

Cognitive Radio 시스템에서 유전자 알고리즘 기반 전력 제어 및 동적 주파수 선택방법

Power Control and DFS Based on Genetic Algorithm in Cognitive Radio System

이주관*

손성환** 홍인*** 김재명****

(Joo-Kwan Lee) (Sung-Hwan Shon) (In Hong) (Jae-Moung Kim)

요약

Cognitive Radio(CR)는 우선 사용자에게 할당되어 있지만 실제로 사용되지 않는 주파수 대역을 감지하고 사용함으로써 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. 우선 사용자가 채널을 점유하게 되면 CR 사용자는 우선 사용자에 대한 간섭을 피하기 위해 다른 채널로 이동해야 하므로 CR 사용자에 대한 서비스 품질의 보장이 어렵다. 본 논문에서는 우선 사용자와 CR 사용자가 공존하기 위해 CR 기지국의 전력 제어를 통해 우선 사용자에 대한 CR 사용자의 간섭을 최소화시키면서 CR 사용자의 다양한 요구에 따른 다양한 통신 시스템 구성 변수들을 할당하기 위한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한 최적의 채널을 찾는 동적 주파수 선택(Dynamic Frequency Selection)을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션 수행을 통해 제안하는 무선 자원 공유 방법이 우선 사용자에 대한 간섭을 줄이고 스펙트럼 효율을 향상시키는 것을 보였다.

Abstract

Cognitive radio is an advanced technology for efficient utilization of under-utilized spectrum via spectrum sensing. CR users should move from current allocating channel to empty channel to avoid the interference to the primary user if the primary user is allocating that channel. Thus, CR system cannot support the CR user's QoS(Quality of Service). In this paper, we propose dynamic frequency selection method based on Genetic Algorithm with power control. It is to find the optimization channel for satisfying various CR user's needs with the power control method to minimize the CR user's interference to the primary user. And, we propose the Genetic Algorithm(GA) which determines the best configuration for CR communication systems. The computer simulation results show that the proposed method guaranteed the primary user's decodability and the optimized solution for various channel status.

Key words: Cognitive radio, cognitive engine, power control, dynamic frequency selection, genetic algorithms.

* 이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (No. M10600000194-06J0000-19410).

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2009-C1090-0902-0019)

* 주저자 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정(교신저자)

** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 박사과정

*** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정

**** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 교수

† 논문접수일 : 2009년 5월 26일

† 논문심사일 : 2009년 6월 26일

† 게재확정일 : 2009년 6월 26일

I. 서 론

최근 정보통신 기술의 발달은 사용자들의 다양한 멀티 미디어 서비스 요구에 빌맞추어 보다 높은 데이터 전송률과 서비스 품질을 제공하고 있다. 이에 따라 고속화 및 광대역 통신을 목표로 유무선 통신의 통합과 다양한 신기술 개발 및 기술 간의 구분이 없어지는 융합 기술이 대두되고 있다. 특히, 멀티 미디어 서비스를 제공하는 이동통신, DTV나 DMB와 같은 방송과 통신의 융합 기술 및 위성 통신을 비롯하여 RFID/USN, Ultra Wide Band(UWB), Wireless Body Area Network(WBAN) 등 길수의 발달로 인해 진정한 유비쿼터스 정보화 사회에서 주파수 자원에 대한 수요가 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 각 국가의 주파수 할당 정책은 최소한의 대역폭을 이용하여 보다 많은 가입자를 수용하는 효율성 증진을 위해 초점이 맞춰져 있으며, 한정된 주파수 자원의 한계를 극복하기 위한 방안으로 신기술 개발을 지속적으로 연구하고 있다.

2002년 12월 미국연방통신위원회(Federal Communications Commission, FCC)의 SPTF(Spectrum Policy Task Force)에 의하면 기존의 허가된 주파수 사용자에게 할당된 주파수의 일시적, 공간적 실제 사용률이 약 15%에서 85% 미만인 것으로 비효율적 주파수 사용을 지적하였다 [1]. 이에 따라 FCC는 주파수 효율적인 사용을 위해 “Unlicensed operation in the TV broadcast bands (FCC 04-186)”를 기초로 하여 2003년 12월 NPRM(Notice of Rule Making)을 발표하여 이러한 문제점의 해결 후보 기술로 Cognitive Radio(CR) 기술의 가능성이 대두되고 있는 추세이다.

CR 기술은 2001년 Jeseoph Mitola III에 의하여 처음으로 제안되었으며 사용이 적은 주파수를 감지하여 이를 바탕으로 스펙트럼의 효율적 이용을 위한 전력, 주파수, 변조방식 등 여러 통신 변수(parameter)를 적응적으로 변화시키며 통신을 하는 차세대 무선통신 기술과 더불어 사용될 수 있는 발전된 SDR(Software Defined Radio) 개념의 기술이다. 이 기술은 주파수를 할당 받은 우선사용자(Primary User, Incumbent User)에게 간섭을 주지 않는 조건하에 공

간, 주파수 및 시간 별로 스펙트럼을 재사용할 수 있기 때문에 무선 통신의 주파수 부족 문제를 해결하고 이를 효과적으로 이용할 수 있는 기술이다 [2, 3].

2004년 11월 IEEE에서는 802.22 WG(Working Group)을 신설하고 CR기술을 이용한 Wireless Regional Area Network(WRAN)에 대한 PHY/MAC 표준 제정을 시작하였다. 2005년 FRD(Functional Requirements Document)를 작성하고 2005년 11월 제안서를 접수여 현재 Draft를 계속 하여 개선하고 있다.

