

밀리미터파 배열 안테나의 최대 복사 방출 측정을 위한 베이지안 최적화 기반 포지셔너 제어 알고리즘 연구

Bayesian Optimization-Based Maximum Radiation Point Measurement System for Millimeter-Wave Array Antennas

권 명 준*** · 박 용 배***

Myeong-Jun Kwon*** · Yong-Bae Park***

요 약

UMFUS 디바이스의 최대 방사지점 측정을 위한 변수 중요도 기반 베이지안 최적화 시스템을 개발하였다. 기존 전방 위 스캔 방식의 비효율성을 해결하기 위해 실측 데이터 기반 다중 방법론을 통한 변수 중요도 분석과 적응적 획득 함수 변환을 적용하였다. 4축 포지셔너에서 8,043개 측정점의 ground truth 데이터셋으로 검증한 결과, 변수 중요도 기반 베이지안 최적화는 순수 베이지안 대비 0.28 dB 성능 향상과 52 % 안정성 개선을 달성하였다. 150회 측정으로 99.3 % 달성률을 기록하여 전수 탐색 대비 약 30배의 효율성을 보였으며, 조기 종료 수렴 감지 시스템 사용 시 평균 99회 수렴으로 50.5 %의 시간절약을 달성하였다. 개발된 시스템은 RF 인증 시험에서 국제 규제 기준을 만족하면서도 측정 시간과 비용을 대폭 절감하는 실용적 해결책을 제시한다.

Abstract

In this study, a data-driven variable importance-based Bayesian optimization system was developed for the maximum radiation point measurement of UMFUS devices. To address the inefficiencies of conventional omnidirectional scanning, variable importance analysis through multiple methodologies based on empirical data and adaptive acquisition function transitions was applied. Performance verification using a ground truth dataset of 8,043 measurement points from a 4-axis positioner demonstrated that variable importance-based Bayesian optimization achieved 0.28 dB performance improvement and 52 % stability enhancement over pure Bayesian optimization. With 150 measurements achieving a target performance of 99.3 %, the system showed an efficiency improvement of approximately 30× over an exhaustive search. When combined with the early termination convergence detection system, the average convergence at 99 iterations achieved a 50.5 % time saving. The developed system provides a practical solution that significantly reduces measurement time and cost while satisfying international regulatory standards in RF certification environments.

Key words: Bayesian Optimization, UMFUS, Millimeter-Wave Antenna, EIRP Measurement

「이 연구는 (주)유엘솔루션즈(UL Solutions) 코리아 수원 무선시험소에서 수행되었음.」

*(주)유엘 솔루션즈(UL Solutions)

**아주대학교 IT융합대학원(Graduate School of IT Convergence, Ajou University)

***아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received November 20, 2025 ; Revised December, 9, 2025 ; Accepted January 7, 2026. (ID No. 20251120-146)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

I. 서론

5세대 이동통신의 도입과 함께 3.4~3.7 GHz(Sub-6) 및 28 GHz (mmWave) 대역을 활용한 초고속 데이터 전송이 현실화되었다^[1]. 특히 24 GHz 이상의 밀리미터파 대역을 활용하는 UMFUS(upper microwave flexible use service)는 기존 4G LTE 대비 훨씬 높은 데이터 전송 속도를 제공하며, 빔포밍과 Massive MIMO 기술을 통해 고주파 대역의 큰 경로 손실을 극복한다^{[2],[3]}.

그러나 밀리미터파 통신 시스템은 짧은 파장으로 인한 심각한 경로 손실, 좁은 빔폭 및 강한 지향성 등의 특성으로 인해 복잡하고 동적인 빔포밍 패턴을 형성한다^{[4],[5]}. 이로 인해 UMFUS 디바이스의 방사 패턴 측정 시 기존 전방위 스캔 방식으로는 최대 방사지점을 정확하게 찾기 위해 4축(턴테이블, 롤 축, 안테나 높이, 편파)을 수십만~수백만 회에 걸쳐 측정해야 하는 비효율성이 발생한다^[6]. 실제 무반사실 환경에서 이를 수행하려면 장시간의 시설 운영과 막대한 비용이 필요하며, 노이즈나 환경 변화로 인해 최대 방사 지점을 놓칠 가능성도 적지 않다.

최근 밀리미터파 통신 분야에서는 빔 정렬이나 초기 접속 절차에서 전수 스캔 대신 부분 탐색 기법을 도입하여 빔 스위핑 시간을 최대 90% 이상 단축하는 연구들이 보고되고 있다^[7]. 그러나 대부분의 연구가 통신 관점에서의 빔포밍 최적화를 다루고 있어, 규제 시험 및 최대 방사전력 측정을 위한 무반사실 측정 환경과는 적용 맥락이 상이하다.

UMFUS 디바이스의 측정 효율성 향상을 위해 다양한 샘플링 기법들이 연구되어 왔다. 전통적인 전방위 격자 스캔 방식은 모든 방향을 체계적으로 조사하여 높은 신뢰성을 제공하지만, 차원 증가에 따른 기하급수적 측정 횟수 증가로 인해 4축 제어 환경에서 수개월의 측정 시간이 소요되는 비효율성을 갖는다^[8].

