

인지 무선 통신망을 위한 인지 알고리즘 및 엔진

송명선 · Jeffrey H. Reed\*

· 김창주

한국전자통신연구원 ·

\*Virginia Tech.

요 약

한정된 자원인 주파수 자원을 보다 효율적으로 사용하고자 시간적/공간적으로 주파수를 공유하는 기술 개발이 가속화되고 있다. 본 논문에서는 대표적인 주파수 공유 기술 중 하나인 Cognitive Radio에서 두뇌 역할을 하는 인지 알고리즘과 필요한 데이터베이스 종류 및 특성을 알아보고, 이들이 이용되는 Cognitive Engine을 구현한 예를 보였다. Cognitive Radio 관련 기술은 아직 연구 초기 단계이기 때문에 Cognitive Radio에 최적인 데이터베이스, 알고리즘, 엔진을 제시하지는 못했지만 관련 기술 개발 방향을 제시하고 개발 시 고려사항들에 대해 설명하였다.

Abstract

Technologies to utilize the limited frequency resource more efficiently in spatial and temporal are accelerated. In this paper cognitive algorithms as brain of cognitive radio, kind and characteristics of databases which are necessary parts for algorithm were reviewed and summarized. And an example of cognitive engine on which database and algorithm are executed was described also. Because the current status of development of technologies relating to cognitive radio is at the initial stage, the best database, algorithm and engine for a cognitive radio were not suggested, but the direction of development and factors to be considered during development of relating technologies were explained.

I. 서 론

Cognitive Radio(이하 CR)는 무선 기기가 주변 환경을 인식하고 그 능력 범위 내에서 자신의 행동과 복잡한 후속 전략을 수립하여 대처한다는 측면에서 전통적인 SDR의 진보된 형태로 볼 수 있다. CR은 값비싼 스펙트럼을 충분히 이용할 수 있게 해주며, 보다 사용자 요구에 맞고 신뢰성이 높으며, 주변 상황에 적합한 통신 서비스를 제공할 수 있는 유망한 기술 분야로 알려져 있다. 또한 이러한 상황 인지를 통한 통신 파라미터 최적화 기능을 가짐으로써 이기종 통신망을 연결해 주는 기능을 제공할 수도 있다.

이러한 환경 적응 기능은 스펙트럼 센싱을 통한 주변 전파 환경 정보 획득과, 스펙트럼 정책 및 전파 사용 규칙, 주파수 할당 정보 및 장비 규격을 담고 있는 데이터베이스, 이들 데이터를 기반으로 파라미터 최적화 방법을 제시하여 주는 알고리즘이 엔진에서 유기적으로 연결되어 실행되어야 가능하다. 따라서 인지 알고리즘 및 엔진은 종래의 무선 기기와 차별성을 갖게 하는 CR 고유의 기능을 가능하게 하여 주는 핵심적인 부분이라 할 수 있다.

II. 데이터베이스

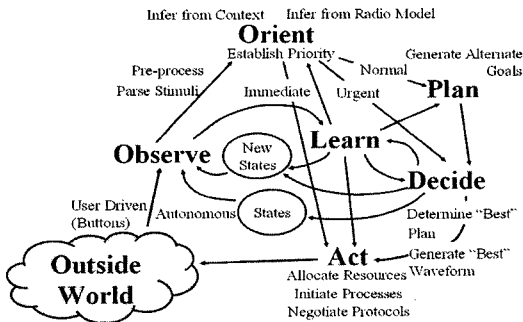
일반적인 무선기기는 인지 능력이 없다. 이러한 무선 기기에 지능과 상황 인지, 학습 능력을 부여해주는 것이 인지 엔진(cognitive engine)이다. 따라서 인지 엔진이 없으면 그것은 단순한 프로그램 가능한 소프트웨어 무선이라 할 수 있다. 인지 엔진은 CR에