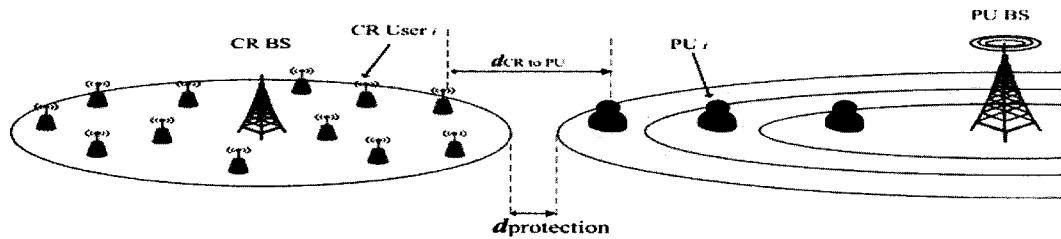
CR 시스템은 모든 CR사용자는 인가된 우선사용자가 사용하지 않는 빈 주파수 대역을 검출하여 그 대역을 사용함으로서 우선사용자에 대한 간섭 회피 보장을 전제로 하는 의무를 가지고 있다. CR 사용자가 사용 중이던 채널에 우선사용자의 통신 신호가 나타나게 되면 CR 시스템은 우선사용자를 감지함과 동시에 점유하고 있던 채널을 신속하게 변경해야 한다. 이 경우 기존의 허가된 무선 통신 시스템에게 주는 간섭을 최소화 시킬 수는 있지만 CR 사용자의 서비스 품질(QoS:Quality of Service)를 보장할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한 CR 시스템의 송신 전력 제어(TPC:Transmitter Power Control)와 최적화된 동적 주파수 선택 방법(Dynamic Frequency Selection)을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서 유전자 알고리즘과 Cognitive Radio 시스템에서 동적 주파수 선택 기법에 대하여 알아본다. III장에서 제안한 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 기법에 대하여 설명한다. 그리고 IV장에서는 본 논문에서 제시한 알고리즘의 성능에 대한 확인할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공하며, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

1. 시스템 모델

본 논문에서 고려하고 있는 CR 시스템과 우선사용자 시스템이 공존하는 상황은 <그림 1>과 같이 표



<그림 1> CR 시스템과 Primary 시스템의 공존 셀 구조
<Fig. 1> Cell structure of CR system and primary system in co-existence

현할 수 있다. 왼쪽 셀을 CR 시스템의 셀을 나타내고, 오른쪽 셀은 우선사용자의 셀을 나타낸다. CR 시스템은 우선사용자에게 간섭을 미치지 않아야 한다는 조건하에서 동작한다. 이는 우선사용자가 동작하고 있는 시간동안은 일정한 범위 내에서 해당 채널이 사용되는 일이 없어야 한다는 것이다. CR 사용자의 시스템은 우선사용자의 수신기에서 간섭으로 작용하기 때문에 간섭 제한을 위해 CR 시스템은 우선사용자의 시스템과 일정한 거리를 유지해야 한다. 이를 보호 거리(protection distance)라 부르며, $d_{protection}$ 로 표현한다. CR 시스템의 기지국은 위치가 고정되어 있기 때문에 이 보호 거리에 따라 CR 시스템의 전체 성능은 큰 영향을 받는다. 만약 CR 사용자가 우선사용자와 가까운 거리에 존재한다면, CR 시스템은 간섭을 제한하기 위해 송신 전력의 제어를 하여 셀 영역을 감소시킬 것이며 우선사용자에게 간섭을 미치는 위치의 CR 사용자의 통신을 억제할 것이다. 반대로, CR 사용자와 우선사용자의 거리가 멀다면, CR 시스템은 송신 전력을

높이는 것이 가능하게 되어 셀 영역은 넓어질 것이고 더 많은 CR 사용자의 통신이 가능해 질 것이다. 이와 같이 CR 사용자의 우선사용자가 공존하는 상황에서 우선사용자에 대한 간섭을 제한하기 위해 보호 거리의 의미는 크다고 할 수 있다.

2. 동적 주파수 선택 방법

동적 주파수 선택 방법(DFS, Dynamic Frequency Selection)은 무선 인지 기술을 기반으로 사용하지 않는 주파수 대역을 검출하여 CR(Cognitive Radio) 시

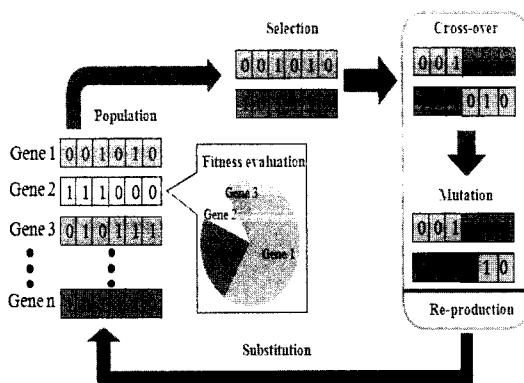
스템이 사용하는 대역에 우선사용자의 시스템을 감지했을 때, 사용하고 있던 대역을 신속하게 변경하여 우선사용자에게 간섭을 주지 않도록 하는 방법이다. 이것은 세부적으로 센싱 단계, 주파수 변경 단계로 나누어진다.

먼저, 현재 사용되지 않는 스펙트럼 대역과 우선사용자에 의해 점유되는 대역들을 찾기 위한 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)은 CR 시스템에서 가장 중요한 선행 조건이라고 할 수 있다. 계산의 복잡도가 낮고 비교적 쉽게 구현가능 한 에너지 검출(energy detection)을 이용하며 [4] 협력 센싱(cooperative sensing)을 통해 우선사용자에 대한 감지는 완벽하다고 가정한다 [5]. 일정한 간격의 Quiet Period 동안 주기적인 센싱을 통해 주변 환경을 감지하여 획득한 정보를 바탕으로 CR 기지국은 이 정보를 바탕으로 주파수 대역 정보를 생성하여 CPE에게 전송한다. 이를 이용하여 우선사용자가 해당 대역을 점유하고 있다면 CR 사용자는 우선사용자의 신호 대 간섭 잡음비를 측정하여 우선사용자에 대한 간섭 유무를 판단한다. 만약, CR 사용자의 신호가 우선사용자에게 간섭을 미친다면, 즉시 통신을 종료하고 이용 가능한 다른 채널로 이동을 한다 [6].

