

셀룰러 네트워크에서의 최적의 채널 할당 알고리즘

허 혜정*, 이 주영*, 이 상규**

*덕성여자대학교 전산학과, **숙명여자대학교 전산학과

Optimal Channel Assignment Algorithm in Cellular Networks

Hyejung Hur*, Ju-Young Lee*, & Sang-Kyu Lee**

Dept. of Computer Science *Duksung Women's University & **Sookmyung Women's University

요 약

셀룰러 네트워크에서의 효율적인 채널 할당 문제는 통신자원의 사용을 최적화 하려는 의도에서 여러 연구자들에 의해 최근 활발히 연구되고 있다. 셀룰러 네트워크는 셀을 나타내는 노드들로 이루어진 삼각형의 격자 모양의 그래프로 모델 되어지며, 셀룰러 네트워크에서의 채널할당 문제는 그래프에서의 컬러링 문제로 바뀌질 수 있다. 본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서의 최적의 채널 할당 알고리즘을 제안하며, 셀의 수가 N 일 때 시간 복잡도가 $O(N)$ 인 알고리즘이다.

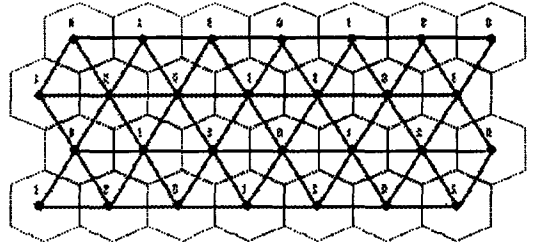
1. 서 론

이동 통신에 대한 수요의 증가는 제한된 주파수 자원을 이용하여 수요 증가를 수용하기 위한 효과적인 주파수 채널 할당 (frequency channel assignment) 문제를 더욱 중요하게 만들었고, 이 문제에 대한 연구가 더욱 활발하게 이루어지고 있다[1, 2].

셀룰러 네트워크는 지리적인 영역을 육각형의 셀룰러 영역(셀이라 부름)으로 나누어서 서비스하는데, 각 셀은 그 셀 내의 이동 클라이언트와의 통신을 관리하는 기본 스테이션(base station)을 가지고 있으며 이 기본 스테이션은 다른 셀에 있는 스테이션과 통신 할 수 있다. 클라이언트의 호출(call)이 있을 때 관계하는 기본 스테이션이 특정 주파수 채널을 할당 시키는데, 인접한 셀 간에 같은 채널을 할당시킨 경우 채널 간섭(interference)을 야기 시킬 수 있다. 주파수의 대역폭(bandwidth)을 효과적으로 공유하기 위해서 채널들은 가능한 재사용 되어야 하며 채널을 선택할 때에는 상호-채널 간섭(co-channel interference)이 일어나지 않도록 해야 한다. 채널 재사용 가능거리(L)이란 셀 간의 거리가 적어도 L 이라면 두 셀 간에 채널 간섭을 초래하지 않고 채널이 재사용 될 수 있는 거리를 말한다. 채널 재사용가능 거리가 L 인 채널 할당 문제는 그래프에서의 컬러링 문제 즉, 각 노드에 하나의 컬러를 할당하는데, 어느 두 노드의 최단 거리가 $L-1$ 이하이면 그 두 노드는 서로 다른 컬러를 할당하면서 최소의 컬러를 사용하여 전체노드를 컬러링 하는 문제로 생각할 수 있다[3, 4].

일반적인 형식에서의 채널 할당 문제는 NP-Complete문제이다. 그러나 이동 셀룰러 네트워크는 매우 일반적인 구조를 가진다. 셀룰러 네트워크는 그림 1에서와 같이 셀을 나타내는 노드들로 이루어진 삼각형의 격자(lattice) 모양의 그래프로 모델 되어질 수 있다. 두 노드에 대응하는 셀들이 서로 근접 하다면, 그 두 노드 사이에 연결선이 있는 셀룰러 그래프로 나타낸다.(또한 그림 1에서는 셀룰러 그래프에서의 3-컬러링의 예도 보이

고 있다.) 이러한 일반적인 구조를 사용하여 채널 할당 문제는 최적화 하게 풀어질 수 있다.



