

IMT-2000 CDMA 시스템의 효율적 주파수 관리에 관한 연구

정회원 김 호*, 진 고 환**, 조 철 회**, 차 동 완***

Efficient Frequency Management in the IMT-2000 CDMA System

Ho Kim*, Go-whan Jin**, Chol-hoe Cho**, Dong-wan Tcha*** *Regula Members*

요 약

이 논문은 IMT-2000 CDMA 시스템의 주파수 관리 문제를 다룬다. 다양한 서비스, 상이한 대역폭을 갖는 채널, 중첩셀 구조 등과 같은 시스템의 특성을 검토하여 문제를 정의한다. 고려하는 문제는 제약 최적화 문제로 모형화된다. 제약식은 통화 품질을 만족시키면서 서비스를 수용하는 것이고, 목적식은 가급적 적은 대역폭을 소비하는 것이다. 이 문제를 해결하여 다음과 같은 의사 결정을 하고자 한다 1) 각 종류의 셀에 어떤 서비스를 할당할 것인가, 2) 각 셀에 어떤 유형의 FA들을 설치할 것인가. 제안된 주파수 관리 정책의 유효성이 실험을 통하여 증명된다.

ABSTRACT

We address the frequency management in the IMT-2000 CDMA system. The system characteristics such as multiple classes of services, multiple kinds of channels with different bandwidths, overlaid cell structure, etc. are examined to make way for the problem definition. The problem is formulated as a constrained optimization model, the objective of which is to consume as narrow bandwidth as possible while satisfying various multimedia demands with required QoS. A solution algorithm is developed which generates two sets of optimal decisions: 1) which combination of service classes to assign to each cell, 2) which set of frequency channels of varying bandwidths to allocate to each cell. The effectiveness of the proposed deployment policy is demonstrated via computational experiments.

I. 서 론

CDMA 시스템에서 일정한 대역폭을 점유하는 FA(Frequency Assignment)가 제공하는 통화 채널은 한정되어 있다. 따라서 통화 채널이 많이 필요할수록 시스템이 소비하는 대역폭은 넓어진다. 본 논문은 CDMA 시스템의 한정된 주파수 자원으로 트래픽을 경제적으로 수용하기 위한 주파수 관리 문제를 IMT-2000 운용환경에서 다루고자 한다.

IMT-2000은 CDMA 접속기술을 사용할 것으로 예상된다. IMT-2000 CDMA 시스템에서 주파수를 필요 이상으로 많이 사용하는 것은 불필요한 기지국 장비의 비용으로 연결되기 때문에 가급적 좁은 대역폭을 사용하여 서비스를 제공하는 것이 중요하다. 본 논문은 IMT-2000 CDMA 시스템의 제한된 운용 환경하에서 주파수를 효율적으로 사용하기 위함 설계 단계에서 고려해야 하는 문제를 '주파수 관리 문제'로 정의하고 이를 해결함으로써 망 설계 단계의 비용을 줄일 수 있는 방법을 제시한다. 제2장

* 한국통신기술연구소(retinex@kri.co.kr),

** 한국전자통신연구원 무선방송연구소

*** 한국과학기술원 테크노경영대학원(tchadw@hanbit.kaist.ac.kr)

논문번호 : 99105-0328, 접수일자 : 1999년 3월 28일

에서 IMT-2000의 운용환경에 대하여 소개하고 제 3 장에서는 IMT-2000의 운용환경 하에서 주파수의 효율적 사용을 위해 해결해야 할 문제를 제시한다. 제 4 장에서는 문제를 수리적으로 모형화하고 제 5 장에서는 예제를 풀어본 후, 제 6 장에서 결론을 언급한다.

II. IMT-2000의 운용환경 특성

이 장은 IMT-2000의 운용환경을 서비스, FA, 그리고 셀 환경의 관점에서 설명한다. IMT-2000 이 목표로 하는 서비스를 제공하기 위한 시스템의 후보 표준안으로 북미의 cdma2000과 유럽의 UMTS 가 대표적이다. 본 논문에서는 cdma2000 을 통해 IMT-2000의 운용환경을 IS-95와 비교하며 살펴본다.

서비스 : IS-95와 IMT-2000은 CDMA를 이용한다는 공통점이 있으나 제공하는 서비스의 종류, FA의 대역폭 등에서 차이가 있다. 서비스의 관점에서 IS-95는 9.6 Kbps의 음성 서비스만을 제공하도록 되어있다. 이에 비해 IMT-2000은 음성 서비스를 포함하여 고속의 인터넷 접속, 파일 전송, 정지화상, 동영상의 전송 등 멀티미디어 서비스를 제공하는 것을 목적으로 한다. 전송 속도 관점에서 IMT-2000은 고속 차량 내에서는 최소 144 Kbps, 보행자에게는 최소 384 Kbps, 정지해 있는 사용자에게는 최소 2 Mbps의 전송률이 제공되어야 하고 비트 에러율 (Bit Error Rate : BER) 도 서비스에 따라 상이한데, 음성 서비스는 7 dB에 상응하는 BER이 제공되어야 하며, 전송 오류에 민감한 데이터 서비스는 더 낮은 BER이 제공되어야 한다^[1].