III. 제안한 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 방법

1. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)은 다윈의 진화론에 기인한 최적화 방법으로써 1960년대와 1970



<그림 2> 유전자 알고리즘의 구조
<Fig. 2> Structure of genetic algorithm

년대에 John Holland에 의해 발전되었으며 비선형적(non-linear) 및 선형적(linear) 문제뿐만 아니라 다양한 분야에 적용되고 있다. 유전자 알고리즘의 일반적인 수행 구조는 <그림 2>과 같다. 다음은 유전자 알고리즘의 연산에 대한 설명이다 [7].

1. 문제 해결을 위해 탐색 공간 내에서 임의로 생성(population)된 해들은 코딩 과정(encoding)을 통해 각각의 chromosome로 생성되며 chromosome들이 모여 하나의 gene을 형성하게 된다. 이것은 문제 해결을 위한 하나의 해집합으로서 부모세대를 의미한다.

2. 각 부모세대는 평가 함수(fitness function)을 통해 적합도(fitness)를 가지게 되어 목적에 부합하는 우수한 유전자와 그렇지 않은 도태되는 유전자로 구분되어 첫 번째 부모세대가 만들어진다.

3. 첫 번째 부모세대가 만들어지면 roulette wheel selection, elitist preserving selection, expected value selection, ranking selection 중 하나의 방법으로 교배하게 될 우수한 gene를 선택하게 된다.

4. 3의 과정을 통해 선택된 두 개의 gene은 부분적으로 염색체를 교배(crossover)하여 자식(off-spring) 염색체를 생성한다. crossover 방법에는 문제에 따라 단일점(on point), 이중점(two point), 다중점(multi point) crossover 등의 방법이 존재한다.

5. 교배 후 유전자를 일정한 확률로 변화시키는 연산을 하게 되는데 이를 변이(mutation) 연산이라고 한다. 변이 연산이 없는 경우 초기 유전자 조합 이외

의 공간을 탐색할 수 없어 발생하는 local optimum 문제를 방지하기 위해 변이 연산을 수행한다.

6. 마지막으로 대치(substitution) 연산을 통해 우수한 유전자와 그렇지 못한 유전자를 대치함으로써 한번의 generation을 수행한다.
7. 1~6의 과정을 최대 generation size 만큼 수행한다.

2. 제안하는 알고리즘

CR 시스템이 채널을 선택함에 있어 CR 사용자의 QOS를 만족시키는 기준은 다양하다. 일반적으로 BER의 최소화, data 전송 효율의 최대화, 전력 소비의 최소화 등 다양한 목적에 따른 선택의 기준이 필요하다. 또한, CR 시스템은 스펙트럼 효율을 증가시키고, 동시에 우선사용자에 대한 간섭 최소화해야 한다 [8-10]. 본 논문에서 목표로 하는 최적화 목적은 다음의 <표 1>과 같다.

이와 같은 다양한 통신 목적들을 충족하기 위해서는 다양한 통신 변수에 대한 상호 관계에 따른 고려가 필요하다. 일반적으로 스펙트럼 효율의 최대화와 우선사용자에 대한 간섭의 최소화는 동시에 만족시키기 어렵다. 이와 같이 각각의 통신 목적은 서로 trade-off 관계에 있기 때문에 동시에 다양한 목적들의 최적화를 이루기는 어렵다.

본 논문에서는 이러한 다양한 목적을 동시에 만족시키기 어려운 문제점을 해결하기 위해서 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 기법을 제안한다. 먼저, 다양한 목적을 만족하기 위하여 가중치 합(weighted-sum approach)방식의 유전자 알고리즘을 사용한다. 다목적 fitness function내의 해집합 x 는 수식

<표 1> 다양한 통신 목적
<Table 1> Cognitive radio objectives

Objective Name	Description
Minimize Interference	Decrease the amount of interference power to PU
Maximize Throughput	Increase the overall data throughput transmitted by CR
Minimize Bit-Error-Rate	Improve the overall BER performance

(1)로 정의할 수 있다 [10].

$$f(x) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(\vec{x})$$

$$f_3 = 1 - \frac{R_{CR}}{R_{\max}} \quad (5)$$

동시에 w_1, \dots, w_n 는 다음의 조건식 (2)을 만족한다.

$$\begin{aligned} W &= [w_1, w_2, \dots, w_n] \\ w_i &\geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_4 = 1 - \frac{M_{CR}}{M_{\max}} \quad (6)$$

$$f_5 = 1 - \frac{\log_{10} 10^{-3}}{\log_{10} P_{be, CR}} \quad (7)$$

위의 weighted-sum 방식을 통해 단일 목적 적합도 함수를 결합하여 다목적 적합도 함수를 생성한다. 이를 위해서 먼저, 각 단일 목적 적합도 함수와 다양한 통신 변수들과의 관계를 정의해야 한다. 본 논문에서 목표로 하는 최적화와 관련된 통신 변수들은 아래의 <표 2>로 나타내었다.

<표 2>에서 언급한 변수를 최적화하기 위한 각각의 단일 적합도 함수는 다음과 같이 설정하였다.

여기서, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 은 각각 간섭 제한 적합도 함수, 송신 전력 적합도 함수, 오류 정정 적합도 함수, 데이터 처리율 적합도 함수와 BER 성능 적합도 함수를 나타낸다.

$$f_1 = \begin{cases} 1 - \frac{I_{\lim}}{|I_{\lim} - I_{est}|} & (I_{\lim} > I_{est}) \\ 0 & (I_{\lim} \leq I_{est}) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_2 = 1 - \frac{P_{CR}}{P_{\max}} \quad (4)$$

간섭 제한 적합도 함수 f_1 에서 I_{\lim} 은 우선사용자 수신기의 간섭 제한 전력을 나타내고, I_{est} 는 CR 시스템에서 측정된 우선사용자에 대한 간섭 전력을 나타낸다. 간섭 제한 조건을 만족하기 위해서는 I_{est} 에 대한 정확한 측정이 수행되어야 한다.

