

동적 스펙트럼 접근을 위한 유전자 알고리즘 기반 전송 매개변수 최적화 기법

채근홍*, 윤석호°

A Transmission Parameter Optimization Scheme Based on Genetic Algorithm for Dynamic Spectrum Access

Keunhong Chae*, Seokho Yoon°

요 약

본 논문에서는 동적 스펙트럼 접근을 위한 유전자 알고리즘 기반 전송 매개변수 최적화 기법을 제안한다. 구체적으로는 전송 매개변수 최적화를 위해 다목적 적합도 함수를 단일 목적 적합도 함수들의 가중합으로 표현하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 주어진 전송 시나리오에 최적화된 전송 매개변수 값을 얻는다. 모의실험을 통하여 제안한 다목적 적합도 함수를 이용하여 주어진 시나리오에 따라 전송 매개변수를 최적화한 결과를 보인다.

Key Words : cognitive engine, dynamic spectrum access, genetic algorithm, multiple objective fitness function, parameter optimization

ABSTRACT

In this paper, we propose a transmission parameter optimization scheme based on genetic algorithm for dynamic spectrum access systems. Specifically, we represent a multiple objective fitness function as a weighted sum of single objective fitness functions to optimize transmission parameters, and then, obtain optimized transmission parameters based on genetic algorithm for given transmission scenarios. From numerical results, we confirm that the transmission parameters are well optimized by using the proposed optimization scheme.

I. 서 론

주파수 스펙트럼이 점차 부족한 자원이 되어감에 따라, 스펙트럼을 효율적으로 이용하기 위한 기술로서 기회적으로 유휴 주파수 대역을 사용하는 동적 스펙트럼 접근이 (dynamic spectrum access: DSA) 주목 받아 왔다^[1].

이차 사용자는 (secondary user: SU) 일차 사용자의 (primary user: PU) 주파수 대역 점유 여부를 스펙트럼 센싱을 통해 판단하고^[2], 다음으로 인지 엔진에

(cognitive engine: CE) 의해 전송 전력, 변조 지수, 전송 대역폭 등의 SU의 전송 매개변수들이 최적화된다. 인지 엔진의 구현은 주로 유전자 알고리즘과 (genetic algorithm, GA) 같은 인공 지능 기술, 전문가 시스템, 신경망 분석, 사례 기반 추론 등의 방법에 기반하여 연구되어 왔다^[3]. 유전자 알고리즘 기반 인지 엔진은 다른 인공지능 기반 인지 엔진과는 달리 사람의 인지 과정처럼 스스로 진화가 가능하기에 많은 주목을 받아왔다^[4,5]. 최근의 유전자 알고리즘 기반 인지 엔진에 관한 연구는 SU의 전송 매개변수 최적화에 초점을 맞

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-(H0301-13-1005))

• First Author : 성균관대학교 정보통신대학, chae0820@skku.edu, 학생회원

° Corresponding Author : 성균관대학교 정보통신대학, syoon@skku.edu, 중신회원

논문번호 : KICS2013-10-432, 접수일자 : 2013년 10월 7일, 최종논문접수일자 : 2013년 11월 5일

추어 진행되어 왔다⁵⁻⁸⁾. [5]와 [6]에서는 초기 버전의 유전자 알고리즘 기반 인지 엔진이 하드웨어 테스트 베드의 형태로 구현되어 그 유용함을 입증하였다. [7]에서는 실제 통신 환경에 해당하는 WLAN 통신 시스템에 유전자 기반 인지 엔진을 적용하여 성능을 분석하였다. 이후, [8]에서는 다양한 전송 시나리오를 다루기 위해 다목적 적합도 함수가 (multiple objective fitness function) 설계되었다.

기존의 연구들은 SU가 사용할 주파수 대역이 전송 매개변수 최적화 이전에 결정되어 있다고 가정하고 진행되어 왔다. 본 논문에서는 SU가 사용할 주파수 대역을 최적화할 전송 매개변수의 하나로 고려하고, 광대역 무선 통신 환경을 위한 다목적 적합도 함수 설계 및 이를 이용하는 전송 매개변수 최적화 기법을 제안한다. 더불어 제안한 전송 매개변수 최적화 기법을 시뮬레이터로 구현하여 국내 개달지에서 실측한 스펙트럼 데이터에 적용한 사례를 보인다.

