

인지 무선 시스템에서 주파수 재사용율과 채널 추정에 따른 주파수 할당 방식의 성능 분석

준회원 김 태 환*, 종신회원 이 태 진*

Performance Analysis of Frequency Allocation Methods Using Frequency Reuse and Channel Estimation in Cognitive Radio Systems

Tae-Hwan Kim* Associate Member, Tae-Jin Lee* Lifelong Member

요 약

최근 이동 통신 네트워크는 2G에서 3G로 이동하고 있으며 주파수의 효율성을 추구하고자 한다. 인지 무선 통신(Cognitive radio) 기술은 secondary 네트워크와 primary 네트워크의 공존을 허용함으로써 주파수의 효율성을 달성할 수 있는 기술로 떠오르고 있다. 하지만, primary 네트워크의 주파수 재사용율을 고려하지 않는 기존 인지 무선 통신 방식은 primary 네트워크와 secondary 네트워크를 포함한 전체 네트워크의 성능을 저하시키게 된다. 본 논문에서는 secondary 네트워크가 primary 네트워크의 파일럿 신호를 감지하여 최적의 가용 주파수를 선택하는 복잡도가 낮은 방식을 제안한다. 그리고, primary 네트워크의 간섭을 최소화하는 제약조건을 가지면서 업링크와 다운링크의 용량을 최대화하는 최적화 문제를 고려한다. 시뮬레이션을 통하여 제안방법과 기존방법의 성능을 비교 하였으며, 제안방법이 기존방법보다 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 작고 채널 사용 변화가 심할 때 특히 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

Key Words : Cognitive Radio, Spectrum Allocation, Pilot Sensing, OFDMA

ABSTRACT

Recently, cellular communication networks are migrating from 2G to 3G. Spectrum utilization tends to be inefficient during the transition. Cognitive radio (CR) technology can be a key solution to increase spectrum efficiency by allowing secondary networks to utilize frequency resource of primary networks. However, conventional CR approaches which do not utilize the frequency reuse factor of primary networks may incur degradation of whole network performance. In this paper, we propose a mechanism that a secondary network senses pilot signals of a primary network and select optimum frequency bands. In order to maximize whole network performance, we formulate an optimization problem subject to interference constraints for a primary network and present algorithms. Simulation results compare the proposed method with the conventional method. Our proposed method shows performance gain over the conventional method if channel variation of a primary network is dynamic and the frequency reuse factor of a primary network is high.

1. 서 론

최근 WiBro나 HSxPA와 같은 무선 통신 기술

의 발달로 인하여 언제 어디서나 광대역의 유비쿼터스 멀티미디어 서비스를 요구하는 무선 단말 사용자 들이 급증하게 되었다. 이러한 요구로 인해 부

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2009-C1090-0902-0005)

* 성균관대학교 정보통신공학부 네트워크시스템연구실 (tthkin, tjlee}@ece.skku.ac.kr

논문번호: KICS2008-10-451, 접수일자: 2008년 10월 13일, 최종논문접수일자: 2009년 4월 1일

족한 무선 주파수의 가치는 끊임없이 상승하였다. 하지만 현재의 고정적인 주파수 할당에 따른 규제는 primary 네트워크에게 독점적으로 주파수를 할당함으로써 주파수 사용의 유연성을 제약하고 있다. 따라서 주파수의 효율적 이용을 위한 개방형 주파수 정책이 필요성이 대두되고 있다. 실제 미국의 FCC (Federal Communications Commission)에서는 주파수의 사용률에 대한 실제 연구를 진행하였고 시간, 공간적으로 주파수 구멍이 상당 부분 존재함을 발견하였다^{[11][12]}. 또한 근본적인 원인이 주파수 사용 권한을 독점적으로 한 네트워크에서 할당하는 주파수 정책에 있다고 밝히고 점유되지 않는 주파수 공유의 가능성에 대해 발표하였다. 따라서 비효율적인 주파수 자원 사용 정책을 개선할 수 있는 새롭고 혁신적인 주파수 자원 관리 방법에 대한 연구가 필요하다.

현재 셀룰러 네트워크 기술은 2G에서 3G로 진화되고 있는 시점이다. 당분간 2G 네트워크와 3G 네트워크는 공존할 수밖에 없다. 이러한 진화 과정에서 3G 기술이 사용하는 주파수 부족은 차츰 심화되고 2G 기술이 사용하는 주파수의 낭비는 심해질 것이다. 2G 기술이 사용하는 고가의 주파수 자원의 효율성 감소는 네트워크 사업자들의 주요 관심 대상이 될 수밖에 없다.

Cognitive Radio (CR) 기술은 SDR (Software Defined Radio) 기술에 기반하며 J. Mitola에 의해 처음 제안되었다^[3]. CR은 동적으로 변화하는 외부 환경을 인지하여 비어있는 주파수를 찾아내고 이를 효율적으로 사용 가능하게 한다^[4]. CR 기술을 이용하여 우리는 낭비되는 2G 네트워크의 주파수 효율성을 향상시킬 수 있다.

CR 기술은 아직까지 해결되지 못한 많은 문제점을 안고 있다. 그 문제점 중 하나가 primary 사용자의 존재를 인지해내는 주파수 센싱 기술이다^[5]. 최근 CR 기술의 주파수 센싱 기술은 대부분 secondary 사용자들 간의 협력을 통한 센싱^[6] 또는 공통 관리 채널을 이용하는 센싱^[7] 등의 방식이 주로 연구되고 있다. 하지만 이러한 방식들은 단말의 복잡도를 증가시키고 일부 주파수 자원을 낭비해야하는 문제점을 가진다. 본 논문에서는 secondary 네트워크에서 파일럿 센싱을 이용하여 최적의 primary 네트워크 주파수를 효율적으로 선택하는 방식을 제안한다. 제안 방법은 기존 방식들에 비해 단말의 복잡도가 높지 않으며 기존 네트워크에 쉽게 적용이 가능하다. 제안 방법은 2G에서 3G로 전환되는 현시점에 주파수 낭비를 줄이는 동시에 주파수 효율을 끌어올릴