서 인지 업무를 관리하는 지능형 에이전트이다. 주변 환경이나 다른 사용자로부터 정보가 들어오면 인지 엔진은 상황을 분석하고 계산을 하여 적절한 반응을 하게 된다. 앞서 언급했던 바와 같이 이러한 상황 인지 능력은 CR을 일반적인 무선 기기와 구별 짓는

가장 중요한 특징이다. <표 1>에 CR이 수행하는 인지 대상을 요약하여 놓았다. 이 표를 보면 CR에 데이터베이스가 필요하다는 것과 그 종류를 알 수 있다. [그림 1]에는 인지 사이클이 돌 때 데이터베이스가 필요한 부분, 검색이 필요한 부분을 나타내었다.

<표 1> CR이 인지해야 할 상황  
<Table 1> Situations that CR may need to be aware.

Type of Awareness	Significance to CR	How to obtain such awareness (through database)?
Location	High	- GPS (or Assisted GPS) - Network based positioning with infrastructure (reference nodes) location database
Policy	High	Can be derived from policy database, defined by service provider and/or user
Regulation	High	Can be derived from regulation database, defined by government authorities
Capability, QoS requirements	High	Can be derived from Configuration database, QoS database, defined by the CR user and/or service provider
Power (energy efficiency)	High for device using battery; Low for device using AC power	Measure the voltage and current of power supply
RF Environment/ waveform	Medium to high	- Radio Equipment database - (Collective) observations by CRs; - Sensor network - Field measurement (measurement database)
Geographical Environment	Medium to high	- "read" and exploit GIS database. - terrain recognition - RF fingerprinting
Language	Med. to high	Language used to access and process data
Experience	Med. to high	Long and short term memory of experience for recall, and case-based decision making
Mobility and Trajectory	Medium	By analyzing the change of locations over period of time, and by correlating with GIS, the moving speed, and trajectory can be estimated
Priority	Low to medium	Can be derived from Priority database, defined by user and service provider
User's intent, context, background environment	Low to medium	Can be derived from Task database, defined by the CR user, or derived from various sensors; e.g., speech recognition and understanding; employing stress sensor, camera, chemical sensor, biometric sensor to detect background activity



[그림 1] 인지 사이클에서 DB의 역할  
 [Fig. 1] The role of DB in cognition cycle.

CR이 상황 인지를 하는 방법에는 다음 두 가지가 있다. 첫째는 스펙트럼 센싱을 통하여 CR 자체적으로 획득하는 방법이며, 두 번째는 여러 종류의 데이터베이스로부터 얻는 방법이 있다. 센싱 수신기를 이용하는 CR 자체의 주변 스펙트럼 센싱은 수신기의 감도 한계와 센싱 가능 거리 제한으로 인해 제한적인 정보만을 얻을 수 밖에 없다. 따라서 데이터베이스의 활용이 필수적이라 하겠다.

CR이 주변 전파 환경을 측정하여 목표 지향적으로 파라미터를 최적화하기 위해서는 측정된 정보, 과거에 통신할 때 사용했던 파라미터 데이터들이 저장되고 검색되어야 할 데이터베이스가 필요하다.

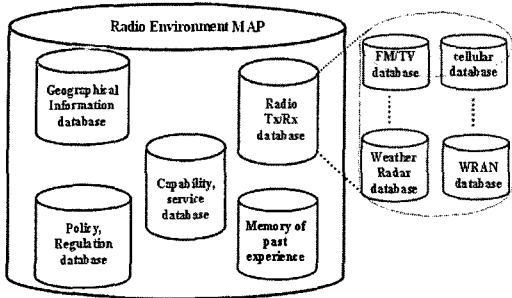
데이터베이스의 구성 요소 중 가장 중요한 데이터베이스 언어에는 SQL(Structured Query Language), XML(Extensible Markup Language), OWL(Web Ontology Language)가 있다. SQL은 가장 널리 쓰이고 있는 데이터베이스 액세스 및 처리를 위한 언어로서, Microsoft Access, IBM DB2, Informix, Microsoft SQL Server, Oracle, Sybase 등에 사용되고 있다. XML은 정보 교환, 특히 DBMS간 정보 교환을 위한 표준 언어로 개발되었으며, 이미 SDR에 사용되어 왔다. 데이터베이스가 분산되어 있는 Web에서는 종래의 데이터베이스 관리 방식이 적합하지 않았으며, 이들 각 데이터베이스 간에 정보를 전달하고 교환하는 데