우선사용자의 송신기는 $P_{PU}G_{PU}$ 의 유효 등방성 복사 전력(EIRP, Equivalent Isotropically Radiated Power)로 신호를 송신한다. i번째 CR 사용자에서 수신된 우선사용자 신호의 전력 세기(RSS, Received Signal Strength)는 경로 손실을 겪어 감쇄하게 되면서 식 (8)과 같은 값을 가지게 될 것이다.

$$RSS_i = \frac{P_{PU}G_{PU}}{L_i(d_i)} \quad (8)$$

P_{PU} 는 우선사용자의 송신 전력, G_{PU} 는 우선사용자의 송신 안테나 이득, $L_i(d_i)$ 는 i번째 CR 사용자와 우선사용자 간의 거리(d_i)에 의한 경로 손실 함수를 나타낸다. 이를 이용하여 식 (9)를 유도할 수 있다.

$$L_i(d_i) = \frac{P_{PU}G_{PU}}{RSS_i} \quad (9)$$

만약, CR 사용자가 우선사용자의 송신 전력, 안테나 이득과 같은 시스템 변수를 안다면, 우선사용자의 수신기에서의 CR 사용자의 간섭 전력을 추정 할 수 있다. 여기서, CR 사용자의 시스템과 우선사용자 간의 채널이 같다고 가정한다. 이는 CR 사용자와 우선사용자의 경로 손실 모델이 같다는 것을 의미한다. 따라서 우선사용자 수신기에서 CR 사용자의 간섭 전력(I_{est})은 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{est} = \frac{RSS_i P_{CR,i} G_{CR,i}}{P_{PU} G_{PU}} \quad (10)$$

$P_{CR,i}$ 과 $G_{CR,i}$ 는 i번째 CR 사용자의 송신 전력과

<표 2> 최적화와 관련된 통신 변수들

<Table 2> Communication parameters related to optimization

Related Parameters	Description
Interference (I)	Constraint for the use of licensed band
Tx Power (P)	Increase the reliability Increase interference to PU
Coding Rate (R)	Increase the system reliability Decrease the system spectral efficiency
Modulation Index (MI)	Improve overall system throughput Decrease the system reliability

안데나 이득을 나타낸다.

송신 전력 적합도 함수 f_2 에서 P_{CR} 는 할당된 송신 전력을 나타낸다. P_{max} 는 CR 사용자의 최대 송신 전력을 나타내며, 다음의 수식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} SINR &= \frac{S}{I+N} \\ &= 10\log_{10}\left(\frac{P_{PU}d^{-\alpha_{PU}}10^{\frac{\zeta_{PU}}{10}}}{P_{CR}d^{-\alpha_{CR}}10^{\frac{\zeta_{CR}}{10}} + \sigma_{PU}^2}\right) < SINR_{req} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, P_{PU} 는 우선사용자 기지국의 송신 전력을 나타내며, $d_{PU}^{-\alpha}$ 는 우선사용자의 기지국과 수신기 사이의 거리를 나타낸다. P_{CR} 은 CR 사용자의 송신전력을 나타내고, $d_{CR}^{-\alpha}$ 는 CR 사용자와 우선사용자 사이의 거리이며 ζ_{PU} 과 ζ_{CR} 는 각각 CR 사용자와 우선사용자의 shadowing에 의한 감쇄성분을 나타낸다. α_{PU} 와 α_{CR} 은 우선사용자 시스템과 CR 사용자 시스템의 경로 손실 지수를 나타낸다. ($2 < \alpha < 4$) σ_{PU}^2 는 우선사용자 수신기의 잡음전력을 나타낸다. 즉, CR 시스템과 우선사용자의 거리 $d^{-\alpha_{CR}}$ 에 따른 P_{CR} 의 전력 제어를 통해 우선사용자에 대한 성능 열화를 끼치지 않을 정도의 $SINR$ 를 보장하면서, 동시에 CR 사용자에게는 전송 효율을 향상 시킬 수 있는 전력 상승이 가능하다. 이때, 전력 제어를 통한 송신 전력 최소치는 CR 시스템에서 BER 성능이 10^{-3} 인 전력 세기를 임계점으로 산정한다. 이는 전력 제어를 통해 우선사용자에 대한 간섭을 제거할 수 있지만, 매우 낮은 전력을 사용할 때, CR 시스템의 성능 열화를 야기할 수 있는 문제점을 방지하기 위함이다.

오류 정정 적합도 함수 f_3 에서 R_{CR} 과 R_{max} 는 각각 적용된 coding rate과 사용가능한 최대 coding rate를 나타내고, 데이터 처리율 적합도 함수 f_4 에서 M_{CR} 과 M_{max} 는 각각 할당된 modulation index와 사용 가능한 최대 modulation index를 나타낸다. BER 성능 적합도 함수 f_5 에서 $P_{be,CR}$ 는 CR 사용자의 BER 성능을 나타내며 다음과 같이 정의할 수 있다 [11, 12].

$$P_{be,BPSK QPSK} = Q\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}} \quad (11)$$

<표 3> Coding 이득

<Table 3> Coding gain

Coding rate	Coding gain
1/2	3.8dB
1/3	4.2dB
1/4	5.1dB

$$P_{be,M-PSK} = \frac{2}{\log_2 M} Q\sqrt{2 * \log_2(M)} \frac{E_b}{N_0} \sin \frac{\pi}{M} \quad (12)$$

$$P_{be,M-QAM} = \frac{2(1 - M^{M-1})}{\log_2 M} Q\sqrt{\frac{3\log_2 M}{M^2 - 1}} 2 \frac{E_b}{N_0} \quad (13)$$

여기서, $\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_b}{N_{0,uncoded}} + \text{coding gain}^\circ$ 이며, M 는 modulation index를 나타낸다. 각각의 coding rate에 따른 coding gain은 <표 3>에서 볼 수 있다.

