韓國 컴퓨터情報學會 論文誌
第13卷 第2號, 2008. 3.

2008-13-2-1-6

공동체 라디오 방송을 위한 주파수 할당의 최적화

손 석 원*, 한 광 록**

Optimization of Frequency Assignment for Community Radio Broadcasting

Surgwon Sohn*, Kwang-Rok Han**

요 약

본 논문에서는 주파수 할당의 최적화를 위하여 제약만족문제의 모델링과 백트랙킹 탐색의 경험적 알고리즘을 제안한다. 연구의 목적은 주어진 서비스 영역에서 공동체 라디오 방송국의 개수를 최대화 하면서 동시에 필요 주파수를 최소화시키는 제약조건을 만족하는 주파수 할당이다. 본 연구는 효과적으로 해를 찾기 위하여 경험적 알고리즘을 제안하는데, 이것은 제한된 시간 안에 해를 찾는데 필요한 백트랙킹 횟수를 최소화하는 변수 순서와 값 순서에 관한 방법이다. 백트랙킹에서 불일치성을 늦게 발견하는 문제를 보완하기 위해서 일관성 강화기술 또는 제약 전파 방법을 사용한다. 백트랙킹 탐색과 일관성 강화 기술을 함께 사용함으로써 제약만족문제에 관한 보다 강력하고 효과적인 알고리즘을 얻을 수 있다. 본 논문은 또한 계산된 해와 이론적인 하한 값을 비교함으로써 제안된 알고리즘의 성능 비교를 수행한다.

Abstract

We present a modeling of constraint satisfaction problems and provide heuristic algorithms of backtracking search to optimize the frequency assignment. Our research objective is to find a frequency assignment that satisfies all the constraints using minimum number of frequencies while maximizing the number of community radio stations served for a given area. In order to get a effective solution, some ordering heuristics such as variable orderings and value orderings are provided to minimize the backtracking in finding all solutions within a limited time. To complement the late detection of inconsistency in the backtracking, we provide the consistency enforcing technique or constraint propagation to eliminate the values that are inconsistent with some constraints. By integrating backtracking search algorithms with consistency enforcing techniques, it is possible to obtain more powerful and effective algorithms of constraint satisfaction problems. We also provide the performance evaluation of proposed algorithms by comparing the theoretical lower bound and our computed solution.

▸ Keyword : 주파수 할당(Frequency Assignment), 공동체 라디오(Community Radio), 제약만족문제(Constraint Satisfaction Problem), 경험적 탐색(Heuristic Search)

• 제1저자 : 손석원 교신저자 : 한광록
• 접수일 : 2008. 2. 1, 심사일 : 2008. 2. 15, 심사완료일 : 2008. 3. 8.
* 호서대학교 뉴미디어학과 부교수 **호서대학교 컴퓨터공학부 교수

I. 서 론

공동체 라디오는 FM 주파수 대역에서 1W 이하의 작은 출력을 이용해 제한된 지역을 대상으로 실시하는 방송으로서 소출력 라디오라고도 불리며, 최대 전파 도달거리는 약 2km 정도이다. 국내의 경우에는 2004년 11월에 8개 시범사업자를 선정하여 2005년도부터 시범운영을 하였다. 미국의 경우에는 2000년 FCC 에 의하여 허가되었으며[1] 유효출력 100 W를 최대출력으로 정하고 비영리기관에만 허가한다. 일본, 영국, 호주 등은 20W 정도의 출력을 허가하며, 일본의 경우 그 숫자가 2004년도에 160개국을 상회하였다. 그러나 현재 상업용 FM 방송국에서 사용하는 주파수 대역을 같이 사용함으로써 서로 간섭현상이 발생하며, 이 간섭현상을 최소화시키면서 최대 개수의 공동체 라디오 방송을 운영하기 위해서는 주파수 할당을 최적화하여야 한다. 본 논문은 이러한 목적을 위해서 FM 방송 주파수에서 기존의 상업용 FM 방송국과 공동체 라디오 방송국이 공존할 수 있도록 주파수 할당문제에 관하여 기술하고, 그 문제를 제약만족기법을 이용하여 최적화 문제로 모델링하며 그에 대한 근사 해를 구한다.