FA : 위에서 언급한 여러 종류의 서비스들을 제공하기 위하여 IMT-2000은 다양한 대역폭을 갖는 FA를 지원한다. IS-95에서는 1.25 MHz의 대역폭을 갖는 FA만 존재한다. 1.25 MHz의 대역폭으로도 협대역 서비스인 음성 서비스를 좋은 품질로 제공할 수 있기 때문이다. 그러나 높은 전송률을 요구하는 서비스를 좋은 품질로 효율적으로 제공하기 위해서는 1.25 MHz이상의 넓은 대역폭을 갖는 FA의 사용이 필수적이며 IMT-2000의 후보 표준안중 하나인 cdma2000은 $N \times 1.25$ MHz ($N=1, 3, 6, 9, 12$)의 대역폭을 갖는 FA를 사용한다. 1.25 MHz 이상의 대역폭을 제공하는 방법으로는 다중 반송파 방식 (Multi Carrier) 과 직접 확산 방식 (Direct Spread) 의 두 가지 방식이 존재한다. 다중 반송파

방식은 1.25 MHz의 대역폭을 갖는 반송파 N 개를 묶어 $N \times 1.25$ MHz의 대역폭을 갖는 FA를 제공한다. 반면 직접 확산 방식은 $N \times 1.25$ MHz의 대역폭을 갖는 1개의 반송파를 사용하여 $N \times 1.25$ MHz의 대역폭을 갖는 FA를 제공한다. cdma2000에서는 순방향 링크로는 다중 반송파 방식과 직접 확산 방식을 모두 사용할 수 있지만, 역방향 링크로는 직접 확산 방식만을 사용할 수 있다^[1]. 다중 반송파 방식과 직접 확산 방식의 차이를 $N=3$ 인 경우를 예로 들어 그림 1에 나타내었다.

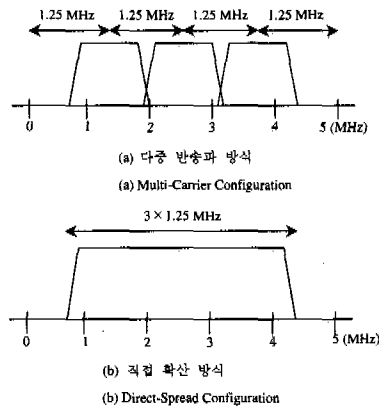


그림 1. 다중 반송파 방식과 직접 확산 방식

FA의 대역폭과 서비스의 관계는 다음과 같다. 일반적으로 FA의 대역폭이 넓어질수록 같은 전송률을 요구하는 사용자를 더 많이 수용할 수 있다. 또한 좁은 대역폭을 갖는 FA에서는 수용할 수 없을 정도로 높은 전송률을 요구하는 서비스도 넓은 대역폭을 갖는 FA는 수용할 수 있다. 역방향 링크를 중심으로 cdma2000의 각 대역폭의 FA가 제공해 줄 수 있는 서비스의 최대 전송속도는 표 1과 같다. FA의 유형은 FA가 차지하는 대역폭에 의하여 구분된다.

표 1. cdma2000의 여러 유형의 FA와 최대 전송속도

	대역폭 (KHz)	최대 전송속도 (Kbps)
유형 1 FA	1250	153.6
유형 2 FA	3750	460.8
유형 3 FA	7500	1036.8
유형 4 FA	11250	2073.6
유형 5 FA	15000	2073.6

셀 환경 : 중첩 셀 환경에서 주파수를 더 효율적으로 수용할 수 있기 때문에 cdma2000 은 메가 셀, 매크로 셀, 마이크로 셀, 그리고 피코 셀 등이 다양하게 중첩되어 있는 환경에서 운영될 수 있다. 셀의 종류와 크기를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. cdma2000의 셀의 종류와 반경

셀의 종류	반경
메가 셀	35 km 이상
매크로 셀	1 ~ 35 km
마이크로 셀	1 km 이하
피코 셀	50 m 이하

IS-95와 IMT-2000의 운용환경의 차이는 표 3과 같다.

III. 문제의 제시

3.1 IS-95의 주파수 관리 문제

IS-95에서는 단일 서비스 (음성) 가 단일한 대역폭 (1.25 MHz) 을 갖는 FA에 의해 제공된다. 이러한 단순성 때문에 IS-95의 주파수 관리 문제는 쉽게 해결할 수 있다. 음성 서비스에 대한 신규 호 시도가 포아송 과정을 따르면서 도착하고 호 지속시간이 지수분포를 따른다고 가정하면 [2]의 결과와 Erlang-B 공식을 이용하여 한 셀에서 신규 호와 핸드오프 호를 적절한 손실률로 수용하기 위해 필요한 통화 채널 (Traffic Channel) 의 수를 구할 수 있다. 이렇게 구한 채널의 수를 필요 통화 채널의 수 r 이라고 하자. 한 FA가 동시에 제공할 수 있는 통화 채널의 최대 수, 즉 용량을 n 이라고 하면 최소의 주파수 대역을 사용하기 위해 한 셀에 설치될 FA의 수 x 는 다음과 같은 간단한 최적화 문제를 해결하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } x \\
 & \text{subject to} \\
 & \quad nx \geq r \\
 & \quad x : \text{nonnegative integer}
 \end{aligned} \tag{1}$$

3.2 IMT-2000의 주파수 관리 문제

IMT-2000의 환경은 표 3에서 알 수 있듯이 IS-95에 비해 매우 복잡해 IMT-2000 의 주파수 관리 문제는 식 (1)과 같은 간단한 최적화 문제로 정식화될 수 없다. 먼저 중첩 셀에 다양한 대역폭을 갖는 FA들이 설치될 것이다. 한 FA가 동시에 여러 종류의 서비스를 제공할 수 있기 때문에 식 (1)의 n 이 한 FA가 동시에 제공할 수 있는 각 서비스 별 통화 채널의 수를 나타내는 벡터로 바뀌어야 한다. 한 FA가 동시에 제공할 수 있는 각 서비스 별 통화 채널의 수를 해당 FA의 '수용가능 서비스 집합' (Admissible Service Set : ASS) 이라 하자. 음성, 파일 전송, 동영상의 3 가지 서비스를 제공할 수 있는 FA가 QoS를 만족시키면서 제공할 수 있는 각 서비스 별 채널의 수가 음성을 위한 통화 채널 10개, 파일 전송을 위한 통화 채널 3개, 동영상을 위한 통화 채널 2개라면 벡터 (10,3,2) 는 이 FA의 ASS중 하나이다. 만약 음성을 위한 통화채널 11개, 파일 전송을 위한 통화 채널 4개, 동영상을 위한 통화 채널 3개는 제공할 수 없다면 (11,4,3) 은 이 FA의 ASS가 아니다.

