

# 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 저궤도 위성망에서의 링크할당

장홍성  
서울대학교 컴퓨터공학과

## Link Assignment in Low-Earth Orbit Satellite Networks using Simulated Annealing

Hong Seong Chang  
Dept. of Computer Engineering, Seoul National University

### 요약

본 논문은 위성간링크를 이용하여 저궤도 위성망을 구성할 때 발생하는 링크할당 문제를 효율적으로 풀기 위한 기법을 제안한다. 제안된 기법은 먼저 위성 궤도운동의 주기성에 기반하여 저궤도 위성망을 유한상태기계로 모델링한 후, 유한상태기계의 각 상태에서 최적의 링크할당을 구하기 위해서 조합형 최적화 문제와 많이 쓰이는 시뮬레이티드 어닐링을 이용한다. 제안된 기법의 잇점은 저궤도 위성망을 유한상태기계로 모델링함으로써 동적인 움직임을 보이는 저궤도 위성망에서의 링크할당 문제를 고정된 위상을 가지는 망에서의 링크할당 문제로 단순화시키고 이물 토대로 최적화 기법을 적용할 수 있다는 것이다. 시뮬레이티드 어닐링에 의하여 최적화된 링크할당의 성능은 정규링크할당과의 비교 분석을 통해서 평가된다. 또한, 각 링크할당에 대하여 정적경로배정과 동적경로배정 기법이 적용된다. 시뮬레이션을 통한 실험결과는 정적경로배정을 적용한 최적링크할당 기법이 음성호의 분쇄확률 측면에서 최고의 성능을 보임을 알려준다.

### 1. 서론

위성통신 기술의 발전에 힘입어 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성망이라고 불리는 새로운 통신 시스템이 여러 이동통신, 위성통신 회사들에 의해 계속 추진되고 있다. 저궤도 위성망은 지상 300~15000 km 고도에 위치하는 다수의 위성들로 구성되어 있으며 위성이 지상 35786 km 고도에 위치하는 정지궤도 위성망에 비해 짧은 통신 지연시간, 적은 발사 비용, 통신 용량 한계 극복 등의 장점을 가진다[1].

저궤도 위성망을 구성할 때, 서로 다른 두 위성간에 정보를 주고 받는 방법으로서 위성간링크(inter-satellite link)를 이용하는 방법이 있다. 위성간링크의 사용이 많은 잇점을 가지지만 위성간링크를 효과적으로 사용하기 위해서는 저궤도 위성망의 각 위성이 주어진 궤도를 따라 움직일 때 위성간의 상호 위치관계가 동적으로 변화하므로 위성간링크를 이러한 위치관계의 변화에 따라서 재-할당해주어야한다. 위상(topology)이 연속적으로 변하는 저궤도 위성망에서의 링크할당은 고정된 위상을 가지는 망에서의 링크할당보다 복잡하다. 본 논문에서는 동적인 위상변화에 의하여 여기되는 문제점을 해소하기 위해서 저궤도 위성망을 유한상태기계로 모델링한다. 유한상태기계의 각 상태는 저궤도 위성망의 시스템주기를 등간격으로 나누으로써 만들어진다. 이렇게 만들어진 각 상태동안에 항상 가시적 관계에 있는 위성의 쌍만을 해당 상태에서 가시적 관계에 있는 것으로 간주함으로써 동적인 움직임을 보이는 저궤도 위성망을 해당 상태에서 정적인 위상을 가지는 망으로 가정할 수 있다. 이러한 가정은 동적인 위상의 변화를 가지는 저궤도 위성망에서의 링크할당 문제를 고정된 위상을 가지는 망에서의 링크할당문제로 단순화시키는 것을 가능하게 한다.

### 2. 유한상태기계 모델링

저궤도 위성망에서 위성들은 망의 설계시에 정해진 운행 규칙에 의하여 주어진 궤도를 따라서 일정한 속도로 주기적으로 움직인다. 본 논문에서는 이러한 규칙성을 기반으로 하여 시간에 따라 변화하는 저궤도 위성망을 유한상태기계로 모델링하였다. 저궤도 위성망과 지구 표면 간의 상호 위치관계는 위성의 궤도공전주기( $O$ )와 지구의 자전주기( $E$ )의 최소공배수에 해당하는 시간(이를 본 논문에서는 시스템주기( $S$ )라 칭함)이 지나면 항상 똑같은 위치관계로 되돌아 오게 된다. 따라서 유한한 시스템주기를 짧은 시간 간격( $I$ )으로 나누고 이렇게 나누어진 짧은 시간 간격을 하나의 상태로 정의하면 유한 개의 상태로 동적인 저궤도 위성망을 나타낼 수 있게 된다. 시스템주기를  $N$ 개의 상태로 나누었을 때 저궤도 위성망은  $N$ 번째 상태를 지난 다음에 다시 1번째 상태로 되돌아간다. 그림 1은 이러한 관계를 잘 보여주고 있다.