[그림 1] 셀룰러 네트워크의 그래프의 모델화

본 논문에서는 채널 간섭을 없애면서 가능한 주파수를 최대한 효과적으로 사용하는 채널 할당 문제를 다루는데, 현재까지 개발된 채널 할당 알고리즘은 최적의 4/3배만큼의 채널을 사용해야 하는 것이지만, 우리는 최적의 알고리즘을 제안한다.

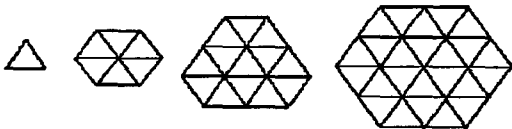
2. 셀룰러 그래프의 컬러링 문제에서의 하한 값(low bound)

셀룰러 그래프 $G = (V, E)$ 에서 채널 간섭이 가능한 거리(k) 값이 주어질 때, 두 노드의 최단 거리가 k 보다 작거나 같은 경우 서로 다른 컬러를 주면서 각 노드를 모두 컬러링 하는 문제 (즉, 거리- k 컬러링 문제)에서 필요한 최소의 컬러 수에 대한 하한 값은 다음 정리와 같다.

정리 2.1

셀룰러 그래프에서 거리- k 컬러링에 필요한 최소 컬러 수는 k 가 홀수일 때 $3/4(k+1)^2$, 짝수일 때 $3/4(k+1)^2 + 1/4$ 이 적어도 필요하다.

증명 : 셀룰러 그래프를 $G = (V, E)$ 라 두자. 그래프 G 에서 노드 집합 V 의 부분집합을 V' 라 두자. 노드의 부분집합 V' 에 있는 모든 노드쌍의 거리가 그래프 G 에서 많아야 k 이라면, V' 를 거리- k 크릭(clique)이라 정의한다. 그림 2에서 k 가 각각 1, 2, 3, 4일 때의 거리- k 크릭을 보인다. 그림에서 보는 것과 같이 k 가 짝수이면 $(k+1) + 2k + 2(k-1) + \dots + 2(k/2 + 1) = 3/4(k+1)^2 + 1/4$ 이 되고, 홀수이면 $(k+1) + 2k + 2(k-1) + \dots + 2(k/2 + 3/2) + (k/2 + 1/2) = 3/4(k+1)^2$ 이 됨을 알 수 있다. 거리- k 크릭에 있는 노드들은 서로 거리가 기껏해야 k 이므로 서로 다른 컬러를 할당해야만 한다. 그러므로 적어도 거리- k 크릭에 있는 노드 수만큼의 컬러가 필요하다. ■



[그림 2] 셀룰러 그래프에서 $k=1,2,3,4$ 일 때 거리- k 크릭

3. 셀룰러 그래프에서의 최적 컬러링 알고리즘

이 절에서는 셀룰러 그래프에서 채널 간섭이 가능한 거리(k) 값이 주어질 때 각 노드에 올바른 컬러링(proper coloring)을 하는 최적 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 그래프 $G = (V, E)$ 와 임의의 k 값이 주어질 때, 그래프에서의 어느 두 노드의 최단거리가 k 보다 작거나 같은 경우 그 두 노드에 같은 컬러를 할당하지 않으면서, 최소 컬러를 사용하여 그래프 전체 노드에 컬러를 할당한다. 2절에서 살펴본 것과 같이 이론적으로 가능한 최소 컬러 수는 적어도 거리- k 크릭의 크기만큼의 수가 필요하다. 즉, 이 알고리즘은 거리- k 크릭 크기의 컬러 수로 전체 노드를 컬러링 하는 알고리즘이다.

$m \times n$ 셀들을 가진 셀룰러 네트워크는 m 행과 n 열의 노드들로 구성된 셀룰러 그래프로 대응되며, 노드의 주소는 그 노드가 위치하는 행과 열 번호로 나타낸다. i 번째 행과 j 번째 열에 해당하는 노드의 주소는 $[i, j]$ 로 표시한다.

정의 3.1

각 행에 기본이 되는 하나의 노드를 기본노드(base node)라 부르며, i 행에서의 기본노드는 $[i, \lceil i/2 \rceil]$ 에 위치하는 노드이다.