FA의 대역폭과 서비스 사양에 따라 하나의 FA에도 매우 많은 ASS가 존재할 수 있다. 이렇게 하나의 FA가 제공할 수 있는 모든 ASS의 모임을 '수용가능 서비스 집합 모임' (Class of Admissible Service Set) 이라고 하자. CASS는 전파 전파 환경, 각종 호 제어 전략 등 시스템 운용의 제반 환경 요인이 상호작용하여 결정된다. 즉 CASS는 고정적일 수 없고, 어떤 호 제어 전략을 사용하는가, 전파 전파 환경은 어떠한가 등의 요인에 따라 변동하게 된

표 3. IS-95와 IMT-2000의 비교

구분	IS-95	IMT-2000
제공 서비스	단일 서비스(음성 서비스)	다양한 서비스(음성, 데이터, 정지화상, 동영상)
FA 종류 (대역폭 관점)	단일 유형의 FA(1.25 MHz)	여러 유형의 FA ($N \times 1.25$ MHz) $N=1, 3, 6, 9, 12$
전송률 (Kbps)	단일(9.6)	다양 $N=1$ (~ 153.6), $N=3$ (~ 460.8) $N=6$ (~ 1036.8), $N=9$ (~ 2 073.6) $N=12$ (~ 2073.6)
셀 환경		메가 셀, 매크로 셀, 마이크로 셀, 피코 셀의 중첩 셀 환경 고려

다. 그러나 이러한 모든 상황을 고려하여 문제를 정식화하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 이 논문에서는 비교적 간단한 가정들을 사용하여 문제를 수립하기로 한다. 비록 이러한 문제 설정이 복잡한 현실과는 거리가 있어도 IMT-2000의 설계 문제를 다루는데 있어서 초기의 연구로서 그 의의가 있다.

3.3 문제 제시

IMT-2000 CDMA 시스템의 주파수 관리 문제는 다음과 같다. 즉 각 서비스에 대한 트래픽 밀도가 주어져 있을 때 이를 효율적으로 처리하기 위해 각 종류의 셀이 수용할 서비스를 결정한다. 각 종류의 셀이 수용하는 서비스가 결정되면 서비스의 트래픽 밀도를 적절한 호 손실률로 수용하기 위해 필요한 FA들의 유형과 수량을 셀 별로 구한다. 본 연구에서 다루는 문제를 서비스, FA, 그리고 셀 환경의 관점에서 설명한다.

3.3.1 서비스

서비스는 인덱스 $i(i=1,2,\dots,l)$ 로 표시한다. 서비스는 다양하게 구분될 수 있으나 본 논문에서는 전송률과 비트 에러율에 의해 서비스를 구분하도록 한다. 서비스 i 에 대해 단위시간당 단위면적에서 발생하는 신규 호 시도횟수를 신규 호 도착률이라고 하고 λ_i 로 표시하자. 각 서비스에 대한 트래픽 밀도는 λ_i 에 의하여 표현되며 서비스 지역 전체에 걸쳐 트래픽 밀도가 균일한 균등 트래픽 (Homogeneous Traffic) 을 가정한다.

3.3.2 FA

다양한 대역폭을 갖는 FA들이 존재하므로 FA는 대역폭에 의해 구분하며 인덱스 $j(j=1,2,\dots,l)$

로 표시한다. 표 1은 FA의 구분의 예를 보여준다.

3.3.3 셀 환경

셀 환경은 주파수 관리 문제를 해결하기 이전에 미리 결정되어야 할 사항으로 서비스 지역의 트래픽 밀도, 전파 전파 환경 등을 고려하여 결정된다. 본 논문에서는 피코 셀, 마이크로 셀, 매크로 셀이 중첩된 환경을 가정한다. 셀의 종류는 인덱스 k (피코 셀 : $k=1$, 마이크로 셀 : $k=2$, 매크로 셀 : $k=3$) 를 사용하여 표시한다. 균등 트래픽을 가정했기 때문에 서비스 지역에 설치된 모든 셀을 고려할 필요 없이 하나의 매크로 셀과 그 매크로 셀에 중첩된 마이크로 셀, 피코 셀들만 고려한다. 또한 균등 트래픽 조건으로부터 하위 셀들의 클러스터가 1개의 상위 셀을 형성하는 구조를 가지게 된다. 상위 셀 1개에 하위 셀 몇 개가 중첩되는 가는 각 종류의 셀의 상대적인 크기에 따라 달라지게 된다. 수리적 분석의 편의를 위하여 셀의 모양은 육각형으로 가정하고 각 셀에 설치할 FA들의 종류와 수량에는 제한이 없는 것으로 한다. 그림 2는 1개의 매크로 셀과 그 셀에 중첩된 마이크로 셀, 피코 셀 및 이들이 육각형으로 변형된 형태를 나타낸다.