본 논문에서는 유한상태기계의 각 상태에서 위성 상호간의 가시성 관

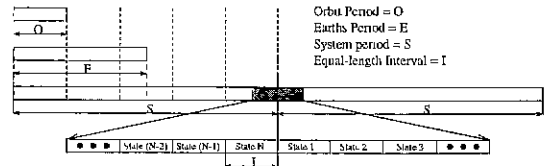


그림 1. 유한상태기계 모델링

계를 다 음과 같이 정의한다. 즉, 해당 상태가 지속되는 동안 항상 서로 가시범위내(line-of-sight)에 있는 위성쌍에 대해서만 가시적 관계에 있는 것으로 규정하고 한 상태 동안 잠시라도 가시범위를 벗어나는 위성쌍에 대해서는 비가시적 관계에 있는 것으로 규정한다. 이와 같이 위성간 가시성 관계를 규정함으로써 한 상태내에서는 저궤도 위성망이 정적인 위상을 가지는 것으로 간주될 수 있게 된다. 이것은 또한 동적인 움직임을 가지는 저궤도 위성망에서의 링크할당문제를 정적인 위상을 가지는 망에서의 링크할당문제로 단순화시키는 것을 가능하게 한다. 위성 상호간의 가시성 관계는 배열(matrix)의 형태로 표현될 수 있다. 즉, 배열내의  $(i, j)$  항은 위성  $i$ 와  $j$ 가 가시적 관계에 있으면 '1'의 값을 그렇지 않으면 '0'의 값을 가진다. 이러한 위성간 가시성 배열(inter-satellite visibility matrix)은 각 상태에서 위성의 위치정보로부터 쉽게 계산될 수 있다.

### 3. 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 링크할당의 최적화

본 논문에서 규정하는 최적의 링크할당(또는 망 위상)은 주어진 위성간 통신요구 배열에 대해 최적 경로배정을 수행할 때 요구되는 위성간링크의 용량이 최소인 링크할당을 의미한다. 본 논문에서는 각 상태에서 효율적으로 최적의 링크할당을 구하기 위해서 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)[2]을 이용하였다. 시뮬레이티드 어닐링은 지역적 최소값에 빠질 가능성을 줄이기 위해서 이전 링크할당에 비해서 나빠진 목적함수값을 가지는 링크할당도 확률분포에 의해서 수용하는 프루제어기법이다. 그림 2는 시뮬레이티드 어닐링 방법을 이용하여 최적의 링크할당을 구하는 과정을 보여준다. 먼저, 시뮬레이티드 어닐링 과정을 제어하는 변수인 온도( $T$ )가 초기화되고 임의의 초기 링크할당이 선택된다. 그리고, 이전 링크할당으로부터 새로운 링크할당을 만들기 위해서 분기-교환 방법이 적용되며 새로운 만들어진 링크할당의 목적함수값인 최소가용 링크용량이 최적 경로배정 문제를 풀음으로써 구해진다. 위 과정에서 구해진 목적함수값을 이전 링크할당의 목적함수값과 비교하여 더 크면 새로운 링크할당이 수용되고 그렇지 않은 경우에도 아래에