수 있는 해결을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식은 전체 전송 대역을 다수의 협대역 직교 부 채널로 분할하여 데이터를 동시에 전송하는 방식으로 등화기 구조가 단순해지고 심볼 간 간섭 및 채널 간 간섭을 제거할 수 있기 때문에 최신 고속의 전송 시스템들의 표준안으로 채택되고 있다^[8]. 또한 인지 무선 기술의 첫 표준화로 진행 중인 IEEE 802.22 WRAN(Wireless Regional Area Network)의 전송 기술로 채택되었다^{[9][10]}. 본 논문에서는 OFDM 기반의 CR 네트워크 제안을 통하여 secondary 네트워크가 primary 네트워크의 주파수 자원을 비연속적으로 사용할 수 있게 하였다^[11-13]. 또한 채널 환경에 적응적인 변복조 및 채널 코딩을 또한 적용할 수 있다^[14]. 본 논문의 최종 목적은 primary 네트워크의 성능 하락을 최소화하고 secondary 네트워크의 성능을 최대화하는데 목적이 있다^[15].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안되는 방식을 기존 방식과의 비교를 통하여 설명하였다. 3장에서 CR 시스템을 최적화 문제로 공식화하였으며, 제안한 알고리즘을 설명하였다. 성능 분석은 4장에 기술하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. Cognitive Radio 주파수 공유 방법

본 논문에서는 제안 주파수 공유 방법을 설명하기 전에 몇 가지 사항을 가정한다. 첫째, secondary 네트워크는 primary 네트워크에 대한 기본 정보를 사전에 인지하고 있다. 인지하는 기본 정보들은 주파수 사용 밴드와 주파수 재사용율과 같은 기초적인 정보들이다. 이러한 정보들은 변화하지 않는 정적인 값이기 때문에 secondary 네트워크의 복잡도에 영향을 미치지 않는다. 또한 제안 방법은 이들 정보를 이용하여 secondary 네트워크의 주파수 중 최적의 채널 세트를 결정할 수 있게 된다. 둘째, secondary 네트워크는 primary 네트워크의 각 서브 채널 사용 정보를 주기적으로 얻는다. 채널 사용 정보는 secondary 네트워크의 채널 센싱을 통해서 또는 primary 네트워크로부터 협력을 통해 주기적으로 전송 받을 수 있다. Secondary 네트워크가 센싱을 하게 될 경우 secondary 네트워크 기지국 또는 단말에 이러한 기능 탑재를 위한 수정이 필요하게 된다. 만약 primary 기지국과 secondary 기지국의 위치가 동일하다면 이중 네트워크 간 협력이 가능

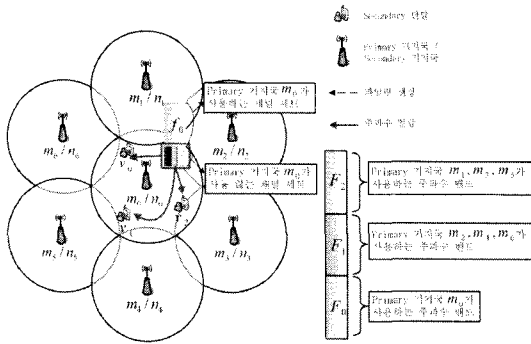


그림 1. 기존 secondary 네트워크의 주파수 공유 방법

하여 정보 전송이 쉽게 이루어질 것이다. 제안한 방법의 설명을 위하여 그림 1, 2에서는 primary 기지국 $m_0 \sim m_6$ 그리고 secondary 기지국 $n_0 \sim n_6$ 각각의 위치가 동일하며 셀 반경도 동일하다고 가정하였다. 이러한 경우는 2G와 3G의 시스템을 동시에 운영하는 네트워크 사업자의 경우일 것이며 기지국의 위치가 동일할 경우 primary 네트워크로부터 채널 사용 정보의 주기적인 전송이 쉽게 이루어지게 된다. 또한, 2G 이하의 primary 시스템은 주파수 재사용율 1/3 이하를 사용하기 때문에 그림에서는 primary 네트워크의 주파수 재사용율을 1/3이라 가정하였다.

2.1. 재사용 계수를 고려하지 않은 기존 주파수 공유 방법

그림 1은 기존의 CR 시스템이 primary 네트워크와 주파수를 공유하는 방법을 나타낸다. 중앙 셀에 존재하는 secondary 단말 $v_0 \sim v_2$ 는 동일 셀에 위치하는 primary 기지국 m_0 의 주파수 F_0 를 센싱하여 primary 기지국이 사용하는 영역 f_0 를 제외하 나머지 영역을 사용하게 된다. 그림과 같은 기존 CR 시스템에서 secondary 네트워크가 primary 네트워크와 주파수를 공유하는 방식은 센싱이 실패하였을 경우 동일 셀 내에서 secondary 네트워크와 primary 네트워크 간 간섭이 발생하는 문제점이 존재한다. 또한 2G 이하의 네트워크는 채널 간의 간섭을 줄이기 위해 주파수 재사용을 기본적으로 많이 사용하지만 기존 방법은 이에 대한 고려가 존재하지 않기 때문에 primary 네트워크가 주파수 재사용을 사용하는 경우에 secondary 네트워크의 가용 주파수가 줄어든다는 단점이 있다. 예를 들어 그림 1과 같이 primary 네트워크의 주파수 재사용율 1/3

을 사용할 경우 각 secondary 셀은 전체 primary 네트워크 주파수 밴드의 1/3의 주파수 밴드만 사용할 수 있게 된다. 주파수 재사용율이 작아짐에 따라 가용한 주파수는 더욱 줄어들게 된다.

2.2 제안하는 파일럿 센싱 및 주파수 공유 방법

Primary 네트워크에게 미치는 간섭을 최소화하는 동시에 secondary 네트워크의 성능을 최대화하기 위해서는 secondary 단말의 위치에 따라 최적의 주파수 할당이 가능해야 한다. 본 논문에서는 secondary 단말에 추가적인 오버헤드를 발생시키는 GPS와 같은 장비를 사용하지 않고 파일럿 센싱을 이용한 최적의 주파수 선택 방법을 제안한다. 셀룰러 단말의 경우 기본적으로 파일럿 신호 인지 기능을 보유하기 때문에 일부 기능의 수정만으로 제안하는 방법의 구현이 가능하다.

