

블록체인 기반 스펙트럼 관리 시스템에서의 전파수신 음영지역 판별을 위한 전파맵 보간 기법

Propagation Map Interpolation Scheme for Identifying Received Signal Strength Shading Areas in Spectrum Management System Based on Block Chain

박 승 범 · 최 주 평* · 이 원 철**

Seung-Bum Park · Joo-Pyoung Choi* · Won-Cheol Lee**

요 약

무선통신 서비스 간 공동의 주파수 대역을 상호 간섭 없이 효율적으로 사용하기 위해서는 사용자 간의 지역적 주파수 이용정보의 공유기술이 필요함과 동시에 보안 유지가 필수적이며, 신뢰할 수 있는 주파수 공존수준 달성을 위한 수신전계강도 예측방안이 필요하다. 본 논문에서는 주파수 이용정보의 보안 유지와 신뢰성 있는 주파수 공존을 위해 블록체인 플랫폼 기반의 스펙트럼 관리 시스템을 제안하였으며, 사용자가 요구하는 지역적 채널가용정보의 정확도 향상을 위해 크리깅 보간 기법(kriging interpolation)을 이용하여 전파수신 음영지역 판별을 위한 수신전계강도 예측과 전파맵을 생성하였다. 또한 전파맵의 성능향상과 자동화를 위해 기계학습 기반의 SVM(Support Vector Machine) 기법을 제안하였으며, 모의실험을 통해 크리깅 보간 기법의 표본 데이터 수에 따른 예측정확도와 전파맵 해상도 비교를 통한 성능분석을 수행하였다.

Abstract

To incorporate common frequency bands in wireless communication services without mutual interference, sharing of frequency usage information is needed that requires security measures, and a method for predicting the local received field strength is required for achieving reliable frequency coexistence levels. In this paper, a spectrum management system based on block chain is proposed for securing frequency usage information, achieving reliable frequency coexistence, and creating a propagation map by employing kriging interpolation for improving the accuracy of channel availability information required by users. Additionally, a support vector machine based on machine learning is proposed for enhancing and automating the propagation map. Through simulation, performance analysis was conducted by comparing the prediction accuracy of kriging interpolation and the propagation map resolution.

Key words: Support Vector Machine, Kriging Interpolation, Propagation Map, Black Chain, Smart Contract

「이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No. 2018-0-00943)과 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B01007836).」

승실대학교 정보통신공학과(School of Information Communication Engineering, Soongsil University)

*승실대학교 지능인지통신연구소(Institute of Cognitive Radio Communication, Soongsil University)

**승실대학교 전자정보공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received July 8, 2019 ; Revised September 3, 2019 ; Accepted September 26, 2019. (ID No. 20190708-064)

· Corresponding Author: Won-Cheol Lee (e-mail: wlee@ssu.ac.kr)

I. 서 론

최근 본격적인 5G 시대에 앞서 기존의 이동통신 용도와 함께 자율주행자동차, 드론, IoT(internet of things) 등 다양한 종류의 무선통신 서비스가 확대될 것으로 예측되고 있으며, 이로 인해 무선통신 서비스 간 주파수의 혼 간섭 문제 및 주파수 수요 증가, 군 주파수 확대 요구 또한 점차 증가되고 있다^[1]. 이에 대한 해결방안으로 상호 주파수 공동사용을 위한 스펙트럼 관리가 필요하며, 미국의 경우에는 CBR(Citizens Broadband Radio Service)와 같은 민간과 군 주파수의 공존을 기반으로 한정된 자원인 주파수를 상호 유해한 간섭 없이 공동으로 사용할 수 있는 연방규정을 도입하여 상용화를 앞두고 있다.

스펙트럼 관리 시스템의 근간이 되는 주파수 공동사용은 공통의 주파수 대역에서 운용되거나 운용될 예정인 무선통신 서비스 간 공존 및 주파수 이용에 대한 상호 신뢰성과 주파수 이용의 효율성 확보를 위해 보안유지가 필수적이며, 본 논문에서는 블록체인 플랫폼을 이용하여 주파수 공동사용에 참여하는 다양한 종류의 무선통신 서비스 간 주파수 이용정보의 보안 유치가 가능함과 동시에 신뢰성 있는 주파수 공동사용 달성이 가능한 스펙트럼 관리 시스템을 제안하였다. 이를 위해 지역적 주파수 공동사용을 위한 가용채널 획득 정보의 정확성 확보와 수신전계강도의 측정이 어려운 음영지역에서 수신신호 예측을 위해 크리깅 보간 기법을 이용하였으며, 실제 전파환경에서 수신전계강도 값을 기반으로 크리깅 보간 기법을 이용한 전파맵 생성과 해상도 비교를 통한 성능분석을 수행하였다. 본 논문의 2장에서는 블록,

체인 기반의 전파맵 생성을 위한 블록체인의 구성요소 및 처리과정과 스마트 계약 기반의 블록체인 스펙트럼 관리 시스템의 구조 및 세부 처리과정에 대해 소개하고 3장에서는 전파맵 생성 전 단계에 해당하는 베리오그램(variogram) 기반의 공간 모델링 기법과 전파맵 생성을 위한 크리깅 보간 기법, 전파맵의 성능향상과 자동화를 고려한 기계학습 기반의 SVM 기법에 대해 소개한다. 4장에서는 센싱 데이터 기반의 실제 수신전계강도 값을 이용하여 경로손실모델 중 하나인 Extended HATA 모델과의 수신신호 예측성능을 비교하고, 크리깅 보간 기법을 이용하여 전파맵 생성에 대한 모의실험 결과를 나타내었다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺고자 한다.

II. 블록체인 구성요소 및 처리과정

블록체인은 특정인으로부터 임의적인 조작 및 변조가 어렵도록 설계된 블록형태의 분산 데이터베이스 플랫폼이라 할 수 있으며, 기존의 서버와 클라이언트 간의 연결 방식이 아닌 클라이언트와 클라이언트 간의 분산 네트워크 방식으로 운용되는 플랫폼이라 볼 수 있다^[2]. 블록체인에 참여하기 위해서는 노드(node)를 사용해야 하며, 노드는 블록체인에서 거래를 수행하기 위한 사용자의 개념으로 참여 목적에 따라 풀 노드(full-node) 또는 라이트 노드(lite-node)로 구분할 수 있다. 풀 노드는 거래의 발생과 채굴, 거래정보의 검증을 수행하며, 채굴자가 그 역할을 담당하고, 라이트 노드의 경우에는 블록체인 내에서 사용자 간 거래를 위한 용도로 사용된다.

2-1 해시 알고리즘

블록체인 내에서 모든 거래정보와 블록들은 해시 알고리즘을 이용하여 해시 값으로 변환하는 과정을 수행한다. 해시 알고리즘은 비대칭 암호화 방식으로 특정 입력 값에 대해 해시 알고리즘을 이용하여 출력 값으로 변환되면 원래의 값으로 복원하기가 어렵고, 입력 값의 길이가 달라도 항상 고정된 길이의 해시 값이 출력되는 특징이 있다. 이러한 특징을 통해 블록 데이터의 용량을 감소시킬 수 있는 특징이 있으며, 입력 값의 일부가 변경될 경우에는 완전히 다른 출력 값이 생성되므로 데이터의 위변

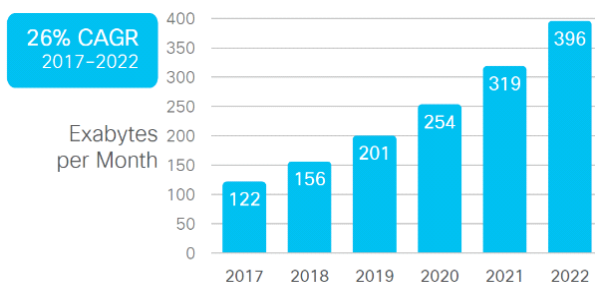


그림 1. 시스코 VNI 글로벌 IP 트래픽 예측현황
Fig. 1. Cisco VNI Global IP traffic forecast.

조 여부를 파악할 수 있다. 또한 원래의 값으로 복원이 어렵기 때문에 해시 값의 공개 또는 유출과 같은 상황이 발생해도 블록체인의 보안이 일정 수준 유지될 수 있다는 장점이 있다.

