L_d} e^{-jkL_d} + \Gamma \frac{1}{L_r} e^{-jkL_r} \quad (4)$$

첫 번째 항은 직접 경로 전계, 두 번째 항은 해면 반사 전계를 의미한다. 두 항의 위상차는  $k(L_r-L_d)$ 에 의해 결정되며, 이 값이  $\pi$ (rad)의 홀수배가 되는 경우 상쇄 간섭이 발생한다. 이로 인해 특정 거리에서 수신 전력이 급격히 감소하는 널이 형성된다.

수신 전력은 전계 크기의 제곱에 비례하므로 정적 평탄 해면 조건에서의 기준 최대 전력  $P_{ref}$ 로 정규화하여 dB 단위로 표현하면 식 (5)와 같다. 이 정규화는 해상 상태 변화에 따른 상대적 감쇠 및 보완 효과를 동일 기준에서 비교하기 위함이다.

$$P_{dB}(R,t) = 10 \log_{10} \left( \frac{P(R,t)}{P_{ref}} \right) \quad (5)$$

이와 같이 구성된 동적 2-ray 모델은 해면 높이 변화에 따라 반사 경로 길이가 시간적으로 변동하며, 그 결과 널 위치가 거리-시간 영역에서 이동하는 특성을 재현한다. 이러한 널 이동 현상은 정적 모델로는 설명할 수 없는 동적 해상 환경의 핵심 특징이며, 다음 절에서는 이를 운용 관점에서 정량화하기 위한 first-null band 정의 방법을 기술한다.

## 2.2 First-Null Band의 정의 및 시간 추적 방법

정적 2-ray 모델에서는 널 위치가 거리 축 상에서 일정 간격으로 반복적으로 나타나며, 이론적으로는 여러 개의 국소 최소점이 존재한다. 그러나 해상 감시 레이더 운용 관점에서는 모든 널이 동일한 의미를 갖는 것은 아니다. 특히 가시선 한계 근처의 장거리 영역에서 형성되는 가장 외곽의 깊은 널은 탐지 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는

단순한 국소 최소값이 아니라, 운용적으로 가장 영향이 큰 first-null band를 정의하고 이를 시간에 따라 추적한다.

먼저 특정 시간  $t$ 에서 거리-전력 분포  $P_{dB}(R,t)$ 를 고려하고, 이 분포에서 국소 최소점을 식 (6)과 같은 조건을 만족하는 거리  $R$ 에서 정의한다.

$$\frac{\partial P_{dB}(R,t)}{\partial R} = 0, \quad \frac{\partial^2 P_{dB}(R,t)}{\partial R^2} > 0 \quad (6)$$

그러나 단순 미분 조건만으로는 운용적으로 의미 있는 널을 구분하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기준 피크 전력 대비 일정 임계 감쇠 이하로 떨어지는 구간을 널 영역으로 정의한다. 기준 피크 전력을  $P_{peak}(t)$ 라 하면, 널 조건은 식 (7)과 같이 정의하였다. 여기서  $\Delta_{th}$ [dB]는 널로 간주하기 위한 감쇠 임계값이다. 일반적으로 3 dB 또는 6 dB와 같은 운용 기준이 적용될 수 있다.

$$P_{dB}(R,t) \leq P_{peak}(t) - \Delta_{th} \quad (7)$$

위 조건을 만족하는 거리 구간 중, 가시선 한계  $R_{LOS}$ 에 가장 인접한 구간을 first-null band로 정의한다. 해당 구간의 시작과 끝 거리를 각각  $R_{min}(t)$ ,  $R_{max}(t)$ 라 하면, 널 중심 위치와 폭은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$R_c(t) = \frac{R_{min}(t) + R_{max}(t)}{2}, \quad W(t) = R_{max}(t) - R_{min}(t) \quad (8)$$