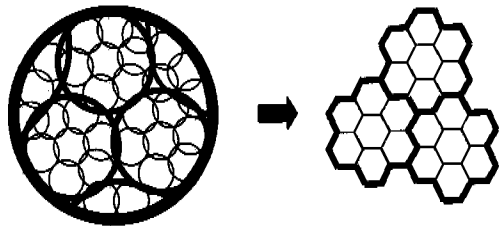


그림 2. 셀 환경

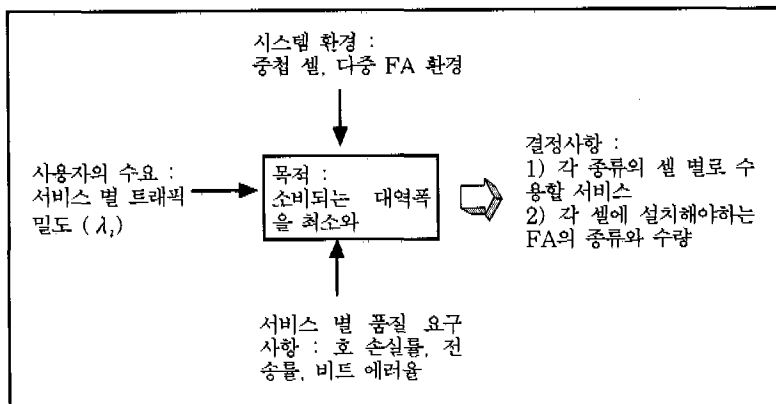


그림 3. IMT-2000 CDMA 시스템의 주파수 관리 문제

이러한 가정하에서 각 서비스에 대해 전송률, 비트 에러율, 그리고 호 손실률을 만족시키며 호를 수용하되 시스템이 소비하는 전체 대역폭을 최소화하기 위해 1) 어떤 서비스를 어떤 종류의 셀이 수용해야 하며, 2) 서비스를 수용하기 위해 각 종류의 셀에 어떤 유형의 FA를 몇 개를 설치해야 하는가를 결정한다. 이를 그림으로 표현하면 다음과 같다.

결국 고려하는 문제는 그림 4와 같은 제약 최적화 문제 (Constrained Optimization Problem)로 표현될 수 있다.

목적 : 시스템이 소비하는 전체 대역폭을 최소화

제약조건 :

- A. 설치될 FA에 의해 각 서비스가 요구하는 통화 채널이 충분히 제공됨.
- B. 각 서비스는 한 종류의 셀에 의해 수용됨
- C. 미리 결정된 셀 환경 하에서 문제 해결

그림 4. 제약 최적화 문제

제약식 A를 통화 채널 제약, B를 배타적 수용 제약, C를 셀 환경 제약이라고 하자. 통화 채널 제약은 각 서비스의 트래픽 밀도를 적절한 호 손실률로 처리하기 위해 필요한 통화 채널의 수가 주어질 때, 셀에 설치할 FA들이 제공하는 통화 채널의 수가 이 값보다 작지 않아야 한다는 것을 의미한다.

배타적 수용 제약은 동일한 서비스를 2 종류 이상의 셀이 동시에 수용할 수 없다는 제약이다. 같은 서비스를 피코 셀과 마이크로 셀 등이 모두 수용하도록 하면 불필요한 주파수가 사용되기 때문이다. 셀 계획 제약은 주파수 관리 문제 해결 이전에 결정된 셀 환경에 대한 제약하에서 문제를 해결함을 의미한다. 셀 환경은 매크로 셀과 마이크로 셀의 2중 중첩셀 구조이거나, 매크로 셀, 마이크로 셀, 그리고 피코 셀의 3중 중첩 셀 구조, 혹은 비 중첩셀 구조 일수도 있다. 본 논문은 3.3.3에서 언급했듯이 3중 중첩 셀 구조를 가정한다.

IV. 모형화

4.1 통화 채널 제약

통화 채널은 셀에 설치되는 FA들에 의해 제공되

고 1개의 호는 1개의 통화 채널을 점유한다. 통화 채널 제약이란 해당 서비스의 주어진 트래픽 밀도를 적절한 호 손실률로 처리하기 위해 필요한 통화 채널의 수가 설치될 FA들에 의해 충분히 제공되어야 한다는 제약이다. 총 N_j 개의 ASS를 제공하는 유형 j FA의 CASS가

$$\{(c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jN_i})^T; l=1, 2, \dots, N_j, c_{jl} : \text{nonnegative integer}\}$$

이고, 비 중첩셀 환경에서 각 서비스의 수요를 요구되는 호 손실률로 제공하기 위해 필요한 통화 채널의 수 $(r_1, r_2, \dots, r_l)^T$ 가 주어져 있다면 통화 채널 제약은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\sum_{j=1}^J \left[\begin{pmatrix} c_{j1} \\ c_{j2} \\ \vdots \\ c_{jN_i} \end{pmatrix} X_{j1} + \begin{pmatrix} c_{j21} \\ c_{j22} \\ \vdots \\ c_{j2N_i} \end{pmatrix} X_{j2} + \dots + \begin{pmatrix} c_{jN_i1} \\ c_{jN_i2} \\ \vdots \\ c_{jN_iN_i} \end{pmatrix} X_{jN_i} \right] \geq \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_l \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 좌변은 각 FA의 ASS들이 제공하는 서비스 별 통화 채널의 수의 선형 결합 (Linear Combination)이며 우변은 서비스 별 필요 통화 채널의 수이다. X_{jl} 은 시스템이 유형 j FA의 l 번째 ASS를 사용하는 개수로서 1개의 ASS는 1개의 FA를 사용하여 제공되므로 유형 j FA를 사용하는 총 개수는 $\sum_{l=1}^{N_i} X_{jl}$ 가 된다. 중첩셀 환경에서는 FA가 설치되는 셀의 종류를 고려하여야 하므로 셀 k 에서 유형 j FA를 사용하는 총 개수는 $\sum_{l=1}^{N_i} X_{jl}^k$ 와 같이 표시할 수 있다.

4.2 배타적 수용 제약

배타적 수용 제약은 중첩 셀 환경에서 임의의 서비스는 단지 한 종류의 셀에 의해 수용되어야 한다는 제약이다. 중첩 셀 환경에서 통화 채널을 설치할 때 모든 종류의 셀이 모든 서비스를 수용하도록 FA를 설치하면 자원을 낭비하는 결과를 낳는다. 따라서 중첩 셀 환경에서는 어떤 서비스가 어떤 종류의 셀에 할당되어야 하는가를 결정하여 그 셀이 수용하는 서비스의 트래픽을 충족시킬 정도의 통화 채널만 설치하여야 한다. 배타적 수용 제약의 의미를 가지기 위해서는 망 설계 단계에서 정의한 서비스의 종류와 시스템 운용 단계에서 정의한 서비스 종류가 일치해야 한다. 예를 들어, 시스템을 운용할 때는 전

송률과 비트 에러율이 동일한 서비스를 제공받는 단말이라도 단말의 이동속도가 빨라지면 매크로 셀이 수용하고, 단말의 이동속도가 느려지면 마이크로 셀이 수용함으로써 주파수 사용 효율을 극대화시키는 운용 전략이 사용될 수 있다. 이렇게 단말의 속도에 따른 가변적 단말 수용 전략이 사용된다면 망 설계 단계에서도 단말의 속도를 고려하여 서비스를 분류해야 한다. 그러나 IMT-2000이 운용되지 않은 현 시점에서는 단말의 구체적인 수용전략을 알 수 없으므로 본 논문은 서비스의 종류를 전송률과 비트 에러율에 의해서만 구분하기로 한다.