2.2 거래정보 생성

블록체인 내에서 사용자간 거래가 발생하면 트랜잭션의 형태로 거래정보가 생성되며, 디지털 키(digital key)를 이용한 서명과 인증과정을 수행한다^[3]. 사용자들은 디지털 키를 반드시 보유하고 있어야 하며, 서명과 인증과정을 수행하는 것을 통해 트랜잭션의 위변조 및 무결성을 검증한다. 디지털 키는 개인키(private key)와 공개키(public key)로 구분할 수 있으며, 개인키는 기존의 은행 계좌번호의 개념으로 볼 수 있으며, 공개키는 계좌번호의 비밀번호에 해당된다고 볼 수 있다. 개인키와 공개키는 하나의 쌍(pair)으로 구성되어 있으며, 개인키는 키 소유자만 알고 있어야 하고, 공개되어서는 안 된다. 또한 한번 잊어버리면 찾을 수 없는 문제가 있어 개인키 관리가 매우 중요하다. 공개키의 경우에는 비밀유지 조건이 없으며, 블록체인에 참여하는 모든 사용자에게 공유되어도 보안상의 문제가 발생하지 않으며, 자유롭게 공유가 가능한 특징이 있다.

그림 2는 블록체인 내에서 사용자들이 각자 보관하고 있는 개인키와 공개키를 사용하여 트랜잭션의 서명과 인증과정을 수행하여 거래가 성립되는 과정을 보여주고 있다. 사용자 1이 사용자 2에게 거래를 요청할 경우, 사용자 1은 사용자 2의 공개키와 현재 거래내역, 이전에 생성된 트랜잭션을 포함하여 트랜잭션을 구성하고, 사용자 1의

개인키를 이용하여 서명을 진행하면 하나의 트랜잭션이 생성된다. 이때 생성된 트랜잭션을 검증하기 위해 사용자 1의 공개키를 이용하여 인증과정을 수행하고, 인증이 완료되면 사용자 1과 사용자 2간의 거래내역에 대한 하나의 트랜잭션 검증이 완료된다. 이와 같은 과정을 통해 트랜잭션의 신뢰성과 무결성을 획득할 수 있으며, 모든 트랜잭션은 이전 트랜잭션에 대한 해시 값을 저장하고 있어 악의적인 사용자가 트랜잭션의 위변조를 시도할 경우 생성된 모든 트랜잭션을 수정해야 하는 문제가 있어 블록체인에 참여하는 사용자와 트랜잭션의 수가 많아질수록 블록체인의 위변조가 어려워지는 특징이 있다.

2.3 블록 생성 및 합의 알고리즘

블록체인에서 블록을 생성하기 위해서는 풀 노드를 보유하고 있는 채굴자가 필요하며, 블록체인에 참여하는 사용자들은 채굴자의 역할로서 자발적으로 참여할 수 있도록 일정량의 보상을 지급하여 채굴자의 참여를 도모하게 된다. 그러나 분산 네트워크 기반의 블록체인 특성상 채굴자가 다수로 참여할 경우 블록의 복제 및 위변조, 중복 생성 등의 문제가 발생하므로 블록을 생성하는 채굴자는 반드시 한 명으로 지정해야 하며, 다수의 채굴자로부터 한 명의 채굴자를 선택하기 위한 방법으로 합의 알고리즘을 사용한다. 블록체인에서는 합의 알고리즘 방식 중 하나인 작업증명(proof of work)을 사용하며, 블록체인에 참여하는 다수의 채굴자들은 작업증명을 통해 블록을 생성하기 위한 경쟁을 수행한다. 이때 경쟁에서 이긴 채굴자는 블록을 생성할 수 있는 권한이 주어지게 되고, 블록을 생성하게 되면 일정량의 코인을 보상받는 방식으로 운영하게 된다. 이처럼 코인을 보상받기 위해 다수의 채굴자가 존재할 수 있으며, 다수의 채굴자들이 작업증명을 수행하기 위해서는 마지막으로 생성된 블록의 구조를 알고 있어야 한다. 블록의 구조는 크게 블록헤더(block header)와 블록바디(block body)로 구성되어 있으며, 블록의 구성과 세부요소는 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

트랜잭션은 복수로 존재하기 때문에 트랜잭션의 관리와 검색, 검증이 필요하며, 이를 위해 머클트리 방식을 사용한다. 머클트리는 이진트리(binary tree) 기반의 자료구조 방식으로 다수의 트랜잭션들을 이진트리로 구성하여

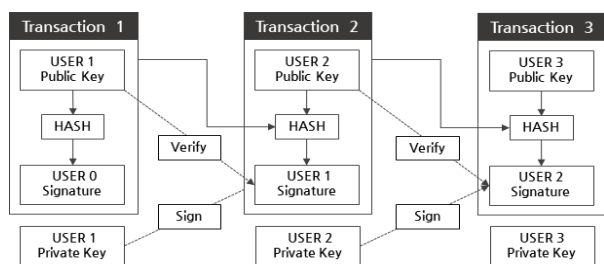


그림 2. 디지털 키를 이용한 트랜잭션 동작과정
Fig. 2. Transaction process using digital key.

표 1. 블록의 구성 및 세부요소

Table 1. Composition and subcomponents of block.

Composition	Subcomponents	Explanation
Block header	Previous block hash	Hash value of the previous block
	Merkle root	Hash value corresponding to the root of the merkle tree
	Time stamp	Time to block generation
	Difficulty	Difficulty setting for block generation
	Nance	Count value to block generation
Block body	Merkle tree	Data structure that organizes transactions in tree form
	Transaction	Hash value of transaction information

트랜잭션들에 대한 고속 검색과 무결성 검증을 수행한다.

그림 3은 작업증명을 이용해 블록이 생성되는 과정을 보여주고 있다. 채굴자는 난이도 목표가 지정한 해시 값보다 작거나 같은 해시 값을 맞추기 위해서 이전 블록의 해시 값과 머클루트의 해시 값에 난스 값을 증가시켜 더하는 과정을 반복하여 수행한다. 이 때 가장 먼저 해시 값을 찾게 되는 한 명의 채굴자에게 블록을 생성할 수 있는 권한이 주어지게 되고, 블록이 생성되면 일정량의 코인을 보상 받게 된다. 이와 같이 채굴자는 난이도 목표가 지정한 해시 값을 다른 채굴자보다 빠르게 찾기 위해서 채굴 작업을 수행하며, 해시 값을 빠르게 찾을 수 있는 정도를 나타내는 성능지표를 해시파워(hash power)라고 한다.

그림 4는 거래발생 시 트랜잭션과 블록이 생성되는 과

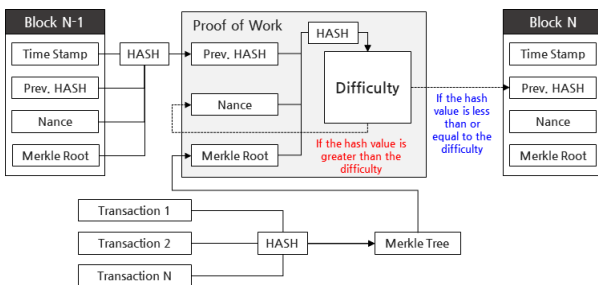


그림 3. 작업증명을 이용한 블록 생성과정

Fig. 3. Block generation process using proof of work.

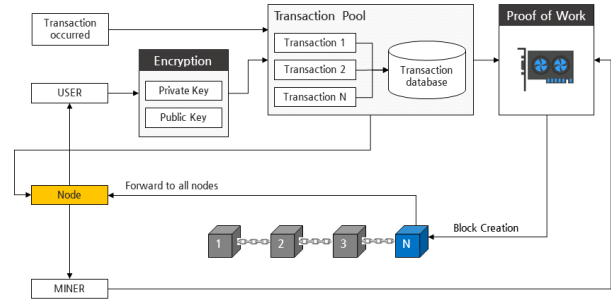


그림 4. 거래발생 시 트랜잭션과 블록 생성 과정

Fig. 4. Transaction and block generation process.