이 정의는 단일 점이 아닌 유의미한 감쇠 구간을 하나의 운용 단위로 간주한다는 점에서 기존의 단순 최소점 기반 정의와 차별된다. 특히 해면 높이  $\eta(t)$ 가 시간적으로 변동함에 따라 반사 경로 길이  $L_r$ 가 변화하고, 그 결과  $R_c(t)$ 와  $W(t)$ 가 시간에 따라 이동한다. 이를 널 이동량이라 정의하면 식 (9)와 같으며, 여기서  $\bar{R}_c$ 는 분석 시간 구간에서의 평균 널 중심 거리이다.

$$\Delta R_c(t) = R_c(t) - \bar{R}_c \quad (9)$$

이와 같이 정의된 first-null band는 시간-거리 히

트맵에서 관찰되는 깊은 감쇠 영역의 이동을 정량적으로 추적하는 지표로 사용된다. 이후 이 구간을 기준으로 이중 주파수 보완 효과를 평가하며, 특히 널 중심  $R_c(t)$ 에서의 전력 개선량을 주요 성능 지표로 활용한다.

### 3. 이중 주파수 운용 전략 정의

동적 해상 환경에서 단일 주파수 운용은 특정 거리 구간에서 심각한 수신 전력 저하를 유발할 수 있다. 이중 주파수 운용은 서로 다른 주파수에서 형성되는 간섭 패턴의 차이를 이용하여, 한 주파수에서 발생하는 널을 다른 주파수로 보완하는 방식이다. 본 연구에서는 기준 주파수  $f_1$ 을 고정하고, 보조 주파수  $f_2$ 의 선택 방식에 따라 고정 운용과 반응형 운용을 구분한다.

두 주파수에서의 정규화 수신 전력을 각각  $P_1(R,t)$ ,  $P_2(R,t)$  [dB]라 정의하면, 동일 거리 및 시간에서의 보완 전력은 식 (10)과 같이 정의된다. 이 식을 통해 주파수 중 더 높은 전력을 선택하여 실질적으로 주파수 다이버시티를 통한 최적 수신 전력 선택을 할 수 있다.

$$P_{comp}(R,t) = \max(P_1(R,t), P_2(R,t)) \quad (10)$$

또한 보완 효과 평가는 식 (11)과 같이 first-null band 중심  $R_c(t)$ 에서의 전력 개선량으로 정의한다.

$$G(t) = P_{comp}(R_c(t), t) - P_1(R_c(t), t) \quad (11)$$

#### 3.1 Fixed Secondary Frequency 운용

고정 보조 주파수 운용은 기준 시각  $t_0$ 에서 first-null band를 관측한 후, 해당 시점에서의 보완 성능이 최대가 되도록 단일  $f_2$ 를 선택하고 이후 모든 시간에 대해 동일한 값을 유지하는 방식이다. 기준 시각에서의 목적 함수는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$f_2^{fixed} = \operatorname{argmax}_{f_2} [P_{comp}(R_c(t_0), t_0)] \quad (12)$$

이때 선택된  $f_2^{fixed}$ 는 전체 분석 시간 구간에 대해 불변으로 적용된다. 이 방식은 구현이 단순하고 주파수

전환 부담이 없다는 장점이 있으나, 해면이 시간에 따라 변동하여  $R_c(t)$ 가 이동하는 경우 초기 최적 조건이 유지되지 않을 가능성이 존재한다.

#### 3.2 Reactive Adaptive Frequency 운용

반응형 운용은 매 dwell 시점마다 현재의 first-null band를 재관측하고, 그 시점에서 널 중심 전력이 최대가 되도록 보조 주파수를 재선택하는 방식이다. dwell 시간 간격을  $\Delta t$  [s]라 할 때, 시간  $t_k = k \Delta t$ 에서의 최적 보조 주파수는 다음과 같이 정의되며, 이 경우  $f_2$ 는 시간에 따라 변하는 함수가 된다.

$$f_2^{react}(t_k) = \operatorname{argmax}_{f_2} [P_{comp}(R_c(t_k), t_k)] \quad (13)$$

반응형 운용은 널 이동을 실시간으로 추적하여 보완 성능을 유지할 수 있다는 장점이 있으나, 빈번한 주파수 재설정이 요구된다는 운용적 부담이 존재한다. 본 연구에서는 주파수 전환 비용이나 지연은 고려하지 않고, 순수 전력 보완 관점에서 두 방식의 성능을 비교한다.