적합하도록 기존 데이터베이스 기술을 확장할 필요성이 있었다. 이러한 배경하에서 탄생한 XML은 임의의 트리 구조를 지원하며, 인간 및 기계가 읽을 수 있는 데이터 포맷을 갖게 되었다<sup>[1],[2]</sup>.

OWL은 Web에서의 데이터 처리를 위해 만들어졌으나, 컴퓨터에 의해서만 해석될 수 있다. 온톨로지는 객체의 정확한 표현과 그들간의 관계, 즉 지식 표현이다. OWL은 도메인과 규칙 기반 정책에 대한 지식을 표현하는 정책 언어의 하나로 활용되어 왔다. 스펙트럼 사용 정책을 근본적으로 바꾸기 위한 미국방성의 DARPA 프로젝트인 XG 프로젝트에서도 정책 엔진 개발에 OWL을 사용하고 있다<sup>[3]</sup>.

CR에 필요한 데이터베이스에는 지형 정보 데이터베이스, 가용 자원 맵 데이터베이스, 정책 데이터베이스, 무선 장비 데이터베이스 등이 있다. 최근 새롭게 제안된 REM(Radio Environment Map)은 이들 데이터베이스를 종합한 CR을 위한 통합 데이터베이스이다. 기존에는 각 데이터베이스들이 독립적인 목적을 가지고 개발되어 운용되었으나, CR에서는 위치, 지리적 주변 환경, 정책, 장비의 능력 등을 종합적으로 활용하여야 하기 때문에 이들을 유기적으로 연결하는 것이 무엇보다도 중요하다. REM에서는 GIS 데이터베이스, 시간적/공간적 송수신기 데이터베이스, 사용자가 위치한 지역에서의 정책 및 스펙트럼 사용 규칙 데이터베이스, 과거 사용자 경험 데이터베이스 등을 관련 지어 데이터베이스를 유기적으로 연결한다. REM은 또한 CR 자체, 서비스 제공자 등에 의해 획득된 정보가 부가된다. REM을 설계할 때는 공간적/시간적 데이터베이스, 동적 데이터베이스, 확장성, 모듈 방식 설계, 보안, 액세스 속도, 질의 및 갱신, 유효 처리량, 신뢰성, 메모리의 효과적인 사용 및 관리, 메모리 최소화, 소모 전력 등을 고려하여야 한다.

[그림 2]에 각종 데이터베이스와 REM의 관계를 나타내었다.



[그림 2] REM을 위한 다양한 데이터베이스 통합 및 연관성

[Fig. 2] Integrating and correlating of various databases for REM.

### III. 결정 프로세스

#### 3-1 가변 파라미터 및 효용 함수(Utility Function)

CR은 기본적으로 타 서비스에 사용되고 있는 대역을 공유하는 무선 기기이므로 크게 보면 두 가지 목적을 가지고 있다. 하나는 CR 망의 효율을 극대화하는 것이고, 두 번째는 기존 시스템에 대한 간섭을 최소화하는 것이다. 일반적으로 CR 통신망의 효율을 극대화하는 것은 응용 서비스에 필요한 QoS에 직접적으로 관련되므로 원하는 응용 서비스에 따라 목표가 달라질 수 있다.

첫 번째 목적을 위해서는 다음과 같은 개별 목표들을 고려하여야 한다:

- BER
- throughput
- 스펙트럼 사용 효율
- 네트워크 지연
- 전력 소모
- CR 통신망 내의 타 CR로의 간섭
- CR 통신망 내의 타 CR로부터의 간섭 제거 능력
- 채널 파라미터 변화에 대한 적응 능력
- 주어진 전송 속도에서의 최소 대역폭 사용

두 번째 목적을 위해서는 다음과 같은 개별 목표들이 고려되어야 한다.