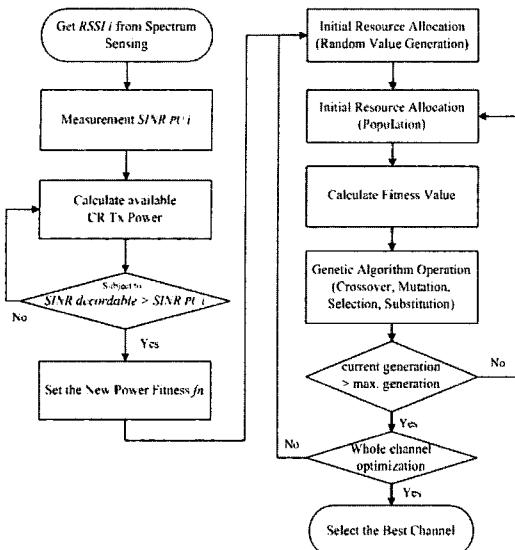
위에서 언급한 5개의 단일 적합도 함수를 동시에 최적화하기 위해서 weighted-sum 방식을 적용하면 다목적 적합도 함수는 다음 식 (15)와 같다.

$$f_{total} = w_1 * f_1 + w_2 * f_2 + w_3 * f_3 + w_4 * f_4 + w_5 * f_5 \quad (15)$$

weight vector w 는 진화 알고리즘의 search direction을 결정하기 때문에 앞서 언급한 식 (2)의 제한 조건을 반드시 준수해야 한다.

<그림 3>에는 최적의 채널을 찾는 제안한 알고리즘을 <그림 2>에서 설명한 유전자 알고리즘의 수행 과정을 포함한 보다 상세한 흐름도로서 나타내었다. 앞서 설정한 5개의 변수에 대한 적합도 함수는 랜덤 생성된 해집합인 gene속에서 주어진 환경에 따른 최적의 해를 찾는 연산을 수행한다.

이렇게 구해진 f_{total} 는 후보 대역에 대한 적합도를 나타낸다. 유전자 알고리즘의 generation size만큼 반복하여 연산을 수행하여 우선사용자의 점유 유무, 우선사용자와 CR 사용자의 거리, 우선사용자의 송신 전력 세기 등 다양한 candidate channel 환경에 따른 CR 시스템의 Tx power, modulation index, coding rate 등 통신 자원을 모의 할당함으로써 해당 상황에서 CR 시스템의 성능을 사전에 측정해 볼 수 있다. 각



<그림 3> 제안하는 알고리즘의 순서도
<Fig. 3> Flow chart of proposed algorithm

gene 속에 할당된 5개의 변수는 2진수로 표현되어 유전자 알고리즘의 연산을 수행하면서 조사 공간 내의 다양한 값을 가지게 된다. generation size 만큼 연산을 수행하면서 공간 내의 다양한 해집합에서 우수한 해들만이 생존하여 최종적으로는 최적의 결과를 도출하는 해들로 이루어진 집합군을 형성한다. 이렇게 산출한 최종 f_{total} 은 CR 시스템의 동적 주파수 선택의 우선순위를 나타내는 기준이 된다. 이 중 최고치의 f_{total} 를 가지는 채널은 최적의 대역으로 고려되어 선택될 것이다. 앞서 모의 할당하였던 CR 시스템의 다양한 통신 자원은 CR 시스템의 대역 선택과 동시에 실제로 할당되어 CR 시스템은 통신을 개시한다. 각 후보 채널 중 우선사용자에 대한 간섭 최소화를 만족하며, CR 사용자 측면에서는 데이터 처리량을 최대화시킴과 동시에 outage probability를 최소화시키는 최적의 채널, 즉 최상의 채널 적합도 f_{total} 를 가지는 채널을 선택한다.

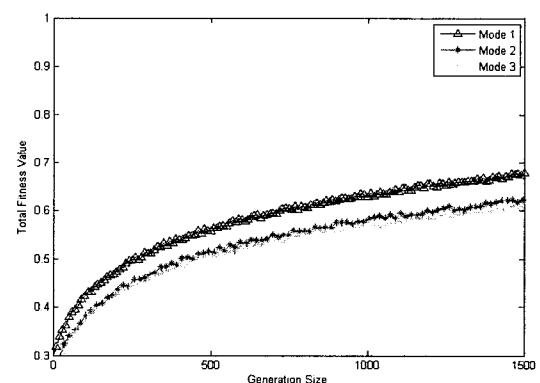
IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 논문에서 제안한 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 할당 기법을 적용하였을 때 우선사용자에 대

한 간섭 확률과 CR 시스템의 데이터 처리율과 outage probability의 향상되는 정도를 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문의 컴퓨터 시뮬레이션에서는 우선사용자 시스템으로써 DTV 시스템을 사용하였으며 구체적인 시스템 변수는 <표 5>에 보였다. DTV 기지국의 송신 전력은 1kW로 하며, 송신 안테나 높이는 지상으로부터 300m에 위치한다. 경로 손실은 음 모델로 사용하여 측정하였으며, DTV 시스템의 cell coverage는 반경 130km로 가정한다.