우리의 알고리즘은 각 행의 기본노드에 먼저 컬러를 할당한 후 이웃하는 노드에 컬러를 주는데 그 행의 모든 노드에 컬러 할당이 끝나면 그 다음 행의 기본노드에 컬러할당을 시작한다. 여기서 각 행의 노드 수 n (즉, 열의 수)은 거리- k 크릭 크기의 배수로 가정한다. 만약 n 이 거리- k 크릭 크기의 배수가 아닌

경우에는 가상노드(dummy node)를 첨가하여 배수로 만들 수 있으므로 위 가정을 만족시킨다. 이 알고리즘을 OPT-coloring이라 부르고 k 가 짝수일 경우 알고리즘1-A에, 홀수일 경우 알고리즘 1-B에 서술한다.

[Algorithm 1-A] - if k is even,

Input : m, n, k

m is the number of rows and n is the number of columns of the cellular graph G . k is integer.

Output : Array $C(i, j)$

$C(i, j)$ is array of the colors assigned to the node (i, j) of cellular graph G .

begin

$\delta := 3k/2 + 2;$

$basenodecolor := 0;$

$maxcolor := 3/4(k+1)^2 + 1/4;$ //size of Distance- k clique

for $i := 1$ **to** m **do**

begin

$basenodecolumn := \lceil i/2 \rceil;$

for $j := 1$ **to** n **do**

$C(i, (basenodecolumn + j - 1) \bmod n) :=$

$(basenodecolor + j - 1) \bmod maxcolor;$

$basenodecolor := (basenodecolor + \delta) \bmod maxcolor;$

end

end

[Algorithm 1-B] - if k is odd,

begin

$\delta_0 := 3 \lceil k/2 \rceil + 1;$

$\delta_1 := 4 \lceil k/2 \rceil + 1;$

$\delta_2 := \lceil k/2 \rceil + 1;$

$basenodecolor := 0;$

$maxcolor := 3/4(k+1)^2;$ //size of Distance- k clique

$subcolor := 3 \lceil k/2 \rceil;$

for $i := 1$ **to** m **do**

begin

$basenodecolumn := \lceil i/2 \rceil;$

for $j := 1$ **to** n **do**

$C(i, (basenodecolumn + j - 1) \bmod n) :=$

$(basenodecolor + j - 1) \bmod subcolor$

$+ ((i-1) \bmod \lceil k/2 \rceil) * subcolor;$

if $(i \bmod 3 \lceil k/2 \rceil) = \lceil k/2 \rceil$ **then**

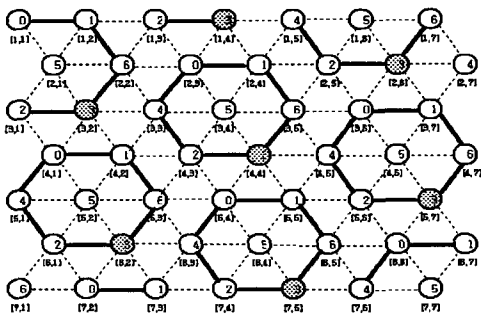
$basenodecolor := (basenodecolumn + \delta_i)$

$\bmod maxcolor;$

```

elseif (i mod 3 [ k/2 ] ) = 2 [ k/2 ] or 0 then
    basenodecolor := (basenodecolumn + δ₂)
                                mod maxcolor;
else
    basenodecolor := (basenodecolumn + δ₀)
                                mod maxcolor;
endif
end
end
end
    
```

그림 3과 4는 각각 $m=7, n=7, k=2$ 와 $m=10, n=9, k=3$ 일 때 OPT-coloring 알고리즘에 의해 각 노드에 할당되어지는 컬러들을 보인다. 그래프에서 노드는 작은 원으로 표시하며, 원 안의 숫자는 그 노드에 할당된 컬러를 의미한다.(즉, 셀룰러 네트워크에서의 셀에 할당된 채널을 의미한다.) 그림에서 굵은 선으로 표시된 것은 거리- k 크릭을 나타낸다. 거리- k 크릭의 각 노드에 할당된 컬러들을 살펴보면, 어떤 거리- k 크릭에서 a 라는 컬러를 할당받은 노드와 다른 거리- k 크릭에서 a 컬러를 할당받은 노드와의 최단거리는 적어도 $k+1$ 이상임을 확인할 수 있다. 예를 들면, 그림 3에서 중앙에 있는 거리-2 크릭에 속하는 노드 [4,4]는 컬러 3을 할당받고, 이웃하는 다른 거리-2 크릭들에 속하는 노드들, [1,4], [2,6], [3,2], [5,7], [6,2], [7,5]들도 역시 컬러 3을 할당받는다. 그러나, 이 노드들 사이의 최단거리는 3 (즉, $k+1$) 이상이므로 같은 컬러를 할당받을 수 있는 것이다. 그림 4에서도 이와 마찬가지로 확인된다.