진화 알고리즘 기반 최적화 기법들은 유전 알고리즘(GA), 입자 떼 최적화(PSO), 차등 진화(DE) 등을 통해 다차원 탐색에서 우수한 성능을 보이지만, 측정 잡음을 세밀하게 모델링하기 어렵고 하이퍼파라미터 의존적인 불안정한 수렴 특성을 보인다^[9]. 참고문헌 [10]은 유전 알고리즘을 통해 빔포밍 행렬 선정 과정에서 탐색 영역을 효과적으로 축소하는 방안을 제시하였으나, 실제 적용 시 다수의

함수 호출로 인한 연산 부담 증가라는 제약이 있다.

심층학습 기반 빔 제어 기법은 합성곱 신경망(CNN)을 활용하여 뛰어난 패턴 인식 능력을 보이며, 참고문헌 [11]은 Sub-6 GHz 채널 정보를 기반으로 밀리미터파 영역의 최적 빔을 예측하여 초기 빔 탐색 오버헤드를 79.3% 단축하는 성과를 달성하였다. 그러나 대량의 학습 데이터 요구, 블랙박스로 인한 해석성 부족, 새로운 환경에 대한 제한적 일반화 성능 등의 한계를 갖는다.

베이지안 최적화는 계산 비용이 높은 복잡한 목적 함수의 최적점을 효율적으로 탐색하는 기법으로, 최소한의 함수 평가를 통해 최적해를 찾는 데 특히 유용하다^[12]. 최근 RF 분야에서도 베이지안 최적화 적용 연구가 활발하다. 참고문헌 [13]은 빔 정렬 문제에서 스펙트럼 효율 최적화, 참고문헌 [14]는 채널 추정을 위한 희소 베이지안 학습, 참고문헌 [15]는 MIMO 시스템의 채널 추정에 베이지안 최적화를 적용하였다.

그러나 기존 연구들은 주로 통신 성능 지표(SINR, 스펙트럼 효율) 최적화를 목표로 하는 반면, RF OTA 측정은 규제 기준 준수를 위한 최대 방사전력(EIRP) 탐지를 목표로 한다. 또한 동적 무선 채널 환경과 달리 정적 무반사실 환경에서 측정 정확도와 재현성이 핵심 제약조건이 된다. 특히 RF OTA 측정에 베이지안 최적화를 직접 적용한 연구는 거의 수행되지 않았으며, 기존 통신 시스템 적용 사례 대비 측정 정확도 및 효율성 측면에서 새로운 가능성을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 UMFUS 디바이스의 최대 방사지점 측정을 위한 베이지안 최적화 기반 측정 시스템을 제안한다. 가우시안 프로세스를 통해 장비의 방사 특성을 모델링하고, 다양한 획득 함수(EI, UCB 등)를 적용하여 최적의 측정 지점을 순차 선정함으로써 측정 효율성을 극대화한다. 4축 제어 시스템에서 최소 시행 횟수로 최대 방사 영역을 신속하게 탐지하여 기존 전방위 스캔 대비 대폭 단축된 측정 시간과 비용으로 규제 기준에 부합하는 정확도를 확보하는 것이 본 연구의 목표이다.

II. 시스템 구성 및 이론

2-1 UMFUS 기술 특성

UMFUS는 24 GHz 이상의 고주파 영역에서 작동하는

차세대 무선통신 기술로, 광대역 특성을 통해 수 기가비트 단위의 전송속도를 제공한다. 짧은 파장 특성으로 인해 안테나 소자들을 조밀하게 배치할 수 있어 massive MIMO와 빔포밍 기술을 효과적으로 적용할 수 있다^[6].

UMFUS 디바이스는 고밀도 안테나 배열부, 정밀 빔포밍 제어부, RF 송수신 회로부, 실시간 디지털 처리부로 구성된다. 안테나 배열은 일반적으로 8×8에서 16×16 격자 형태의 massive MIMO 배치를 채택하며, 개별 안테나 소자마다 독립적인 전력 조절과 위상 제어가 가능하다^[7]. 이러한 구조는 높은 방향성과 빔 이득을 제공하지만, 동적인 빔포밍 패턴으로 인해 방사 특성 측정의 복잡도가 크게 증가한다.

2-2 베이지안 최적화 알고리즘

베이지안 최적화는 평가 비용이 높은 블랙박스 함수에서 전역 최적해를 효율적으로 탐색하는 기법으로, 가우시안 프로세스를 통해 미지의 함수를 확률적으로 모델링한다. 이 방법은 각 점에서 함수값이 정규분포 $N(\mu(x), \sigma^2(x))$ 를 따른다고 가정하며, 제한된 측정 횟수로도 최적해에 수렴할 수 있다는 장점을 갖는다^[8].