정을 나타내고 있다. 거래가 발생하면 이전에 생성된 트랜잭션 해시 값과 현재 발생된 트랜잭션 해시 값을 개인 키와 공개키를 이용하여 서명과 인증과정을 수행하고, 트랜잭션을 생성하게 된다. 이때 생성된 트랜잭션은 트랜잭션 풀에 저장되며, 모든 노드에 전달된다. 트랜잭션 풀에 저장된 트랜잭션들은 다음 블록이 생성되기 전까지 상기의 과정을 반복 수행하며, 채굴자는 트랜잭션 풀에 저장된 트랜잭션들을 머클트리 형태로 구조화하고, 타임스탬프가 지정한 블록생성 시간동안 트랜잭션들의 개수와 해시파워에 따라 작업증명을 수행한다. 작업증명을 통해 선발된 채굴자는 블록을 생성하고, 모든 노드에 생성된 블록을 전달하게 되며, 상기의 과정을 반복 수행하게 된다.

2.4 주파수 이용정보 거래 시스템 설계

본 논문에서는 그림 5와 같이 블록체인에 참여하는 특정 사용자로부터 수집된 센싱 데이터 기반의 실제 수신 전계강도 값을 이용하여 전파맵을 생성하고, 사용자 간 거래를 가능하게 하는 주파수 이용정보 거래 시스템을 설계하였다^[4]. 주파수 이용정보 거래 시스템의 설계에 있어 스마트 계약의 사용은 반드시 필요하며, 참여하는 모든 사용자들 간의 모든 거래는 스마트 계약에 의해서만 이루어지게 된다^[5].

스마트 계약은 블록체인에서 발생한 트랜잭션과 코인을 검증하는 코드 프로그래밍 기법으로 복수로 존재할 수 있고, 수정이 불가능한 특징이 있어 트랜잭션과 거래 과정에 대해 외부로부터의 개입이 불가능한 특징이 있다.

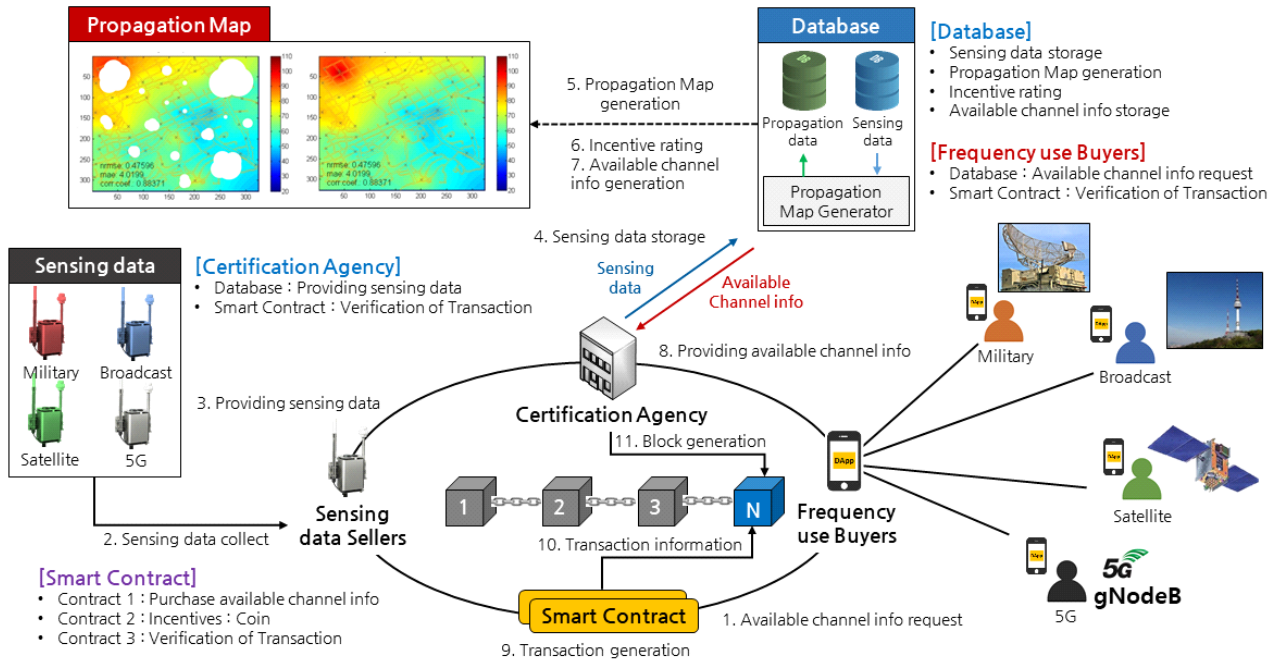


그림 5. 스마트 계약을 이용한 블록체인 기반 주파수 이용정보 거래 시스템
Fig. 5. Block chain based frequency usage information trading system using smart contract.

이러한 특징으로 본 논문에서 제안하는 주파수 이용정보 거래 시스템을 구성하는 센싱 데이터와 코인 간 거래에 대한 신뢰성과 무결성을 확보할 수 있으며, 거래과정을 자동화함으로써 보다 능동적으로 주파수 이용정보 거래 시스템을 운용할 수 있다.

센싱 데이터와 코인과의 거래를 수행하기 위해 주파수 이용정보 거래 시스템에 참여하는 모든 사용자들은 이더리움 기반의 블록체인 네트워크에 참여해야 한다. 센싱 데이터와 코인과의 거래과정은 그림 6에서 설명하는 처리과정에 의해 동작하며, 주파수 이용 구매자, 공인인증기관, 센싱 데이터 판매자들의 구성요소와 역할은 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 모든 센싱 데이터를 관리하는 공인인증기관은 국가 또는 신뢰할 수 있는 기관으로 한정하여 센싱 데이터의 관리에 대한 신뢰성을 확보하고, 주파수 이용 구매자는 공인인증기관이 판매하는 채널 정보에 대한 신뢰성을 얻을 수 있다. 또한 블록체인 플랫폼 내에서만 거래정보가 운용되기 때문에 위변조 문제와 센싱 데이터들 간 보안 문제를 해결할 수 있다.

본 논문에서는 주파수 이용정보 거래 시스템에서 스마

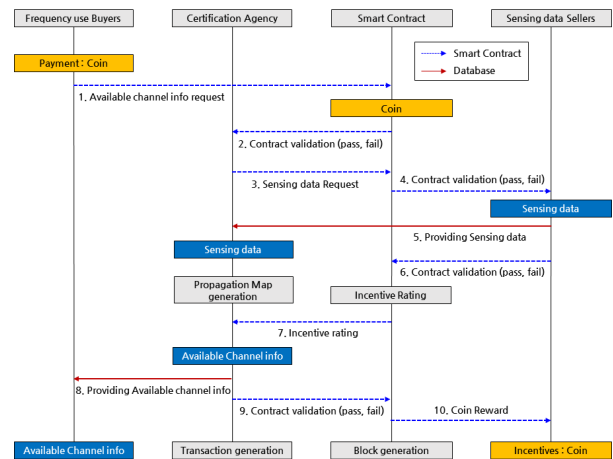


그림 6. 주파수 이용정보 거래 시스템의 처리 과정도
Fig. 6. Algorithm of frequency usage information trading system.

트 계약을 사용하기 위해 Solidity 프로그램을 이용하였으며, 표 3과 같이 별도의 사용자 정의 함수를 개발하였다. 주파수 이용 구매자, 공인인증기관, 센싱 데이터 판매자의 주요 기능들은 각각 독립적으로 동작하며, 스마트 계약의

표 2. 주파수 이용정보 거래 시스템의 구성요소 및 역할
Table 2. Components and roles of the frequency usage information trading system.

Node	Component	Role
Frequency use buyers	USER()	Coin payment
		Purchase available channel information
Certification agency	MINER()	Database administration
		Generation and management of propagation map
		Mining
Sensing data sellers	OWNER()	Sensing data collection
		Sensing data sales

표 3. 스마트 계약의 함수 종류 및 기능
Table 3. Function types and functions of smart contract.

Function	Type	Smart contract role
wikispectra()	Behavior of smart contracts	Purchase available channel information
payToswich()	Coin payment	1 ETH payment when purchasing available channel information
dataTotx()	Sensing data request	Request sensing data from Sensing data sellers
dataTorx()	Provide sensing data	Providing the collected sensing data
dataToch()	Providing available channel information	Providing available channel information to frequency use buyers
withdrawFund()	Coin reward	Withdraw 1 ETH to sensing data sellers

동작은 거래가 발생할 경우에만 수행되고, 거래가 발생하지 않을 경우에는 대기상태로 유지된다.