배타적 수용 제약을 적용하면 식 (2)는 식 (3)으로 변경된다.

$$\sum_{i=1}^I \left[\begin{pmatrix} c_{i11} \\ c_{i22} \\ \vdots \\ c_{iN1} \end{pmatrix} X_{i1}^k + \begin{pmatrix} c_{i21} \\ c_{i22} \\ \vdots \\ c_{i2N} \end{pmatrix} X_{i2}^k + \dots + \begin{pmatrix} c_{iN1} \\ c_{iN2} \\ \vdots \\ c_{iNN} \end{pmatrix} X_{iN}^k \right] \geq \begin{pmatrix} r_1^k - M \cdot y_1^k \\ r_2^k - M \cdot y_2^k \\ \vdots \\ r_i^k - M \cdot y_i^k \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\sum_{i=1}^I y_i^k = 2$
 $i=1, 2, \dots, I, \forall k=1, 2, 3$

식 (3)에서 y_i^k 는 서비스 i 가 셀 k 에 수용되면 0, 그렇지 않으면 1을 갖는 이진 변수, X_{ij}^k 는 셀 k 에 설치되는 유형 j FA의 i 번째 ASS를 사용하는 개수이다. 식 (3)의 r_i^k 는 서비스 i 가 셀 k 에서 수용될 때 이 서비스에 대한 신규 호와 핸드오프 호를 적절한 호 손실률로 수용하기 위해 필요한 통화 채널의 수로서 셀의 크기, 단말의 속도, 단말의 이동 방향, 호 시도 시점의 위치 등을 모두 고려하여 도출된다. M 은 매우 큰 양수로서 M 에 곱해지는 y_i^k 가 1이면 해당 제약식을 제거하는 효과를 준다.

4.3 셀 계획 제약

cdma2000은 다양한 크기의 셀이 중첩되는 환경에서 운영된다. 셀 계획은 본 논문에서 다루는 주파수 관리 문제와는 별도로 다루어져서 주파수 관리 문제를 해결하기 전에 트래픽 밀도와 전파 전파 환경 등을 고려하여 미리 결정되어야 한다. 예를 들어 서비스 지역에 매크로 셀과 마이크로 셀의 2중 중첩셀을 사용할지, 피코 셀까지 포함된 3중 중첩셀을 사용할지, 혹은 매크로 셀만 사용할 지가 미리 결정되어 있어야 한다. 따라서 셀 계획 제약은 어떤 셀 계획을 사용하느냐에 따라 달라지게 된다. 본 논문에서는 서비스 지역에 매크로 셀, 마이크로 셀, 피코 셀이 중첩된 3중 중첩셀 환경을 가정한다. 3중 중첩

셀 계획 제약은 다음과 같이 수리적으로 표현된다.

$$1 \leq \sum_{i=1}^I y_i^k \leq I-1 \quad \forall k=1, 2, 3 \quad (4)$$

4.4 제약 최적화 문제

위의 제약식들을 사용하여 그림 3의 제약 최적화 문제를 다음과 같이 수리적으로 표현할 수 있다.

(P)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^3 W_j X_{ij}^k$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^I \left[\begin{pmatrix} c_{i11} \\ c_{i22} \\ \vdots \\ c_{iN1} \end{pmatrix} X_{i1}^k + \begin{pmatrix} c_{i21} \\ c_{i22} \\ \vdots \\ c_{i2N} \end{pmatrix} X_{i2}^k + \dots + \begin{pmatrix} c_{iN1} \\ c_{iN2} \\ \vdots \\ c_{iNN} \end{pmatrix} X_{iN}^k \right] \geq \begin{pmatrix} r_1^k - M \cdot y_1^k \\ r_2^k - M \cdot y_2^k \\ \vdots \\ r_i^k - M \cdot y_i^k \end{pmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^I y_i^k = 2$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^I y_i^k \leq I-1 \quad \forall k=1, 2, 3$$

$$y_i^k \in \{0, 1\}$$

$$X_{ij}^k : \text{nonnegative integer}$$

$$\forall i=1, 2, \dots, I \quad \forall j=1, 2, \dots, J$$

$$\forall l=1, 2, \dots, N_j \quad k=1, 2, 3$$

(5)

목적함수는 1개의 매크로 셀과 그 셀에 중첩된 마이크로 셀, 피코 셀에 설치될 FA가 소비하는 전체 대역폭을 나타낸다. (P)에서 결정변수는 X_{ij}^k, y_i^k 이며 주어진 파라미터는 ASS에 해당하는 좌변의 벡터와 필요 통화 채널 수인 r_i^k 이다. ASS와 필요 통화 채널 수의 도출은 4.5에서 다룬다.

4.5 ASS와 필요 통화 채널 수 r_i^k 의 도출

(P)의 파라미터로 사용되는 ASS와 r_i^k 는 서비스 사양, FA의 대역폭, 셀의 사양과 같은 원천 자료 (Raw Data)로부터 도출된다.

