

정수선형계획법을 이용한 셀 설계 최적화

김동민^{1*}, 전현우¹, 이인택², 김덕경^{1**}인하대학교¹, SK 텔레콤²kkwkdm@naver.com^{1*}, kdk@inha.ac.kr^{1**}

Optimal Cell Planning Using Integer Linear Programming

Dong Min Kim^{1*}, Hyun Woo Jeon¹, InTaek LEE², Duk Kyung Kim^{1**},Inha University¹, SK Telecom²

요 약

본 논문은 5G/6G 환경에서 기지국 밀집으로 인해 발생하는 간섭 및 에너지 비효율 문제를 해결하기 위해 정수선형계획법(ILP)에 기반한 기지국 배치 최적화 모델을 제안한다. 제안된 모델은 현실적 제약을 수리적으로 반영하여 최소한의 기지국 설치로 목표 커버리지를 달성하도록 설계하였으며, 모델의 성능은 단순 격자 환경, 3GPP TR 38.901 표준 채널 모델 적용 환경, 그리고 실제 도심 데이터 기반 환경의 세 가지 시나리오를 통해 단계적으로 검증하였다. 그 결과, 제안된 모델은 복잡한 전파 환경에서도 안정적으로 최적해를 도출하며, 평균 SIR을 향상시키고 불필요한 기지국 설치 수를 효과적으로 줄여 통신 품질과 인프라 효율성을 동시에 개선할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

무선 통신 시스템에서 커버리지는 사용자가 안정적으로 서비스를 이용할 수 있는 영역을 의미하며, 이동통신의 발전과 함께 핵심적인 설계 지표로 다뤄져 왔다. 초기에는 넓은 지역을 단일 기지국이 담당하는 단순한 셀 구조로 관리가 가능했으나, 서비스의 고도화와 데이터 트래픽 증가, 사용자 밀도 상승으로 인해 보다 정교한 커버리지 관리가 필요해졌다. 이 과정에서 동일 지역 내 다수의 기지국이 배치되면서 셀 간 중첩과 간섭이 불가피하게 발생하였고, 네트워크 구조의 복잡성이 급격히 증가하였다. 특히 5G 및 향후 6G 환경에서는 초고주파(mmWave) 대역의 활용으로 경로 손실이 심화되면서, 이를 보완하기 위한 소형 셀의 고밀도 배치가 불가피하다. 그러나 이러한 구조는 에너지 효율 저하와 인접 셀 간 간섭 확대를 유발하여, 결과적으로 서비스 품질 저하를 초래한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 커버리지 최적화 기법들이 제안되어 왔으며, 기존 연구에서는 커버리지 최적화를 위해 휴리스틱이나 베이직한 최적화 기법이 주로 활용되어 왔다.[1][2] 이러한 방법들은 근사해를 비교적 쉽게 탐색할 수 있지만, 전송 전력 제한이나 간섭 허용 범위 등 복잡한 제약 조건을 정밀하게 반영하기 어렵고, 탐색 과정이 반복 계산에 의존하기 때문에 연산 시간이 길어지는 한계가 있다. 또한 확률적 탐색에 기반하기 때문에 지역 최적해에 머물 가능성이 높아 전역 최적해를 보장하기 어렵다.

본 논문에서는 기지국 커버리지와 간섭 관계를 수리적으로 모델링하고, 정수선형계획법(ILP)을 적용하여 다양한 제약 조건을 반영하고 전역 최적해를 도출하는 정밀 최적화 방안을 제안한다. 제안된 기법의 유효성은 세 가지 시나리오로 단계별로 검증하였다. 먼저, 120° 섹터 기반 기지국 배치 환경에서 ILP 모델의 최적화 성능을 평가하였다. 이후 현실적인 통신 모델을 적용하여 최적화 전과 후의 평균 SIR 성능을 비교함으로써 간섭 제어 효과를 입증하였다. 마지막으로, 서울 도심 지형 데이터를 활용한 실험을 통해 제안 기법이 실제 5G/6G 고밀도 네트워크 설계에 대한 실효성을 검증하였다.

II. 본 론

1) 수학적 모델링

본 장에서는 서론에서 제시된 세 가지 최적화 문제를 해결하기 위해 정수선형계획법을 활용한 수학적 모델과 그 세부 수식을 전개한다. 정수선형

계획법은 목적 함수와 제약 조건이 모두 선형 형태를 가지며, 변수 값이 정수로 제한되는 최적화 기법이다. 이를 바탕으로 수학적 모델을 구성하기 위해, 먼저 문제를 구성하는 기본 요소를 정의하고, 입력 변수와 결정 변수를 설정한다. 이 변수들은 목적 함수와 제약 조건의 기반이 되며, 전체 시스템에서 최적의 기지국 설치 조합을 결정하는 핵심 요소로 사용된다.