- 기존 시스템으로의 간섭
- 기존 시스템으로부터의 간섭 제거 능력

이러한 목적 달성을 위하여 CR에서 가변할 수 있는 파라미터에는 송신 출력, 변조 방식, 송신 파형, 스케줄링을 위한 노드 선택, 대역폭, 전송 속도 등이 있다. CR에서는 이들 파라미터들이 밀접하게 연관되어 있고, 하나의 파라미터만을 최적화하면 원하는 CR 통신망에서 요구되는 목표를 달성할 수 없다. 따라서 다중 파라미터 적응이 필요하다.

참고문헌 [4]에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 다중 파라미터를 최적화함으로써 시스템 목적을 달성한 예를 보였다. ETRI는 버지니아대와 공동으로 신경망을 이용하여 중심 주파수, 송신 출력, 변조 방식을 최적화하여 QoS, 스펙트럼 사용 효율, 송신 출력을 최적화하는 간단한 인지 알고리즘과 인지 엔진을 개발하였다. 일반적으로 무선 기기의 파라미터들과 통신망의 목표는 선형적 관계나 컨벡스 관계를 갖지 않는다. 따라서 다차원, 다목적 함수 최적화 방법이 필요하다.

#### 3-2 결정 알고리즘

결정 알고리즘은 네트워크 목표를 달성하기 위하여 네트워크 파라미터, 무선기기 관련 파라미터를 적응시키는 최적화 알고리즘이다. 결정 알고리즘에는 수리적인 방법과 경험적인 방법이 있다.

수리적인 방법 중 대표적인 방법에는 Cyclic-coordinate method, Steepest descent method, Quasi-Newton method, Conjugate-gradient method와 같은 알고리즘이 있다. 일반적으로 수리적인 최적화 방법은 부분 최적해를 제시할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 이를 방지하기 위하여 Branch/Bound 방법이 제시되고 있다. 그러나 Bound를 정하기 위해서는 문제에 대한 Bound를 정하고 가능한 해 공간(solution space)

상에서 서브 영역을 나누기 위해서는 그 문제에 대한 전반적인 정보를 필요로 한다. 또한 Branch/Bound 기법을 위한 계산량은 문제에 들어있는 파라미터 수에 대해 지수 함수적으로 증가한다. 그러나 목적 함수를 잘 정의하기만 하면 신뢰성 있는 해를 얻을 수 있고, 수렴 특성에 대한 폭넓은 연구 결과로 수렴 시간에 대한 정확한 예측도 가능해졌다.

경험적인 방법은 해를 찾는 일반적이고 좋은 방법

이며 전통적인 수학적 최적화 방법보다 프로그램 하기가 용이하나, 최적해를 제공해 주지 않을 수도 있다.

경험적인 방법에는 Simulated annealing, Genetic algorithm, Ant Colony Optimization, Tabu Search, Smoothing and continuation method, Neural network 등이 있다<sup>[5]</sup>.

<표 2>에 결정 알고리즘별 장단점을 요약하였다. 이외에도 일찍부터 게임 이론을 통신망 운용 최적화에 활용하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 버

<표 2> 결정 알고리즘별 상대적인 장점  
<Table 2> Relative merits of decision process.