Ⅲ. 공간모델링 기법

공간 모델링 기법의 대표적 방법인 크리깅 보간 기법은 위치 또는 공간적인 특성이 반영된 데이터들을 이용한 통계적 분석기법으로 기존의 과거 데이터가 없이도

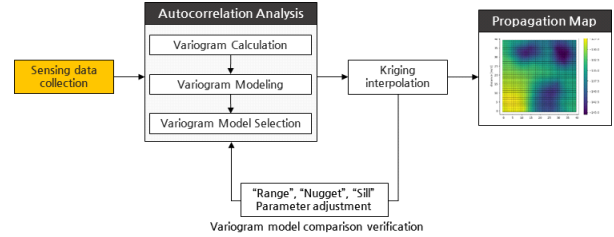


그림 7. 전파맵 생성을 위한 크리깅 보간 기법 처리과정
Fig. 7. Flow diagram of kriging interpolation method for generation of propagation map generation.

현재 취득된 데이터를 기반으로 알 수 없는 특정 위치에서의 값을 추정할 수 있어 교통정보 및 날씨예측, 지형정보 등과 같이 지리 통계학 분야에 주로 사용된다^[6].

그림 7은 전파맵을 생성하기 위해 요구되는 크리깅 보간 기법에 대한 처리 과정도를 나타내고 있다. 크리깅 보간 기법을 수행하기 위해서는 먼저 측정된 센싱 데이터 간의 상관관계 값을 산출해야 하며, 이를 위해 베리오그램을 사용한다. 베리오그램을 사용하여 산출된 상관관계 값을 기반으로 다양한 베리오그램 모델을 생성하게 되고, 그 중 상관관계 값과 가장 유사한 베리오그램 모델을 선택하게 된다. 다음으로 선택한 베리오그램 모델을 이용하여 모든 지점에 대해 크리깅 보간 기법을 수행하고, 전파맵을 생성하게 된다. 본 논문에서는 예측된 센싱 데이터 값들을 이용하여 2.4절에서 소개한 주파수 이용정보 거래 시스템에서 음영지역 판별을 위한 전파맵 생성역할을 수행한다.

3-1 베리오그램

베리오그램은 공간정보가 포함된 모든 지점과 지점 사이를 일정 구간의 거리 별로 나누어 상관관계 값으로 나타내는 지표로서 분산 값(variance)이라 한다. 분산 값을 산출하기 위해서는 먼저 측정된 센싱 데이터들의 위치정보 값을 알고 있어야 하며, 베리오그램을 통해 계산하면 식 (1)과 같이 분산 값 $2\gamma(d)$ 을 산출할 수 있다.

$$2\gamma(d) = \frac{1}{N_d} \sum_{i,j} (Z_{(s_i)} - Z_{(s_j)})^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 d 는 두 지점 사이의 거리를 나타내며, N_d 은 베리오그램을 계산할 때 사용된 모든 지점의 개수를 의

미한다. $Z_{(s_i)}$ 는 측정된 하나의 지점이고, $Z_{(s_j)}$ 는 $Z_{(s_i)}$ 지점을 기준으로 일정한 거리만큼 떨어져 있는 지점을 의미한다. 즉, 베리오그램의 분산 값은 두 지점 간의 차이를 제곱을 평균화 한 값으로 지점 사이의 거리가 가까울수록 분산 값은 작아지게 되고, 지점 사이의 거리가 멀어질수록 분산 값은 커지게 된다. 일반적으로 베리오그램을 계산할 경우, 계산의 편의성을 위해 준 베리오그램(semi-variogram)을 이용하며 식 (2)와 같이 베리오그램의 절반에 해당되는 준 분산(semi-variance)을 산출할 수 있다.

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N_d} \sum_{i,j} (Z_{(s_i)} - Z_{(s_j)})^2 \quad (2)$$

산출된 준 분산 값을 이용하여 베리오그램 모델링을 수행하며, 이를 위해 그림 8과 같이 Range, Nugget, Sill 파라미터 값을 이용해야 한다^[7].

Range는 측정된 두 지점 사이의 상관관계를 나타낼 수 있는 최대 거리를 의미하고, Sill은 Range가 최대 거리일 때의 준 분산 값을 나타내며, Nugget은 두 지점 사이의 거리가 0일 때의 상관관계 값을 나타낸다. 측정된 두 지점 사이의 거리가 Range보다 멀어지면 준 분산 값은 일정한 값으로 유지되는데, 이는 지점 간 거리가 멀리 떨어져 있어 두 지점 사이에 미치는 영향이 작아진다는 것을 의미한다. 즉, 두 지점 사이의 거리가 가까워지고, 그 분포가 밀집되어 있으면 Nugget 값은 작아지게 되고, 두 지점 간의 상관관계가 커진다고 볼 수 있다. 베리오그램을 통해 산출된 준 분산 값을 이용하여 적절한 Range, Nugget, Sill 파라미터 값을 선택한 후 다음 과정으로 베리오그램 모

델링을 수행하며, 베리오그램 모델은 크게 선형모델, 구형 모델, 지수 모델, 가우시안 모델로 구분할 수 있다. 선형 모델은 센싱 데이터 값들의 상관관계가 선형적으로 존재 할 경우에 주로 사용되며, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, a 는 Range, c_0 는 Nugget, c_1 은 Sill을 의미한다.

$$\gamma(d) = c_0 + c_1(d/a) \quad (3)$$

구형 모델은 식 (4)와 같이 3차 다항식의 형태로 표현되며, 상관관계의 값이 Sill 값과 일치한다.

$$\gamma(d) = c_0 + c_1(1.5(d/a) - 0.5(d/a)^3) \quad (4)$$

지수 모델은 정확한 Sill 값을 나타낼 수는 없으나 Range가 증가할수록 Sill 값에 수렴하는 특징이 있어 측정 값들의 분포 수가 적고 지점 간의 거리가 멀리 떨어져 있을 경우 주로 사용되며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma(d) = C_0 + C_1(1 - e^{(-d/a)}) \quad (5)$$

가우시안 모델은 측정값들이 밀집되어 있고, 그 분포가 많은 경우에 주로 사용되며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma(d) = c_0 + c_1(1 - e^{(d^2/a^2)}) \quad (6)$$

각각의 베리오그램 모델마다 상관관계 값의 변화 특징은 상이하며 보다 정확한 크리깅 보간 기법을 사용하기 위해서는 이전단계에서 산출된 준 분산 값과 가장 유사한 베리오그램 모델을 선택하는 것이 중요하다.

3-2 크리깅 보간 기법

베리오그램 모델을 선택한 이후에는 크리깅 보간 기법을 이용하여 측정된 센싱 데이터 값에 해당하는 가중치를 계산할 수 있으며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (7)$$

식 (7)에서 z^* 는 특정 지점에서의 센싱 데이터 예측 값, z_i 는 이미 알고 있는 지점에서 측정된 센싱 데이터 값을 나타낸다. n 은 크리깅 보간 기법에 사용되는 측정 지점의 총 개수이고, λ_i 는 각 측정 지점에 해당되는 가중치 값을 나타낸다. 크리깅 보간 기법의 종류로는 단

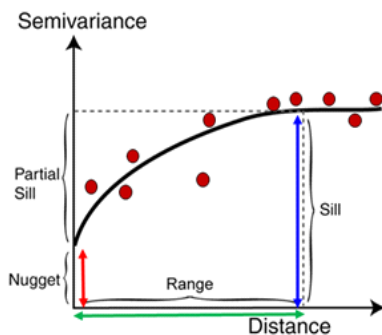


그림 8. 베리오그램의 파라미터 정의
Fig. 8. Parameter definition of variogram.

순 크리깅, 일반 크리깅, 정규 크리깅이 있으며, 본 논문에서는 지점 간 편향(bias)이 존재하지 않도록 가중치들의 합을 1로 고려하는 정규 크리깅(ordinary kriging)을 사용하였으며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$\begin{aligned} \sigma_{OK}^2 &= \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \sigma_{ij}^2 \\ \text{sub. } 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 σ_{OK}^2 는 정규 크리깅의 오차분산 값이고, σ^2 는 예측 지점에 대한 모든 분산 값을 의미한다. 또한 σ_{ij}^2 는 지점과 지점 간의 위치에 따른 공분산 값을 의미한다. 즉, 정규 크리깅 보간 기법은 식 (8)의 제약조건 내에서 오차분산 값이 최소가 되는 모든 지점에 대한 가중치를 산출하는 기법이라 할 수 있다.