그림 2는 본 논문에서 제시한 주파수 공유 방법을 나타내었다. 그림 1과 마찬가지로 primary 네트워크는 주파수 재사용율 1/3을 사용한다고 가정하였다. Primary 네트워크의 주파수 밴드는 $F_0 \sim F_2$ 의 3영역으로 분리되며 각 primary 기지국 별로 사용하는 밴드가 구분되어 있다. 그림 2(a)에서 secondary 단말 v_0 는 인접 primary 기지국 $m_0 \sim m_6$ 들이 주기적으로 전송하는 파일럿 신호를 센싱한다. 제안한 방식은 센싱된 파일럿 신호의 크기 비교를 통해 secondary 단말의 위치에 따른 최적의 주파수를 할당하게 된다. 그림 2에서 secondary 단말 v_0 는 primary 네트워크의 주파수 밴드 $F_0 \sim F_2$ 중 F_1 을 사용하는 것이 primary 네트워크에게 미치는 간섭이 가장 작다. 본 논문에서는 각 secondary 단말은 수신한 파일럿 신호 중 4번째로 큰 신호를 전송한 primary 기지국의 주파수 밴드를 선택하는 것을 제안한다. 따라서 그림 2(b)와 같이 secondary 단말 v_0 는 primary 기지국 m_2 의 주파수 밴드 F_1 을 선택하게 된다. Primary 네트워크의 주파수 재사용율이 1/7인 경우에 secondary 단말로부터 7번째로 먼 primary 기지국 m_4 의 주파수 밴드를 사용하는 것이 최적이지만, 파일럿 신호 크기가 5번째 이상 되는 기지국을 선택할 경우 인접 7 개 셀을 벗어난 2계층 이상의 기지국이 선택될 가능성이 있다.

기존 주파수 공유 방식은 primary 네트워크의 주파수 재사용율을 고려하지 않았으며 각 secondary 단말이 가장 인접한 primary 기지국의 주파수 밴드

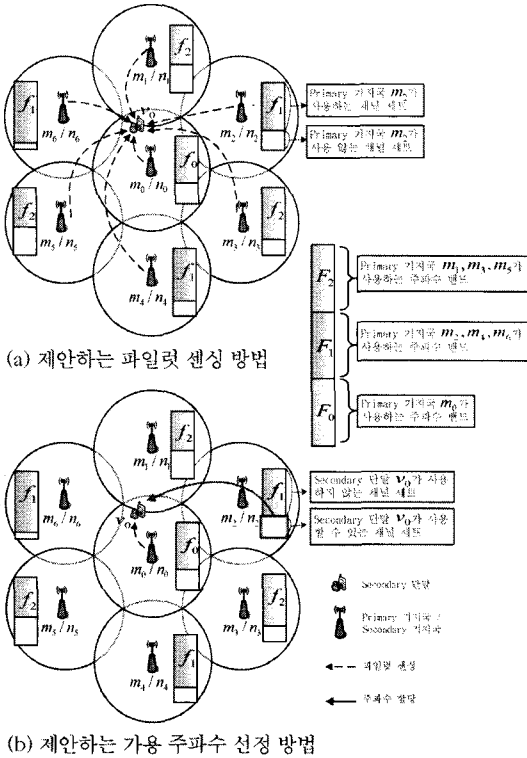


그림 2. 제안 secondary 네트워크의 주파수 공유 방법

를 사용하기 때문에 제안한 주파수 공유 방식에 비해 secondary 네트워크의 가용 주파수 자원도 적으며 채널 사용 정보의 정확성이 떨어질 경우 간섭을 일으킬 확률도 커진다. 하지만 기존 주파수 공유 방식이 가용한 주파수 자원이 적다고 하여 각 secondary 단말이 primary 네트워크의 전체 주파수 영역을 모두 사용하게 되면 secondary 네트워크가 primary 네트워크에게 미치는 간섭을 증가 시키는 문제점이 발생한다. 제안된 방식의 경우 각 secondary 단말들은 파일럿 센싱을 통하여 각자의 위치에 따라 primary 네트워크의 주파수 중 최적의 주파수를 선택하게 된다. 따라서 그림 2의 중앙 셀의 secondary 기지국 n_0 와 통신하는 secondary 단말 들은 주파수 밴드 F_0 를 제외한 F_1, F_2 를 가용한 주파수 밴드로 선택하게 된다.

III. 최적 공유 정식화 및 제안 주파수 할당 알고리즘

3.1 최적 주파수 공유 정식화

본 절에서는 primary 네트워크와 secondary 네트

워크 간 최적의 주파수 공유 문제를 수학적 모델을 이용하여 공식화 하였다. Primary와 secondary 기지국의 집합을 각각 M 과 N 으로 각각 정의한다. Primary 기지국 $m (\in M)$ 에 위치하는 primary 단말의 집합을 U_m , secondary 기지국 $n (\in N)$ 에 위치하는 secondary 단말의 집합을 V_n 으로 정의한다. Primary 네트워크가 사용하는 서브 채널의 집합을 C 로 나타낸다. Primary 기지국 m 이 primary 단말 u_m 으로 서브 채널 c 를 통해 다운링크 신호를 전송 할 때 수신되는 파워를 $P_{u_m, m}^c$ 로 나타낸다. 이 신호에 대한 secondary 네트워크의 간섭은 서브 채널 C 를 사용하는 모든 secondary 기지국의 집합 N^c 로부터 수신되는 파워의 합으로 이루어지며 $\sum_{n \in N^c} P_{u_m, n}^c$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 primary 기지국 m 이 primary 단말 u_m 과 서브 채널 c 를 통해 다운링크로 통신할 때 secondary 네트워크의 간섭만을 고려한 신호 대 간섭비 (Signal to Interference plus Noise Ratio)는

$$SINR_{u_m, m}^c = \frac{P_{u_m, m}^c}{\sum_{n \in N^c} P_{u_m, n}^c + N_0} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며 N_0 는 열잡음(thermal noise)을 의미한다.