Decision Processes	Key Benefits	Drawbacks
Classical Optimization	Provides globally optimal solutions for class of convex optimization problems  Convergence properties are well-analyzed	Could yield sub-optimal (non-desirable) solutions for ill-behaved functions  Branch-and-bound, clustering and multi-start techniques that enhance performance need access to global information in addition to being computationally intensive
Heuristic Techniques		
1) Simulated Annealing	Asymptotically converges to globally optimal solution with probability one. Easy to implement	Yield good but not necessarily optimal solutions  Convergence rate can be slow
2) Genetic Algorithms	Well-investigated for wireless applications	Convergence has not been analytically investigated Efficiency depends on proper parameter selection
3) Ant Colony Optimization	Can easily adapt to changes in real-time	Inferior to SA for local searches
4) Tabu Search	Easy to implement	Convergence has not been analytically investigated Efficiency depends on proper parameter selection Relatively new technique
5) Smoothing and Continuation Methods	If well-implemented, requires fewer computations than SA and GA techniques	Convergence has not been analytically investigated
6) Neural Networks	Has been applied to several well-known classical optimization problems	Performance is not analytically tractable

지니아대를 중심으로 CR 통신망에 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있고<sup>[6]</sup>, 특히 전력 제어 알고리즘에 적합한 것으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

#### IV. 인지 엔진(Cognitive Engine)

인지 엔진(이하 CE)은 스펙트럼 측정 결과, 각종 데이터베이스를 활용하여 전송 파라미터를 최적화하는 기능을 하는 CR에서의 핵심적인 두뇌에 해당한다. 현재까지 정형화된 CE는 없으므로, 본 절에서는 CE의 한 예로서 ETRI가 미국 버지니아대와 공동 개발한 CE에 대해 간단히 설명하고자 한다.

여기서 개발한 초기 CE는 PC상에서 돌아가는 버지니아대의 OSSIE(Open Source SCA Implementation Embedded)를 기반으로 하고 있으며, 여기에 측정 장비를 연결하여 매우 간단한 CR test-bed를 구성하였다.

[그림 3]에 CR test-bed 구성도를 나타내었다.

엔진 내에서 수행되는 인지 알고리즘은 신경망을 이용하고 있으며, 두 대의 임의 파형 발생기가 송신기 역할을 하는 데 그 중 한 대는 간섭 송신기 역할

을 한다. 그리고 실시간 스펙트럼 분석기는 수신기의 역할을 한다. 엔진은 PC상에서 수행되며 스펙트럼 분석기, 즉 수신기로부터 간섭, 잡음 등 채널 상태 정보를 획득한다. 신경망은 과거의 결정이 통신 시스템의 목표에 어떻게 영향을 주는 지를 기억하고 앞으로 사용할 파라미터를 적절히 결정한다.

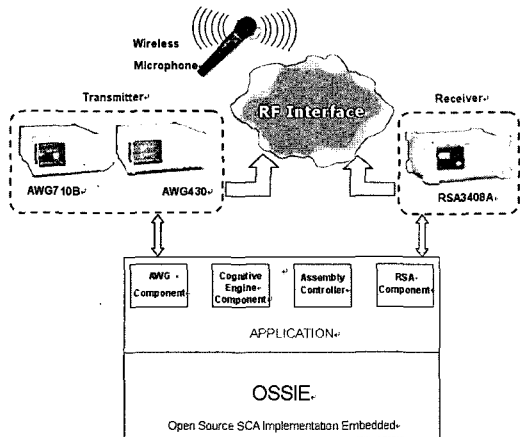
신경망은 이러한 학습 능력과 구현 용이성 때문에 test-bed에 사용되었지만, 한번의 결정이 이루어지고 난 후 트레이닝을 얼마나 해야 하는 가를 결정하는 것은 해결해야 할 매우 어려운 문제이다. 또한 잘못된 결정에 대한 학습 시간 낭비를 줄이기 위해 모든 가능성에 대해 트레이닝을 시켜서는 안된다.

구현된 test-bed의 엔진에서 신경망은 서비스 품질, 스펙트럼 효율, 송신 전력, 이렇게 세 개의 효용 함수를 최대화하기 위하여 채널 신뢰도를 기반으로 송신기의 출력, 변조 방식을 결정한다. 이들 세 개의 효용 함수는 우선 순위와 가중치를 부여하였다. 다음 액션은 이들 효용 함수의 가중치 부여 합이 최대가 되도록 하는 파라미터에 의해 결정된다.