FM 신호는 VHF 주파수 대역의 88 - 108 MHz 에서 송신되는데, FM 방송 한 채널이 200 KHz 이므로 총 100개의 채널이 1번부터 100번 까지 채널번호로 할당된다. 이 연구의 목적은 주파수 할당에 있어서 여러 가지 제약조건을 만족하면서 최소의 주파수를 사용하는 주파수 할당 최적화인데, 이 문제는 그래프 채색 (Graph Coloring) 문제로 귀결된다는 결과가 많은 연구자들에 의해서 입증되었다[2][3][4]. 이 문제에 있어서 색은 주파수를 나타내고 정점 (Vertices) 은 송신기를 의미하게 모델링할 수 있다. 또한 이 송신기들은 서비스 영역을 잘게 나눈 셀에 위치하며, 송신기들을 연결하는 절선 (Edges) 들은 같은 주파수에 이들 송신기들이 할당될 수 없다는 제약조건을 의미하게 된다. 즉, 이 문제의 해는 결국 연결되지 않은 모든 정점들을 서로 다른 색으로 색칠하는 최소의 색채 수 (Chromatic Number)를 찾는 것이 된다.

II. 관련 연구

주파수 할당문제는 1970년대부터 연구가 진행되어 왔는데, 특히 이동통신의 주파수 할당에 관하여 연구가 활발하였다. 1980년에 Hale 은 방송에 있어서 자동 주파수 할당에 관한 연구를 하였고, 그 결과 주파수 할당이 그래프 채색과 같다는 사실을 밝혔다[5]. 이 그래프 채색 문제는 많은 연구가 되어 계산 복잡도가 NP-hard 인 문제로 밝혀졌다. 따라서 이 문제의 완전 해는 복잡도가 증가할수록 기하급수적인 시간이 걸리게 된다. 최적 해를 찾기 위하려 Giortizis는 정수 선형계획법 (Integer Linear Programming) 의 한 방법으로 분기 한정법 (Branch and Bound) 을 사용하였다[2].

이 그래프 채색 문제는 NP-hard 문제이기 때문에 대부분의 경우에 완전해를 구하는 것은 시간이 너무 걸려서 실용적이지 못하다. 따라서 근사 해를 구하는 많은 경험적 방법 (Heuristic Algorithm) 들이 제안되었다. 즉 시뮬레이티드 어닐링 (Simulated Annealing), 타부 검색 (Tabu Search), 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm) 등이 제안되어 근사 해를 빠른 시간 내에 구할 수 있게 되었다. Dunkin 과 Thiel 은 이러한 경험적 탐색 (Heuristic Search) 방법 이외에 언덕 등반 (Hill Climbing) 방법을 이용하여 근사 해를 구하기도 하였다[6][7]. 최근에는 Wang 이 이동통신의 주파수 할당 문제에 대해서 신경망 회로 (Neural Network) 를 이용해서 푸는 방법을 제안하기도 하였다[8]. 또한 제약만족문제 (Constraint Satisfaction Problem) 라고 불리는 CSP 방법을 이용해서 이러한 문제를 해결하는 방법이 Carlsson, Walsher, Yokoo 등에 의해서 제안되기도 하였다[9]. 최근에는 이러한 CSP 방법에 있어서 제약 프로그래밍 (Constraint Programming) 을 이용한 제약전파 (Constraint Propagation) 보다 수학적 프로그래밍 (Mathematical Programming) 을 이용한 제약전파가 더 효과적이라는 연구결과가 나왔다[10]. 따라서 이 결과는 현재 많은 연구자들에 의해 진행 중인 수학적 프로그래밍과 제약 프로그래밍의 혼합 방법 (Hybrid Method)에 미칠 영향이 어떠한가를 지켜보아야 할 것이다.