### 4. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 장에서는 동적 해상 환경에서 형성되는 널 이동 특성을 분석하고, 이를 기반으로 고정 보조 주파수 운용과 반응형 운용의 성능 차이를 정량적으로 비교한다. 모든 수신 전력은 정적 평탄 해면 조건에서의 기준 최대 전력으로 정규화한 dB 값으로 표현하였다.

먼저 시간-거리 평면에서의 정규화 수신 전력 분포를 보면 Fig. 1과 같다. 색상 스케일은 전력 감쇠 수준을 의미하며, 어두운 영역은 깊은 널 구간을 나타낸다.

정적 2-ray 모델에서는 널 위치가 거리 축에서 고정된 형태로 나타나지만, 동적 해면을 적용한 결과에서는 깊은 감쇠 영역이 시간에 따라 이동하는 현상이 확인된다. 이는 해면 높이  $\eta(t)$  변화에 따라 반사 경로 길이가 변동하고, 이에 따라 경로 길이 차이가 시간적으로 변화하기 때문이다. 결과적으로 위상차 조건이 시간에 따라 변하면서 널 중심  $R_c(t)$ 가 거리 축을 따라 이동하게 된다.

특히 가시선 한계 근처에서 형성되는 최외곽 깊은

널 구간은 시간에 따라 수백 미터 이상 이동하는 특성을 보인다. 이는 장거리 탐지 구간에서 탐지 성능의 불연속적 저하를 유발할 수 있음을 의미한다. 따라서 동적 환경에서는 단일 주파수 기반 고정 운용이 시간에 따라 성능 편차를 유발할 가능성이 존재한다.