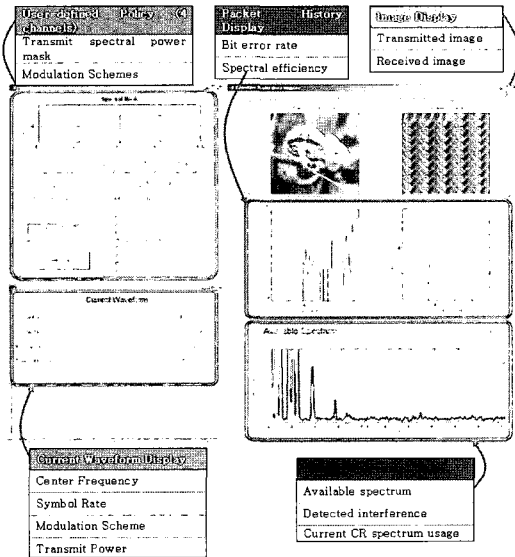
[그림 3]과 같은 test-bed의 동작 방식을 설명하면 다음과 같다.

Test-bed를 시험하기 위하여 송신기에서 수신기로 이미지 데이터를 보낸다. 일정 시간 후 다른 하나의 송신기에서 데이터 송신 채널에 간섭을 발생시킨다 ([그림 4] 참조). 그러면 CE에서 채널 품질 열화를 인지하고 다른 채널로 채널 스위칭을 하여 목적하는 데이터를 전송됨을 확인하였다([그림 5] 참조).

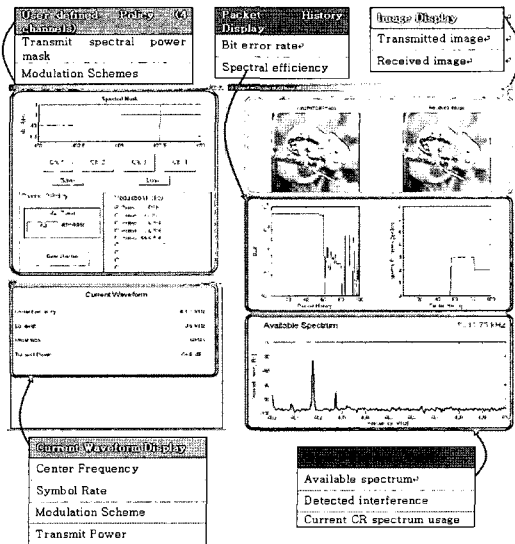
앞서 언급한대로 본 CE에서는 세 가지의 효용 함수를 사용하였다. 우선 순위가 가장 높은 것은 서비스 품질 만족(가중치: 50%), 두 번째 우선 순위는 스펙트럼 사용 효율(가중치: 30%), 세 번째는 송신 출력 최소화(가중치: 20%)이다. 이러한 효용 함수 및 가중치는 실제 CR 통신망에서 사용하고자 하는 응용 서비스에 따라 최적화 되어야 한다. [그림 6]과 [그림 7]에 본 CE에서 사용한 효용 함수의 채널 상



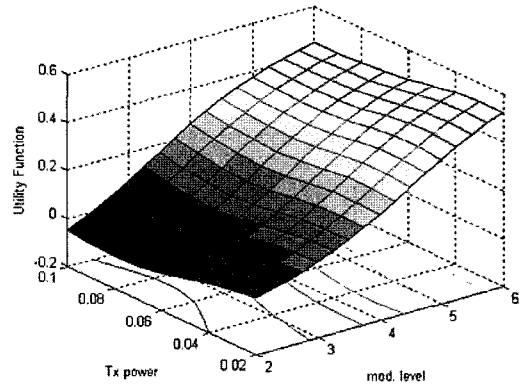
[그림 3] CR test-bed 구성도  
[Fig. 3] Block diagram of CR test-bed.