II. 시스템 모델

전송 매개변수는 잡음 밀도, 스펙트럼 센싱에서 사용된 검정통계량 등의 환경 매개변수의 정보에 기반하여 최적화될 변수로서, 본 논문에서는 전송 전력 P_s , 변조 지수 M , 각 협대역에 대응되는 변수 k (각 협대역은 스펙트럼 센싱에 의해 유휴 상태로 판정된 주파수 대역이다), SU 신호의 대역폭 B_s 까지 총 네 개의 전송 매개변수를 고려한다.

유전자 알고리즘에 기반하여 전송 매개변수를 최적화하기 위해 본 논문에서는 먼저 이진 비트의 수열로 전송 매개변수의 값을 나타낸 유전자를 설계한다. 일례로 그림 1과 같이 P_s , M , k , B_s 의 값을 각각 4개, 2개, 2개, 2개의 비트를 이용하여 나타내어 총 10의 길이를 가지는 비트의 수열로 나타낼 수 있다. 이 경우에는 P_s , M , k , B_s 의 값으로 각각 16종류, 4종류, 4종류, 4종류의 후보값들을 고려할 수 있다. 다음으로 전송 매개변수 해의 적합성을 수치화하는 다

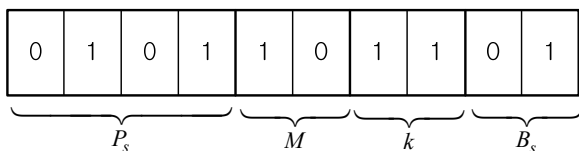


그림 1. 전송 파라미터를 표현한 유전자의 구조.
Fig. 1. The structure of the chromosome representing the transmission parameters.

목적 적합도 함수를 정의한다. 다목적 적합도 함수 f 는 아래와 같이 나타내어질 수 있다.

$$f = a_1 f_1 + a_2 f_2 + \dots + a_L f_L \quad (1)$$

여기서 $\{f_l\}_{l=1}^L$ 은 단일 목적 적합도 함수를, a_l 은 ($l \in \{1, 2, \dots, L\}$) 각 f_l 의 가중치를 의미하며, $\sum_{l=1}^L a_l$ 은 1의 값을 가진다⁸⁾. 전송 시나리오에서 높은 (낮은) 우선 순위를 가지는 f_l 에 대해 큰 (작은) 가중치 값을 부여한다. 마지막으로, 유전자 알고리즘은 선택, 교차, 돌연변이 연산을 이용하여 설계된 다목적 적합도 함수가 가장 큰 값을 가지도록 하는 최적화된 해를 구한다⁹⁾.

III. 제안한 전송 매개변수 최적화 기법

전송 매개변수의 최적화를 위해서는 다목적 적합도 함수가 시나리오를 잘 반영하도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 다목적 적합도 함수를 설계하기 위해 대역폭, 비트 오류율과 (bit error rate: BER) 같이 SU의 데이터 전송 성능에 영향을 미치는 단일 목적 적합도 함수를 설계한다.

3.1. 전송 신뢰도와 관련된 단일 목적 적합도 함수 f_{BER}

BER의 값이 작을수록 더 높은 신뢰도로 SU가 데이터를 전송한다는 점을 이용하여, 단일 목적 적합도 함수 f_{BER} 을 설계할 수 있다.

$$f_{BER} = \frac{\log_{10}(0.5) - \log_{10}(P_b)}{\log_{10}(0.5) - \log_{10}(P_{b, \min})} \quad (2)$$

여기서 P_b 는 BER을 의미하며, $P_{b, \min}$ 은 주어진 전송 매개변수 후보군으로부터 얻을 수 있는 최소의 P_b 값을 의미한다. 한 비트의 에너지 E_b 와 잡음 밀도 N_0 를 이용하여 P_b 를 E_b/N_0 의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서 E_b/N_0 를 $\frac{2P_s}{B_s \times \log_2(M) \times N_0}$ 로 대체함으로써 P_b 를 전송 매개변수에 관해 나타낼 수 있다.