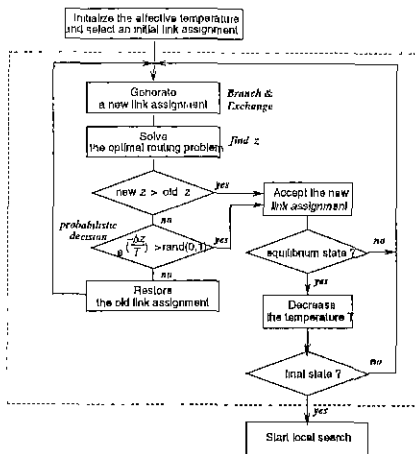


그림 2 시뮬레이티드 어닐링의 흐름도

주어진 확률에 의하여 수용된다

$$P = e^{-\frac{\Delta z}{T}}$$

만약, 최종적으로 새로이 제안된 링크할당이 거부되면 이전의 링크할당으로 환원되고 다시 분기-교환 단계로 이동한다 새로이 제안된 링크할당이 수용되면 해당 온도에서 평형상태(equilibrium state)에 도달했는지를 검사한 후에, 평형상태이면 온도를 낮추고 그렇지 않으면 분기-교환 단계로 이동한다 마지막으로 현재의 상태가 최종상태(final state)에 도달했는지를 검사하여서 만약 최종상태이면 현재 링크할당에 지역탐색 기법을 적용함으로써 최종적인 링크할당을 구한 후에 비로소 모든 과정이 종료된다.

본 논문에서 채택한 시뮬레이티드 어닐링이 전역적 최소값(global optimum)에 얼마나 가까운 최종해를 구하는가는 초기온도, 평형상태 조건, 온도를 감소시키는 비율, 그리고 최종상태 조건 등의 네가지 요인에 의해서 결정된다 [3, 4, 5, 6]

- 초기온도 : 시뮬레이티드 어닐링의 전 과정을 제어하는 변수인 온도가 초기에 높은 값으로 설정되면 시뮬레이티드 어닐링이 종료되기까지 많은 반복이 필요하지만 지역적 최소값에 빠질 확률이 작다 반면에 초기온도가 낮으면 종료시점까지 적은 시간이 소요되지만 지역적 최소값에 빠질 확률이 크다 본 논문에서는 초기온도가 다음과 같이 설정되었다[5]

$$T_0 = k \times \sigma \quad (1)$$

식(1)에서  $\sigma$ 는 링크할당들이 가지는 목적함수값의 표준편차이며  $k$ 는 현재의 링크할당보다 목적함수값이 3 $\sigma$  정도 높은 링크할당을 수용할 확률이  $P$  일 경우의 값으로서 아래와 같이 정의되며

$$k = \frac{3}{\ln P} \quad (2)$$

본 논문에서는  $k$ 를 20으로 설정( $P=0.86$ 에 해당)함으로써 온도를 초기화하였다.

- 평형상태 조건 : 시뮬레이티드 어닐링을 수행하면서 온도는 해당온도에서 생성되는 링크할당의 목적함수값이 안정상태(steady-state) 확률분포에 도달하는 평형상태(equilibrium state)에 이르렀을 때 새로운 온도로 감소된다 본 논문에서는 해당온도에서 평형상태에 도달했는지 여부를 결정하기 위해서 [5, 6]에서 제안된 기법을 이용하였다 제안된 기법에서는 수용된 링크할당의 총개수에 대해서 목적함수값이 구간 ( $C > -\delta, < C + \delta$ )에 포함된 링크할당의 비율이  $erf(\delta/\sigma)$ 를 넘어선 경우에 평형상태로 간주하고서 온도를 감소시킨다 여기에서  $C$ 는 링크할당의 평균 목적함수값이며,  $\delta$ 는 평형상태에 도달한 후의 링크할당이 되도록이면 평균값에 가까운 목적함수값을 가지도록 선택되는 변수값으로서 일반적으로  $\sigma$  값의 절반으로 설정되며,  $erf(x)$ 는 에리 함수이다[7].

- 온도를 감소시키는 비율 : 임의의 온도에서 평형상태에 도달한 후에 온도를 감소시킬 때에는 각 온도에서의 목적함수값의 평균이 일정(uniform)하게 들어가도록 해야한다. 이를 위해서 본 논문에서는 아래의 식에 의해서 온도를 감소시키면서 시뮬레이티드 어닐링을 수

행하였다[4, 5, 6].

$$T_{new} = T_{old} \exp\left(-\frac{\lambda T_{old}}{\sigma}\right) \quad (3)$$

실제로 시뮬레이티드 어닐링을 구현할 때에, 본 논문에서는  $\lambda$  값으로 0.7을 설정하였으며 새로이 설정되는 온도 ( $i.e., T_{new}$ )가 만약 이전 온도 ( $i.e., T_{old}$ )의 반절 이하가 되는 경우에는 반절으로 제한함으로써 너무 급격한 온도의 감소를 방지하였다