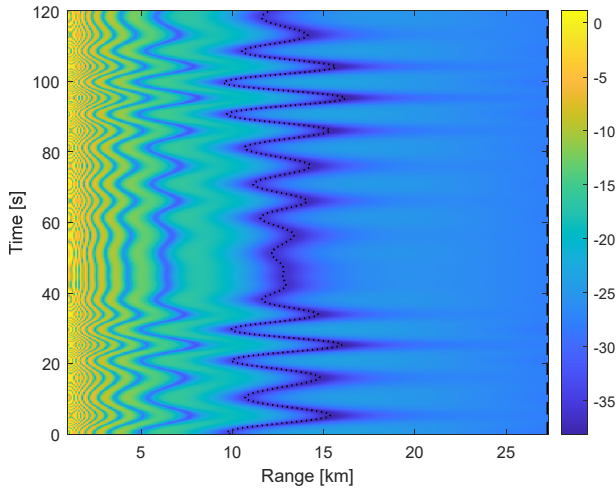


Fig. 1. Result of null migration characteristics in the time-range domain

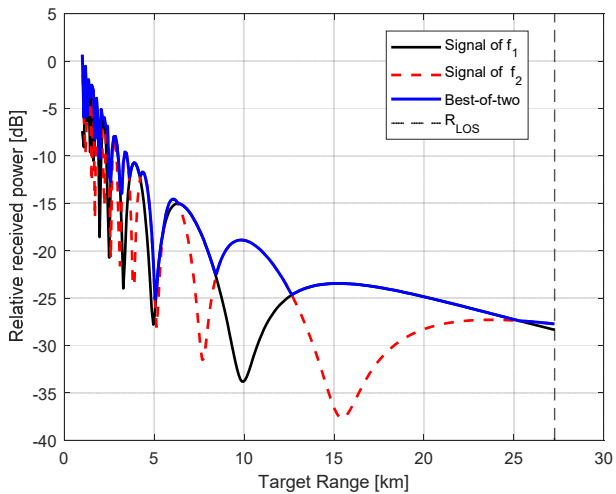


Fig. 2. Result of dual-frequency compensation effect at the reference time

Fig. 2 결과는 특정 기준 시점에서의 거리에 따른 전력 변화를 나타낸다. 기준 주파수  $f_1$ 에서 깊은 널이 형성된 거리 구간에서, 보조 주파수  $f_2$ 를 적용할 경우 전력 저하가 완화되는 양상을 확인할 수 있다. 이는 주파수가 달라질 경우 파수가 변하고, 동일한 경로 길이 차이에 대해 위상차가 달라지기 때문이다. 결과적으로 두 주파수의 간섭 패턴은 완전히 일치하지 않음

며, 한 주파수에서 상쇄 간섭이 발생하는 거리에서 다른 주파수는 상대적으로 높은 전력을 유지한다. 이는 이중 주파수 운용의 기본 물리적 타당성을 보여주는 결과로, 특정 시점에서는 적절한  $f_2$  선택을 통해 널 중심 전력을 유의미하게 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이 결과는 단일 시점 분석에 해당하며, 해면이 시간적으로 변동할 경우 이러한 보완 효과가 지속적으로 유지되는지는 별도의 분석이 필요하다.

이를 위해 해면의 시간적 변화에 따른 보조 주파수 선택 변화를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 3와 같이 나타난다. 고정 운용의 경우  $f_2^{fixed}$ 가 전 시간 구간에서 일정하게 유지되는 반면, 반응형 운용에서는 매 dwell 시점마다  $f_2^{fixed}(t_k)$ 가 재설정되는 양상이 나타난다.

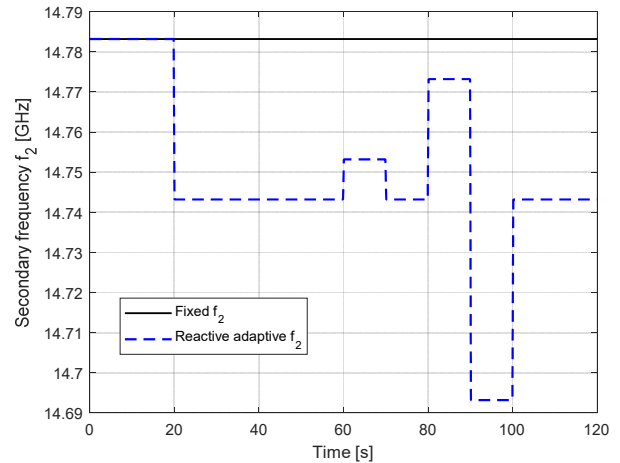


Fig. 3. Frequency selection characteristics of fixed and reactive operation schemes

해면 높이 변화에 따른 널 중심 이동이 발생할 경우, 동일한 보조 주파수로는 최적 보완 조건을 유지하기 어렵다. Fig. 3에서 확인되듯이 반응형 운용은 널 중심 이동에 따라 보조 주파수가 점진적으로 변화하며, 특정 구간에서는 급격한 전환이 발생하기도 한다. 이는 널 위치가 시간에 따라 비선형적으로 이동함을 반영한다. 이 결과는 동적 환경에서 보완 성능을 유지하기 위해서는 주파수 선택 역시 시간 의존적으로 조정되어야 함을 의미한다.

Fig. 4는 first-null 중심  $R_c(t)$ 에서의 전력 개선량  $G(t)$ 을 시간에 따라 비교한 결과이다. 고정 운용의 경우 초기 시점에서는 비교적 큰 개선 효과가 나타나지만, 시간이 경과함에 따라 개선량이 감소하거나 일부

구간에서는 보완 효과가 미미해지는 현상이 관찰된다. 이는 초기 기준 시점에서 최적화된  $f_2^{fixed}$ 가 이후 이동한 널 중심과 위상 조건이 일치하지 않기 때문이다. 반면 반응형 운용은 매 dwell마다 널 중심에 맞추어  $f_2$ 를 재설정하므로, 전 시간 구간에서 상대적으로 안정적인 개선 효과를 유지한다.