<표 6>에서는 CR 사용자의 시스템 변수를 보였다. CR 시스템의 사용 주파수는 TV 주파수 대역인 54~862MHz의 대역을 사용하고, 각 채널은 6MHz를 사용하며, CR 시스템의 cell coverage는 반경 33km로 한다. 이 셀 영역 안의 CR 유저의 수는 50개로 균일하게 분포(uniform distribution)하며 동일한 채널을 공



<그림 4> 다양한 기중치 값에 따른 최종 적합도 그래프
<Fig. 4> Total fitness value graph using various weight vector

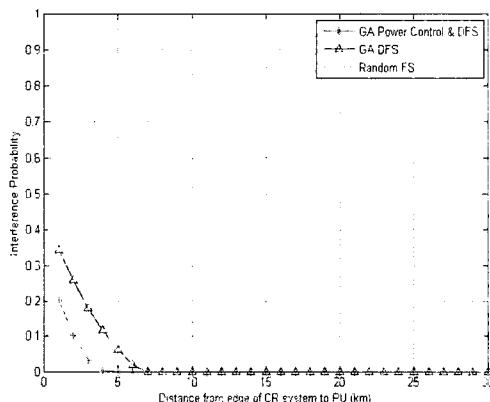
<표 4> 기중치 값
<Table 4> Weight vector

Mode name	Weight Value
Mode 1(Balance)	w1=0.2,w2=0.2,w3=0.2,w4=0.2,w5=0.2
Mode 2 (Min. Interference)	w1=0.5,w2=0.2,w3=0.1,w4=0.1,w5=0.1
Mode 3 (Max. Throughput)	w1=0.2,w2=0.1,w3=0.1,w4=0.5,w5=0.1

유한다고 가정한다.

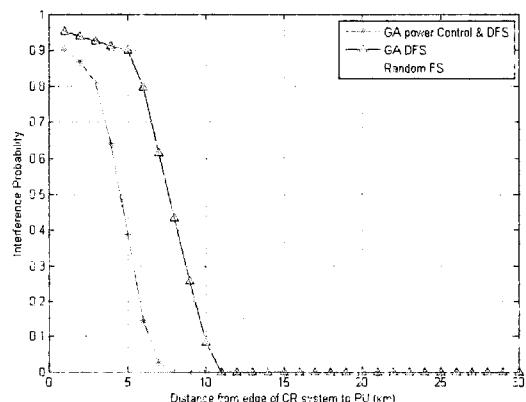
weighted-sum 방식은 단일 목적 적합도 함수를 다른 목적 적합도 함수로 결합하는데 가중치를 부여하는 weight vector의 값에 따라 최적화의 속도와 성능의 차이를 보인다. 이는 <그림 4>에서 볼 수 있다. 각각의 mode에 따른 weight vector의 값은 <표 4>과 같다. 본 논문에서는 다른 weight 설정에 비해 빠른 최적화와 높은 적합도를 보인 mode 1의 값을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

CR 시스템이 동적 주파수 선택을 할 수 있는 후보 대역으로 고려되는 채널은 10개라고 가정한다. 실질적인 우선사용자의 설정을 위해서 10개의 후보 대역을 점유하는 우선사용자의 이용 효율은 FCC의 보고서에 조사된 15%~85%로 설정하였다. <그림 5, 6, 7, 8>는 상기 언급된 통신 변수들을 유전자 알고리즘에 의하여 최적화 하여 최적의 채널을 선택했을 때 CR 시스템이 우선사용자에게 간섭을 미칠 확률을 CR 시스템과 우선사용자와의 거리에 따라 계산



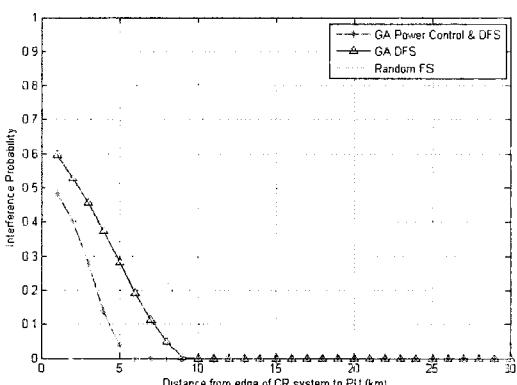
<그림 5> 우선사용자의 점유율이 15%일 때 거리에 따른 간섭 확률 그래프

<Fig. 5> Interference probability versus distance when PU usage probability is 15%



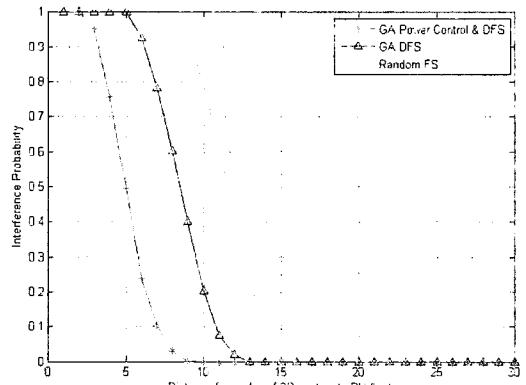
<그림 7> 우선사용자의 점유율이 85%일 때 거리에 따른 간섭 확률 그래프

<Fig. 7> Interference probability versus distance when PU usage probability is 85%



<그림 6> 우선사용자의 점유율이 50%일 때 거리에 따른 간섭 확률 그래프

<Fig. 6> Interference probability versus distance when PU usage probability is 50%



<그림 8> 우선사용자의 점유율이 100%일 때 거리에 따른 간섭 확률 그래프

<Fig. 8> Interference probability versus distance when PU usage probability is 100%

<표 5> DTV 시스템 변수

<Table 5> DTV system parameters

Parameter	Value
Transmission Power(EIRP)	1KW
Antenna Height	300m
Noise Figure	10dB
Cell Coverage	130km
Path-loss Model	ITU-R M.1546-1

<표 6> CR 시스템 변수

<Table 6> CR system parameters

Parameter	Value
CPE EIRP	4W
Bandwidth	6,7,8MHz
Noise Figure	10dB
Cell Coverage	33km

한 그래프이다. <그림 5, 6, 7, 8>에서 우선사용자의 관심 채널 점유율은 각각 15%, 50%, 85% 100%이며, 본 논문에서 제안한 유전자 알고리즘 기반 전력제어 및 동적 주파수 선택 기법과 비교하기 위한 기준 알고리즘은 랜덤 주파수 선택 기법이다. 또한, 송신 전력 적합도 함수를 통한 성능 비교를 위해 단순 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 기법을 추가적으로 비교하였다. 본 논문에서 사용한 유전자 알고리즘의 설정 변수는 <표 7>과 같다.