- 최종상태 조건 : 시뮬레이티드 어닐링의 반복 과정을 마치고 지역탐색 기법을 시작하기 위한 조건으로서 본 논문에서는 [5, 6]에서 제안된 기법을 이용하였다. 즉, 임의의 온도에서의 새로운 링크할당의 수용에 의하여 생기는 목적함수값의 변화량이 해당 온도에서 목적함수값의 최대값과 최소값의 차이와 같을 경우에 반복 과정을 마치게 된다

#### 4. 성능 평가

시뮬레이션을 통한 성능평가를 위하여 본 논문에서 사용한 저제도 위성망의 사양은 다음과 같다

- 위성수 : 12
- 궤도수 : 3
- 각 위성당 위성간링크수 : 3
- 궤도주기 : 6 시간

본 시뮬레이션에서 사용된 저제도 위성망의 시스템주기는 궤도주기(6시간)가 지구자전주기(24시간)의 배수에 해당하므로 24시간이 된다. 즉, 매 24시간마다 모든 위성은 지구와의 상대적 위치가 같아진다 본 논문에서는 이러한 시스템주기(24시간=86400초)를 600초 간격으로 나눔으로써 144개의 상태를 얻을 수 있었다 144개로 나누어진 각 상태에서의 링크할당을 위해서 두 개의 링크할당 기법을 고려한다 첫 번째 링크할당 기법은 각 상태의 트래픽 요구배열에 대해서 시뮬레이티드 어닐링을 통하여 최적화된 링크할당 테이블을 참조하면서 링크할당을 수행하는 최적링크할당(optimized link assignment) 방법이며 두 번째 기법은 각 상태에서 메쉬 모양의 링크할당을 만드는 정규링크할당(regular link assignment) 방법이다 두 개의 링크할당에 대하여 두 개의 경로배정 기법을 고려한다 첫 번째 경로배정 기법은 최단경로 알고리즘에 기반한 방식으로서 주기적으로 방송(broadcast)되는 링크이용률로부터 계산되는 결과에 의하여 경로배정 테이블을 갱신하고 이에 따라서 음성호를 경로배정하는 동적경로배정(dynamic routing) 방법이다 두 번째 경로배정 기법은 망내의 최소사용 링크용량(minimum residual link capacity)을 최대한으로 하는 최적 경로배정 문제를 풀음으로써 얻어지는 경로배정 테이블에 따라서 음성호를 경로배정하는 정적경로배정(static routing) 방법이다.

본 실험에서는 시뮬레이션을 위해서 필요한 각 상태에서의 트래픽 요구배열을 얻기 위해서 간단한 모델을 이용한다 두 위성  $i$  와  $j$  사이에 발생하는 음성호는 트래픽 요구배열의 원소  $(i, j)$  ( $T_{ij}$ 로 표기)에 의해서 결정되며  $T_{ij}$ 는 위성  $i$  와  $j$ 의 잠재적 요구 농도(potential requirement density)인  $w_i$  및  $w_j$ , 그리고 두 위성 사이의 거리인  $d_{ij}$ 로부터 아래의 식에 의해서 계산된다

$$T_{ij} = \frac{w_i \cdot w_j}{d_{ij}} \quad (4)$$

위 식에서 사용된 잠재적 요구 농도  $w_i$ 는 위성  $i$ 가 커버하는 지역에서 서비스 요청이 발생할 가능성을 나타내는 지표이다

본 실험에서, 위성  $i$ 와  $j$  사이의 음성호 요청은 평균 도착률  $\lambda_{ij}$ 을 가지고서 포아송 분포로 생성되며  $\lambda_{ij}$ 은 다음의 식에 의해서 얻어진다

$$\lambda_{ij} = \mu \times \frac{T_{ij}}{\sum_{m=0}^N \sum_{n=0}^N T_{mn}} \times (\text{제공된 전체 트래픽}) \quad (5)$$

위 식에서  $1/\mu$ 는 평균 음성호 지속시간으로서 본 실험에서는 90초로 설정되었으며 제공된(offered) 전체 트래픽은 모든 음성호가 수용된다고 가정할 때 저제도 위성망에 의하여 서비스되는 음성호의 평균값을 의미하며 정규화(normalization) 상수로서 본 시뮬레이션에서는 2000으로 값이 설정되었다

