

채널의 출력제어를 통한 셀룰라 이동통신 시스템의 최적 설계

正會員 玉昌秀*, 廉奉縉**, 李亨洙***, 金成駿****

Optimal Design of Mobile Cellular Communication Systems by Channel Power Control

Chang Soo Ok*, Bong-Jin Yum**, Hyung Soo Lee***,
Seong-Jun Kim**** *Regular Members*

※본 연구는 94년도 한국전자통신연구소 연구비 지원에 의해 수행되었음

요 약

셀룰라 이동통신 시스템에서의 중요한 문제 중 하나는 주파수의 효율적 사용이다. 따라서 시스템의 주파수 효율을 높이기 위한 여러가지 주파수 할당방식이나 트래픽 분담기법 등이 제안되었다. 그러나, 이들 방법은 제어량이 증가하여 복잡한 하드웨어나 소프트웨어를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 각 기지국의 설정 채널 및 통화채널의 출력을 제어함으로써 시스템의 성능을 향상시키는 새로운 방법을 제안하였다. 먼저, 각 기지국에서 감당해야 하는 통화요구율이 같게 될 때 전체 시스템의 평균 호손실수가 최소가 됨을 보이고, 이 결과를 채널 출력과 서비스 범위 간의 관계와 결합하여 각 기지국의 적절한 출력을 결정하였다. 아울러, 동일채널간섭을 고려하여 각 기지국의 출력의 상한을 결정하였으며, 수치예를 통해 제안된 방법이 기존의 대안들과는 달리 제어량의 과도한 증가 없이도 호손실수를 줄이는 데 효과적이라는 것을 보였다.

*大宇通信株式會社 綜合研究所 네트워크研究團 通信網研究室
Daewoo Telecom Ltd., R&D Center, Network Group, Telecommunication Network Dept.

**韓國科學技術院 産業工學科
Department of Industrial Engineering, KAIST

***韓國電子通信研究所 電波工學 研究室
ETRI, Radio Science Section, Radio Engineering Lab.

****江陵大學校 産業工學科
Department of Industrial Engineering, Kangnung National University
論文番號:94289
接受日字:1994年 10月 17日

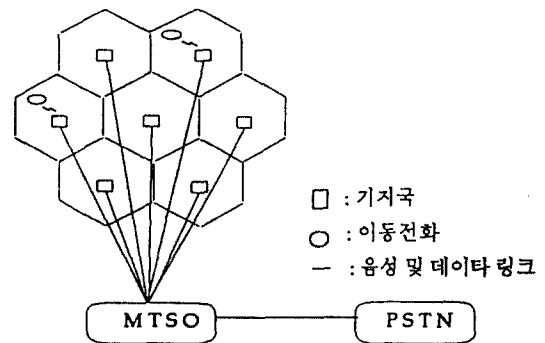
ABSTRACT

A major concern in a cellular mobile communication system is how to efficiently utilize the limited amount of frequencies. Various channel assignment methods and traffic sharing schemes have been proposed to improve system performance. However, these approaches suffer from complicated software and hardware requirements due to increased amount of traffic control. In this paper, we propose a new method for improving system performance by controlling the powers of the set-up and voice channels of each cell site. We first show that the average number of blocked calls in a system is minimized when the traffic rates are made identical for all cell sites in a system. This result, together with the relationship between the channel powers and the service area, is used to determine the appropriate channel powers of each cell site. We also determine the upper limit on the channel power of each cell site considering co-channel interference and numerically show that the proposed method is effective in reducing the number of blocked calls without an excessive increase in the amount of system control.

I. 서 론

이동전화 서비스의 수요가 급증함에 따라 수용 능력의 한계를 극복하고 주파수 대역을 보다 효율적으로 사용하기 위해 AT&T 벨 연구소는 1970년대에 셀룰라 이동통신 기술을 개발하였다.^(9, 12) 셀룰라 이동통신 시스템의 기본 개념은 그림 1에서 보는 바와 같이 전체 서비스대상지역을 정육각형의 작은 셀(cell)로 분할하고 각 셀마다 다른 주파수 채널(이하 채널이라고 함)을 사용하게 함으로써 동일채널간섭을 피하고자 하는 것이다. 한편, 동일채널간섭이 충분히 미약하게 되는 거리만큼 떨어진 셀에서는 동일채널을 재사용하여 주파수의 효율적인 사용을 도모한다. 이때, 각 셀마다 사용할 채널을 할당해야 하는데 대부분의 셀룰라 이동통신 시스템에서는 자기 셀에 할당된 채널만을 사용하는 고정 채널할당방식(fixed channel assignment)을 사용하고 있다.^(4, 8) 그러나, 이 방식은 자기 셀에 할당되어 있는 채널만을 사용하기 때문에 각 셀의 트래픽 부하가 균형을 이루지 않는 경우에는 시스템의 효율이 저하되는 단점이 있다.⁽⁵⁾