본 논문의 목적은 primary 네트워크와 secondary 네트워크를 모두 고려한 전체 네트워크의 주파수 효율을 최대화하는 데 있다. 하지만 primary 네트워크는 주파수 사용을 공식적으로 허가 받은 네트워크이기 때문에 최소한의 성능을 보장 받아야 한다. 따라서 앞에 정의한 식 (1)을 이용하여 우리는 primary 네트워크의 신호 대 간섭비의 임계점을 정의 할 수 있다. Primary 기지국 m 이 primary 단말 u_m 과 다운링크로 통신할 때의 사용하는 모든 서브 채널 집합 $C_{u_m, m}$ 에 대한 평균 SINR 값은

$$\overline{SINR}_{u_m, m} = \frac{\sum_{c \in C_{u_m, m}} SINR_{u_m, m}^c}{|C_{u_m, m}|} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, 이 식을 이용하여 primary 기지국 m 과 통신하는 모든 primary 단말 집합 U_m 에 대한 평균 SINR 값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{SINR}_m = \frac{\sum_{u \in U_m} \overline{SINR}_{u,m}}{|U_m|} \quad (3)$$

최종적으로 primary 네트워크의 다운링크 최소 성능 보장을 위한 수식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\overline{SINR}_m \geq SINR_{thr}, \forall m \in M \quad (4)$$

우리의 최종 목적은 primary 네트워크와 secondary 네트워크를 모두 고려한 전체 네트워크의 처리율 향상에 있다. $r_{u_m, m}^c$ 를 primary 기지국 m 이 primary 단말 u_m 과 서브채널 c 를 통하여 다운링크 통신할 때의 처리율이라고 하면, primary 기지국 m 과 단말 u_m 사이의 총 처리율은

$$r_{u_m, m} = \sum_{c \in C} r_{u_m, m}^c \quad (5)$$

로 구해 질 수 있으며, primary 기지국 m 의 다운링크에 대한 총 처리율은

$$r_m = \sum_{u \in U_m} r_{u, m} \quad (6)$$

로 구해진다. 동일한 방법으로 secondary 기지국 n 의 다운링크에 대한 총 처리율 r_n 역시 정의 될 수 있다. 따라서 전체 네트워크의 처리율 향상을 위한 최종 목적 함수를 다음 식으로 나타 낼 수 있다.

$$\max \left(\sum_{m \in M} r_m + \sum_{n \in N} r_n \right) \quad (7)$$

3.2 제안 주파수 할당 알고리즘

본 절에서는 2절에서 제안한 파일럿 센싱 및 주파수 공유 알고리즘을 그림 3-5의 순서도로 나타내었다. 그림 3과 4는 각각 secondary 단말과 기지국의 파일럿 센싱 과정을 나타내었다. 그림 3은 각

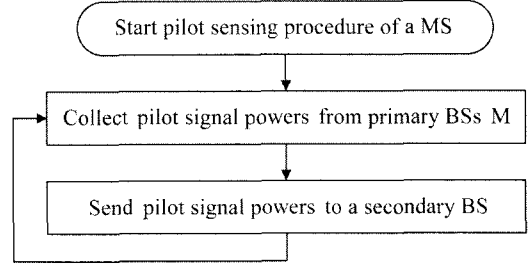


그림 3. Secondary 단말의 파일럿 센싱 알고리즘

secondary 단말이 primary 기지국들로부터 파일럿 신호의 크기를 측정하여 secondary 기지국으로 전송하는 과정을 나타낸다. 이 과정은 주기적으로 반복되어 실행된다. 그림 4는 한 secondary 기지국이 자신과 통신하는 모든 secondary 단말들로부터 주기적으로 파일럿 신호 정보를 수신 받는 과정을 나타낸다. 사전에 secondary 기지국 들은 primary 네트워크의 주파수 재사용율과 각 primary 기지국들이 사용하는 주파수 밴드가 무엇인지 알고 있어야 한다. 또한 secondary 기지국 들은 primary 기지국들의 채널 사용 정보를 주기적으로 전송 받게 된다.