3.2. 데이터 전송률과 관련된 단일 목적 적합도 함수 $f_{throughput}$

데이터 전송률은 변조 지수 M 의 값에 비례함을 고

려하여 단일 목적 적합도 함수 $f_{\text{throughput}}$ 은 아래와 같이 설계할 수 있다.

$$f_{\text{throughput}} = \frac{\log_2(M) - \log_2(M_{\min})}{\log_2(M_{\max}) - \log_2(M_{\min})} \quad (3)$$

여기서 M_{\max} 와 M_{\min} 은 각각 변조 지수 후보군 $\{M\}$ 의 최대값 및 최소값을 나타낸다. $f_{\text{throughput}}$ 은 $M=M_{\max}$ 일 때 최대값 1을 가지며, M_{\min} 일 때 최소값 0을 가진다.

3.3. PU와 SU 간 간섭량에 관련된 단일 목적 적합도 함수 $f_{\text{interference}}$

SU가 PU 신호에 미치는 간섭은 작을수록 적합하다. 이를 이용하여 본 논문에서는 SU의 전송 전력 P_s 와 SU 신호의 대역폭 B_s 의 곱을 간섭량으로 정리하고, 이에 관한 단일 목적 적합도 함수 $f_{\text{interference}}$ 를 아래와 같이 설계하였다.

$$f_{\text{interference}} = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{P_s - P_{s,\min}}{P_{s,\max} - P_{s,\min}} \right) + \left(\frac{B_s - B_{s,\min}}{W(k) - B_{s,\min}} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서 $P_{s,\max}$ 와 $P_{s,\min}$ 은 각각 SU의 전송 전력 후보군 $\{P_s\}$ 의 최대값과 최소값을 나타낸다. $W(k)$ 는 PU에게 할당된 k 번째 주파수 스펙트럼의 대역폭을 의미하고, $B_{s,\min}$ 은 SU 신호의 대역폭 후보군 $\{B_s\}$ 의 최소값을 의미한다. 여기서 SU는 주어진 PU 유휴 대역만을 사용하므로, $B_{s,\min}$ 는 $B_{s,\min} \leq B_s \leq W(k)$ 의 관계를 만족한다.

3.4. SU의 주파수 대역을 결정하기 위한 단일 목적 적합도 함수 f_{band}

SU의 주파수 대역을 결정하기 위한 단일 목적 적합도 함수를 설계하기 위하여 k 번째 주파수 대역의 검정 통계량값 $T(k)$ 및 스펙트럼 센싱의 문턱값 $\gamma(k)$ 는 인지 엔진에게 알려져 있음을 가정한다. 또한, k 번째 주파수 대역의 대역폭 $W(k)$ 는 미리 SU에게 알려져 있는 정보이다.

스펙트럼 센싱에 의해 관심 주파수 대역에 PU 신호가 없다고 판단되었을지라도 스펙트럼 센싱에서의 미검출에 (missed detection) 의해 실제로는 해당 주파수 대역들 중 일부에는 PU 신호가 존재할 수 있다. 이를 반영하기 위하여 $\gamma(k) - T(k)$ 가 클수록 주파수 대역

이 실제로 비어 있을 가능성이 높음을 관찰하였다. 이때 $D(k) = \gamma(k) - T(k)$ 로 정의하고, D_{\max} 및 D_{\min} 을 각각 $D(k)$ 의 후보들 중 최대값 및 최소값으로 정의한다. 이들을 이용하여 $\left(\frac{D(k) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \right)$ 항을 설계한다. 이 때, 관심 협대역들은 이미 유휴 대역으로 인지되어 있는 상태이므로 $D(k) > 0$ 이다. 여기에 더 넓은 주파수 대역을 이용함과 동시에 선택된 주파수 대역을 최대한 사용하기 위해 추가적인 항을 설계한다. W_{\max} 와 W_{\min} 을 각각 협대역 대역폭의 후보군 $\{W(k)\}$ 의 최대값 및 최소값으로, $B_{s,\max}$ 를 $\{B_s\}$ 의 최대값으로 정의하고, 두 개의 항 $\left(\frac{W(k) - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \right)$, $\left(\frac{B_s - B_{s,\min}}{W(k) - B_{s,\min}} \right)$ 을 설계한다. 설계된 항들을 결합하고 정규화하여 아래와 같은 단일 목적 적합도 함수 f_{band} 를 제안한다.

$$f_{\text{band}} = \frac{1}{3} \left(\frac{D(k) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{W(k) - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{B_s - B_{s,\min}}{W(k) - B_{s,\min}} \right) \quad (5)$$

요약하면, 단일 목적 적합도 함수 f_{band} 는 비어있는 주파수 대역을 선택할 확률을 높이고, 더 큰 대역폭을 가지는 대역을 선택하며 SU 신호를 더 큰 대역폭으로 전송하기 위하여 설계되었다.