이러한 접근 방법들 중에서 많은 수는 완전해가 아닌 근사해를 구하는 방법들인데 최적 해에 매우 근접한 해이다. 이러한 근사해의 정확도를 측정하기 위해서는 이론적인 하한 값 (Lower Bound) 을 구해서 비교하여야 한다. 그래프 색채문제에서 필요한 최소의 색채 수에 관한 이론적 하한 값은 오랫동안 여러 연구가 진행되어왔다[11][12][13]. 다른 한 편으로는 이동 통신의 주파수 할당문제에 있어서의 하한 값을 구하는 연구도 행하여졌다[14][15]. Achlioptas와 Naor에 의하여 구해진 이론적 하한 값은 가장 최근에 이루어진 색채 수에 관한 정확한 값으로서 본 연구에 의해 구하여진 근사 값의 정확도를 측정하는데 사용된다. 그것은 주파수 할당문제가 궁극적으로 그래프 색채문제로 귀결되기 때문이다. 본 연구는 그래프 채색문제를 푸는데 있어서 제약만족문제의 기법을 사

용하여 기존의 근사해보다 성능이 우수한 해를 구한다. 성능 검토는 랜덤 그래프 이론에서 구해진 이론적 하한 값을 본 연구에서 계산된 값과 비교한다.

III. 주파수 할당문제의 모델링

많은 조합문제 (Combinatorial Problem) 들은 제약만족문제 (CSP) 로 표현될 수 있다. 또한 주파수 할당문제 역시 CSP 문제로 볼 수 있다[3][4][9]. CSP 문제는 변수의 집합, 변수에 할당되는 값들의 집합인 도메인 (Domain), 그리고 변수들 사이에 동시에 할당되는 값을 제한하는 제약조건 (Constraint) 들로 구성된다[17].

정의 1. CSP 문제는 〈X,D,C〉이다. 이 때

- $X=\{X_1,...,X_n\}$ 는 변수들의 유한집합이고
- $D=\{D_{x_1},...,D_{x_n}\}$ 는 가능한 값들의 유한집합이다. 여기서 D_{x_i} 는 변수 X_i 의 도메인이다.
- $C=\{C_{x_1,...,x_k} | 1 \le k \le n\}$ 는 제약조건들의 유한집합이다.

제약조건의 차수 (Arity) 는 이 제약조건이 갖는 변수의 수로 나타내어진다. CSP 가 2진 (Binary) 이라고 하는 것은 결국 각각의 제약조건이 2개의 변수에 대하여 갖는 제약을 말한다. 2진 CSP 는 제약 그래프 (Constraint Graph) 인 $G=(V,E)$로 나타내어지며 이 때, 정점 $v \in V$ 는 변수에 대한 것이며 절선 $e \in E$ 는 각각의 제약조건에 관한 것이다. CSP 에 관한 해는 모든 변수들이 제약조건을 만족하는 범위 안에서 도메인의 값들로 할당되는 것이다. 주파수 할당문제에 있어서는 필요한 최소의 주파수를 목적함수로 생각할 수 있다. 또한 모든 변수에 값들을 할당하는 체계적 탐색 (Systematic Search) 과 해로 인식되지 않는 탐색공간을 미리 가지 치는 제약전파 (Constraint Propagation) 의 융합으로 이 문제를 모델링할 수 있다. 주파수 할당문제에 있어서 각각의 송신기는 변수로 생각할 수 있으며, V는 송신기들의 집합으로 나타낸다. 할당될 가능한 주파수의 집합은 변수의 도메인으로 표현된다. 즉, 도메인은 D_i는 송신기 i가 취할 수 있는 주파수의 도메인이 된다. 주파수들 사이에는 제약조건들이 다음과 같이 표현된다.

* 동일 채널 제약 (Co-Channel Constraint, CCC) - 서로 다른 셀에 있는 송신기들은 같은 주파수를 사용해서는 안된다. 단, 충분히 떨어져 있다면 가능하다. 만약 송신기 i 와 j 에 대하여 할당된 주파수가 f_i 와 f_j 로 표현되고 $d(i,j)$ 가 두 송신기의 거리라고 표현되며 k 는 충분히 떨어진 거리라고 한다면, 이 제약조건에서 만약 $d(i,j) \le k$ 이라면 $f_i \ne f_j$ 이다.