3-3 SVM 기반의 크리깅 보간 기법

크리깅 보간 기법을 사용하는데 있어 사용자의 수동적 선택에 의한 파라미터 값의 변화로 예측 정확도가 낮아질 수 있는 문제가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 SVM을 이용하여 베리오그램 모델을 구현하였다^[9]. SVM은 특정 경계를 기준으로 하는 초평면(hyperplane)을 기반으로 센싱 데이터들 간 영역을 분류하는 이진 분류 알고리즘이며, 학습에 필요한 파라미터 조정 값이 적고, 적은 수의 센싱 데이터만으로도 우수한 성능을 보여준다. 또한 경험적 위험 최소화 방식을 기반으로 두고 있어 최근 대두되고 있는 인공지능망(neural network)의 단점으로 적용되는 과적합 문제를 최소화할 수 있다. SVM을 이용하여 센싱 데이터들 간 영역을 분류하기 위해서는 초평면을 찾는 과정을 수행하며, 초평면과 서포트 벡터(support vector) 사이의 거리를 마진이라고 한다. 마진의 크기는 $2\|w\|$ 가 되며, 마진이 커질수록 분류 성능이 좋아지는 특징이 있다. 즉, SVM은 센싱 데이터를 분류할 때 오차를 최소한으로 줄이면서 마진을 최대로 하는 최적의 초평면인 결정경계(decision boundary)를 찾아야 하며, 식 (9)는 결정경계를 찾기 위해 초평면 $w^T x_i + b$ 에 마진의 크기를 제약조건으로 고려한 산출식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \min_{w,b} \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\zeta_i + \zeta_i^*) \\ \text{sub. } \quad & (w^T x_i + b) y_i \geq 1 - (\zeta_i + \zeta_i^*) \\ & y_i \in -1, 1 \\ & \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 w 는 초평면과 직교를 이루는 법선벡터를 나타내며, x_i 는 센싱 데이터의 좌표 값, b 는 초평면의 위치 값, y_i 는 센싱 데이터의 영역을 나타낸다. C 는 마진의 크기를 결정하는 패널티에 해당하는 가중치 값이며, 패널티 유무를 판별하는 함수 ζ_i, ζ_i^* 를 나타낸다. SVM을 계산하기 위해서는 라그랑제 승수법과 KKT(karush kuhn tucker) 조건을 사용하며, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f(x, v) &= f(x, a, a^*) \\ &= \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) K(x_i, x_j) + b \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 a 와 a^* 는 라그랑제 계수 값을 나타내고, x_i 와 x_j 는 데이터의 위치 값을 나타낸다. K 는 데이터를 선형적으로 분류할 수 없을 경우 데이터를 고차원의 공간으로 사상(mapping)시켜 계산하는 커널트릭(kernel trick)을 기반으로 계산하는 커널함수를 나타낸다. 커널함수의 종류에는 선형 커널, RBF 커널, 다항식 커널이 있으며, 본 논문에서는 비선형 분류 시 비교적 연산처리 속도가 빠른 RBF 커널을 사용하였으며, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \|x_i - x_j\|^2} \quad (11)$$

식 (11)에서 x_i 와 x_j 는 데이터의 위치 값을 나타내고, γ 는 가우시안 표준편차 값을 나타낸다. 즉, 지점과 지점사이에 표준편차를 주어 비선형의 형태로 나타낼 수 있는 방식이라 볼 수 있다.

3-4 Support Vector Regression

SVR(support vector regression)은 기존 SVM 방식에서 e-loss function을 적용하여 임의의 실수 값을 예측하는 회귀 분석 방법이다^[10]. SVR은 모든 센싱 데이터 중에서 e-loss function에서 지정한 오차 값보다 작은 값을 찾는 동시에 마진의 크기를 최소화하는 것을 목적으로 두며, 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\zeta_i + \zeta_i^*) \\
& \text{sub.} \quad y_i - (w^T x_i + b) \geq \varepsilon + \zeta_i \\
& \quad (w^T x_i + b) - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i^* \\
& \quad \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0
\end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 ε 는 오차허용율을 나타내고, C 는 오차허용율의 크기를 결정하는 패널티 값이며, ζ_i 와 ζ_i^* 는 패널티 유무를 판별하는 함수이다. 즉, 센싱 데이터들이 오차허용율 안에 최대도 포함되는 동시에 오차허용율의 크기를 최소화 하는 것이 SVR의 목적이라 할 수 있으며, 논문에서는 기존의 베리오그램 모델에 SVR을 이용하여 크리깅 보간 기법을 구현하고 이를 이용하여 음영지역에서의 수신전계강도 판별을 위한 알고리즘으로 적용하였다.

IV. 모의실험

본 논문에서 제안한 주파수 이용정보 거래 시스템에서 크리깅 보간 기법을 이용한 전파맵의 성능분석을 위해 그림 9와 같이 센싱 데이터 판매자, 주파수 이용 구매자, 공인인증기관으로 구분하여 모의실험을 진행하였다. 센싱 데이터 판매자는 900 MHz 대역에서 사용 가능한 LoRa 단말을 사용하여 센싱 데이터 수집 용도로 이용하였으며, 주파수 이용 구매자와 공인인증기관, 센싱 데이터 판매자는 블록체인에 참여해야 하므로 Mist Browser와 Geth 프

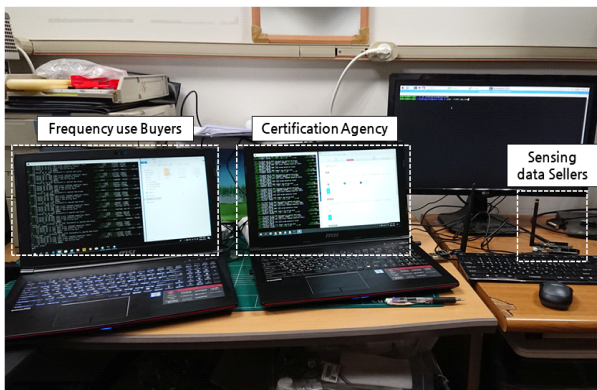


그림 9. 주파수 이용정보 거래 시스템 동작을 위한 모의 실험 환경

Fig. 9. Simulation environment for operating frequency usage trading system.

로그를 이용하여 사설 이더리움 기반의 블록체인 네트워크를 구축하였다^[11]. 또한 크리깅 보간 기법을 이용한 전파맵 생성과 SVM 모델의 동작 구현을 위해 Python 프로그램을 이용하여 베리오그램 모델별 센싱 데이터 추정 성능 비교와 전파맵 생성과정을 수행하였다.

4.1 주파수 이용정보 거래 시스템의 동작

주파수 이용정보 거래 시스템의 동작은 주파수 이용 구매자에 의해 발생하며, 스마트 계약을 이용하여 사용 가능한 LoRa 단말의 채널 정보를 요청하고 1 ETH를 송금하게 된다. 1 ETH를 송금하게 되면 스마트 계약이 활성화되고, 스마트 계약에 의해 센싱 데이터 판매자에게 센싱 데이터를 요청하고, 센싱 데이터 판매자는 데이터 수집을 수행한다. 센싱 데이터의 수집은 LoRa 단말로 한정하며, 수집하는 센싱 데이터 위치는 그림 10과 같이 송실대학교 캠퍼스 내 p0번에서 p9번까지의 개별 위치에서 수신전계강도 값을 측정하였다.

측정 지점마다 실내 또는 실외 환경이 포함되어 있어 표 4와 같이 측정된 수신전계강도 값은 비교적 불규칙한 형태를 나타내는 것을 볼 수 있으며, 송신점과 수신점 사이의 거리가 멀어질수록 수신전계강도 값이 감소하는 것을 알 수 있다.

측정된 센싱 데이터는 공인인증기관의 데이터베이스에 전달하게 되며, 공인인증기관은 크리깅 보간 기법을 이용

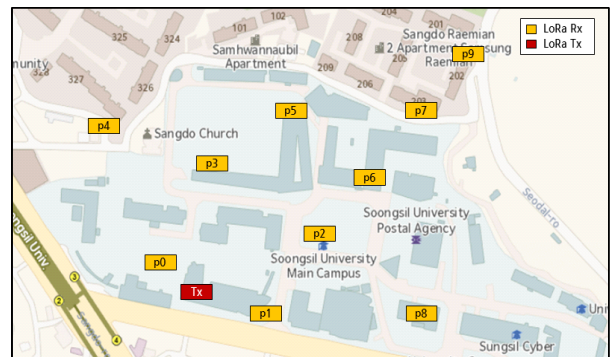


그림 10. 송실대학교 캠퍼스 환경에서의 수신전계강도 측정지점

Fig. 10. Received signal strength points in the Soongsil university campus environment.