ASS는 FA가 제공하는 각 서비스 별 통화 채널의 수의 집합으로서 벡터로 표현된다. 유형 j 의 대역폭을 W_j , 유형 j FA에서 서비스 i 의 용량을 N_{ji} 라고 하자. $k_{ji} = \frac{W_j}{N_{ji}}$ 에 대해 ASS는 다음 식 (6)을 만족시키는 벡터 $(c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jN})$ 이다.

$$\sum_{i=1}^I k_{ji} c_{ji} \leq W_j$$

$$(c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jN})^T : \text{nonnegative integer-valued vector}$$

(6)

표 4. 서비스의 사양

서비스	R_i (Kbps)	(E_b/N_0) (dB)	d_i	$1/\mu_i$ (초)	$V_{max,i}$ (미터/초)	P_i^N	P_i^H
1	9.6	7	0.4	60	22.22	0.02	0.01
2	153.6	10	0.14	120	11.11	0.02	0.01
3	460.8	10	0.12	180	5.56	0.02	0.01
4	1036.8	10	0.06	300	0	0.02	0.01

k 는 셀 k 에서 수용되는 서비스 i 의 트래픽을 적절한 신규 호 및 핸드오프 호 손실률로 처리하기 위해 필요한 통화 채널의 수이다. 서비스 i 의 신규 호 시도는 도착률이 λ_i 인 포아송 과정을 따르고, 전체 호 지속시간은 평균이 μ_i^{-1} 인 지수분포를 따르며, 핸드오프 호 시도는 신규 호 시도와 비례한다고 가정하자. [2]의 결과로부터 핸드오프 호 시도는 포아송 과정을 따르고 단말의 채널 점유 시간은 지수 분포를 따르므로 k 는 Erlang-B 공식을 이용하여 구할 수 있다. 서비스 i 의 신규 호 도착률과 평균 채널 점유 시간의 곱을 신규 호 로드라고 하고, 핸드오프 호 도착률과 평균 채널 점유 시간의 곱을 핸드오프 호 로드라고 하자. 호 손실률이 고정적이면 k 는 신규 호 로드, 핸드오프 호 로드 및 셀의 크기의 함수이다. 동일한 크기의 셀에 수용되는 서비스에 대해 신규 호 및 핸드오프 호 로드가 클수록 k 는 증가한다. 또한 셀의 크기가 클수록 단위 시간당 신규 호 시도 횟수와 단말의 채널 점유 시간이 증가한다. 임의의 서비스 i 에 대해 i 가 피코 셀 보다는 마이크로 셀에 수용될 때, 마이크로 셀 보다는 매크로 셀에 수용될 때 필요 통화 채널 수 k 는 증가한다. 즉 $k < k' < k''$ 가 된다.

V. 예제들이

5.1 예제의 제시

본 예제에서 사용한 서비스, FA, 및 셀 환경은 cdma2000에서 제시한 사양을 일부 참조하였다. 서비스, FA, 셀의 사양은 원천 자료에 해당한다. 원천 자료로부터 ASS와 필요 통화 채널 수가 도출되면 이를 이용하여 (P)를 해결할 수 있다.

1) 서비스 : 아래의 표 4는 서비스의 사양을 나타내며 왼쪽부터 전송률, 비트 에너지 대 잡음 밀도 비율, 가변 부호화율, 호 지속시간의 평균, 각 서비스를 제공받는 단말이 취할 수 있는 최대 속도, 신규 호의 손실률, 핸드오프 호의 손실률을 나타낸다.

전송률은 cdma2000의 사양을 참조하였으며 비트 에너지 대 잡음 밀도 비율은 음성 서비스의 경우 7 dB를 규정하고 있는 것을 참조하여 더 낮은 에러율로 전송해야 하는 데이터 서비스의 경우 7 dB 이상의 비트 에너지 대 잡음 밀도 비율이 요구될 것으로 생각하여 10 dB로 정하였다. 가변 부호화율은 음성 서비스의 경우 Qualcomm 사가 제시한 0.4를 사용하였고 나머지 서비스의 가변 부호화율은 일정한 정보량을 각 서비스의 전송률로 전송할 때 활성화 상태 (active state) 와 비활성화 상태 (inactive state)의 비율로서 정의하였다. 호 지속시간의 평균은 음성 서비스를 1분으로 하고 나머지 서비스는 음성 서비스 보다 더 오랫동안 서비스 될 것이라는 가정하에 임의로 정한 값이다. 최대 속도는 cdma2000 후보 표준안을 참조하여 빠른 속도로 이동하는 단말은 높은 전송률을 제공 받을 수 없도록 설정하였다. 신규 호의 손실률은 2 퍼센트, 핸드오프 호의 호 손실률은 1 퍼센트로 정하였다. 서비스의 분류는 시스템 운용 전략을 고려하여 더 세분될 수 있지만 IMT-2000이 아직 구현되지 않은 현 단계에서는 이와 같은 요인에 의한 분류를 채택할 수 밖에 없다.

ASS는 전송률, 비트 에너지 대 잡음 밀도 비율, 그리고 가변 부호화율의 함수이다. 호 지속시간의 평균, 최대 속도, 신규 호와 핸드오프호의 호 손실률은 k 에 영향을 준다.

2) FA : FA의 사양은 cdma2000 후보 표준안을 참조하여 다음의 표 5와 같다. 넓은 대역폭을 소비하는 FA는 다양한 서비스를 제공할 수 있다.

표 5. FA의 사양

	대역폭 (KHz)	FA가 제공하는 서비스
유형 1 FA	1250	서비스 1, 2
유형 2 FA	3750	서비스 1, 2, 3
유형 3 FA	7500	서비스 1, 2, 3, 4
유형 4 FA	112500	서비스 1, 2, 3, 4

3) 셀의 사양 : 피코 셀, 마이크로 셀, 매크로 셀의 반경은 각각 150m, 450m, 900m 로가정한다. 이러한 크기에서 피코 셀 : 마이크로 셀 : 매크로 셀 = 21 : 3 : 1 로 중첩된다.

각 서비스의 신규 호 도착율이 상이한 2개의 예제를 고려한다. 예제는 표 6과 같다.

서비스 도착율은 현실을 고려하여 임의로 책정했다. 표 6에서 λ_i 는 단위시간당 단위면적에서 서비스 i 의 호 시도율로서 단위시간은 1초, 단위면적은 $900 m^2$ 이다.