따라서 이와 같은 단점을 극복하고 채널을 보다 효율적으로 사용하기 위한 방법으로서 먼저, 채널할당 방식 자체를 바꾸는 동적 채널할당방식⁽²⁾(dynamic channel assignment)과 혼합 채널할당방식⁽⁵⁾(hybrid channel assignment)이 제안되었다. 그러나 이 방법들은 제어량이 많다는 것과 트래픽 부하가 심한 경우에는 고정 채널할당방식보다 성능이 오히려 떨어진다



MTSO : Mobile Telephone Switching Office
PSTN : Public Switched Telephone Network

그림 1. 셀룰라 이동통신 시스템
Fig 1. Cellular mobile communication system

는 단점이 있다.^(2, 5) 이와는 달리 기존의 고정 채널할당방식을 그대로 유지한 채 트래픽의 분산을 통해 채널을 효율적으로 사용하고자 하는 방법들이 제안되었는데, 재시도 유도기법⁽³⁾(directed retry scheme)과 부하 분담기법⁽⁶⁾(load sharing scheme) 등이 여기에 속한다. 그러나, 이들 방법 역시 제어량이 많고 동일채널간섭이 과도하게 증가할 수 있다는 단점이 있다.

셀룰라 이동통신 시스템에서는 하나의 셀을 다수의 섹터(sector)로 분할하여 각 섹터의 기지국으로 하여금 이동전화 서비스를 수행하게 하고 있는 경우가 많다. 그러나, 셀 내에서 각 기지국이 감당해야 할 통화요구율은 시간과 상황에 따라 변화하기 때문에 부

분적으로는 많은 호손실(call blocking)이 발생하여 시스템 효율이 심각하게 저하될 우려가 있다. 본 논문에서는 기존의 채널운용방법의 단점을 보완하기 위해 고정 채널할당방식은 그대로 유지하면서 설정채널(set-up channel)의 출력제어를 통해 트래픽을 효과적으로 분산시키는 방안에 대해 연구하였다. 이를 위해 우선 셀 내의 각 기지국이 감당해야 할 통화요구율이 같아질 때 셀 내의 평균 호손실수(average number of blocked calls)가 최소화됨을 보였으며, 이러한 형태의 트래픽 분포를 달성하기 위해 각 기지국의 설정채널에 대한 출력제어를 제안하였다. 통화채널의 출력도 설정채널과 유사한 방법으로 조정하되, 출력을 줄이고자 하는 기지국에서 현재 사용중인 통화채널이 있을 때는, 우선 설정채널의 출력만 낮추어 새로운 접속을 줄이고 통화채널 출력은 통화가 끝난 후에 조정함으로써 불필요한 핸드오프를 피하도록 하는 방안을 제시하였다. 그리고, 각 기지국의 출력과 그 서비스 범위 간의 관계식을 유도함으로써 각 설정채널의 최적출력을 구하는 절차를 개발하였으며, 동일 채널간섭을 고려한 출력의 상한을 구하여 최적출력이 이 상한을 초과할 때에는 상한까지만 증가시키도록 하였다. 마지막으로, 각 섹터에 대한 트래픽 부하비율을 다양한 값으로 변화시켜 가면서 제안된 방법이 적용될 때 기대되는 호손실수의 감소를 도표화하여 제시하였다.

II. 통화요구율과 호손실수를 고려한 셀룰라 이동통신 시스템의 최적화 모형

먼저, 이동통신 시스템의 최적설계를 위해 각 기지국의 트래픽을 나타내는 통화요구율이 어떤 형태일 때 전체 시스템의 호손실수가 최소로 되는가를 파악하기 위한 최적화 문제를 구성하고, KT 조건⁽¹¹⁾(The Kuhn-Tucker condition)을 이용하여 최적해를 구하고자 한다.