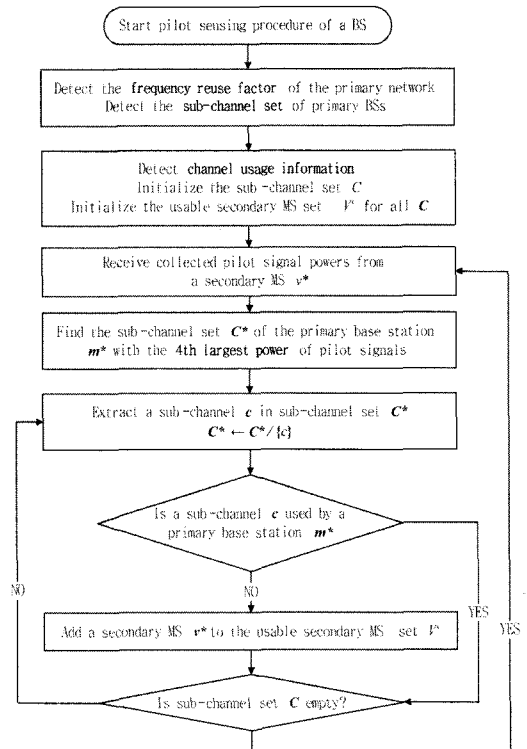


그림 4. Secondary 기지국의 secondary 단말로부터 수신한 파일럿 센싱 정보를 secondary 단말 세트 V^c 결정 알고리즘

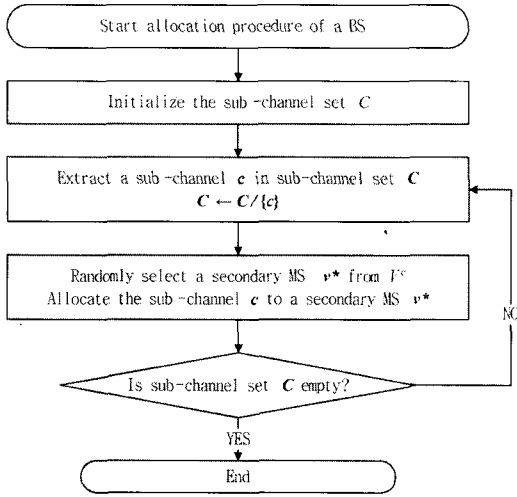


그림 5. Secondary 단말 세트 V^c 를 이용한 secondary 기지국의 주파수 할당 알고리즘

만약 secondary 단말 v^* 로부터 파일럿 신호 파워에 대한 정보를 전송 받게 되면 secondary 기지국은 4 번째로 큰 파일럿 신호 크기를 가진 primary 기지국 m^* 을 찾게 되고, m^* 이 사용하는 서브 채널 집합 C^* 을 알아낸다. 집합 C^* 내의 각 서브 채널 c 가 primary 기지국 m^* 에 의해 사용 되는지 여부에 따라 서브 채널 c 를 사용할 수 있는 secondary 단말들의 집합 V^c 를 설정하게 된다. 서브 채널 c 가 primary 기지국 m^* 에 의해 사용되지 않을 경우 secondary 단말 v^* 를 집합 V^c 에 추가한다. 이 과정은 모든 서브채널 집합 C^* 에 대해 반복 수행된다. 이러한 과정이 모든 secondary 단말로부터 파일럿 정보를 수신하여 최종적으로 V^c 를 설정하게 된다. 집합 V^c 는 주파수 할당 과정에서 사용 된다.

Secondary 기지국의 secondary 단말에 대한 서브 채널 할당 과정은 그림 5에 순서도로 나타내었다. 할당 과정은 secondary 단말의 파일럿 센싱 정보를 이용하여 생성된 V^c 값을 이용하여 이루어진다. V^c 를 이용하여 어떠한 주파수 할당 방식도 적용이 가능하다. 본 논문의 목적은 제안한 파일럿 센싱 및 주파수 선택 방법의 성능 검증에 있으므로 제안 방식의 할당 알고리즘은 단순한 랜덤 할당 방식을 적용하였다. 기존 방법도 비교 목적을 위하여 랜덤 할당 방식을 적용하였다. 할당 과정은 각 secondary 기지국이 서브 채널 집합 C 의 모든 서브 채널 c 에 대해 secondary 단말 집합 V^c 에서 랜덤하게 한 개

의 단말 v^* 를 선정하여 할당하는 과정으로 이루어진다.

IV. 제안 방법 성능 평가

본 절에서는 기존 방법과 제안된 방법의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 표 1에 기존 방식 (Conventional)과 제안된 방식(Proposed)의 차이점에 대하여 간단히 비교하였다. 2.1절에서 이미 설명하였듯이 기존 방식의 경우 가장 인접한 primary 기지국의 주파수 밴드 영역을 선택하여 사용하게 된다. 제안 방식의 주파수 밴드 선택 방법은 가장 인접한 primary 기지국의 주파수 밴드를 제외한 나머지 인접한 6개 primary 기지국의 주파수 밴드 중에서 선택하는 방식이다. 기존 방식과 달리 제안 방식은 파일럿 센싱을 통하여 자신의 위치를 파악한 후 3.2 절에서 제안한 알고리즘에 따라 최적의 주파수를 선택하게 된다. 또한 시뮬레이션 비교의 정확성을 위해 기존 방식을 확장한 방식 (Conventional-E)을 제시하였다. 확장 방식은 기존 방식과 제안한 방식을 혼합한 방식이다. 파일럿 센싱을 사용하지 않고 인접한 모든 셀의 주파수 사용 정보를 단순히 사용하게 된다. 이 방식의 경우 primary 네트워크의 미치는 영향을 최소화 할 수 있지만 secondary 네트워크의 성능은 낮을 것으로 예상된다.

표 2는 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타내었다. Secondary 기지국과 primary 기지국의 위치와 반경은 동일하게 설정하였으며, 전체 네트워크에 총 19개의 셀을 위치 시켰다. Primary 기지국은 각 primary 단말이 최고 1Mbps의 처리율 성능을 갖도록 할당하였다. 표 3은 성능에 영향을 미치는 시뮬레이션 변수 값을 나타낸다. Primary 네트워크의 주파수 사용율은 1, 1/3, 1/7로 변화를 시켰다. 본 논문에서는 primary 네트워크가 2G 이하의 시스템이며 주파수 재사용율 1을 사용하지 않는다는 가정을 기본적으로 하였지만 시뮬레이션 비교를 목적으로 그래프를 추가하였다. Secondary 네트워크가 primary 네트워크로부터 채널 사용 정보를 사용할 때, 채널

표 1. 제안된 방법과 기존 방법과의 비교

Methods	서브 채널 선택 방법
Proposed	인접한 6개 primary 기지국의 채널 선택
Conventional	가장 인접한 1개 primary 기지국의 채널 선택
Conventional-E	전체 primary 기지국의 채널 선택

표 2. 시뮬레이션 파라미터.

Parameter	Value
전체 네트워크 크기	Two-tier (19 cells)
셀 간 거리	1000 meter
서브 채널 갯수	768
다운링크 심볼 속도	5600 symbol/sec
열잡음	-174 dBm/Hz
기지국 전송 파워	20 W
채널 모델	COST231-WI (표준 편차 = 10 dB) ^[16]

표 3. 시뮬레이션 변수

Variable	Value
Primary 네트워크 주파수 재사용율	1, 1/3, 1/7
Secondary 네트워크 센싱 성공률 (α)	0.3, 0.6, 0.9
Primary 단말 갯수	30, 60, ..., 300

정보의 정확도를 센싱 성공률로 표현하였다. 이는 primary 네트워크로부터 채널 사용정보를 주기적으로 전송받을 경우 primary 네트워크의 채널 사용 정보가 변동되지 않을 확률과 동일하다. 센싱 성공률이 1일 경우 primary 네트워크의 채널 사용 정보를 secondary 네트워크는 100% 정확하게 인지하며 primary 네트워크가 사용하는 채널의 변화가 정적임을 의미한다. Primary 단말의 수는 30부터 최대 300까지 30단위로 증가시켰다. Secondary 단말의 수는 300으로 고정하였다.