가우시안 프로세스의 예측 분포는 $f(x^*)|D \sim N(\mu(x^*), \sigma^2(x^*))$ 로 표현되며, 여기서 $\mu(x^*)$ 는 예측 평균을, $\sigma^2(x^*)$ 는 예측 분산을 나타낸다. $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ 는 관측 데이터를 의미하며, 이를 통해 미지의 영역에서도 함수값을 확률적으로 추정할 수 있다. 획득 함수는 다음 측정 위치를 결정하는 핵심 기준으로 작용하며, 본 연구에서는 EI(expected improvement)를 주요 획득 함수로 채택하였다. EI는 $EI(x) = (\mu(x) - f_{max})\Phi(Z) + \sigma(x)\phi(Z)$ 로 정의되며, 여기서 $Z = (\mu(x) - f_{max})/\sigma(x)$ 이고, Φ 와 ϕ 는 각각 표준정규분포의 누적분포함수와 확률밀도함수를 나타낸다.

2-3 4축 포지셔너 측정 시스템

제안하는 측정 시스템은 전자파 무반사실 내에 구축된 4축 포지셔너를 기반으로 구성되었다. θ 축은 EUT 회전각을 담당하며 0°에서 180°까지 0.5° 해상도로 5.56°/초의 속도로 구동되고, ϕ 축은 턴테이블 회전각으로 0°에서

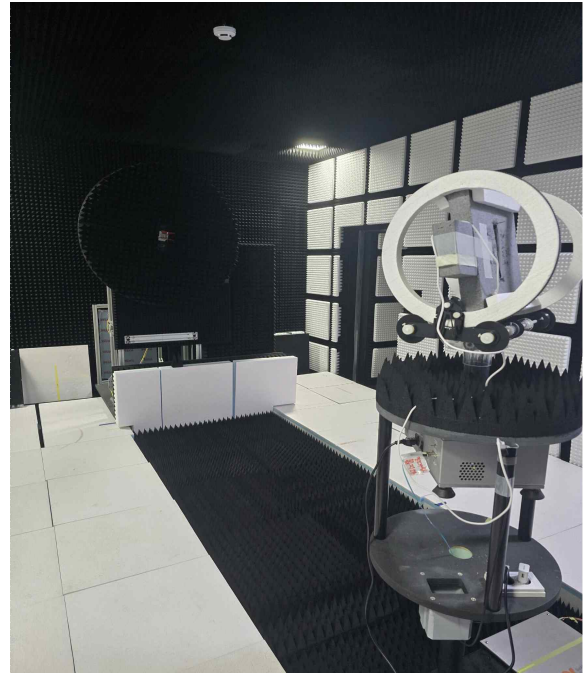


그림 1. 무반사실 내 측정 시스템 배치도
Fig. 1. System layout of the measurement setup in the anechoic chamber.

360°까지 0.5° 해상도로 11.72°/초의 속도를 갖는다. h축은 안테나 높이를 160 cm에서 180 cm 범위에서 0.5 cm 해상도로 0.42 cm/초의 속도로 조절하며, p축은 편파각을 0°에서 180°까지 0.5° 해상도로 4.64°/초의 속도로 제어한다.

RF 측정을 위해서는 Keysight PXA N9030B 스펙트럼 분석기를 사용하여 27.525 GHz의 5G FR2 n261 대역에서 측정을 수행한다. 측정 시스템은 50 MHz의 측정 대역폭과 1 MHz의 분해능 대역폭으로 설정되어 고정밀 신호 측정이 가능하도록 구성되었다(그림 1).

2-4 실측 데이터 기반 변수 중요도 설정

UMFUS 디바이스의 최대 방사지점 측정 효율성을 향상시키기 위해, 광역 측정을 통해 수집된 실측 데이터를 활용하여 각 제어 변수의 EIRP 성능에 대한 상대적 영향력을 정량적으로 분석하는 체계적 접근법을 설계하였다.

단일 분석 방법의 편향을 방지하기 위해 네 가지 상호보완적인 통계 분석 방법론을 통합 적용하여 신뢰성 있

는 변수 중요도 추정 체계를 구축하였다. 순열중요도 분석은 각 변수의 전역적 기여도를 측정하며, 랜덤포레스트 특성중요도는 비선형 관계와 상호작용 효과를 포착한다. 효과기반분석은 변수별 실제 성능 변화 범위를 직접 측정하고, 분산분해분석은 ANOVA를 통한 통계적 유의성을 검증한다.

연속 변수(θ, ϕ, h)는 5분위 구간 분할을 통한 효과 분석을, 편파 변수(p)는 주요 각도($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) 기준 그룹 분석을 수행하여 교차편파 손실을 정량화하였다. 이러한 다중 방법론 기반 변수 중요도 분석을 통해 베이지안 최적화의 초기 탐색 효율성을 향상시키면서도 실제 성능에 중요한 영향을 미치는 변수에 우선순위를 부여할 수 있다.

본 연구에서 제안한 다중 방법론 기반 변수 중요도 분석은 특정 디바이스 구조에 의존하지 않고 실측 데이터를 기반으로 각 변수의 상대적 영향력을 객관적으로 산출하므로, 다양한 안테나 구조(패치 어레이, 혼 안테나, 슬롯 안테나)와 빔포밍 방식(아날로그, 디지털, 하이브리드)에 적용 가능할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 다중 디바이스를 대상으로 한 변수 중요도 패턴 비교 분석과 주파수 대역별 적용성 검증을 통해 제안된 방법론의 일반화 성능을 입증할 예정이다.