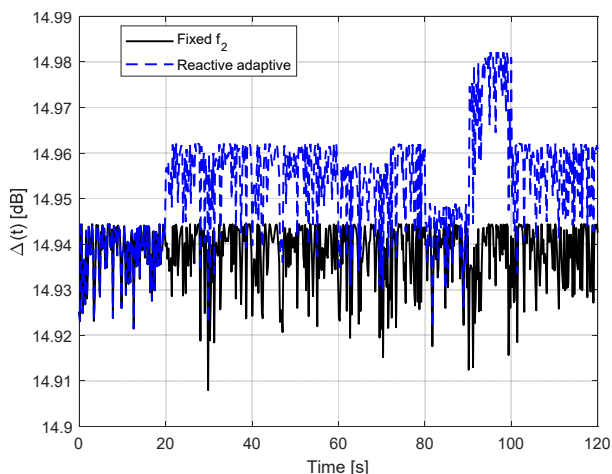


Fig. 4. Comparison of power improvement at the null center

특히 최악 조건 구간에서의 개선량  $G_{min}$ 을 비교하면, 반응형 운용이 고정 운용 대비 보다 높은 최소 개선량을 확보하는 것을 확인할 수 있다. 이는 평균 성능뿐 아니라 극한 조건에서의 안정성 측면에서도 반응형 운용이 우수함을 의미한다.

이러한 결과들을 바탕으로 시간에 따른 거리별 적응 이득 분포를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다.

고정 운용의 경우 특정 시간 구간에서는 넓은 영역에서 이득이 감소하거나 국부적으로 보완 효과가 사라지는 구간이 존재하였다. 반면 반응형 운용에서는 널 중심 인근뿐 아니라 그 주변 거리 구간에서도 보다 균일한 이득 분포가 형성된다. 이는 주파수 재설정을 통해 간섭 패턴이 지속적으로 재배치되기 때문이다. 결과적으로 반응형 운용은 시간-거리 전 영역에서 보다 안정적인 전력 분포를 형성한다. 다만, 결과에서 확인되었듯이 모든 거리와 시간에서 항상 양의 이득이 확보되는 것은 아니다. 이는 주파수 다이버시티가 간섭 패턴의 완전한 제거가 아니라 재배치를 의미하기 때문이다. 따라서 반응형 운용의 효과는 특정 널 구간 완화에 집중된다고 해석하는 것이 타당하다.