표 6. 서비스 별 λ_i

예제 1		예제 2	
서비스	λ_i	서비스	λ_i
1	0.7	1	1.8
2	0.3	2	0.36
3	0.2	3	0.18
4	0.1	4	0.036

주어진 원천 자료로부터 구한 신규 호와 핸드오프 호의 필요 통화 채널 수는 다음과 같다. 신규 호와 핸드오프 호의 필요 통화 채널 수는 (P)의 파라미터로 이용된다. 식 (5)의 s_k 는 신규 호와 핸드오프 호의 필요 통화 채널 수의 합이다. 표 7은 두 예제에 대해 계산한 필요 통화 채널 수를 보여준다.

표 7. 요구 채널 코드 수

(a) 예제1의 필요 통화 채널 수 (신규 호, 핸드오프 호)

$k \backslash j$	1	2	3	4
1	(4,6)	(4,6)	(4,6)	(6,0)
2	(12,11)	(10,11)	(11,10)	(15,0)
3	(86,42)	(69,41)	(75,37)	(90,0)

(b) 예제2의 필요 통화 채널 수 (신규 호, 핸드오프 호)

$k \backslash j$	1	2	3	4
1	(10,19)	(5,11)	(5,9)	(9,0)
2	(84,80)	(34,41)	(30,29)	(45,0)
3	(396,189)	(151,92)	(128,64)	(154,0)

표 7의 중간 결과에 따르면 같은 서비스에 대해 셀의 크기가 커질수록 필요 통화 채널 수는 증가되는데 이는 셀의 크기가 커지면 단위시간당 발생

하는 신규 호 시도횟수와 채널 점유 시간이 증가하기 때문이다. 또한 단말의 최대 이동 속도가 낮을수록 같은 종류의 셀 내에서 핸드오프 호 수용을 위해 필요한 통화 채널의 수가 감소하게 되는데 이는 단말의 이동속도가 느릴수록 전체 호 지속시간 내에 통과할 수 있는 셀의 수가 줄어들기 때문이다.

5.2 계산 결과

(P)는 결정변수 X_k^* 가 정수 값을 가지는 정수 계획법 문제로서 변수의 수가 매우 많아 분담탐색법 (branch and bound method) 을 사용하면 최적해를 구할 수 있으나 풀이 시간이 매우 오래 걸린다. 따라서 X_k^* 가 실수 값을 갖도록 선형 계획법 문제로 완화하여 선형 계획 문제를 풀고 이 선형 계획 문제의 최적해를 올림하여 원 문제에 대한 근사해를 구하였다. 이 근사해를 $(X_k^*)_c$ 라고 하자. 선형 계획 문제의 최적해에 해당하는 목적함수 값을 W_c , $(X_k^*)_c$ 로부터 구한 목적함수 값을 W_L 라고 하면 혼합 정수 계획법 문제로 정식화된 원 문제의 최적해는 W_L 와 W_c 사이에 존재한다. 식 (7)은 W_L 와 W_c 의 차이를 나타낸다.

$$G = \frac{W_c - W_L}{W_c} \times 100(\%) \quad (7)$$

아래의 표 8은 이렇게 구한 근사해와 G 를 보여준다.

표 8. 예제 1과 예제 2의 결과

(a) 예제 1

k	수용하는 서비스	설치할 FA의 종류(수량)
1	서비스 3, 4	유형 3 (1), 유형 4 (1)
2	서비스 2	유형 1 (6)
3	서비스 1	유형 1 (4)
소비하는 전체 대역폭 : 31.25 MHz		
G : 21.74 %		

(b) 예제 2

k	수용하는 서비스	설치할 FA의 종류(수량)
1	서비스 3, 4	유형 2 (2), 유형 3 (3)
2	서비스 2	유형 1 (19)
3	서비스 1	유형 1 (15)
소비하는 전체 대역폭 : 38.75 MHz		
G : 13.7 %		

5.3 결과 분석

제 3 장의 문제제기에서 우리는 두 가지를 결정하고자 하였다. - 1) 어떤 서비스를 어떤 종류의 셀에 할당할 것인가, 2) 할당된 서비스를 수용하기 위해 설치할 FA의 유형과 수량은 무엇인가.

1) 서비스 및 셀 별로 필요 통화 채널 수가 표 7과 같이 주어진 상황에서는 표 8과 같이 서비스를 할당하는 것이 필요한 통화 채널의 수를 최소화 시킨다. 위의 결과는 높은 전송률과 낮은 비트 에러율을 요구하는 광대역 서비스 일수록 작은 반경의 셀에서 수용하고 낮은 전송률과 높은 비트 에러율을 허용하는 협대역 서비스 일수록 큰 반경의 셀에서 수용하는 것이 전체적으로 필요한 통화 채널의 수를 최소화 시켜서 FA가 소비하는 전체 대역폭이 최소화 됨을 의미한다.

2) 셀 종류별 서비스의 할당이 1)과 같이 되었을 때, 설치해야 할 FA의 유형과 수량은 표 8과 같이 된다. 이는 피코 셀이 수용하는 광대역 서비스를 제공하기 위해 피코 셀에는 광대역폭 FA가 설치되고 중대역 및 협대역 서비스를 수용하는 마이크로 셀과 매크로 셀에서는 협대역폭 FA가 설치될 때 소비되는 대역폭이 최소가 됨을 의미한다.

이 결과에서 마이크로 셀과 매크로 셀에는 유형 1 FA만 설치되었다. 예제 1의 매크로 셀에는 유형 1 FA (1.25 MHz) 가 4개 설치 되는데 이는 본 예제에서는 유형 2 FA (3.75 MHz) 1 개와 유형 1 FA (1.25 MHz) 1개를 설치하는 것과 동일한 용량을 제공하고 소비되는 대역폭도 두 경우가 같게 된다. 즉, 본 예제는 다수 최적해를 갖는다. 일반적으로 협대역폭 FA의 N배의 대역폭을 소비하는 광대역폭 FA는 협대역폭 FA의 용량의 N배 이상을 수용하게 된다. 이를 규모의 경제성이라 한다. 그러나 4.5에서 제시한 ASS를 구하는 방법은 규모의 경제성을 고려하지 않는다. 따라서 다수 최적해가 존재하는 결과가 발생하였다.