3.5. 단일 목적 적합도 함수들의 가중합으로 설계된 다목적 적합도 함수 f_p

본 논문에서는 다목적 적합도 함수 f_p 를 아래와 같이 제안한다.

$$f_p = w_1 f_{\text{band}} + w_2 f_{\text{BER}} + w_3 f_{\text{throughput}} + w_4 f_{\text{interference}} \quad (6)$$

여기서 $\{w_l\}_{l=1}^4$ 은 각 단일 목적 적합도 함수 f_{band} , f_{BER} , $f_{\text{throughput}}$, $f_{\text{interference}}$ 에 곱해지는 가중치이며, $\sum_{l=1}^4 w_l = 1$ 이다.

그림 2는 제안한 다목적 적합도 함수의 블록도를 나타낸다. 여기서 각 단일 목적 적합도 함수에 곱해지는 가중치 $\{w_l\}_{l=1}^4$ 를 다르게 함으로써 다양한 전송 시나리오를 고려할 수 있다. 유전자 알고리즘에 의해

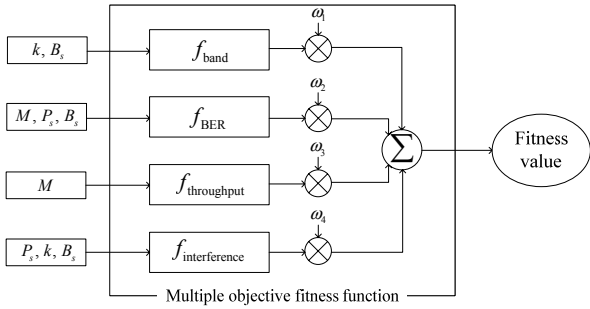


그림 2. 다목적 적합도 함수의 블록도.
Fig. 2. The block diagram of multiple objective fitness function.

다양한 조합의 전송 매개변수가 다목적 적합도 함수의 입력값으로 설정되며, 이들 중 최대의 다목적 적합도 함수의 값을 가지게 하는 전송 매개변수들이 최적화된 전송 매개변수로 결정된다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 개발한 인지 엔진 시뮬레이터를 소개하고 전송 매개변수를 최적화한 결과를 보인다. 본 저자들은 [250 MHz, 260 MHz] 대역의 스펙트럼을 국내 용인의 산 정상에서 관측하고, 이 결과를 시뮬레이터의 입력 데이터로 이용하였다. 관측한 스펙트럼은 그림 3에서 보인 바와 같이 4개의 주파수 대역이 (Band1 ~ Band4) 유휴 상태인 것으로 검파되었다. 시뮬레이터는 Matlab graphic user interface (GUI) programming을 이용하여 제작하였으며, 그림 4에서 구현한 시뮬레이터의 결과 화면 예시를 나타내었다.

모의실험에 있어 본 논문에서는 다음과 같은 매개변수를 가정하였다. 유전자의 길이는 10비트이며, 그 중 4, 2, 2, 2 비트가 각각 P_s , M , k , B_s 를 나타내기 위해 사용되었다. P_s , M , k , B_s 의 후보군은 각각 $\left\{ \frac{23}{16}, \frac{2 \times 23}{16}, \dots, 23 \right\}$ dBm, $\{2 \text{ (BPSK)}, 4 \text{ (QPSK)}, 8 \text{ (8PSK)}, 16 \text{ (16QAM)}\}$, $\{\text{Band1, Band2, Band3, Band4}\}$, $\{0.01, 0.1, 0.5, W(k)\}$ MHz로 설정되었으며, 여기서 유휴 주파수 대역은 경기도 용인시 석성산 주변 주파수 대역 250 ~ 260 MHz를 실측함으로써 설정되었다. 전송 매개변수 값들과 비트들의 맵핑 관계를 표 1에서 나타내었다. P_s 의 최대값은 LTE Uplink의 최대 전송전력 23 dBm으로 설정하였다. 잡음 밀도 N_0 는 [200 MHz, 300 MHz]의 범위에서 가장 낮은 전력