먼저 관찰지점 집합 $O=\{1, 2, \dots, m\}$ 은 분석 구역 내에서 서비스 품질(RSRP 또는 SIR)을 평가해야 하는 위치들의 집합으로 정의한다. 각 원소 i 는 하나의 개별 관찰지점을 의미하며, 이후 모델의 커버리지 평가 기준으로 사용된다. 다음으로, 기지국 후보 집합 $B=\{1, 2, \dots, n\}$ 은 실제로 기지국을 설치할 수 있는 후보 위치들의 집합으로 정의한다. 각 원소 j 는 하나의 후보 기지국을 나타내며, 최적화 과정에서 설치 여부를 결정하는 변수와 연결된다. 기지국과 관찰지점 간의 관계는 커버 가능성 행렬 A 로 표현된다. 또한, 이 행렬의 원소 a_{ij} 는 기지국 j 가 관찰지점 i 를 커버할 수 있는지를 나타낸다.

$$A \in \{0,1\}^{n \times m}$$

$$a_{ij} \in \begin{cases} 1, & \text{기지국 } j \text{는 관찰점 } i \text{ 커버가능} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \quad (1)$$

마지막으로 결정 변수는 기지국 설치 여부를 나타내는 변수 x_j 와 관찰지점의 커버 여부를 나타내는 변수 z_i 총 두 가지로 정의된다.

$$x_j \in \begin{cases} 1, & \text{기지국 } j \text{를 선택한 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \quad \forall j \in B \quad (2)$$

$$z_i \in \begin{cases} 1, & \text{관찰점 } i \text{가 커버된 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \quad \forall i \in O \quad (3)$$

입력 변수와 결정 변수는 위와 같이 정의하였으며, 이를 토대로 최적화 문제의 수학적 모델을 구성하였다. 모델 설계 시에는 무선 통신 환경의 현실적 제약을 고려하여 모든 관찰 지점 O 을 완벽히 커버하는 대신 사용자가 지정한 목표 커버리지 비율 γ 이상을 만족하는 부분 커버리지 모델(Partial Coverage Model)을 정의한다. 완전 커버리지 모델은 목표 비율을 100%로 설정한 특수한 형태로 볼 수 있다. 이 모델의 최적해를 구하기 위해 앞서 정의한 결정 변수 x_j 와 z_i 를 활용하여 목적 함수와 제약 조건을 수립한다. 목적 함수는 설치해야 하는 기지국의 개수를 최소화하도록 설정하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^m x_j, \quad \forall j \in B \quad (4)$$

이 목적 함수는 다음의 제약 조건들을 만족하는 범위 내에서 최적화된다. 첫 번째 제약 조건은 각 관찰 지점이 최소 하나 이상의 기지국에 의해 커버 되도록 하는 조건이며 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \geq z_i, \forall j \in O \quad (5)$$

두 번째 제약 조건은 전체 관찰지점 중 목표 커버리지 비율 이상이 커버 되도록 하는 조건이다. 전체 관찰지점 개수를 n , 사용자가 지정한 목표 커버리지 비율을 ρ 라 할 때, 최소한 $T = \rho \cdot n$ 개의 관찰지점이 커버되어야 하며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n z_i \geq T, T = \rho \cdot n \quad (6)$$

이와 같은 목적 함수와 제약 조건의 정식화를 통해, 본 연구는 최소한의 기지국 설치로 목표 커버리지 비율을 만족하는 부분 커버리지 최적화 모델을 제안하였다.

2) 시나리오별 최적화 설계 및 결과

본 연구에서는 제안한 정수선형계획법(ILP) 기반 모델을 Gurobi Optimizer를 통해 단계별로 최적화하였다. 최적화는 현실성을 고려 하여 전체 관찰지점의 95%를 목표 커버리지 비율로 설정하고, 각 관찰 지점의 최대 수신 전력(Max RSRP)이 -94 dBm 이상인 경우에만 커버된 것으로 정의하였다. 이러한 기준을 바탕으로 세 가지 단계별 시나리오를 구성하였으며, 각 시나리오 별 상황 설정과 최적화 결과를 순차적으로 기술한다.

시나리오 1. 단순화된 섹터 모델

1km × 1km 크기의 단순 격자형 환경을 구성하고 각 지점을 중심으로 120° 간격의 섹터 3개를 배치하여 총 75개의 빔 후보를 설정하였다. 이 단계는 ILP 모델의 기본적인 최적화 동작과 수리적 타당성을 확인하기 위한 사전 검증 단계로, 균일한 조건에서 모델의 수학적 정합성을 평가하기 위해 수행되었다. 총 75개의 후보 빔으로 최적화를 수행한 결과, 목표 커버리지 비율 $\rho = 0.95$ 를 만족하는 최적해는 32개 빔으로 도출되었다. 이는 초기 후보 빔 수 대비 약 57.3% 감소한 수치이며, 달성된 커버리지 비율은 목표치에 근접한 95.2%를 기록하였다. 이 결과는 본 모델이 최소 설치 개수로 목표 커버리지 조건을 만족하는 최적해를 효과적으로 도출함을 입증한다.