5.4 향후 연구과제

우리는 서비스를 전송률과 비트 에러율로 구분했다. 그러나 전송률과 비트 에러율이 동일한 서비스라 하더라도 단말의 속도에 따라 다른 종류의 셀에 수용되는 운용 전략이 가능하다. 가령 전송률과 비트 에러율이 같은 서비스를 제공받는 단말이라도 거의 정지해 있는 경우는 피코 셀에서 이 단말을 수용하고, 빠르게 이동중인 단말은 매크로 셀에서 수용하는 전략이 주파수를 더 효율적으로 사용

할 수 있다. 운용의 관점에서 현실적인 문제를 해결하기 위해서는 단말의 속도를 포함하여 여러 다른 요인에 의하여 구분된 서비스에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다. 또한 ASS와 필요 통화채널 수를 정확하게 계산할 수 있어야 현실적으로 의미 있는 결과를 얻을 수 있다. 특히 ASS의 계산은 규모의 경제성을 고려되어야 한다. 규모의 경제성이 고려되지 않으면 본 논문의 계산결과처럼 복수 최적해가 존재하는 결과를 낳는다.

IV. 결론

본 논문은 셀 계획이 완료된 중점 셀 환경의 망 설계 단계에서 최소의 대역폭을 소비하며 각 서비스에 대한 수요를 충족시키기 위해 어떠한 서비스를 어떤 종류의 셀에 할당하고 이렇게 할당된 서비스의 트래픽 밀도를 적절한 QoS로 수용하기 위해 각 셀에 설치해야 할 FA의 종류와 수량에 대해 연구하였다. 그 결과 협대역 서비스를 받는 단말은 매크로 셀에 수용하고 광대역 서비스를 제공 받는 단말은 적은 크기의 셀에 수용하는 전략이 주파수를 효율적으로 활용하는 전략임이 판명되었다. 또한 이와 같은 할당 전략하에서 각 종류의 셀에 설치해야 할 FA의 유형과 수량을 구하였다.

본 연구에서는 서비스의 종류를 전송률과 비트 에러율의 두 요소에 의해 구분 하였으나 단말이 취할 수 있는 속도를 고려하는 문제로 확장되어야 할 것이다. 또한 주어진 무선 환경에서 규모의 경제성을 고려하여 CASS와 각 서비스 별 필요 통화 채널 수를 정확하게 도출하는 것이 중요하다. 한정된 무선 자원을 효율적으로 활용하기 위한 방안을 초기 망 설계 단계에서 고려한다는 것이 본 연구의 의의이다. 좀 더 현실적인 가정들을 도입하고, 서비스의 종류를 나누는 기준을 다양하게 하여 세분화된 서비스를 고려하며, CASS와 필요 통화 채널 수를 더 정확히 계산하면 더욱 현실감 있는 연구가 되어 본 논문에서 제시한 방법이 현실 문제에 유연하게 적용될 수 있으리라 기대한다.

참고 문헌

[1] TIA, *The cdma2000 ITU-R RTT Candidate Submission*, April 1998
 [2] D.Y. HONG and S. S. Rappaport, "Traffic Model and Performance Analysis for Cellular

Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-35, no. 3, pp. 77-92, Aug. 1986

- [3] J. Evans and D. Everitt, “Call Admission Control in Multiple Service DS-CDMA Cellular Networks”, *Proc. IEEE VTC96*, pp. 227-231
- [4] Qualcomm Inc., *The CDMA Network Engineering Handbook Volume 1: Concepts in CDMA*, San Diego California, 1992
- [5] V. Chvatal, *Linear Programming*, New York, W. H. Freeman and Company, 1983
- [6] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1996
- [7] 장석진, 김웅배, 한기철, “ETRI의 IMT-2000 연구 개발 현황”, *한국통신학회지*, 제 14권, 11호, pp. 42-50, 1997년 11월

김 호(Ho Kim)

정회원



1997년 2월: 연세대학교 경영학과 학사
 1999년 2월: 한국과학기술원 테크노경영대학원 경영공학전공 석사
 1999년 3월~현재: 한국통신기술 연구소

<주관심 분야> 통신망 설계, 트래픽 엔지니어링, 시스템 최적화

진 고 환(Go-hwan Jim)

정회원

1987년 2월: 성균관대학교 산업공학과 학사
 1990년 2월: 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1999년 2월: 한국과학기술원 테크노경영대학원 경영공학전공 박사

1990년 3월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
 <주관심 분야> 무선망설계, 트래픽 엔지니어링, 이동통신 운용기술 및 시스템최적화, 이동통신 망관리

조 철 회(Chol-hoe Cho)

정회원



1982년 2월: 홍익대학교 전자계산학과 학사
 1997년 2월: 대전대학교 컴퓨터공학과 석사
 1982년 3월: 한국전자통신연구원 입소

1982년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 <주관심 분야> 소프트웨어 엔지니어링, 객체지향 방법론, 이동통신서비스, Mobile Computing, 망관리(TMN)

차 동 완(Dong-wan Tcha)

정회원

1975: Northwestern University, Operations Research 박사

1976~현재: 한국과학기술원 테크노경영대학원 교수
 현재: INFORMS 2000 SEOUL 조직위원장, 한국과학기술원 테크노경영대학원 통신경영정책 연구센터장

1987년 2월~1987년 8월: Humboldt Fellow, School of Computer Science, University of Darmstadt (TH Darmstadt), W. Germany

1983년 6월~1983년 9월: Visiting Scientist, IBM Japan Science Institute, Tokyo, Japan

1981년 9월~1982년 9월: Visiting Scientist, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York, U.S.A.

<주관심 분야> 통신망 설계, 경영과학