* 인접 채널제약 (Adjacent Channel Constraint, ACC) - 서로 다른 곳에 있는 두 송신기가 인접한 간섭거리 안에 있다면 이 두 송신기는 인접 채널을 사용할 수 없다. 인접채널은 보통 1 - 3 채널 안에 위치한다. 따라서 이 제약조건은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$|f_i - f_j| \ge c_{ij}$$

여기서 $i \ne j$ 이고 c_{ij} 는 채널 간 이격거리를 나타낸다. ACC 는 n 정점의 제약 그래프에서 n x n 행렬로 나타내어지며, 간섭도 같은 제약 그래프로 나타내어진다. 각각의 송신기 쌍 (u,v) 에 대해서 최소 주파수 거리를 나타내는 c_{uv} 값으로 나타낸다.

* 동일지역 제약 (Co-Site Constraint, CSC) - 같은 셀 안의 채널들은 적어도 지정된 주파수 거리 이상을 유지하여야 한다. FM 방송에서는 주로 4 채널 이상을 유지하여야 간섭이 생기지 않는다.

* 중간주파 제약 (Intermediate Frequency Constraint, IFC) - 송신 또는 수신을 위해서 캐리어 (Carrier) 주파수가 중간 단계의 주파수로 이동되는데 이 중간 단계의 주파수를 IF 주파수라고 한다. 어떤 셀 또는 인접한 셀에 할당된 두 주파수는 이 IF 주파수만큼 차이가 나야 좋은 수신 신호를 얻을 수 있다.

* 주파수 블록제약 (Blocked Frequency Constraint, BFC) - 몇몇 주파수는 이미 상업 FM 방송국에 의해 사용 중이기 때문에 할당이 불가능하게 된다. 이러한 주파수들은 벡터로 표현된다.

* 기존할당 제약 (Preassigned Frequency Constraint, PFC) - 기존의 지역에 할당된 소출력 FM 방송국에 의하여 주파수들이 할당될 수 없는 제약을 말한다.

이동통신 시스템에서는 CSC 제약조건이 있지만 본 시스템에서는 한 셀에 하나의 주파수만 할당된다는 조건이 있으므로 이 제약조건이 제거된다. 또한 CCC 제약조건은 ACC 에 포함된다.

IV. 주파수 할당문제를 위한 CSP 알고리즘

CSP 문제는 기본적으로 생성-시험 (Generate and

Test) 의 구조를 이용해서 문제를 푼다. 그러나 보다 효율적인 방법으로서 백트랙킹 (Backtracking) 방법을 사용하는데, 이것은 트리구조에서 노드가 되는 변수들을 차례로 대입하는 것이다. 이 백트랙킹법은 기본적으로 탐색공간에서 깊이 우선탐색 (Depth First Search) 을 시도한다. 도메인 D 의 첫 번째 주파수 d_1 이 송신기 i 에 할당되는 것은 $f_i = d_k$, $k=1$ 로 표시된다. 백트랙킹 알고리즘은 이미 할당된 주파수 f_j ($\forall j < i$) 에 관하여 제약 위반사항을 점검한다. 만약 이때 위반사항이 없다면 백트랙킹 알고리즘은 도메인에서 다음 주파수를 검사한다. 즉, $f_i = d_{k+1}$ 이 된다. 만약에 도메인에 있는 모든 주파수가 할당되지 못한다면 알고리즘은 전에 할당된 송신기로 백트랙하게 된다. 백트랙킹 알고리즘의 i 번째 단계에서 i 개의 변수들은 값들을 할당받게 된다. 이 때 변수는 정적 또는 동적으로 선택되어 값이 할당된다. 정적이라는 말은 탐색이 진행되기 전에 변수가 선택된다는 것이고, 동적이라는 것은 탐색되면서 변수가 정해진다는 것이다.