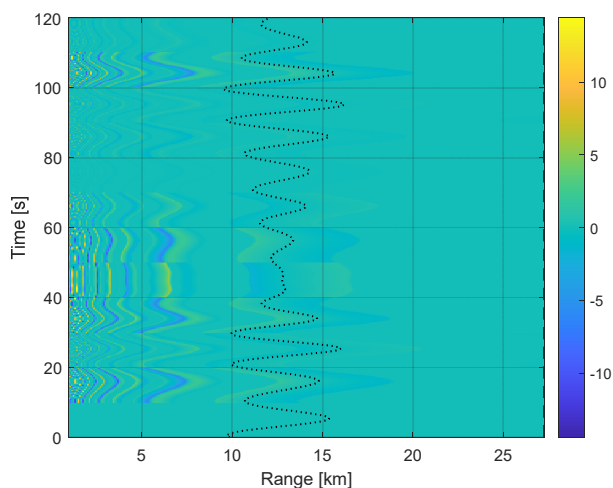


Fig. 5. Result of distribution of adaptive gain in the time-range domain

종합하면, 동적 해상 환경에서는 널 위치가 시간적으로 이동하며, 이에 따라 고정 보조 주파수 운용은 초기 최적 조건을 지속적으로 유지하지 못한다. 반면 매 dwell마다 보조 주파수를 재설정하는 반응형 운용은 널 중심 이동에 효과적으로 대응하여 평균 개선량과 최악 조건 개선량 측면에서 모두 우수한 성능을 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 동적 해상 환경에서 발생하는 다중 경로 널의 시간적 이동 특성을 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 고정 보조 주파수 운용과 매 dwell마다 재최적화하는 반응형 이중 주파수 운용 전략을 비교하였다. 이를 위해 지구 곡률을 고려한 2-ray 기하 모델과 시간 가변 해면 모델을 결합하여 거리-시간 영역에서의 수신 전력 분포를 계산하였으며, 단순한 국소 최소점이 아닌 운용 관점에서 의미 있는 first-null band를 정의하여 널 중심 이동을 추적하였다.

시뮬레이션 결과, 해면 높이의 시간적 변동에 따라 반사 경로 길이와 위상 조건이 지속적으로 변화하며, 이에 따라 널 중심 위치가 거리 축을 따라 이동하는 현상이 확인되었다. 이러한 널 이동은 장거리 구간에서 수신 전력의 불연속적 저하를 유발할 수 있으며, 정적 환경을 가정한 단일 주파수 운용이나 사전 고정된 보조 주파수 운용이 시간에 따라 성능 편차를 발생시킬 가능성을 내포한다. 고정 보조 주파수 운용은 기

준 시점에서 최적화된 주파수를 전체 시간 구간에 적용하는 방식으로, 초기에는 유의미한 전력 개선 효과를 보였으나 널 중심이 이동함에 따라 개선량이 감소하거나 일부 구간에서는 보완 효과가 제한되는 특성을 나타냈다. 반면 반응형 운용은 매 dwell 시점마다 first-null 중심을 재관측하고 보조 주파수를 재설정함으로써, 널 중심에서의 전력 개선을 전 시간 구간에 걸쳐 보다 안정적으로 유지하였다. 특히 최악 조건에서의 최소 개선량 측면에서 반응형 운용이 고정 운용 대비 우수한 성능을 보였다.

결과적으로, 동적 해상 환경에서는 널 위치가 시간적으로 이동하므로 사전 고정된 주파수 운용만으로는 안정적인 성능 확보에 한계가 있으며, 상황 반응형 주파수 운용이 보다 효과적인 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 해상 레이더 체계의 성능 안정성 확보를 위한 운용 전략 수립에 유의미한 시사점을 제공한다.

## 참고문헌

[1] Christopher D. Berube, Paul R. Felton, Ken Hsu, James H.

Lattimer, & David B. Swaney, 'Target Height Estimation Using Multipath over Land,' in proceedings of the IEEE Radar Conference, Boston, MA, April 2007, pp. 88-93.

<https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374196>

[2] Yeo-Sun Yoon, 'Elevation Angle Estimation in a Multipath Environment Using MIMO-OFDM Signals,' Remote Sensing, VOL. 16, NO. 23, 2024, Article 4490.

<https://doi.org/10.3390/rs16234490>

[3] Daihyun Kwon, Hyunwoo Ko, Sungwon Hong, Kichul Yoon, Byunglae Cho, & Kwan Sung Kim, 'Elevation Estimation Algorithm for Low-Altitude Targets in Multipath Environment,' Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 24, NO. 4, 2024, pp. 341-349.

<https://doi.org/10.26866/jees.2024.4.r.234>

[4] Myung-Hoon Park, Jeong Kim, Jae-Deok Jang, Se-Woong Kwon, & So-Yeong Lee, 'Optimal Dual-Frequency Operation of Radar for Null Avoidance in Multipath Environment,' Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, VOL. 29, NO. 10, 2025, pp. 1377-1384.

<https://doi.org/10.6109/jkiice.2025.29.10.1377>

[5] Hamza Bounaceur, Ali Khenchaf, & Jean-Marc Le Caillec, 'Analysis of Small Sea-Surface Targets Detection Performance According to Airborne Radar Parameters in Abnormal Weather Environments,' Sensors, VOL. 22, NO. 9,

2022, Article 3263. <https://doi.org/10.3390/s22093263>