그림 6~8은 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 각각 1, 1/3, 1/7 일 때, 제안 방법, 기존 방법 그리고 확장 방법의 secondary 단말 당 처리율 성능을 비교한 그래프이다. 그림 9~11은 primary 셀과 secondary 셀의 처리율을 합한 전체 네트워크의 처리율에서 secondary 시스템이 존재하지 않고 primary만 존재하는 시스템의 처리율을 뺀 셀 당 처리율을 센싱 성공률의 변화에 따라 세 가지 방법들을 비교하였다. 이를 통해 CR 기술이 적용되지 않을 경우에 비해 CR 기술이 적용될 때 얼마만큼의 성능 향상이 이루어지는지 확인할 수 있게 된다.

그림 6은 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 1일 때, 제안 방법과 기존 방법 그리고 확장 방법의 secondary 단말 당 처리율 성능을 비교한 그래프이다. 세 가지 방법 모두 primary 단말의 수가 적을 경우에는 센싱 성공률이 높을 때, primary 단말 수가 많을 경우에는 센싱 성공률이 낮을 때 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. Primary에게 미치는 간섭을 고려하지 않는다면 기본적으로 secondary 네트워크는 primary 네트워크의 주파수를 많이 사

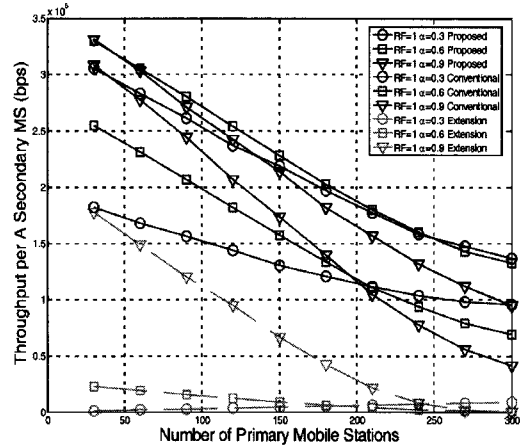


그림 6. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1 일 때 센싱 성공률에 따른 secondary 단말 당 처리율 성능

용하여야 성능이 올라간다. 따라서 primary 단말의 수가 증가할 경우 세 가지 방법 모두 센싱 성공률의 낮을 경우에 secondary 네트워크의 가용 채널이 늘어나서 성능이 더 좋아지게 된다. 또한, 제안한 방법의 secondary 단말 성능은 기존 방법보다 센싱 성공률이 0.3일 경우 최대 0.123 Mbps, 약 68% 이상 향상시킬 수 있음을 확인 할 수 있다. Primary 단말의 수가 적을 경우엔 가용한 주파수도 많으며 센싱 성공률이 부정확해도 primary로부터 받는 간섭도 작기 때문에 기존 방법보다 큰 성능 차이를 보이지만 primary 단말의 수가 많아질 경우에는 성능 차이가 줄어들음을 볼 수 있다. 확장 방법의 경우 동일 primary 기지국과 인접 primary 기지국들의 채널 사용 정보를 모두 이용하기 때문에 secondary의 가용 주파수 자원이 부족하여 가장 성능이 좋지 못하다.

그림 7은 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 1/3으로 증가 될 경우 제안 방법과 기존 방법과의 성능 차이가 더욱 커짐을 보여준다. 제안 방법과 기존 방법의 성능 차이는 센싱 성공률이 0.3일 때 최대 약 0.175Mbps 이상 차이가 나며 센싱 성공률이 0.9일 때 최대 약 7배정도 차이가 난다. 이러한 성능 차이는 제안 방법이 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 증가할 경우 primary 네트워크로부터 받는 간섭이 줄어들어 secondary 네트워크의 성능이 향상 되기 때문이며, 기존 방법은 오히려 주파수 재사용율이 증가함에 따라 가용한 주파수가 줄어들어 성능이 떨어지기 때문이다. 앞서 설명한 것과 같이 센싱 성공률이 증가할 경우 primary 단말의 수

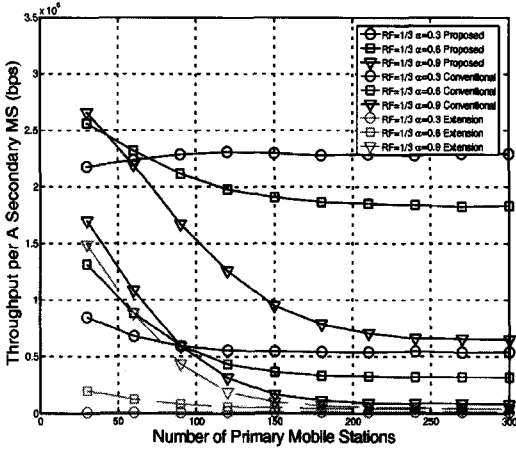


그림 7. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1/3 일 때 센싱 성공률에 따른 secondary 단말 당 처리율 성능

가 증가할수록 제안 방법의 secondary 네트워크는 primary 네트워크로부터 가용한 주파수가 줄어들어 성능이 떨어진다. 그림 8의 주파수 재사용율이 1/7 인 경우에도 그림 7과 동일한 패턴의 결과를 볼 수 있으며 제안 방법과 기존 방법의 성능 차이는 센싱 성공률이 0.3일 때 약 0.187 Mbps 이상, 센싱 성공률이 0.9일 때 약 7.3배 이상 차이가 남을 알 수 있다.