단순 백트래킹, 즉 초기에 정해진 순서대로 깊이 우선 탐색을 하는 것보다 탐색해 나갈 가지들의 순서를 정할 경우에 보다 효과적인 탐색이 될 수 있다. 이 가지는 변수로 생각할 수 있다. 또한 이 변수에 값을 할당하는 경우에도 초기 값의 순서대로 값을 할당하지 않고 어떠한 순서를 만들어서 그 순서에 따라 할당하면 보다 효과적으로 해를 찾을 수 있다. 이것이 제약만족문제 (CSP) 에 있어서 해를 구하는 기본 백트래킹 기법이 된다. 이러한 변수 순서화 (Variable Ordering) 와 값 순서화 (Value Ordering) 는 CSP 의 해를 탐색공간의 좌측으로 옮긴다. 따라서 CSP 해는 경험적인 백트랙킹 알고리즘에 의해서 빨리 찾을 수 있게 된다.

경험적 변수 순서화 기법 중에서, 일반적으로 fail-first 기법에 의해서 변수가 선택되는데, 이것은 어느 변수가 빨리 실패하는가를 검사해서 그 변수를 선택한다는 말이다. 변수가 빨리 실패한다는 것은 그 만큼 빨리 가지를 쳐 낼 수 있기 때문에 유용한 것이다. 이 개념을 이용한 것이 최소 도메인 우선 (Smallest Domain First) 변수 순서화 방법이다. 이것을 이용하면 브랜치 (Branch) 의 깊이를 최소화할 수 있다. 변수에 해당하는 특정 송신기가 선택되었다면 알고리즘은 이제 값에 해당하는 주파수를 선택하여 할당시킨다. 사용된 주파수의 개수를 최소화하기 위하여 지금까지 할당된 것 중에서 가장 많이 사용되었던 주파수를 값으로 송신기에 할당시킨다. 이것은 most-used 값 순서화 방법이라고 한다.

주파수 할당 문제는 전통적으로 Brelaz 가 제안한 그래프 채색에 가장 효과적인 포화도 (Saturation Degree) 알고리즘인[17] Dsatur 을 사용하여 해를 구하였으며 이것은 동적 변수 순서화 방법에 해당된다. 즉, 주파수 값들의 도메인이 가장 작은 변수를 찾아서 먼저 주파수를 할당한 다음에 다음 도메인 크기가 작은 변수를 선택한다. 도메인 크기란 할당할 수 있는 주파수의 개수를 말한다. 만약에 같은 크기의 변수가 나타나면 연결 인접도 (Connectivity or Degree) 가 큰 변수를 선택한다. 연결인접도는 Freuder 에 의해서 제안된 것으로서[18] 이것은 탐색하기 전에 이미 변수의 순서가 정해지는 정적 변수 순서화 법이다. 즉, 연결인접도는 변수를 선택함에 있어서 도메인 크기가 같을 경우에 차선책으로서 변수 선택의 판단 근거가 되는 것이다.

본 연구에서는 변수 선택의 방법으로서 도메인 크기만을 고려하지 않는다. 그 이유는 주파수 할당 문제가 도메인의 크기도 변화하지만 연결 인접도도 변화하기 때문이다. 따라서 도메인의 변화뿐만 아니라 정점 (Vertex) 들의 연결인접도를 동시에 고려한 복합 알고리즘을 제안한다. 즉 도메인의 변화에 주목하는 동적 변수 순서화법과 연결인접도의 변화에 주목하는 정적 변수 순서화법을 동시에 고려한 $wdom-\deg$ 알고리즘을 제안한다. 여기서 dom 은 변수들이 가질 수 있는 값들의 집합이고 deg 은 변수들의 연결인접도를 뜻한다. 즉, 브랜치마다 크기가 달라지는 동적 요소인 dom 과 크기가 고정되어 있는 정적요소인 deg 를 복합적으로 사용하여 변수 순서화를 진행한다. w 는 도메인과 연결인접도의 크기가 매우 다를 경우, 변수 선택에 있어서 한 쪽으로 치우치는 것을 방지하기 위한 것으로 실험적으로 얻어진 가중치이다.