표 4. 측정 위치 별 수신전계강도

Table 4. Received signal strength by measurement points.

Point	p0	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9
RSSI(dBm)	-105	-115	-117	-122	-120	-126	-126	-130	-127	-130

하여 전파맵을 생성하고, 사용 가능한 채널을 찾아 주파수 이용 구매자에게 전달하게 된다. 주파수 이용 구매자에게 사용 가능한 채널이 전달되면 스마트 계약에 저장되어 있던 코인을 센싱 데이터 판매자에게 인출하게 되고, 스마트 계약은 종료하게 된다.

그림 11과 그림 12는 스마트 계약을 수행하기 전 결과와 스마트 계약이 1회 수행한 후의 결과를 보여주고 있다. 스마트 계약이 1회 동작하면 그림 12와 같이 센싱 데이터 판매자에게 1 ETH를 보상받은 것을 볼 수 있으나, 주파수 이용 구매자는 1 ETH보다 많은 1.05 ETH가 소모된 것을 볼 수 있다. 이는 스마트 계약을 수행하기 위한 수수료가 포함되었기 때문이다. 이와 같이 스마트 계약은 프로그래밍 코드의 길이에 따라 소모되는 수수료가 증가하는 문제가 있어 이를 해결하기 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

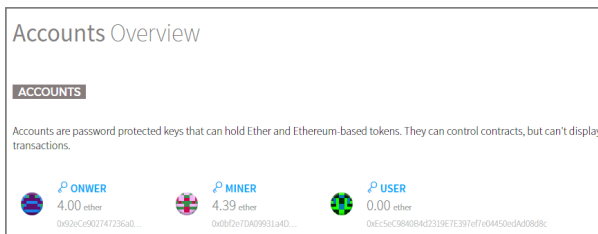


그림 11. 스마트 계약을 수행하기 전 결과
Fig. 11. Results before performing smart contract.

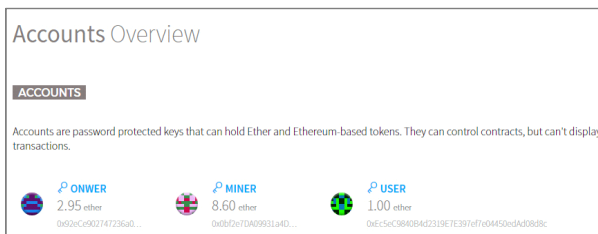


그림 12. 스마트 계약이 1회 수행한 후 결과
Fig. 12. Result after performing smart contract once.

4.2 전파맵 생성 및 성능분석

전파맵을 생성하기 위해 표 4에서 측정된 표본 데이터를 기반으로 베리오그램 모델 별 음영지역의 수신전계강도 추정성능을 확인하였다. 또한 전파맵을 생성하는데 앞서 부족한 표본 데이터의 수를 확보하기 위해 Extended HATA 모델을 사용하였으며, 그림 13은 LoRa 단말의 거리 별 수신전계강도 값과 Extended HATA 모델을 사용하여 생성된 수신전계강도 값의 변화량을 나타낸다^{[12],[13]}.

그림 13의 결과에서 알 수 있듯이, LoRa 단말을 이용하여 측정한 수신전계강도 값의 변화량이 Extended HATA 모델을 이용한 수신전계강도 값의 변화량과 유사한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Extended HATA 모델을 기반으로 그림 14와 같이 가로 및 세로 길이가 1,200 m인 공간적인 전파환경을 고려하여 총 1,600개 지점에 해당하는 표본 데이터를 생성하였다.

다음으로 크리깅 보간 기법을 이용한 전파맵을 생성하

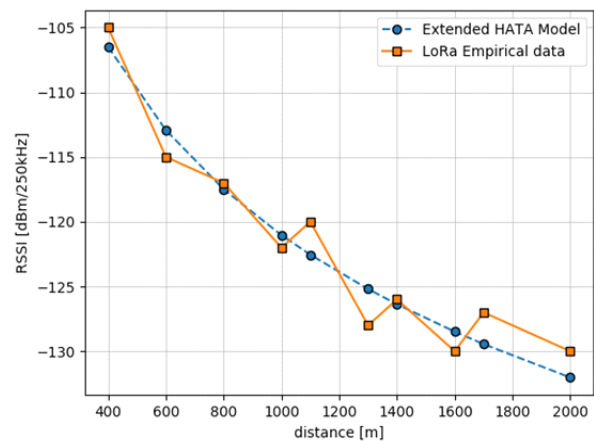


그림 13. LoRa 단말의 수신전계강도 측정값과 extended HATA 모델과의 비교

Fig. 13. Comparison between the received signal strength measurement of LoRa terminal and the extended HATA model.

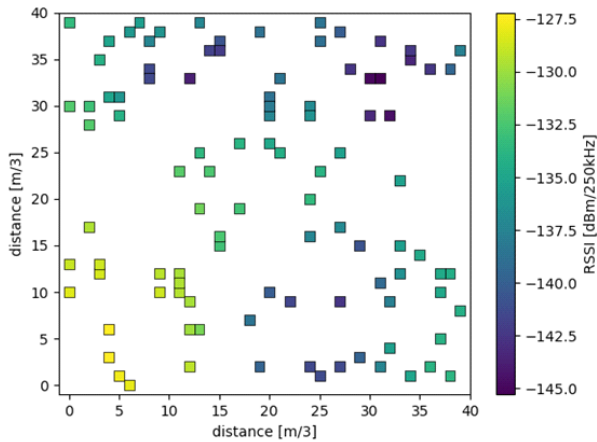


그림 14. Extended HATA 경로손실 모델을 이용한 표본 데이터

Fig. 14. Input data using extended HATA model.

기 위해 1,600개의 표본 데이터 중 무작위로 100개의 표본 데이터를 선정한 후 그림 15와 같이 베리오그램을 계산하여 준 분산 값을 산출하였다.

다음으로 그림 15와 같이 산출된 준 분산 값과 가장 유사한 베리오그램 모델을 찾아야 하며, 이를 위해 Range, Nugget, Sill 파라미터 값을 수동적으로 대입하여 베리오그램 모델을 찾기 위한 반복 과정을 수행해야 한다.

본 모의실험에서는 기존의 수동적 선택에 의한 파라미터를 찾는 방식이 아닌 본 논문에서 제안한 SVM을 이용

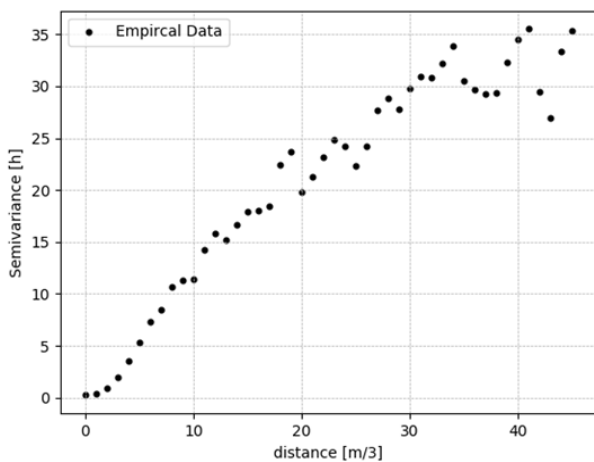


그림 15. 베리오그램을 이용하여 산출한 준 분산 값

Fig. 15. Semi-variance calculated using the variogram.

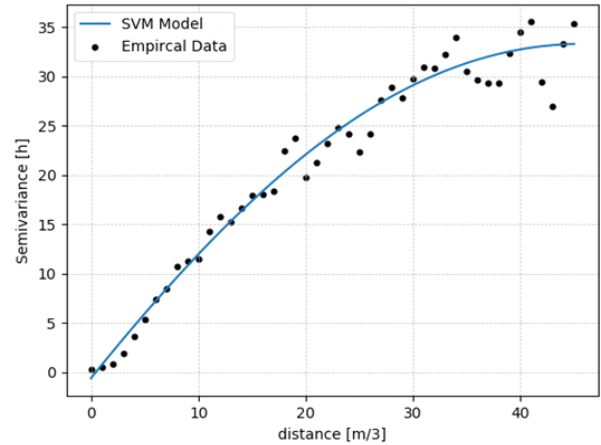


그림 16. SVM 베리오그램 모델(표본 데이터 100개)

Fig. 16. SVM variogram model(100 sample data).