그림 9~11은 CR 기술이 적용되지 않는 경우 이 비해 CR 시스템이 적용될 경우 얼마만큼의 성능이 향상 되는지 세 가지 방법을 센싱 성공률의 변화에 따라 비교하였다. 그림 9는 주파수 재사용율이 1일 경우에 그림 6에서 살펴본 것처럼 secondary 단말의 처리율 성능은 뛰었지만 primary 단말의 수가

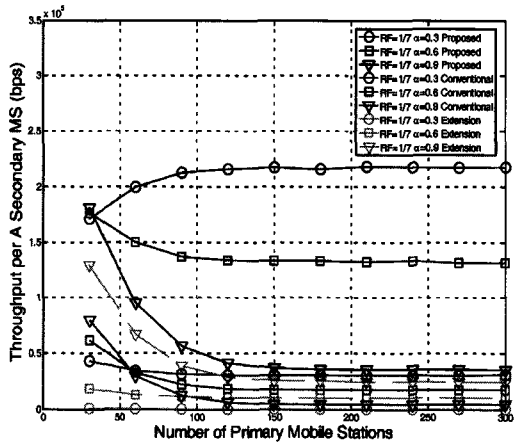


그림 8. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1/7 일 때 센싱 성공률에 따른 secondary 단말 당 처리율 성능

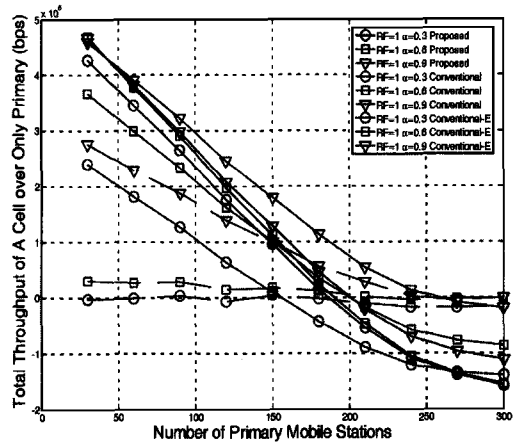


그림 9. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1 일 때 primary 네트워크만 존재하는 시스템 대비 센싱 성공률에 따른 전체 네트워크 처리율 성능 향상

많은 경우에는 전체 네트워크 처리율 성능이 오히려 CR 시스템이 존재하지 않는 경우 보다 좋지 않음을 볼 수 있다. 이는 제안한 방법이 주파수 재사용율이 1인 경우의 primary 네트워크를 가정하지 않기 때문에 secondary 네트워크가 primary 네트워크에게 미치는 간섭이 매우 커서 primary 네트워크의 성능이 떨어졌기 때문이다. 하지만 기존 방법 또한 성능이 좋지 않음을 볼 수 있으며, 확장 방법의 경우 primary 네트워크의 주파수 사용 현황을 가장 정확하게 반영하기 때문에 primary 네트워크만 존재하는 시스템의 성능 패턴과 비슷함을 볼 수 있다. 그림 9의 결과를 통해 primary 네트워크의 주파수 재사용율이 1인 경우에는 primary 단말의 수가 적은 경우에는 CR 기술을 적용할 경우 전체적인 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있지만, primary 단말의 수가 많은 경우에는 오히려 CR 기술을 적용하지 않는 편이 더 좋을 수 있다. 하지만 2G 이하의 시스템의 경우 주파수 재사용율 1/3 이하를 사용하기 때문에 그림 10과 11에서의 결과와 같은 CR 기술의 적용을 통한 전체 시스템의 성능 향상을 볼 수 있다.

제한된 방법은 주파수 재사용율이 1/3이 되면 그림 10에서와 같이 매우 뛰어난 성능을 보여준다. 제한된 방법은 기존 방법에 비해 센싱 성공률이 0.3 일 때 최대 약 2.9 Mbps 이상 성능차이를 보이며 가장 뛰어난 성능을 보여 준다. 이는 주파수 재사용율이 증가함에 따라 이중 네트워크 간 간섭이 크게 감소하였으며, secondary 네트워크의 처리율 또한 크게 상승되었음을 의미한다. 또한 앞서 설명한 것

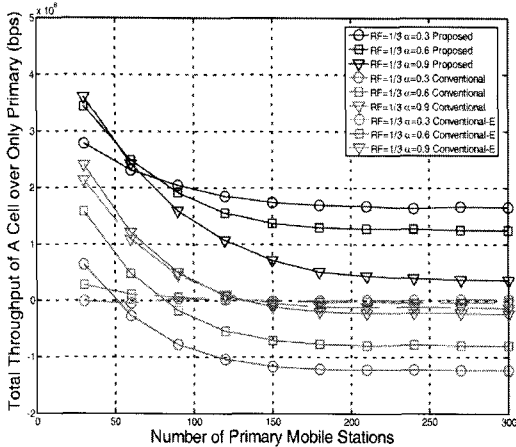


그림 10. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1/3 일 때 primary 네트워크만 존재하는 시스템 대비 센싱 성공률에 따른 전체 네트워크 처리율 성능 향상

처럼 제한한 방법은 센싱 성공률이 낮을 경우에 secondary 네트워크의 가용한 주파수가 늘어나서 secondary의 성능이 향상되며 이러한 성능 향상이 primary와 secondary 네트워크의 성능을 합한 전체 네트워크의 처리율 향상에도 도움이 됨을 볼 수 있다. 하지만 센싱 성공률이 낮을 경우 primary 네트워크에 미치는 간섭은 커질 것이다. 기존 방법은 가장 인접한 셀의 primary 기지국의 주파수를 사용하기 때문에 센싱 성공률이 낮을 경우 이중 시스템 간 간섭이 커지게 된다. 따라서 그림 7과 같이 센싱 성공률이 낮을 경우 secondary 네트워크의 처리율 향상이 있었지만 primary 네트워크의 처리율 감소 폭이 더 크기 때문에 전체 네트워크 성능이 감소하게 된다. 그림 11의 주파수 재사용율이 1/7로 더욱 증가 되면 제안 방법과 기존 방법과의 성능 격차는 최대 센싱 성공률이 0.3일 경우 약 3.25 Mbps로 더욱 심화됨을 볼 수 있다. 또한 기존 방법의 경우 확장 방법보다도 최대 1.13 Mbps 이상 낮은 성능을 보여 준다. 따라서 주파수 재사용율이 작아짐에 따라 제안된 방법은 기존 방법 보다 좋은 성능을 보여주며 특히 센싱 성공률이 낮을 경우 더욱 큰 성능 차이가 발생함을 결론 내릴 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 secondary 단말들이 primary 기지국의 파일럿 신호를 센싱한 후 파일럿 신호 크기를 비교하여 최적의 가용 주파수를 선택하는 방법을