본 논문에서는 앞에서 언급한 링크할당 및 경로배정 기법의 성능을 각 기법에서의 음성호의 봉쇄확률(blocking probability)을 측정함으로써 비교·분석한다 측정되는 봉쇄확률은 새로이 시작되고자 하는 음성호가 채널의 부족때문에 봉쇄되는 확률인 초기 음성호 봉쇄확률( $P_{new}$ ,

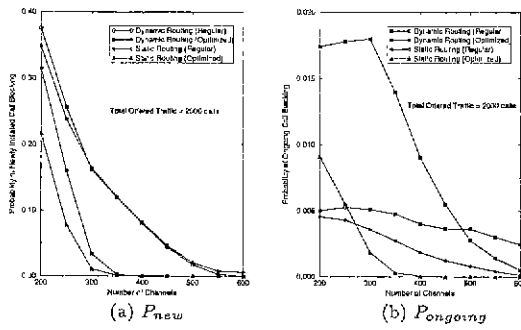


그림 3 링크용량에 따른  $P_{new}$  및  $P_{ongoing}$

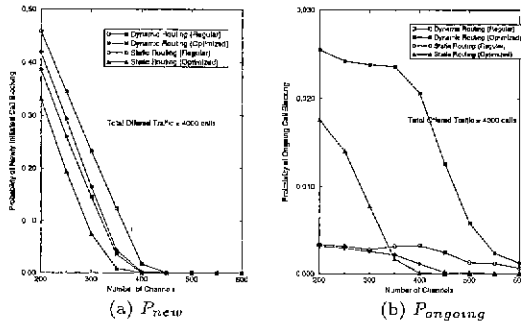


그림 4: 위성수 24개의 저궤도 위성망에서의 음성호 분쇄확률

probability of newly initiated call blocking)과 현재 진행중인 음성호가 상태전이(state transition)시에 재-경로배정되는 과정에서 채널 부족으로 인해서 분쇄되는 확률인 진행중 음성호 분쇄확률( $P_{ongoing}$ , probability of ongoing call blocking)이다.

그림 3은 제공된 전체 트래픽(total offered traffic)이 2000이고 링크당 채널의 수가 200부터 600까지 증가될 때의  $P_{new}$  및  $P_{ongoing}$ 을 보여준다. 그림 3-(a)는 최적링크할당이 정규링크할당보다 훨씬 작은  $P_{new}$  값을 가짐을 나타내준다. 이러한 결과는 최적링크할당의 경우에는 각 상태에서의 트래픽 요구에 따라서 링크할당이 최적화된 것에 반해서 정규링크할당은 항상 동일한 모양을 가지므로 수시로 변화하는 트래픽 상황에 잘 적응하지 못하는 데에 기인한다. 그림 3-(a)는 또한 링크할당이 같은 경우에 정적경로배정이 동적경로배정보다 다소 나은 성능을 가짐을 보여준다. 이것은 동적경로배정은 상태전이(state transition) 후에 경로배정 테이블을 안정화시키기 위해서 얼마간의 시간이 필요한 반면에 정적경로배정은 경로배정 테이블이 미리 계산되어있으므로 안정화를 위한 시간이 필요없기 때문이다. 그림 3-(b)는 정적경로배정의  $P_{ongoing}$  값이 동적경로배정의  $P_{ongoing}$  값보다 훨씬 작음을 보여준다. 이것은 정적경로배정이 상태전이시에 진행중인 음성호들을 재-경로배정하는 과정에서 동적경로배정보다 음성호들을 링크상에 고루 분배하기 때문이다. 동적경로배정이 재-경로배정 과정에서 몇 개의 링크만을 집중적으로 사용하는 이유는 그것이 각 시퀀스-중점(source-destination)간 하나의 경로(path)만을 고려하는 최단경로 알고리즘(shortest path algorithm)에 근거하기 때문이다. 그림 3-(b)에서 흥미로운 사실은 링크용량이 작은 경우에 정규링크할당이 최적링크할당보다 작은  $P_{ongoing}$  값을 가진다는 것이다. 이것은 그림 3-(a)에서 확인했듯이 링크용량이 작은 경우에 정규링크할당은 매우 큰  $P_{new}$  값을 가지며 그 결과로서 상태전이시에 적은 수의 음성호만이 재-경로배정되기 때문이다.