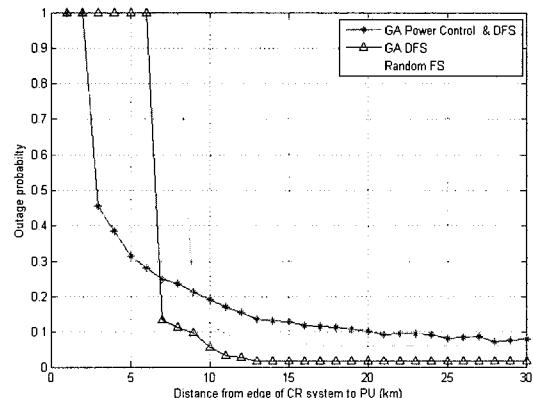
먼저, 우선사용자의 점유율이 15%로 매우 낮을 경우, 제안한 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 기법은 랜덤 주파수 선택 기법에 비해 약 10%의 적은 간섭 확률을 보인다. 또한, 전력 제어 기법을 통해 약 13%의 간섭 확률을 줄일 수 있음을 <그림 5>에서

<표 7> 유전자 알고리즘 설정 변수

<Table 7> Genetic algorithm configuration parameters

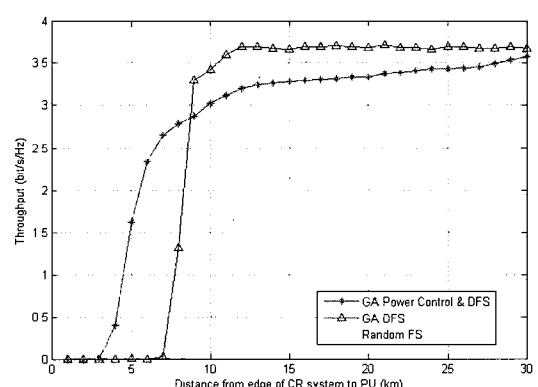
Parameter	Value
Probability of Crossover	90%
Probability of Mutation	10%
Selection scheme	Elitist Selection
Substitution scheme	Elitism

볼 수 있다. 또한, 점유율이 50%, 85%로 증가함에도 불구하고, 제안하는 기법이 간섭 확률을 현저히 저하시키는 뛰어난 성능의 향상을 <그림 6, 7>과 같이 알 수 있다. 우선사용자에 대한 간섭을 피하기 위한 일정 거리, 즉 보호 거리(protection-distance)의 경우, 우선사용자의 점유율이 15~85%로 증가함에도 불구하고, 랜덤 주파수 선택 기법에 비해 각각 약 4km, 6km, 8km의 차이를 보이며, 우선사용자에 대한 간섭 제한에 있어서 효과적인 성능의 향상을 보인다. 우



<그림 9> 우선사용자의 점유율이 100%일 때 거리에 따른 outage probability 그래프

<Fig. 9> Outage probability versus distance when PU usage probability is 100%



<그림 10> 우선사용자의 점유율이 100%일 때 거리에 따른 throughput 그래프

<Fig. 10> Throughput versus distance when PU usage probability is 100%

선사용자가 모든 후보 대역을 점유하고 있을 경우 (100%)와 <그림 8>과 같이 CR 시스템에 치명적인 상황에서도 보호 거리를 약 9km로 유지한다면 우선 사용자에 대해 간섭을 효과적으로 억제함으로써 CR 시스템의 통신을 가능하게 한다.

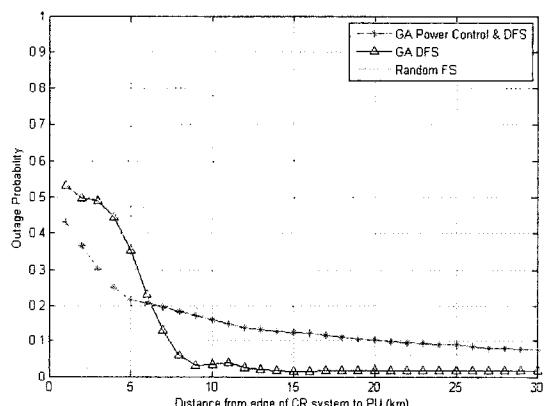
이와 같이 우선사용자에 대한 간섭 확률의 효과적인 성능 향상을 보임과 동시에 CR 시스템의 QOS를 만족시키는 다목적 최적화를 보이기 위해 우선사용자와 CR 시스템의 거리에 따른 CR 시스템의 데이터

처리율과 outage probability를 측정하였다.

제안한 기법에 의해 CR 시스템의 송신 전력 제어를 통해 우선사용자에 대한 간섭에 대한 효과적인 감소를 보임과 동시에 데이터 처리율과 outage probability에 있어서도 뛰어난 성능을 볼 수 있다. <그림 9, 10>의 경우, 해당 대역에서 우선사용자는 100%의 점유율이 가진다. 우선사용자와의 거리가 가까울 때, 다른 기법에 비해 뛰어난 outage probability를 가지며, 데이터 처리율에 있어서도 빠르게 상승하는 성능을 볼 수 있다. <그림 11, 12>에서 우선사용자의 점유율은 15~85%이다. 보호 거리 제안한 기법에 의해 CR 시스템의 송신 전력 제어를 통해 우선사용자에 대한 간섭에 대한 효과적이 짧은 경우, 기존 기법에 비해 약 30% 이상의 outage probability 성능 향상을 보인다. 또한, 데이터 처리율에 있어서도 우수한 데이터 처리율을 가지며 우선사용자와의 거리가 짧음에도 불구하고, 최대 데이터 처리율에 근접한 성능을 보인다.