2.5 수렴 감지 시스템 설계

단일 기준의 한계를 극복하기 위하여 다중 기준 수렴 감지 시스템이 설계하였다. 성능 정체 감지는 12회 윈도우 크기에서 0.2 % 임계값으로 측정 노이즈를 고려한 현실적 기준을 적용하고, 예측 기반 수렴은 0.5 % 임계값으로 GP 모델의 UCB 예측을 기반으로 하며, 통계적 수렴은 20회 윈도우 크기에서 분산 0.001 기준으로 안정성을 확인하도록 구현되었다(표 1).

전역해 보호 메커니즘을 통해 초기 수렴으로 인한 전역해 손실을 방지한다. 최소 반복 보호는 60회 미만에서 수렴 감지를 비활성화하여 전역해 탐색을 위한 강제 탐색 기간을 확보하고, 성능 증가율 보호는 초기 대비 10 % 미만 개선시 탐색을 지속하며, 탐색 다양성 보호는 변동 계수 5% 미만 시 다양성 탐색을 유지하도록 구성하였다.

표 1. 수렴 감지 기준 및 임계값

Table 1. Convergence detection criteria and threshold.

Criterion	Window	Threshold	Additional conditions/description
Stagnation detection	12	0.2 %	Convergence declared when stagnation rate ≥ 90 %
Prediction-based convergence	N/A	0.5 %	Confidence ≥ 95 % (expected improvement based on GP-UCB)
Statistical convergence	20	Variance 0.001	Confidence ≥ 95 % (expected improvement based on GP-UCB)

2.6 적응적 획득 함수 전환

측정 진행도에 따라 획득 함수를 적응적으로 전환하는 전략을 도입하여 최적화 효율성을 극대화하였다. 초기 단계인 0 %에서 30 % 구간에서는 importance-weighted EI를 적용하여 변수 중요도 기반 편향 탐색을 수행함으로써 전체 탐색 공간에서 유망한 영역을 조기에 발견할 수 있도록 하였다. 중간 단계인 30 %에서 70 % 구간에서는 UCB(upper confidence bound)를 사용하여 불확실성 기반 탐색을 진행함으로써 아직 충분히 조사되지 않은 미지 영역을 체계적으로 탐색한다. 후반 단계인 70 %에서 100 % 구간에서는 순수한 EI(expected improvement)를 적용하여 기대 개선량을 최대화하는 정밀 최적화를 수행한다. 이러한 단계별 획득 함수 전환을 통해 초기에는 광역 탐색을 통한 전역해 후보 발견에 집중하고, 후반에는 발견된 후보 지역에서의 정밀 최적화를 통해 전역 최적해 발견 확률을 높일 수 있다(그림 2).

구체적으로 importance-weighted EI는 식 (1)로 계산된다.

$$IW-EI(x) = w(x) \times EI(x) \tag{1}$$

여기서 기본 expected improvement는

$$EI(x) = (\mu(x) - f^*)\Phi(Z) + \sigma(x)\phi(Z) \tag{2}$$

$$Z = \frac{\mu(x) - f^*}{\sigma(x)} \tag{3}$$

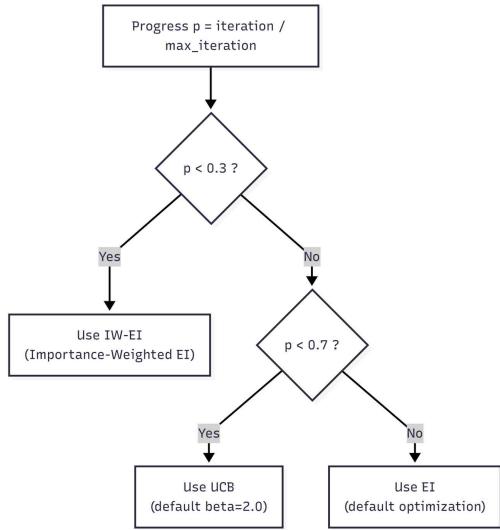


그림 2. 진행도별 획득 함수 전환 전략
Fig 2. Progress-based acquisition function transition strategy.

변수 중요도 가중치는 4개 변수 모두에 실측 중요도를 비례적으로 적용한다.

$$w(x) = w_{\theta}(x_{\theta}) \times w_{\phi}(x_{\phi}) \times w_h(x_h) \times w_p(x_p) \quad (4)$$

$$w_{\theta}(x_{\theta}) = 1 + 0.24 \times \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^5 \exp\left(-\frac{(x_{\theta} - \theta_i)^2}{400}\right) \quad (5)$$

$$w_{\phi}(x_{\phi}) = 1 + 0.531 \times \sin\left(x_{\phi} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (6)$$

$$w_h(x_h) = 1 + 0.065 \times \max\left(\frac{x_h - 150}{50}, 0\right) \quad (7)$$

$$w_p(x_p) = 1 + 0.164 \times \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^5 \exp\left(-\frac{(x_p - p_i)^2}{900}\right) \quad (8)$$

또한 변수 중요도 가중치는 위의 식으로 정의되며, 여기서 $\mu(x)$, $\sigma(x)$ 는 GP 모델의 예측 평균 및 표준편차, f^* 는 현재 최고값, $\Phi(Z)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수, $\phi(Z)$ 는 표준정규분포의 확률밀도함수, θ_i 와 p_i 는 최근 측정된 상위 5개 고성능 측정점의 고도각 및 편파각 값, x_{θ} 는 고도각, x_{ϕ} 는 방위각, x_h 는 안테나 높이, x_p 는 편파각을 의

미한다.