CSP 문제를 푸는데 있어서 변수 순서화와 값 순서화 이외에 또 다른 중요한 것은 일관성 강화 (Consistency Enforcing) 알고리즘인데 이것은 탐색트리에 적용되어서 가능 해에 나타나지 않을 도메인의 값들을 제거하는 것이다. 2진 CSP 문제에 있어서 가장 많이 쓰이는 일관성 강화법은 전방 검사 (Forward Checking) 방법이다. 변수 u 가 할당되었을 때, 전방 검사법은 제약조건으로 연결되었으나 또한 값이 할당되지 않은 변수 v 를 조사하여 이 변수에 할당될 수 없는 값을 v 의 도메인으로부터 삭제한다. 따라서 탐색실패와 더불어 백트랙킹이 빨리 발생하게 된다. 이러한 변수 순서화 방법과 값 순서화 방법을 이용하여 깊이 우선 탐색을 실행하고 최적 값을 위하여 분기 한정법을 이용한다.

V. 실험결과 및 성능분석

모델링을 단순하게 하기 위하여 서비스 영역을 일정한 크기의 정사각형 셀로 나누어 실험하였다. 서비스 영역은 총 5,000 m x 5,000 m 로 이루어진 정사각형 넓이의 영역으

로 되어 있고, 이것을 다시 500 m x 500 m 의 크기로 나누어 총 100개의 셀로 구성된 서비스 영역을 정하였다. 하나의 셀 안에는 오직 한 개의 송신기만 설치될 수 있다. 또한 지형적인 이유로 송신기가 설치될 수 없는 셀도 존재한다.

FM 채널의 수는 총 100 개 채널이 존재하지만, 서울 지역에는 이미 75 개 채널이 상업방송 등 기존의 방송국에 의해서 점유되어 이들 주파수에는 할당할 수 없게 되어 있다. 따라서 나머지 25 개 주파수를 이용하여 공동체 라디오 방송의 송신기에 할당하여야 한다. FM 수퍼헤테로다인 수신기에서는 중간 주파수 (IF) 로 보통 10.7 MHz 를 사용하므로 주파수 간섭을 제거하기 위해서는 이 IF 주파수만큼 주파수거리가 존재해서는 안 된다. 따라서 이 10.7 MHz 를 채널수로 바꾸면 10.7 MHz/200 KHz = 53.5 채널 간격이 있는 송신기는 인접 셀에 설치가 될 수 없다. 실제로 정수 채널을 사용하므로 53 또는 54 채널이 차이가 나는 서로 다른 두 채널은 인접 셀에 설치될 수 없게 된다.

실험에서 소출력 송신기의 안테나 높이는 25 m 로 정하고 송신기의 유효 출력 전력 (Effective Radiated Power) 은 국내 법규상 1W 로 정하였다. 이러한 실험 데이터는 정보통신정책연구원이 수행한 실험을 사용하였다[19]. 실험에서 75 개의 주파수가 도메인에서 제거되었으므로 총 탐색공간은 25^{100} 이 된다. 다음 표 1은 여러 가지 변수 순서 방법을 이용한 알고리즘의 성능을 나타낸 것이다. 여기서 SB 는 변수 순서화 및 값 순서화를 하지 않고 단순 백트랙킹 (Simple Backtracking) 을 사용하였을 경우이다. NV 는 변수 순서화를 사용하지 않고 값 순서화 방법만 행하였을 경우이며, 이 때 most-used 값 순서 방법을 사용하였다.