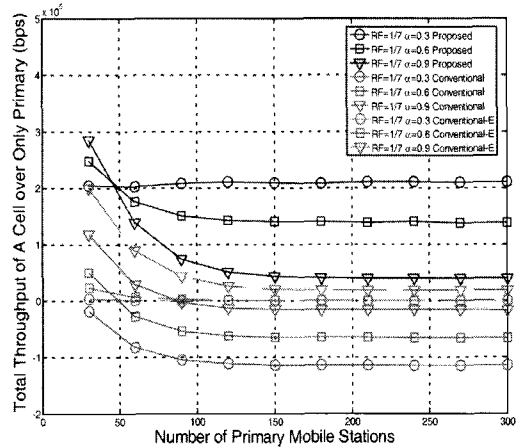


그림 11. Primary 네트워크 주파수 재사용율 1/7 일 때 primary 네트워크만 존재하는 시스템 대비 센싱 성공률에 따른 전체 네트워크 처리율 성능 향상

제안하였다. 또한 primary 네트워크의 간섭을 최소화하고 전체 네트워크의 성능을 최대화하기 위한 최적화 문제를 공식으로 제시하였다. 최적화 문제 해결을 위하여 파일럿 센싱 및 주파수 선택 방법의 알고리즘을 제안하고 순서대로 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 기존 방법과 비교한 결과, 제안 방법이 primary 네트워크의 채널 사용 변화가 크고 주파수 재사용율이 낮을 경우 주파수 재사용율을 고려하지 않는 기존 방법보다 뛰어난 성능을 보임을 확일 수 있었다. 하지만 주파수 재사용율이 1인 경우에는 primary의 단말이 적을 경우 CR 기술의 적용이 효율성을 발휘하지만 primary 단말이 많은 경우 오히려 효율성을 떨어뜨림을 볼 수 있었다. 따라서 주파수 재사용율 사용하는 2G 이하의 시스템의 사용자가 줄어드는 현 시점에서 제안된 방법이 주파수 효율성을 보장할 수 있는 CR기술로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Limits on Communications in a Cognitive Radio Channel," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 6, pp. 44-49, Jun. 2006.
- [2] Federal Communications Commission, "Spectrum policy task force report," Rep. ET Docket no. 02-155 Nov. 2002.
- [3] J. Mitola et al., "Cognitive Radio: Making Software Radios more Personal," *IEEE Pers.*

- Commun.*, vol. 6 no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [4] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [5] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios," in Proc. of 38th Asilomar Conference Signals, Systems, and Computers, pp. 772-776, 2004.
- [6] G. Ganesan, Y. Li, B. Bing, and S. Li, "Spatiotemporal Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 5-12, Jan. 2008.
- [7] P. D. Sutton, K. E. Nolan, and L. E. Doyle, "Cyclostationary Signatures in Practical Cognitive Radio Applications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 13-24, Jan. 2008.
- [8] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications.*, Artech House, London, 2000.
- [9] J. Y. Won, S. B. Shim, Y. H. Kim, S. H. Hwang, M. S. Song, "An Adaptive OFDMA Platform for IEEE 802.22 Based on Cognitive Radio," in Proc. IEEE Asia-Pacific Conference, Seoul, Korea, Aug. 2006.
- [10] Y. Chen, N. Han, S. H. Shon, and J. M. Kim, "Dynamic Frequency Allocation Based on Graph Coloring and Local Bargaining for Multi-Cell WRAN System," in Proc. of Asia-Pacific Conference Communications, pp. 1-5, 2006.
- [11] T.-H. Kim and T.-J. Lee, "Spectrum Allocation Algorithms for Uplink Sub-carriers in OFDMA-Based Cognitive Radio Networks," in Proc. of 4th International Innovations Information Technology, pp. 51-54, 2007.
- [12] A. M. Wyglinski, "Effects of Bit Allocation on Non-contiguous Multicarrier-based Cognitive Radio Transceivers," in Proc. of IEEE 64th Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, 2006.
- [13] S. S. Jeong, W. S. Jeon, and D. G. Jeong, "Dynamic Channel Sensing Management for OFDMA-Based Cognitive Radio Systems," in Proc. of IEEE 65th Vehicular Technology Conference, pp. 2646-2650, 2007.
- [14] M. B. Pursley, and T. C. Royster IV, "Low-Complexity Adaptive Transmission for Cognitive Radio in Dynamic Spectrum Access Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 83-94, Jan. 2008.
- [15] A. T. Hoang and Y. C. Liang, "Maximizing Spectrum Utilization of Cognitive Radio Networks Using Channel Allocation and Power Control," in Proc. of IEEE 64th Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, 2006.
- [16] D. S. Baum, J. Hansen, and J. Salo, "An Interim Channel Model for Beyond-3G Systems," in Proc. of IEEE 61st Vehicular Technology Conference, pp. 3132-3136, 2005.

김 태 환 (Tae-Hwan Kim)

준회원



2007년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 졸업 (학사)

2009년 2월 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 졸업 (석사)

2009년 2월~현재 삼성전자 DMC 연구원

<관심분야> Cognitive Radio, Femtocell Systems, Cooperative Communications

이 태 진 (Tae-Jin Lee)

중신회원



1989년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업 (학사)

1991년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업 (석사)

1995년 12월 University of Michigan, Ann Arbor, EECS (M.S.E.)

1999년 5월 University of Texas, Austin, ECE (Ph.D.)

1999년 5월~2001년 2월 삼성전자 중앙연구소 책임 연구원

2001년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부 교수

<관심분야> 통신 네트워크 성능 분석 및 설계, 무선 LAN/PAN/MAN, ad-hoc/센서 네트워크, 무선 통신 시스템, 광 네트워크