진행도 p 에 따른 획득 함수 선택 절차는 다음과 같다. 초기 탐색 단계($p < 0.3$)에서는 변수 중요도 기반 탐색을 위해 $A(x) = IW - EI(x)$ 를 적용하여 실측 데이터에서 도출된 변수 중요도를 반영한 효율적 초기 탐색을 수행한다. 중간 균형 단계($0.3 \leq p < 0.7$)에서는 $A(x) = \mu(x) + 2.0 \times \sigma(x)$ 의 UCB(upper confidence bound) 획득 함수를 사용하여 탐색과 활용의 균형을 유지하면서 미탐색 영역을 발견한다. 후반 정밀 단계($p \geq 0.7$)에서는 순수 expected improvement $A(x) = EI(x)$ 를 적용하여 이미 발견된 최적해 후보 주변에서의 정밀한 탐색을 통해 전역 최적해를 탐지한다. 이러한 단계적 전환을 통해 측정 진행도에 따라 탐색 전략을 체계적으로 최적화한다.

2-7 병렬 이동 최적화 시스템

베이지안 최적화의 효율성을 극대화하기 위해 4축 포지셔너의 하드웨어 특성을 활용한 병렬 이동 최적화 시스템을 설계하였다. θ 축(COM11)과 ϕ 축(COM12)은 독립 포트를 통해 병렬 구동이 가능하며, h 축과 p 축은 COM13 포트를 공유하여 순차 구동된다.

실제 하드웨어 성능 측정 결과, ϕ 축이 11.72°/초로 가장 빠른 속도를 보였으며, θ 축 5.56°/초, p 축 4.64°/초, h 축 0.42 cm/초 순으로 나타났다. 베이지안 최적화의 초기 30회 샘플링에서 simple greedy 경로 최적화를 적용한 결과, 순차 이동 614.41초에서 322.53초로 47.5%의 이동 시간 단축을 달성하였다.

III. 실험 및 측정

3-1 실험 설정

성능 평가를 위해 두 단계 실험을 설계하였다. 첫째, ground truth 데이터셋 구축을 위해 광역 탐색 ($13 \times 19 \times 3 \times 7 = 5,187$ 개 점)과 정밀 탐색(2,856개 점)을 수행하여 총 8,043개 측정점의 완전한 EIRP 분포를 확보하였다. 둘째, 동일한 150회 측정 예산하에서 순수 베이지안 최적화와 변수 중요도 기반 베이지안 최적화의 성능을 10회 반복 실험으로 비교 검증하였다(표 2).

표 2. 측정 파라미터 설정 및 해상도

Table 2. Measurement parameter settings and resolution.

Parameter	Range	Coarse search interval	Fine search interval	Hardware resolution
Θ (EUT roll) (°)	0~180	15	5	0.5
ϕ (turntable) (°)	0~360	20	7	0.5
ρ (antenna polarization) (°)	0~180	30	10	0.5
h (antenna height) (cm)	165~180	10	3	0.5

3-2 변수 중요도 분석

Ground truth 데이터를 활용하여 각 변수가 EIRP에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 순열중요도, 랜덤포레스트, 효과기반분석, 분산분해분석의 4가지 방법론을 통합 적용하여 객관적인 변수 중요도를 도출하였다(그림 3).

분석 결과, 방위각(ϕ)이 53.1 %로 가장 높은 중요도를 보였으며, 고도각(Θ) 24.0 %, 편파각(p) 16.4 %, 높이(h) 6.5 % 순으로 나타났다. 이는 mmWave 대역에서 안테나의 강한 방향성 특성을 반영한 결과이다.

네 가지 분석 방법론을 통해 도출된 결과가 일관된 변수 순위($\phi > \Theta > p > h$)를 보여, 다중 방법론 접근법의 신뢰성을 입증하였다(표 3).

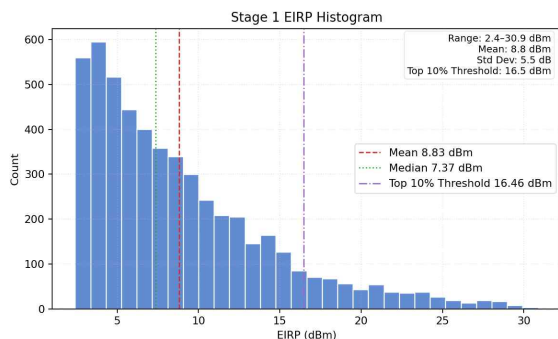


그림 3. 광역 탐색 EIRP 분포 특성

Fig 3. Characteristics of EIRP distribution in wide-area exploration.