표 1. 변수 순서 방법 알고리즘의 성능
Table 1. Performance of Variable Ordering Heuristic Algorithms

변수순서 방법	필요 채널수	총 노드 수	실행시간 (초)
SB	17	7,867,085	715.36
NV	17	3,444,129	358.13
deg	16	40,988	7.58
dom	17	3,773	0.88
Dsatur	15	71,898	18.01
$wdom-\deg$	15	8,296	2.25

위 실험에서 얻어진 결과가 최적 해에 얼마나 근접하였는가를 측정하기 위해서 이론적 하한 값을 알 필요가 있다. 이러한 이론적 하한 값 (Lower Bound) 은 많은 연구자들에 의해서 연구되었다[7][14][15]. 그래프의 클릭 (Clique) 은 완전 부분그래프 (Complete Subgraph) 의 최댓값이다. 또한 주어진 그래프의 클릭을 구하는 문제는 NP-완전 (Complete) 문제이다. 그래프 G 에서 최대 클릭의 정점의 수는 $\omega(G)$ 로 나타낸다. 즉 임의의 그래프에서

$$\omega(G) \geq \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n-d_i} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 n 은 그래프의 정점의 수이고, d_i 는 그래프의 정점 i 의 차수 (Degree) 이다. 그래프 G 에서 색채 수 (Chromatic Number) $\chi(G)$ 는 인접한 정점의 색이 같지 않게 색칠하는데 필요한 최소수이다. 그래프에서 색채 수는 항상 클릭 수보다 크거나 같다.

$$\chi(G) \geq \omega(G) \quad \cdots\cdots (2)$$

랜덤 그래프 (Random Graph) 는 정점의 수, 절선의 수, 그리고 연결이 서로 임의로 되어 있는 그래프를 말한다. 일반적으로 n 정점을 갖는 랜덤 그래프에서 절선은 확률 p 로 독립적으로 선택된다면 $G(n,p)$ 로 나타내어진다. 이 모델은 과거 1970년대부터 수십 년간 연구되어진 분야로서 색채 수 $\chi(G(n,p))$ 가 연구의 중요한 테마가 되어 왔다. 실제로 최근에 아래 정리 1 과 같이 Achlioptas 와 Naor 에 의해서 랜덤 그래프의 중요한 연구결과가 발표되었다[13].

정리 1. $d\in(0,\infty)$ 일 때 $d<2k\log k$ 가 되는 가장 작은 정수를 k_d 라 하자. 만약 $n\to\infty$ 일 때 다음 식은 확률 값 1 로 수렴한다.

$$\chi(G(n,d/n)) \in k_d, k_d+1 \quad \cdots\cdots (3)$$

실제로 $\chi(G(n,p))$ 는 대부분의 중간 값 $d\in(0,\infty)$ 을 이용해서 구해질 수 있다. 즉, 위 정리 1 에서 볼 수 있듯이 25 개의 채널과 75 개의 셀에서 이론적인 색채 수의 하한 값은 13 또는 14 이다. 표 1 의 실험에서 구한 색채 수는 Dsatur 알고리즘의 경우 15 이고 본 연구에서 제안한 $wdom-\deg$ 알고리즘의 경우에도 15 주파수가 필요하다. 그러나 탐색할 때 필요한 총 노드의 수와 실행 시간에 있어서 $wdom-\deg$ 알고리즘이 더 우수하였다. 따라서 실험에 사용된 알고리즘은 근사해로서 성능이 좋은 것임을 알 수 있다.

Ⅵ. 결론

본 논문에서는 공동체 라디오 방송을 위한 주파수 할당문제를 제약만족문제 (CSP) 로 모델링하고, 그에 따른 변수 순서 방법 및 값 순서 방법의 경험적 탐색법을 이용하여 제약만족문제의 최적화된 해를 구하였다. 이 문제는 기본적으로 그래프 채색 문제와 같아서 NP-hard 문제이며 랜덤 그래프에서 색채 수를 구하는 문제와도 같다. 제약만족문제에 있어서 중요한 변수 순서 방법에 대하여 기존의 *Dsatur* 알고리즘보다 더 우수한 $wdom-\deg$ 알고리즘을 제안하여 최소 필요 주파수의 근사 값을 구하였으며, 이 근사 값을 랜덤 그래프의 이론적인 색채 수와 비교하여 그 성능이 우수함을 입증하였다.