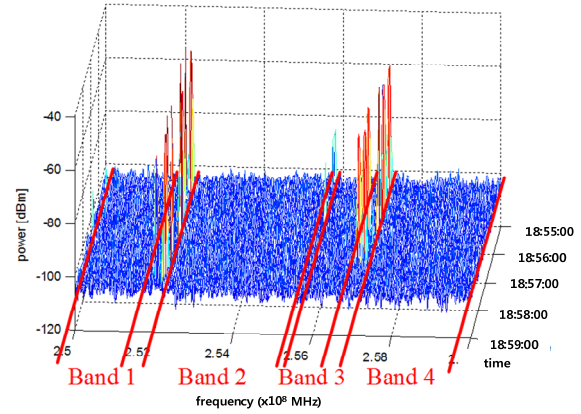


그림 3. [250 MHz, 260 MHz] 대역의 주파수 스펙트럼.
Fig. 3. The frequency spectrum of [250 MHz, 260 MHz] bands.

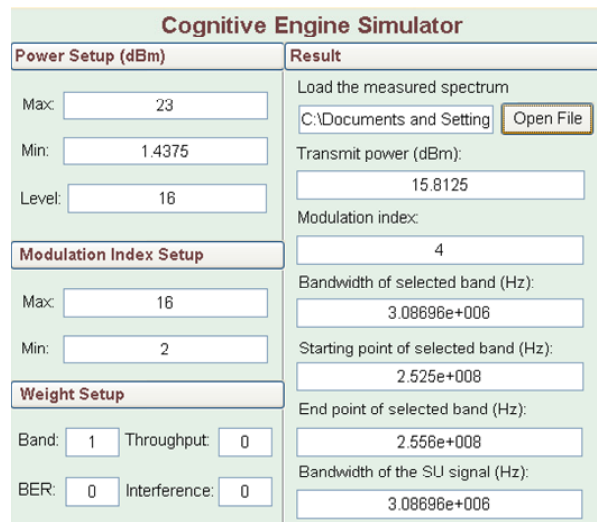


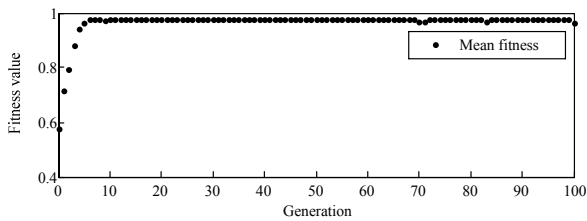
그림 4. 인지 엔진의 GUI 시뮬레이터.
Fig. 4. The cognitive engine GUI simulator.

밀도를 가지는 주파수 대역의 파워 스펙트럼 밀도로 (power spectral density: PSD) 결정하였으며, 스펙트럼 센싱의 문턱값은 0.01의 오경보 확률을 (false alarm probability) 만족하도록 결정하였고, 스펙트럼 센싱은 에너지 검파를 통해 수행되었다^[10].

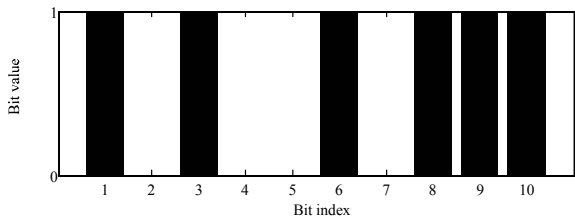
전송 시나리오는 먼저 시뮬레이터의 검증을 위하여 가장 간단한 경우인 $\bar{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4] = [1, 0, 0, 0]$ 을 고려하였으며, 다음으로 $\bar{\omega} = [0.6, 0.1, 0.2, 0.1]$ 의 가중치 벡터를 가지는 전송 시나리오를 예시로 들어 본 시뮬레이터의 동작 결과를 서술하였다. 그림 5의 (a)는 $\bar{\omega} = [1, 0, 0, 0]$ 일 때의 평균 적합도를 나타내며, 그림 5의 (b)는 동일 환경에서 전송 매개변수 최적화 결과를 나타내며, 0또는 1의 값을 가지는 10개의 비트로 나타내었다. 그림 5로부터, 세대를