표 3. 변수 중요도 분석 결과

Table 3. Results of variable importance analysis.

Parameter	Measured contribution (%)	Effect range (dB)	Coefficient of variation (%)	Remarks
ϕ	53.1	14.5	33.2	Directional characteristic
Θ	24.0	9.8	33.4	Elevation angle control
p	16.4	10.1	54.8	Polarization dependency
h	6.5	1.6	76.9	Limited influence

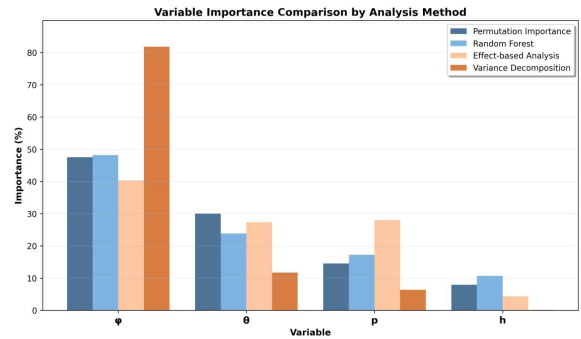


그림 4. 분석 방법론별 변수 중요도 비교

Fig 4. Comparison of variable importance by analysis method.

편파 특성 분석에서는 수직편파($67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)에서 30.89 dBm의 최고 성능을 달성하였으며, 수평편파 대비 10.06 dB의 교차편파 손실이 발생하여 편파 매칭의 중요성을 확인하였다(그림 4).

3-3 베이지안 최적화 성능 검증

150회 측정 완료 후 10회 반복 실험 결과를 종합한 성능 비교는 다음과 같다. 변수 중요도 기반 베이지안 최적화는 평균 30.93 dBm의 EIRP를 달성하여 순수 베이지안의 30.65 dBm 대비 0.28 dB 향상된 성능을 보였다 ($p=0.004$, 통계적 유의)(표 4).

본 연구 결과를 3GPP RAN5에서 정의한 5G FR2 OTA

표 4. 전체 성능 비교

Table 4. Overall performance comparison.

Performance metric	Pure Bayesian	Importance-weighted	Improvement
Mean EIRP	30.65±0.27 dBm	30.93±0.13 dBm	+0.28 dB
True value achievement rate	98.5 %	99.3 %	+0.9 %p
Win rate (10 trials)	20 % (2/10)	80 % (8/10)	+60 %p
Iterations to 95 %	69.3±32.5	53.8±17.5	-22.4 %
Iterations to 98 %	117.2±25.8	93.2±19.4	-20.5 %
Performance Std. Dev.	0.27 dB	0.13 dB	-52 %
Convergence Std. Dev.	25.8	19.4	-25 %

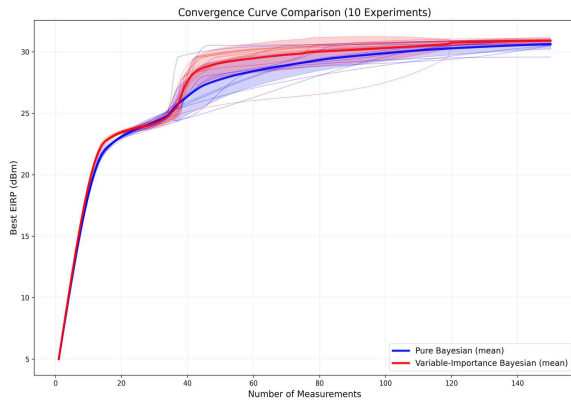


그림 5. 수렴 곡선 비교

Fig. 5. Comparison of convergence curves.

적합성 시험 기준과 비교하면, 제안된 시스템의 실용성을 명확히 확인할 수 있다. 5G FR2 대역은 24 GHz 이상의 밀리미터파 특성으로 인해 FR1 대역 대비 현저히 높은 측정불확도를 갖는다. CATR(IFF) 환경에서 FR2 EIRP 측정불확도는 신뢰구간 95 %에서 5.99 dB에 달하며, 최종 허용오차는 2.65~3.89 dB로 설정된다^[9](그림 5).

본 연구에서 달성한 측정 정확도 0.20 dB는 FR2 측정 불확도 5.99 dB의 3.3 % 수준으로, PC3 단말 최대출력전

력 시험의 허용오차 2.65 dB 대비 약 1/13에 해당하는 우수한 정밀도를 보인다. 특히 99.3 %의 참값 달성률은 적합성 시험에서 요구하는 95 % 신뢰구간을 충분히 만족하며, 0.13 dB의 낮은 표준편차는 FR2 대역의 높은 불확도 환경에서도 뛰어난 측정 재현성을 입증한다.