참고문헌

[1] Federal Communications Commission, http://www.fcc.gov/mb/audio/lpfm

[2] A.I. Giortzis, L.F. Turner, "Application of Mathematical Programming to the Fixed Channel Assignment Problem in Mobile Radio Networks," IEE Proceedings of Communication, vol. 144, pp.257-264, 1997.

[3] M. Carlsson, M. Grindal, "Automatic Frequency Assignment for Cellular Telephone Using Constraint Satisfaction Techniques," Proceedings of the Tenth International Conference on Logic Programming, pp. 647-665, 1993.

[4] J.P. Walsher, "Feasible Cellular Frequency Assignment Using Constraint Programming Abstractions," Proceedings of the Workshop on Constraint Programming Applications, 1996.

[5] W.K. Hale, "Frequency Assignment:Theory and Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 68, pp. 1497-1514, 1980.

[6] N. Dunkin, S. Allen, "Frequency Assignment Problems: Representation and Solutions," Technical Report CSD-TR-97-14, Royal Holloway, University of London, 1997.

[7] S.U. Thiel, S. Hurley, D.H. Smith, "Frequency Assignment Algorithms," Technical Report Year 2, University of Wales Cardiff, 1997.

[8] L. Wang, S. Li, F. Tian, X. Fu, "A Noisy Chaotic Neural Network for Solving Combinatorial Optimization Problems: Stochastic Chaotic Simulated Annealing," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 34., no. 5, pp. 2119-2125, 2004.

[9] M. Yokoo, K. Hirayama, "Frequency Assignment for Cellular Mobile Systems Using Constraint Satisfaction Techniques," IEEE Int'l Proceedings of Vehicular Technology Conferences, 2000.

[10] I.D. Aron, D.H. Leventhal, M. Sellmann, "A Totally Unimodular Description of the Consistent Value Polytope for Binary Constraint Programming," In Proceedings of the Third International Conference on Integration of AI and OR Techniques (CP-AI-OR), Springer Verlag, pp. 16-28. 2006.

[11] B. Bollobas, The Chromatic Number of Random Graphs, Combinatorica 8, pp.49-55, 1988.

[12] T. Luczak, The Chromatic Number of Random Graphs, Combinatorica 11, pp.45-54, 1991.

[13] D. Achlioptas, A. Naor, The Two Possible Values of the Chromatic Number of a Random Graph, Annals of Mathematics, 2005.

[14] A. Gamst, Some Lower Bounds for a Class of Frequency Assignment Problems, IEEE Proceedings on Vehicular Technology, vol. VT-35, pp. 8-14, 1986.

[15] D.H. Smith, S. Hurley, Bounds for the Frequency Assignment Problem, Discrete Mathematics 167/168, pp. 571-582, 1997.

[16] E. Tsang, Ed., Foundations of Constraint Satisfaction. Academic Press, 1993.

[17] D. Brelaz, New Methods to Color the Vertices of a Graph, Communication of the ACM 22(4), pp.251-256, 1979.

[18] E. C. Freuder, ""A sufficient condition for backtrack-free search,"" Journal of ACM, vol. 29, no. 1, pp. 24-32, 1982.

[19] 정보통신정책연구원, 소출력 라디오방송 활성화를 위한 법제도 연구, 무선관리단, 2002.

저 자 소 개

손 석 원

1985년 2월 : 인하대학교 전자공학과 공학사
2007년 8월 : 인하대학교 컴퓨터정보공학과 공학박사
1999년 ~ 현재 : 호서대학교 뉴미디어학과 부교수
관심분야 : 인공지능, 제약만족최적화, 무선통신망

한 광 록

1984년 2월 : 인하대학교 전자공학과 공학사
1989년 8월 : 인하대학교 전자공학과(정보공학 전공) 공학박사
1991년 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터공학부 교수
관심분야 : HCI, 정보검색, 자연언어처리, 유비쿼터스 컴퓨팅