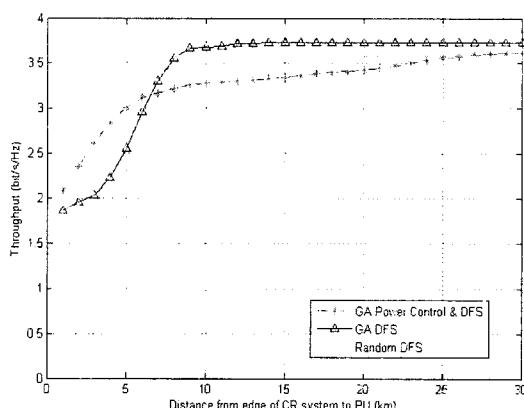
V. 결 론

본 논문에서는 CR 시스템의 우선사용자에 대한 간섭 확률을 효과적으로 줄이면서 CR 시스템의 데이터 처리율의 최대화와 outage probability의 최소화를 동시에 만족시키는 뛰어난 성능의 유전자 알고리즘 기반 동적 주파수 선택 기법을 제안하였다. CR 사용자가 빈 대역을 사용하고 있을 때, 우선사용자의 신호가 나타나 그 대역을 점유하게 된다면, CR 사용자는 반드시 해당 대역을 비우고 다른 채널로 이동해야 한다. 단순히 비어있는 다른 채널로 이동하는 것이 아니라 CR 시스템의 통신 변수를 최적화 시킬 수 있는 최적의 채널을 선택하는 기준을 제안하는 알고리즘을 통해 제시하였다. 또한, CR 시스템의 사용하고자 하는 후보 대역에서 우선사용자의 점유율을 다양한 상황에서 비교하여 기존의 기법보다 우수한 성능을 보였다. 모든 후보 대역에서 우선사용자의 신호가 존재하는 상황과 같은 CR 시스템에게 치명적인 상황에서도 우선사용자와 CR 시스템 간의 거리에 따른 간섭 전력의 여지를 이용한 전력



<그림 11> 우선사용자의 점유율이 15~85%일 때 거리에 따른 outage probability 그래프

<Fig. 11> Outage probability versus distance when PU usage probability is 15~85%



<그림 12> 우선사용자의 점유율이 15~85%일 때 거리에 따른 throughput 그래프

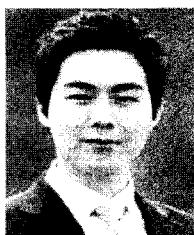
<Fig. 12> Throughput versus distance when PU usage probability is 15~85%

제어를 통해 CR 시스템의 통신을 가능하게 하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Federal Communications Commission, Spectrum Policy Task Force, Rep. ET Docket no. 02-135, Nov. 2002.
- [2] S. Haykin, "Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [3] J. Mitola, *Cognitive Radio : An Integrated Agent Architecture for software Defined Radio*, Ph. D. Dissertation, Royal Institute of Technology(KTH), Sweden, 8 May 2000.
- [4] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531. Apr. 1967.
- [5] J. K. Lee, Y. Kim, S. Sohn, and J. Kim, "Weighted-cooperative spectrum sensing scheme using clustering in cognitive radio systems," *Proc. Int. Conf. Advanced Communication Technol.*, vol. 1, pp. 786-791, Feb. 2008.
- [6] D. Maldonado, B. Le, A. Hugine, T. W. Rondeau, and C. W. Bostian, "Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation," *Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access*, pp. 597-600, Nov. 2005.
- [7] S. Forrest, "Genetic algorithms," *ACM Computing*, vol. 28, no. 1, pp. 77-80, Mar. 1996.
- [8] T. Rondeau, B. Le, C. Rieser, and C. Bostian, "Cognitive radios with genetic algorithms: intelligent control of software defined radios," *Proc. Software Defined Radio Forum Technical Conf.*, pp. C3-C8, Nov. 2004.
- [9] H. Lu and G. G. Yen, "Multiobjective optimization design via genetic algorithm," *IEEE Proc. Int. Conf. Control Applications*, pp. 1190-1195, Sept. 2001.
- [10] J. M. Kim, S. Sohn, N. Han, G. Zheng, Y. Kim, and J. Lee, "Cognitive radio software testbed using dual optimization in genetic algorithm," *Proc. Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Network and Communications*, pp.1-6, May 2008.
- [11] P. J. Lee, "Computation of the bit error rate of coherent M-ary PSK with Gray code bit mapping," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 34, no. 5, pp. 488-491, May 1986.
- [12] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001.

저자소개



이 주 관 (Lee, Joo-Kwan)

2007년 2월 : 인하대학교 컴퓨터공학부(공학사)

2007년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정



손 성 환 (Sohn, Sung-Hwan)

2004년 2월 : 인하대학교 전자공학부(공학사)

2006년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원(공학석사)

2006년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 박사과정



홍 인(Hong, In)

2008년 6월 : 인천대학교 전자공학부(공학사)

2009년 3월 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정



김 재 명 (Kim, Jae-Moung)

1974년 2월 : 한양대학교 전자공학부(공학사)

1981년 8월 : 미국 남가주대학교(USC) 전기공학과 석사(공학석사)

1987년 8월 : 연세대학교 전자공학과 박사(공학박사)

1974년 3월 ~ 1974년 6월 : 한국과학기술연구소, 한국통신기술연구소 근무

1982년 9월 ~ 2003년 3월 : 한국전자통신연구원 위성통신연구단장/무선방송연구소 소장 역임

2003년 4월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 교수, 통신위성우주산업연구회 회장 외
정부 및 다수기업에 기술자문으로 활동 중