베이지안 최적화 과정에서 초기 30회 라틴 하이퍼큐브 샘플링 시 실측 변수 중요도 분석 결과에 따라 방위각에 40 %의 샘플을 집중 할당하고, 고도각에 25 %, 편파각에 20 %, 안테나 높이에 15 %의 샘플을 각각 할당함으로써 중요 변수 공간의 조밀한 탐색을 구현하였다. 동시에 4축 포지셔너의 병렬 이동 최적화를 통해 초기 샘플링 단계에서 47.5 %의 이동 시간 단축을 달성하였으며, 이후 베이지안 최적화 알고리즘이 학습된 가우시안 프로세스 모델을 기반으로 최적 측정점을 순차 선정하는 방식으로 전환하였다.

측정 횟수에 따른 성능 변화를 분석한 결과, 흥미로운 phase transition 현상이 관찰되었다. 초기 30회에서 변수 중요도 기반 방법이 22.59 dBm으로 순수 방법의 22.02 dBm보다 0.57 dB 우위를 보였으며, 60회 시점에서는 1.7 dB의 최대 차이를 기록하였다. 70회 시점에서 일시적으로 순수 방법이 역전하였으나, 최종적으로는 변수 중요도 기반 방법이 우위를 회복하였다.

이러한 현상은 초기에는 변수 중요도 기반 편향이 효율적인 탐색을 유도하지만, 충분한 데이터 축적 후에는 가우시안 프로세스 모델 자체의 예측 정확도 향상으로 편향의 영향이 상대적으로 감소하는 베이지안 최적화의 본질적 특성을 반영한다.

Enhanced balance 방식의 수렴 감지 시스템을 평가한 결과, min_iter를 90회로 설정했을 때 평균 99.0회에서 수렴하여 50.5 %의 시간 절약을 보이면서도 31.13 dBm의 최고 성능을 달성하였다. 이는 참값을 100 % 달성한 것으로, 가우시안 프로세스의 보간 능력이 실제 측정점 사이의 최적점을 효과적으로 예측할 수 있음을 보여준다(표 5).

개발된 시스템의 측정 시간 단축은 두 단계 최적화를 통해 달성되었다. 1단계에서 변수 중요도 기반 베이지안 최적화와 병렬 이동 최적화의 통합 적용을 통해 측정 횟수를 5,187회에서 150회로 단축하는 동시에, 4축 포지셔너의 병렬 구동으로 초기 샘플링 단계에서 47.5 %의 이동 시간 단축을 달성하여 소요 시간을 27.5시간에서 55분으

표 5. 측정 방법별 효율성 비교

Table 5. Comparison of efficiency by measurement method.

Measurement method	No. of measurements	Time required	Achievement rate (%)	Efficiency index
Full grid scan	5,187	27.5 hrs	100	1.0
Pure Bayesian	150	55 min	98.7	29.6
Importance-weighted	150	55 min	99.5	29.8
Enhanced balance	71	26 min	95.0	60.2

로 96.7 % 단축하였다. 2단계에서 enhanced balance 수렴 감지 시스템을 통한 조기 종료로 71회 수렴을 달성하여 최종 26분으로 추가 단축하였다.

이러한 베이지안 탐색 알고리즘과 하드웨어 최적화의 결합된 접근을 통해 전수 탐색 대비 최대 60.2배의 효율성과 98.4 %의 시간 단축을 실현하였으며, 이는 RF 인증 시험의 실용적 적용 가능성을 명확히 보여주는 결과이다.

IV. 결 론

본 연구는 5G FR2 대역 UMFUS 디바이스의 최대 방사 전력 측정 효율성을 혁신적으로 개선하기 위해 변수 중요도 기반 베이지안 최적화 방법론을 개발하고 검증하였다. mmWave 대역의 강한 방향성으로 인한 측정 복잡도 증가 문제를 해결하기 위해, 실측 데이터 기반 다중 방법론을 통한 변수 중요도 분석을 베이지안 최적화에 통합하는 새로운 접근법을 제시하였다.

27.525 GHz에서 동작하는 EUT를 대상으로 4축 포지셔너 환경에서 수행한 체계적인 실험을 통해 다음과 같은 주요 성과를 달성하였다.

첫째, 8,043개의 실측 데이터로 구축한 ground truth를 통해 방위각 53.1 %, 고도각 24.0 %, 편파각 16.4 %, 높이 6.5 %의 변수 중요도를 도출하였으며, 네 가지 분석 방법론 간 일관된 결과로 접근법의 신뢰성을 확인하였다.

둘째, 변수 중요도 기반 베이지안 최적화는 평균 30.93±0.13 dBm을 달성하여 순수 베이지안의 30.65±0.27 dBm 대비 0.28 dB 향상과 52%의 표준편차 감소를 보였다

(p=0.004, 통계적 유의). 특히 95 % 성능 도달까지 22.4 %, 98 % 도달까지 20.5 %의 수렴 속도 단축을 달성하였다.

셋째, 실용성 측면에서 전수 탐색 대비 약 30배의 기본 효율성을 달성하여 측정 시간을 27.5시간에서 55분으로 단축하였다. Enhanced balance 수렴 감지와 병렬 이동 최적화를 통해 최대 60.2배의 효율성과 98.4 %의 시간 절약을 실현하였다.