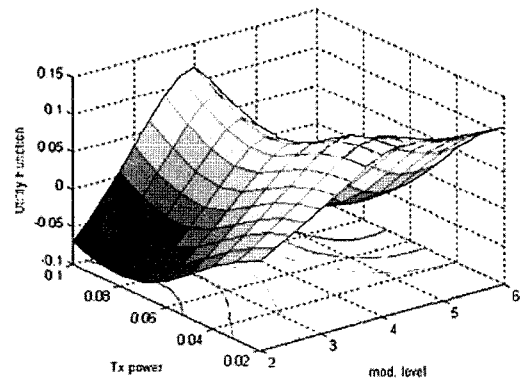
[그림 4] 영상 데이터가 간섭 신호에 의해 깨지는 화면  
[Fig. 4] Screen shot to show the corrupted image data by interfering device.



[그림 5] 간섭을 피하기 위하여 채널 스위칭한 후 성공적으로 영상 데이터가 수신되는 화면  
[Fig. 5] Screen shot to show the successfully received image data after channel switching to avoid interference.



[그림 6] 채널 상태가 좋을 때의 효용 함수  
[Fig. 6] Utility function with high channel reliability.



[그림 7] 채널 상태가 나쁠 때의 효용 함수  
[Fig. 7] Utility function with low channel reliability.

태에 따른 계산 결과를 도시하였다. 계산 결과 효용 함수를 최대로 하는 지점에 해당하는 파라미터를 통신하는데 사용하게 된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 CR을 구현하는 데 핵심이 되는 데이터베이스, 인지 알고리즘에 대해 알아보고, 이들이 수행되는 엔진을 구현한 예에 대해 간단히 설명하였다. 데이터베이스의 경우는 서로 다른 종류의

데이터베이스를 유기적으로 연결하여 통신 파라미터 결정 알고리즘에서 효과적으로 관련 데이터를 입출력하고 가공할 수 있어야 하며, 인지 알고리즘의 경우는 대표적인 알고리즘에 대해서만 알아보았지만 목적하는 서비스 및 통신망에 어떤 알고리즘이 적합한 지, 그리고 선택된 알고리즘을 CR 환경에 맞도록 동작시키기 위한 효용 함수를 정의하고 최적화하는 방법에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Kifer et al., *Database Systems: An Application-Oriented Approach*, Second Edition, Pearson Education, 2005.
- [2] T. Connolly et al., *Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management*, Fourth Edition, Addison Wesley, 2005.
- [3] <http://www.darpa.mil/ato/programs/xg/>
- [4] T. W. Rondeau, Bin Le, C. J. Rieser, and C. W. Bostian, "Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios", *Software Defined Radio Technical Conference and Product Exposition*, pp. 15-18, Nov. 2004.
- [5] <http://www.cs.sandia.gov/opt/survey/main.html>
- [6] <http://www.mprg.org/people/gametheory/publications.shtml>
- [7] James O. Neel, Jeffrey H. Reed, and Robert P. Gilles, "Convergence of cognitive radio networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Mar. 2004.



≡ 필자소개 ≡

송 명 선



1984년: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
1986년 1월~현재: 한국전자통신연구원  
광대역RF연구팀장 책임연구원  
[주 관심분야] Cognitive Radio, 무선통신시스템, 밀리미터파 능동 및 수동 회로, LTCC 활용 기술

Jeffrey H. Reed



1979년~1987년: B.S., M.S., and Ph.D. from the University of California, Davis  
1980년~1986년: Signal Science, Inc.  
1987년~1991년: Private consultant and part-time faculty member at UC Davis  
2000년 6월~2002년 6월: Director of

MPRG

1992년~현재: Willis G. Worcester Professor in the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering of Virginia Tech. and Deputy Director of MPRG  
[주 관심분야] Software radios, Smart antennas, Communications signal processing

김 창 주



1980년: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)  
1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1993년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1979년 12월~1983년 3월: 국방과학연

구소 연구원

1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 전파기술연구그룹장  
[주 관심분야] 전자파 통신, 신호 처리, 무선 인지 기술, 이동통신 시스템, 무선 통신 시스템