하였으며, 그림 16에서 보여주는 SVM 모델 대비 가장 유사한 형태의 베리오그램 모델을 찾기 위해 RMSE(root mean square error)를 사용하였고, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \hat{Z}_i)^2} \quad (13)$$

여기서 N 은 RMSE에 사용되는 표본 수를 나타내고, Z_i 는 원본데이터, \hat{Z}_i 는 예측 데이터를 나타낸다.

즉, 원본데이터와 예측 데이터의 평균제곱근오차를 나타내며, 주로 회귀 모델 및 예측 모델을 평가하는 방법으로 사용된다. 산출된 파라미터 값은 표 5에서 알 수 있듯이 RMSE 값에 해당하는 Sill, Nugget, Range 값을 이용하여 그림 17과 같이 베리오그램 모델을 생성한 후, 크리깅 보간 기법을 사용하여 전파맵을 생성하였다.

그림 18은 베리오그램 모델 별 크리깅 보간 기법을 이

표 5. 베리오그램 모델 별 최소 RMSE 값

Table 5. Minimum RMSE values for variogram model.

Model	RMSE	Sill	Range	Nugget
SVM	1.27	-	-	-
Exponential	1.28	35	28	0.3
Spherical	1.19	35	26	0.3
Gaussian	1.54	36	29	0.3
Linear	1.24	37	26	0.3

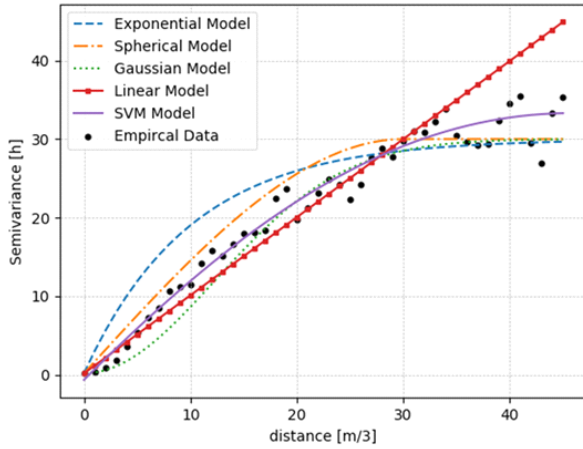


그림 17. 베리오그램 모델별 변화량 추이
Fig. 17. Variation tansion by variogram model.

용한 전파맵 생성 결과를 보여주고 있다. 1,600개 표본 데이터 중 100개의 표본 데이터만 이용하여도 음영지역이 육안으로 확인 가능할 정도로 높은 정확도를 볼 수 있으나, 베리오그램 모델 별 전파맵의 형태는 전체적으로 유사한 것으로 볼 수 있다. 또한 SVM 모델의 경우, 기존 베

리오그램 모델 대비 성능이 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 각 지점 별로 LoRa 단말 수신전계강도 값의 차이가 크게 나지 않고 음영지역의 표현이 비교적 단순하기 때문이다. 향후 도심지역 및 지형, 지하, 건물 등을 적용한 보다 복잡한 환경에서 SVM 모델을 이용한 크리깅 보간 기법을 적용할 경우, 높은 예측 성능을 기대해 볼 수 있을 것으로 예상된다.

다음으로 보다 정확한 크리깅 보간 기법의 성능을 확인하기 위해 표본 데이터 1,600개 중 100개부터 1,500개까지 100개씩 수를 늘려 크리깅 보간 기법을 수행하였으며, 표 6은 표본 데이터 수에 따른 베리오그램 모델 별 RMSE 성능비교 결과를 나타내고 있다. 가우시안 모델의 경우, 다른 베리오그램 모델 대비 성능이 좋지 않은 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 데이터들을 무작위로 선정하여 데이터 간 분포가 밀집되어 있지 않기 때문이다. 또한 표본 데이터의 수가 감소할수록 SVM 모델이 기존 베리오그램 모델 대비 성능이 향상되는 것을 볼 수 있으나, 표본 데이터의 수가 증가할 경우 SVM 모델이 기존 베리오그램 모델 대비 성능이 저하되는 것을

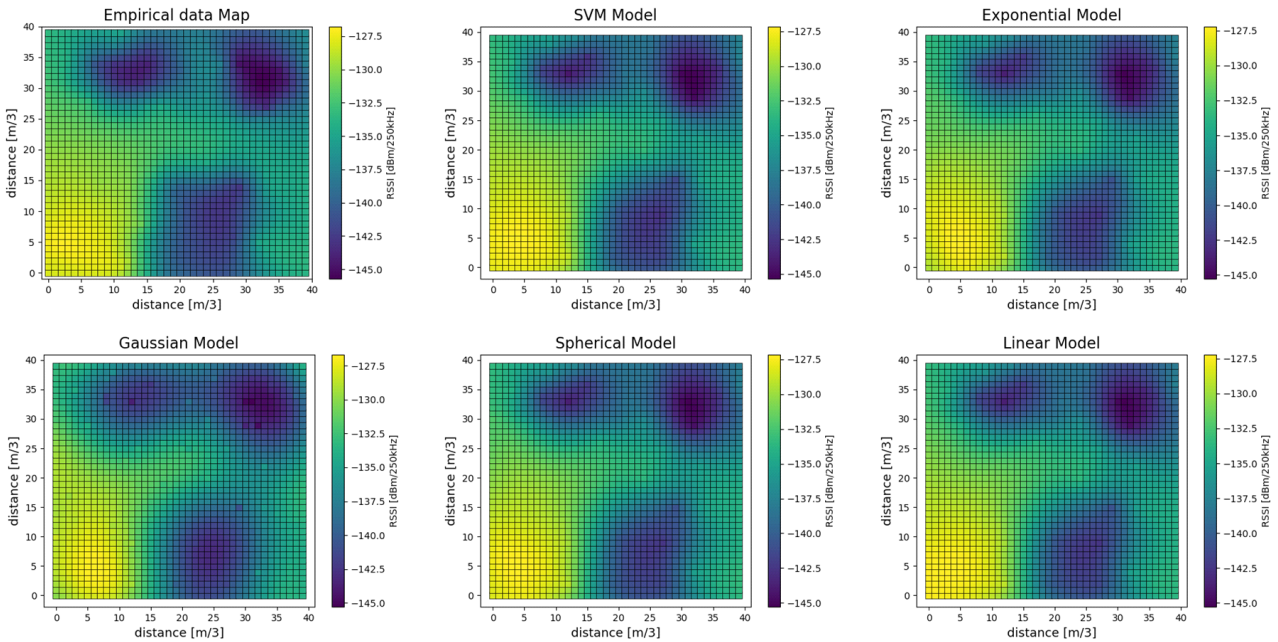


그림 18. 베리오그램 모델 별 크리깅 보간 기법을 이용한 전파맵 생성 결과
Fig. 18. Result of propagation map generation using kriging interpolation technique by variogram model.

볼 수 있다. 이는 그림 19와 같이 표본 데이터가 증가할수록 베리오그램의 준 분산 값이 평준화되어 SVM 적용 모델이 선형적으로 변화하는 문제가 생기기 때문이다.

표 6. 표본 데이터 수에 따른 베리오그램 모델 별 RMSE 성능비교

Table 6. RMSE performance comparison by variogram model according to the number of sample data.