본 연구의 핵심 기여는 mmWave 안테나 측정에서 변수 중요도 분석과 데이터 기반 최적화의 효과적 융합을 실증한 것이다. 기존 순수 데이터 기반 접근법의 초기 탐색 비효율성을 변수 중요도 정보로 보완함으로써, 탐색 효율성, 수렴 안정성, 실시간 적용성을 모두 개선하였다. 이는 5G/6G 통신 시스템의 인증 과정을 획기적으로 단축시킬 수 있는 실용적 솔루션을 제공한다.

실제 인증 환경에서의 적용성을 높이기 위해, ground truth 데이터 없이도 효과적으로 작동할 수 있는 확장 방안을 고려할 수 있다. 메타학습 기반 접근법을 통해 다양한 UMFUS 디바이스로부터 수집된 변수 중요도 패턴을 활용하여 새로운 디바이스의 중요도를 빠르게 추정하거나, 전이학습을 통해 유사한 주파수 대역이나 안테나 구조를 가진 기존 디바이스의 측정 데이터를 활용한 사전 훈련된 모델을 새로운 디바이스에 적용하는 방법론을 향후 연구에서 개발할 예정이다.

향후 다양한 안테나 구조와 실제 운용 환경으로의 확장, 다중 목표 최적화 발전을 통해 차세대 무선 통신 시스템 개발에 광범위하게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, San Diego, CA, Academic Press, 2020.
- [2] J. I. Choi, B. S. Lee, "Phase adjustable 4T4R sector antenna for 5G," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 6, pp. 450-457, Jun. 2023.
- [3] R. Przesmycki, M. Bugaj, and L. Nowosielski, "Broadband microstrip antenna for 5G wireless systems operating at 28

- GHz," *Electronics*, vol. 10, no. 1, p. 1, Dec. 2021.
- [4] C. Sudhamani, M. Roslee, J. J. Tiang, and A. U. Rehman, "A survey on 5G coverage improvement techniques: Issues and future challenges," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2356, Feb. 2023.
- [5] A. N. Uwaechia, N. M. Mahyuddin, "A comprehensive survey on millimeter wave communications for fifth-generation wireless networks: Feasibility and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 62367-62414, Mar. 2020.
- [6] P. Kwak, M. Kim, and T. Song, "A study on over-the-air(OTA) test metrics for UE conformance testing on the 5G FR2 millimeter wave," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 40-52, Jan. 2021.
- [7] I. Aykin, M. Krunz, "Efficient beam sweeping algorithms and initial access protocols for millimeter-wave networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2504-2514, Apr. 2020.
- [8] Y. Zhou, Y. Liu, Y. Dong, and X. Sun, "Methods and challenges of RF conformance test for 5G millimeter wave terminals," in *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, Shenzhen, Nov. 2020, pp. 284-286.
- [9] M. F. Archi, D. Gunawan, "Initial access in 5G mmWave communication using hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization," in *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems(ISRITI)*, Yogyakarta, Dec. 2020, pp. 182-186.
- [10] H. Guo, B. Makki, and T. Svensson, "A genetic algorithm-based beamforming approach for delay-constrained networks," in *2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks(WiOpt)*, Paris, May 2017.
- [11] M. S. Sim, Y. G. Lim, S. H. Park, L. Dai, and C. B. Chae, "Deep learning-based mmWave beam selection for 5G NR/6G with sub-6 GHz channel information: Algorithms and prototype validation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 51634-51646, Mar. 2020.
- [12] B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams, and N. de Freitas, "Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 1, pp. 148-175, Dec. 2015.
- [13] S. Yang, B. Liu, Z. Hong, and Z. Zhang, "Bayesian optimization-based beam alignment for mmWave MIMO communication systems," in *2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC)*, Kyoto, Sep. 2022, pp. 825-830.
- [14] F. Zhu, A. Liu, and V. K. N. Lau, "Channel estimation and localization for mmWave systems: A sparse Bayesian learning approach," in *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications(ICC)*. May 2019, pp. 1-6.
- [15] Y. You, C. Zhang, and L. Zhang, "Bayesian matching pursuit based estimation of off-grid channel for millimeter wave massive MIMO system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 11, pp. 11603-11614, Nov. 2022.
- [16] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, and K. Wang, et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May. 2013.
- [17] Z. Pi, F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011.
- [18] C. K. I. Williams, C. E. Rasmussen, *Gaussian Processes for Machine Learning*, Cambridge, MA, MIT Press, 2006.
- [19] P. Kwak, M. Kim, and T. Song, "A study on over-the-air(OTA) test metrics for UE conformance testing on the 5G FR2 millimeter wave," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 40-52, Jan. 2021.

권 명 준 [(주)유엘 솔루션즈/과장]

<https://orcid.org/0009-0006-1484-3377>



2019년 2월: 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)

2026년 2월: 아주대학교 IT융합대학원 정보전자전공 (공학석사)

2021년 9월~현재: (주)유엘 솔루션즈 과장
[주 관심분야] RF

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2000년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2003년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2006년~현재: 아주대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전자장 해석, 레이더, 레이돔