표 1. 전송 매개변수들의 후보군
Table 1. Candidates of transmission parameters

Parameter	Value (bit)			
P_s	$\frac{23}{16}$ (0000)	$\frac{2 \times 23}{16}$ (0001)	$\frac{3 \times 23}{16}$ (0010)	$\frac{4 \times 23}{16}$ (0011)
	$\frac{5 \times 23}{16}$ (0100)	$\frac{6 \times 23}{16}$ (0101)	$\frac{7 \times 23}{16}$ (0110)	$\frac{8 \times 23}{16}$ (0111)
	$\frac{9 \times 23}{16}$ (1000)	$\frac{10 \times 23}{16}$ (1001)	$\frac{11 \times 23}{16}$ (1010)	$\frac{12 \times 23}{16}$ (1011)
	$\frac{13 \times 23}{16}$ (1100)	$\frac{14 \times 23}{16}$ (1101)	$\frac{15 \times 23}{16}$ (1110)	$\frac{16 \times 23}{16}$ (1111)
M	2, BPSK (00)	4, QPSK (01)	8, 8PSK (10)	16, 16QAM (11)
k	Band1 (00)	Band2 (01)	Band3 (10)	Band4 (11)
B_s	0.01 MHz (00)	0.1 MHz (01)	0.5 MHz (10)	$W(k)$ (11)



(a) Fitness value of the multiple objective fitness function

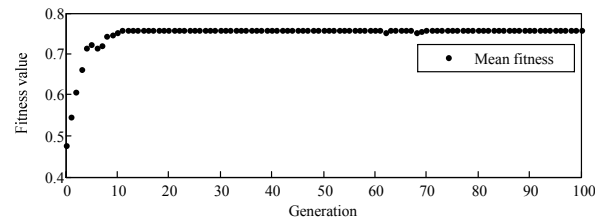


(b) The solution result in a form of a 10 bit stream

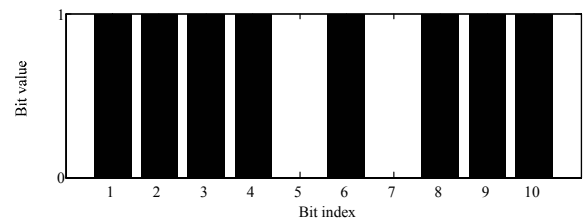
그림 5. $\bar{\omega} = [1, 0, 0, 0]$ 일 때 모의실험 결과.
Fig. 5. Simulation results when $\bar{\omega} = [1, 0, 0, 0]$.

거듭함에 따라 평균 적합도가 점차적으로 수렴해감을 확인할 수 있다. 또한 최종 해인 염색체의 7번째 및 8번째 비트는 '01'로, 9번째 및 10번째 비트는 '11'이므로 가장 넓은 대역폭을 가지는 유희 주파수 대역 Band 2가 주파수 대역으로 선택되었으며, SU가 Band2의 전체 스펙트럼을 이용함을 의미한다. 하지만 f_{band} 는 P_s 와 M 을 포함하고 있지 않는 단일 목적 적합도 함수이므로, 전송 전력과 (1번째 ~ 4번째 비트) 변조지수는 (5번째 ~ 6번째 비트) 유전자 알고리즘에 의해 무작위로 선택된다.

그림 6의 (a)는 $\bar{\omega} = [0.6, 0.2, 0.1, 0.1]$ 일 때의 평균 적합도를 나타내며, 그림 6의 (b)는 동일 환경에서 시뮬레이터의 작동 결과를 나타낸다. 본 시나리오에서는 f_{band} 에 가장 큰 가중치가 부여되는 '대용량 전송



(a) Fitness value of the multiple objective fitness function



(b) The solution result in a form of a 10 bit stream

그림 6. $\bar{\omega} = [0.6, 0.2, 0.1, 0.1]$ 일 때 모의실험 결과.
Fig. 6. Simulation results when $\bar{\omega} = [0.6, 0.2, 0.1, 0.1]$.