시나리오 2. TR 38.901 적용 모델

3GPP TR 38.901 UMi-NLOS 채널 모델과 실제 빔 패턴을 적용하여 간섭이 존재하는 현실적인 전파 환경을 구성하고, 해당 조건에서 최적화를 수행하였다. 이를 통해 모델이 복잡한 전파 특성을 고려한 상황에서도 안정적으로 동작하도록 구현하였다. 최적화 결과 75개의 섹터별 빔 중 44개의 빔으로 최적화되었으며, 목표 커버리지 비율은 95.2%를 만족하였다. 또한 통신 품질 지표인 평균 SIR은 최적화 전 5.8dB에서 약 1.7dB 향상된 7.5dB로 증가했다. 이러한 결과는 제안된 모델이 간섭을 효과적으로 제어하며, 네트워크 품질을 향상시킬 수 있음을 검증한다.

시나리오 3. 서울 도심 환경 적용 모델

서울 도심의 1km × 1km 구역을 대상으로 실제 기지국 위치 및 빔 패턴을 반영한 실측 기반 환경을 구축하고, 동일한 목표 커버리지를 기준으로 최적화를 진행하였다. 이 단계는 모델의 현실 적용 가능성과 환경 적응성을 검증할 수 있도록 설계되었다. 최적화 결과 99.2%를 커버하는 초기 배치 51개의 빔이 단 4개의 빔만으로 95.5% 커버리지를 달성하는 최적해를 도출하였다. 또한 평균 SIR은 4.8dB에서 13.5dB로 최적화 전 대비 약 2.7배 향상

되어, 제안된 모델이 실제 환경에서도 기지국 설치 비용 절감과 통신 품질 향상을 동시에 달성할 수 있음을 확인하였다.

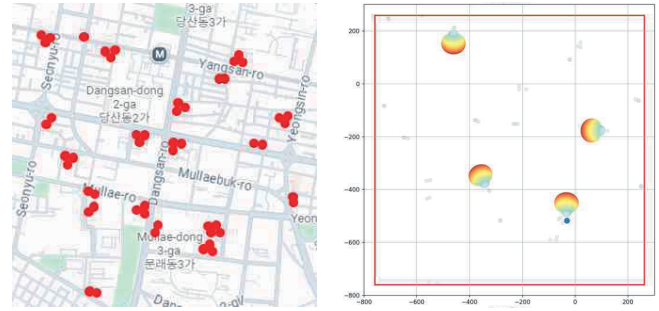


그림 1 최적화 전

그림 2 최적화 후

	커버리지 달성	기지국 수 변화	평균 SIR 변화
시나리오 1	95.3%	75 → 32	-
시나리오 2	95.2%	75 → 44	1.7dB 향상
시나리오 3	95.5%	51 → 4	8.7dB 향상

표 1 시나리오 별 최적화 결과

III. 결론

본 논문은 5G/6G 환경에서 기지국 밀집으로 인한 기지국 간 간섭과 서비스 품질 저하 문제를 해결하기 위해 정수선형계획법(ILP) 기반의 최적화 방안을 제안하였다. 제안된 모델은 현실적 제약을 수리적으로 반영하여 최소한의 기지국 설치로 목표 커버리지를 달성하는 부분 커버리지 구조로 정식화되었다. 이를 검증하기 위해 세 가지 단계별 시나리오를 구성하여, 단순 격자 환경에서의 기본 성능, 표준 채널 모델 적용을 통한 간섭 환경에서의 최적화 성능, 그리고 실제 도심 데이터를 이용한 현실 적용성을 단계적으로 평가하였다. 그 결과, 복잡한 전파 환경에서도 평균 SIR이 향상되고 불필요한 기지국 수가 감소하여, 제안된 ILP 모델이 통신 품질과 인프라 효율을 동시에 개선함을 확인하였다. 이는 기존 휴리스틱 및 베이지안 최적화와 같은 탐색 기법이 가지는 성능의 한계를 극복하고, 5G/6G 네트워크 설계 및 인프라 최적화에 활용 가능한 기초 모델로서의 가능성을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was in part financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the "Global Industrial Technology Cooperation Center program" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT).

참고 문헌

- [1] K. Sato and K. Suto, "Bayesian Optimization Framework for Channel Simulation-Based Base Station Placement and Transmission Power Design," IEEE Networking Letters, vol. 6, no. 4, pp. 217-222, Dec. 2024.
- [2] V. Sciancalepore, S. F. Mangiante, D. Bianchi, and L. Chiaraviglio, "BASICS: Scheduling Base Stations to Mitigate Interferences in Cellular Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 9, pp. 4131-4143, Nov. 2013.
- [3] Gurobi Optimization, "The Leader in Decision Intelligence Technology," Gurobi, [Online]. Available: <https://www.gurobi.com/>