그림 4는 제공된 전체 트래픽을 4000으로 가정하고서 24개의 위성망을 가지는 저궤도 위성망에서  $P_{new}$  및  $P_{ongoing}$ 를 측정할 결과를 보여주고 있다. 이 결과들은 앞에서 제시된 그림 3과 비슷한 모양을 가짐을 알 수 있다. 이것은 유한상태기계에 기반해서 링크할당을 최적화하는 기법을 채택한 저궤도 위성망이 망 크기가 커지는 경우에도 우수한 성능을 유지함을 보여준다.

본 논문에서는 링크할당을 최적화할 때 사용하는 목적함수로서 가용 링크용량의 최소값을 최대화 하는 것 뿐만 아니라 가용 링크용량의 평균값을 최대화 하는 것도 고려해 보았다. 그림 5는 이러한 두 개의 목적함

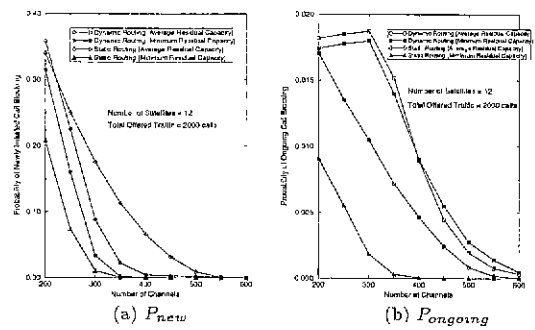


그림 5 새로운 목적함수를 적용한 저궤도 위성망의 음성호 분쇄확률

수에 대해서 최적화된 각각의 링크할당을 가지고서 동작하는 저궤도 위성망에서의 음성호 분쇄확률을 보여주고 있다. 그림에서 주어진 결과로부터 가용 링크용량의 최소값을 최대화 하는 것을 목적함수로 채택된 링크할당이 더 낮은 음성호의 분쇄확률을 보임을 알 수 있다. 이것은 가용 링크용량의 평균값을 최대화 하는 경우에 음성호들을 단지 최소 함수를 통해서 경로배정하려고 하고 결과적으로 몇 개의 링크에 집중적으로 음성호가 할당되기 때문이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 위성간링크를 이용하는 저궤도 위성망에서 링크할당을 위한 새로운 기법을 제안했다. 제안된 기법은 저궤도위성의 궤도운동의 특성을 이용하여 위성망을 유한상태기계로 모델링하였고 유한상태기계의 각 상태에서 최적의 링크할당을 얻기 위해서 시뮬레이션이든 어닐링을 이용하였다. 시뮬레이션이든 어닐링을 통해서 구해진 링크할당과의 비교 분석을 위해서 정규링크할당을 고려하였고 각 링크할당에 대해서 두 개의 경로배정(정적 및 동적 경로배정) 기법을 적용하였다. 각각 두 개의 링크할당 및 경로배정으로 부터 생기는 네 개의 경우에 대해서 본 논문은 시뮬레이션을 통하여 음성호의 분쇄확률을 측정함으로써 비교 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 시뮬레이션이든 어닐링을 통해서 구해진 링크할당이 정규링크할당보다 더 낮은 음성호의 분쇄확률을 가짐을 보여준다. 또한 링크할당이 같은 경우에, 정적경로배정이 동적경로배정보다 더 우수한 성능을 보임을 시뮬레이션을 통해서 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 종합해보면, 정적경로배정을 채용하고 시뮬레이션이든 어닐링을 통해서 최적화된 링크할당이 최고의 성능을 보임을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] W. W. Wu, E. F. Miller, W. L. Pritchard, and R. L. Pickholtz, "Mobile Satellite Communications," *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 9, pp. 1431-1448, Sep 1994.
- [2] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [3] P. J. M. van Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, pp. 17-38. Dordrecht D. Reidel Publishing Company, 1st ed., 1987.
- [4] C.-J. Chang and C.-H. Wu, "Optimal Frame Pattern Design for a TDMA Mobile Communication System Using a Simulated Annealing Algorithm," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 205-211, May 1993.
- [5] M. D. Huang, F. Romeo, and A. Sangiovanni-Vincentelli, "An Efficient General Cooling Schedule for Simulated Annealing," in *Proc. IEEE ICCAD-86*, pp. 381-384, 1986.
- [6] M. Duque-Antón, D. Kunz, and B. Rüber, "Channel Assignment for Cellular Radio Using Simulated Annealing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 14-21, February 1993.
- [7] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 3rd edition ed., 1970.