모드'로 정의할 수 있으며, f_{BER} 에 큰 가중치를 부여하는 경우 '고신뢰성 전송 모드', $f_{throughput}$ 에 큰 가중치를 부여하는 경우 '고속 전송 모드', $f_{interference}$ 에 큰 가중치를 부여하는 경우 'PU 간섭 최소화 모드' 등으로 다양하게 변경할 수 있을 뿐 아니라, 필요에 따라 두 개 이상의 전송 매개변수에 큰 가중치를 곱함으로써, 두 개 이상의 목적을 위해 가중치가 결정될 수도 있다. 본 시나리오에서는 f_{band} 에 곱해진 가중치가 가장 크기 때문에 Band2가 주파수 대역으로 선택되며, SU는 $\bar{\omega} = [1, 0, 0, 0]$ 인 경우처럼 Band2의 주파수 대역 전체를 사용한다. 그러나 f_{BER} 에 두 번째로 큰 가중치가 곱해지기에 BER을 낮출 수 있도록 전송 전력 P_s 와 변조 지수 M 에 대해 23 dBm의 최

대 전력과 QPSK 변조가 선택된다.

V. 결 론

본 논문에서는 동적 스펙트럼 접근을 위한 유전자 알고리즘 기반 전송 매개변수 최적화 기법을 제안하였다. 구체적으로는 다양한 전송 매개변수들을 결합한 다목적 적합도 함수를 얻은 후, 유전자 알고리즘에 기반하여 전송 매개변수들을 최적화하였다. 모의실험을 통해 제안한 다목적 적합도 함수를 이용할 경우, 주어진 전송 시나리오에 따라 유전자 내의 전송 파라미터를 최적화하여 SU에게 할당할 주파수 대역을 포함한 전송 매개변수들을 최적으로 결정함을 보였다.

References

- [1] P. Yadav, S. Chatterjee, and P. P. Bhattacharya, "A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio," *Int. J. Next-Generation Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 27-46, Dec. 2012.
- [2] T. Yüech and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-127, Mar. 2009.
- [3] D. Xu, L. Ying, and W. S. Qun, "Design and implementation of a cognitive engine functional architecture," *Chinese Sci. Bulletin*, vol. 57, no. 28-29, pp. 3698-3704, Oct. 2009.
- [4] B. Park, J. Han, Y. Choi, M. Cho, and H. Park, "Radio network optimization in the homogeneous traffic distribution using genetic algorithm," *J. Korean Inst. Commun. Sci. (KICS)*, vol. 27, no. 2B, pp. 137-144, Feb. 2002.
- [5] C. J. Rieser, "Biologically inspired cognitive radio engine model utilizing distributed genetic algorithms for secure and robust wireless communications and networking," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Inst. State Univ., Blacksburg, U.S.A., Aug. 2004.
- [6] T. Rondeau, B. Le, C. J. Rieser, and C. W. Bostian, "Cognitive radio with genetic algorithms: Intelligent control of software

defined radios," in *Proc. Software Defined Radio Forum Tech. Conf.*, pp. C3-C8, Phoenix, U.S.A., Nov. 2004.

- [7] D. Maldonado, B. Le, A. Hugine, T. W. Rondeau, and C. W. Bostian, "Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation," in *Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 597-600, Baltimore, U.S.A., Nov. 2005.
- [8] T. R. Newman, B. A. Barker, A. M. Wyglinski, A. Agah, and J. B. Evans, "Cognitive engine implementation for wireless multicarrier transceivers," *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 7, no. 9, pp. 1129-1142, May 2007.
- [9] C. Ahn, R. S. Ramakrishna, and C. Kang, "A new genetic algorithm for shortest path routing problem," *J. Korean Inst. Commun. Sci. (KICS)*, vol. 27, no. 12C, pp. 1215-1227, Dec. 2002.
- [10] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, Apr. 1967.

채 근 흥 (Keunhong Chae)

한국통신학회 논문지 제 38A권 제 10호 참조

윤 석 호 (Seokho Yoon)

한국통신학회 논문지 제 38A권 제 10호 참조