[그림 3] 알고리즘 1-A에 의한 컬러 할당 ($k=2$)

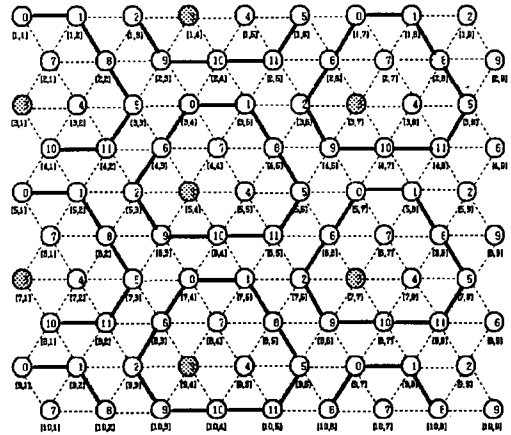
정리 3.2

셀룰러 그래프에서 임의의 k 값에 대해 알고리즘 OPT-coloring에 의한 컬러링은 최적이다.

증명 : 임의의 k 값에 대해 거리- k 크릭 내에 있는 어느 두 노드 사이의 최단거리는 k 와 같거나 작으므로 거리- k 크릭의 모든 노드는 서로 다른 컬러를 할당받아야 함은 명백하다. 즉, 적어도 거리- k 크릭의 노드 수만큼의 컬러가 필요하다. OPT-coloring 알고리즘은 거리- k 크릭에 있는 각 노드에 서로 다른 컬러를 사용하여 컬러링 한 후 전체 그래프에 거리- k 크

릭에 할당한 컬러를 반복적으로 할당하는 방법으로 거리- k 크릭의 노드 수만큼의 컬러로 모든 노드를 컬러링 한다. ■

OPT-coloring 알고리즘은 첫 번째 행부터 시작하여 마지막 행까지 모든 노드들을 한번씩만 지나가면서 컬러를 할당하는 방법으로, $n \times m (=N)$ 인 셀룰러 그래프에서 시간 복잡도(time complexity)가 $O(N)$ 이다. 즉, 선형시간(linear time)에 수행하는 알고리즘이므로 다음과 같은 정리를 얻는다.



[그림 4] 알고리즘 1-B에 의한 컬러 할당 ($k=3$)

정리 3.3

알고리즘 OPT-coloring에 의한 컬러링은 $O(N)$ 시간에 실행된다.(여기서 $N = m \times n$ 이다.)

4. 결론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서의 채널할당 문제를 해결하기 위해 네트워크의 도형적 배열을 고려하여 일반적인 구조를 가진 셀룰러 그래프로 모델화 하여 임의의 그래프에서는 NP-Complete인 채널할당 문제에 대해 셀룰러 그래프에서 최적의 알고리즘을 제안하였다. 이 결과는 다른 네트워크 내에서도 역시 유용하게 적용할 수 있을 것이라 생각된다.

참고문헌

- [1] A. Sen, T. Roxborough and S. Medidi, "Upper and Lower bounds of a Class of Channel Assignment Problems in Cellular Networks", *Technical Report, Department of Computer Science and Engineering, Arizona State Univ.*, January 1998.
- [2] G. Cao and M. Singhal, "Efficient Distributed channel Allocation for Mobile Cellular Networks", *technical Report OSU-CISRC-5/98-TR14, p. 19, Ohio State Univ.*, 1998.
- [3] D.B. West, "Introduction to graph theory", *Prentice-Hall*, 1996.
- [4] T.R. Gensen and B. Toft, "Graph coloring problems", *Wiley-interscience, New York*, 1995.