Sample data	SVM model	Exponential model	Spherical model	Gaussian model	Linear model
100	1.27	1.28	1.19	1.54	1.24
200	0.85	0.90	0.87	1.31	0.88
300	0.65	0.68	0.65	1.2	0.68
400	0.47	0.50	0.49	1.11	0.53
500	0.40	0.41	0.4	1.05	0.44
600	0.36	0.35	0.36	0.98	0.38
700	0.33	0.30	0.31	0.90	0.33
800	0.29	0.27	0.28	0.84	0.29
900	0.26	0.25	0.26	0.78	0.27
1000	0.21	0.20	0.21	0.71	0.22
1100	0.17	0.16	0.16	0.62	0.17
1200	0.16	0.14	0.15	0.56	0.15
1300	0.15	0.10	0.11	0.46	0.12
1400	0.12	0.09	0.10	0.40	0.11
1500	0.09	0.03	0.03	0.24	0.04

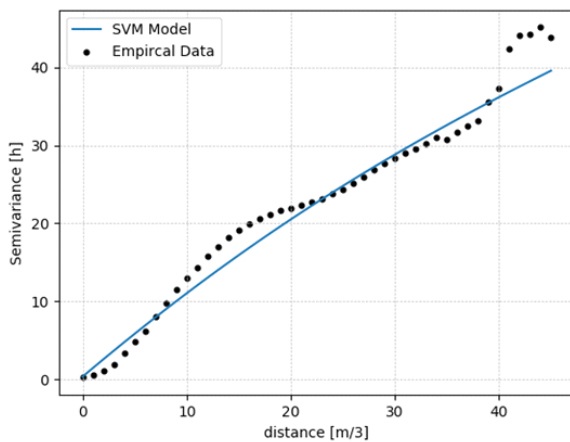


그림 19. SVM 베리오그램 모델(표본 데이터 1,500개플)
Fig. 19. SVM variogram model(1,500 sample data).

크리깅 보간 기법을 실제 전파 환경에서 사용할 경우, 충분한 센싱 데이터를 확보할 수 없는 문제가 존재하며, 본 논문에서 제안하는 주파수 이용정보 거래 시스템은 블록체인의 도입으로 센싱 데이터의 수를 확보하고, SVM 모델을 이용한 크리깅 보간 기법을 이용하여 센싱 데이터의 수가 비교적 적은 상황에서도 높은 정확도의 전파맵을 생성할 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선통신 서비스 간 공동의 주파수 대역에 대한 상호 공존 및 주파수 이용효율 향상, 공유 정보에 대해 높은 레벨의 보안 수준을 달성할 수 있는 블록체인 기반의 주파수 이용정보 거래 시스템을 제안하였으며, 다양한 종류의 베리오그램 모델을 고려한 크리깅 보간 기법의 적용과 베리오그램 모델 별 음영지역에서 수신전계강도 값의 추정성능을 확인하였다. 또한 SVM을 적용한 베리오그램 모델을 구현하여 기존의 베리오그램 모델의 단점인 수동적인 파라미터 입력방식에서 탈피한 지능적이고 자동화된 베리오그램 모델 방식을 제안하였다. 마지막으로 베리오그램 모델을 적용한 크리깅 보간 기법을 이용하여 전파맵을 생성하고, 베리오그램 모델별 전파맵 해상도 비교와 실제 수신전계강도 값과 가장 근접한 성능을 발휘하는 베리오그램 모델을 확인하였다. 향후 무선통신 발전 트렌드는 5G 도입과 함께 자율주행자동차, IoT 등 높은 레벨의 보안 수준 및 고 신뢰의 서비스 품질이 요구되는 융합적 서비스 분야가 더욱 확대될 것으로 예측되고 있으며, 한정된 자원인 주파수의 효율 가치는 빠르게 확대될 것으로 예측되고 있다. 또한 민간 무선통신 서비스 분야와 더불어 군 통신 분야에서도 첨단 무기체계의 확대에 의해 주파수 수요가 확대되고 있으나, 현실적으로 수백 GHz 및 THz 대역 등 매우 높은 수준의 주파수 대역을 즉시 이용하기에는 요원한 실정이다. 이에 대부분의 공공 및 민간 무선통신 서비스가 이용되거나 이용될 예정인 수백에서 수십 GHz 대역 주파수에 대한 이용효율 향상방안은 필수적이며, 기술적으로는 주파수 관리를 위한 지능화된 시스템 구축 및 실현방안 마련이 시급한 과제라 할 수 있으며, 향후 추가적인 고도화 연구를

통하여 미래 지능화된 스펙트럼 관리 분야에 있어 높은 수준의 기여가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. P. Choi, W. C. Lee, "Study on the introduction of spectrum policy to revitalize the domestic spectrum," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 200-213, Mar. 2018.
- [2] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," 2008. Available: <http://www.bitcoin.org>
- [3] Y. Lee, H. Y. Kim, C. G. Kim, and J. S. No, "On cryptographic primitives for blockchain," *Communications of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, vol. 36, no. 12, pp. 17-22, Dec. 2018.
- [4] S. B. Park, H. S. Kim, and W. C. Lee, "LoRa using smart contract-based spectrum information trading platform," in *the Conference of The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 2019, no. 1, pp. 1578-1592, Jan. 2019.
- [5] V. Buterin, "A Next-generation Smart Contract and Decentralized Application Platform," Ethereum White Paper, 2014. Available: https://cryptorating.eu/whitepapers/Ethereum/Ethereum_white_paper.pdf
- [6] R. Sidler, K. Holliger, *Kriging and Conditional Geostatistical Simulation Based on Scale-invariant Covariance Models*, Swiss Federal, Institute of Geophysics Department of Earth Science, Oct. 2003.
- [7] S. Kim, "The estimation of the variogram in geostatistical data with outliers," Ph.D. dissertation, Okayama University, Okayama, Mar. 2015.
- [8] C. V. Deutsch, "Correcting for negative weights in ordinary kriging," *Computers & Geosciences*, vol. 22, no. 7, pp. 765-773, Aug. 2018.
- [9] M. Hofmann, *Support Vector Machines: Kernels and the Kernel Trick*, Jun. 2006. Available: http://www.cogsys.wiai.uni-bamberg.de/teaching/ss07/hs_rc/slides/SVM_Seminarbericht_Hofmann.pdf
- [10] T. B. Trafalis, H. Ince, "Support vector machine for regression and applications to financial forecasting," in *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium*, Como, 2000, vol. 6, pp. 348-353.
- [11] SEMTECH, "An1200.22 LoRa modulation basic," 2018. Available: <http://www.semtech.com>
- [12] D. H. Yi, S. C. Kim, "Analysis of computer simulated and field experimental results of LoRa considering path loss under LoS and NLoS environment," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 2, pp. 444-452, Feb. 2017.
- [13] SEAMCAT, "SEAMCAT Handbook Edition 2," European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, ECC Report 252, pp. 360-365, 2016.

박 승 범 [숭실대학교/전임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4340-3745>



2017년 2월: 숭실대학교 부설 평생교육원
정보통신공학과 (공학사)

2019년 8월: 숭실대학교 정보통신공학과
(공학석사)

2019년 9월~ 현재: 숭실대학교 전자정보공
학부 전임연구원

[주 관심분야] 주파수 공동사용, 스펙트럼

모니터링 기술, 블록체인, 인공지능, 지리정보시스템

이 원 철 [숭실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6250-9342>



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학
사)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
석사)

1994년 5월: 미국 Polytechnic Institute of
New York University, Electrical Engineer-
ing (공학박사)

1995년 9월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 교수

2017년 1월~현재: 한국전자파학회 상임이사

2014년 3월~2016년: 미래부 주파수 공동사용 제도개선 연구반
위원

2014년 3월~현재: TTA PG901 부의장 및 WG9013 의장

2013년 1월~현재: 미래부 TV White Space 운영작업반 위원장

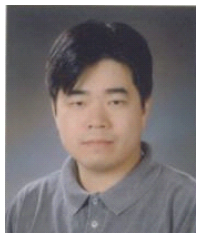
2013년 1월~현재: 한국통신학회 상임이사

2010년 1월~현재: 한국전자파학회 CR·SDR 연구회 위원장

[주 관심분야] Cognitive Radio, TV White Space, 주파수 공동사
용, 간섭분석, 디지털 필터설계

최 주 평 [숭실대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2242-2218>



2001년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학
석사)

2010년 8월: 숭실대학교 정보통신공학과
(공학박사)

2013년 12월~현재: 숭실대학교 지능인지
통신연구소 연구교수

2014년 3월~현재: TTA PG901 위원 및

WG9013 부의장

2013년 7월~2013년 11월: 한국전파진흥협회 선임연구원

2011년 3월~2013년 2월: CR/SDR 포럼 서비스 분과 간사

2010년 9월~2013년 2월: 숭실대학교 지능인지통신연구소 연구
교수

2003년 3월~2006년 12월: 새턴정보통신(주) 전기정보사업부 책
임연구원

[주 관심분야] 주파수 공동사용, 주파수 정책, Cognitive Radio,
TV White Space, 스펙트럼 모니터링 기술, 간섭분석