2.1 호손실률 (Blocking Probability)

하나의 셀을 여러 섹터로 나누어 몇 개의 기지국이 서비스하는 셀룰라 이동통신 시스템을 고려하자(예, 그림 2의 3-섹터 셀). 그리고, 각 기지국의 채널 수는 N이고, 각 섹터로부터 해당 기지국에 대한 호 발생은

평균 도착률(= 통화요구율= 단위시간당 통화요구수)이 $\tilde{\lambda}$ 인 포아송 분포를 따르고 각 통화의 채널 사용 시간은 평균이 $1/\mu$ 인 지수분포를 따른다고 가정하자. 그러면 각 기지국은 M/M/N/N 대기행렬(queueing) 시스템으로 볼 수 있다.⁽¹¹⁾ 그리고, S_j 를 한 기지국에서 현재 사용중인 채널의 수가 j인 상태로 정의하고 p_j 를 이 기지국의 상태가 S_j 에 있을 안정상태(steady-state) 확률이라 정의하자. 이 때 p_j 는 출생사망과정(birth-and-death process)을 이용하여 구할 수 있으며, 상태 전이도(state transition diagram)는 그림 3과 같다.

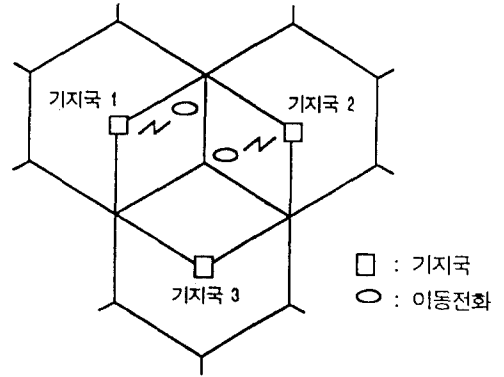


그림 2. 3-섹터 셀
Fig 2. 3-sector cell

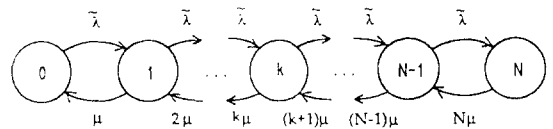


그림 3. 상태전이도
Fig 3. State transition diagram

그림 3에서 “rate up = rate down” 상태 방정식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$p_k = \frac{\tilde{\lambda}^k}{k! \mu^k} p_0, k = 1, \dots, N$$

모든 확률의 합은 1이 되어야 하므로 (즉, $\sum_{i=0}^N p_i = 1$), p_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_0 = \left(\sum_{k=0}^N \frac{\tilde{\lambda}^k}{k! \mu^k} \right)^{-1}$$

호손실률은 N 개의 채널이 모두 사용되고 있어 서비스를 받을 수 없을 확률이므로 p_N 으로 나타낼 수 있으며 이는 다음과 같이 얻어진다.

$$p_N = \frac{\tilde{\lambda}^N}{N! \mu^N} \quad p_0 = \left(\frac{\tilde{\lambda}^N}{N! \mu^N} \right) / \left(\sum_{k=0}^N \frac{\tilde{\lambda}^k}{k! \mu^k} \right) \quad (1)$$

2.2 호손실수 (Number of Blocked Calls)

단위시간당 평균 호손실수는 호손실률과 통화요구율의 곱이 된다. 따라서 i 번째 기지국의 통화요구율을 $\tilde{\lambda}_i$ 라 하면 식 (1)에 의해 i 번째 기지국의 단위시간당 평균 호손실수 NB_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$NB_i = \tilde{\lambda}_i \cdot p_N = \left(\frac{\tilde{\lambda}_i^{N+1}}{N! \mu^N} \right) / \left(\sum_{k=0}^N \frac{\tilde{\lambda}_i^k}{k! \mu^k} \right)$$

하나의 셀이 n 개의 섹터로 분할되고 n 개의 기지국에 의해 서비스가 이루어진다고 할 때, 하나의 셀(이 시스템이라 한다)에 대한 단위시간당 평균 호손실수 NB 는 각 기지국의 단위시간당 평균 호손실수를 모두 더하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$NB = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\tilde{\lambda}_i^{N+1}}{N! \mu^N} \right) / \left(\sum_{k=0}^N \frac{\tilde{\lambda}_i^k}{k! \mu^k} \right) \right] \quad (2)$$

2.3 최적 통화요구율의 결정

앞의 2.2절에서 구한 시스템의 단위시간당 평균 호손실수를 목적함수로 하고, 각 기지국에 대한 통화요구율의 합, $\sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i$ 이 전체 시스템의 통화요구율 $\tilde{\lambda}$ 와 같다는 것과, 각 기지국의 통화요구율 $\tilde{\lambda}_i$ 는 최대 평균 처리율 $N\mu$ 보다 클 수 없다는 것을 제약조건으로 하여 다음과 같은 최적화 모형 (P1)을 구성할 수 있다.

$$(P1) \text{에서 Minimize } \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\tilde{\lambda}_i^{N+1}}{N! \mu^N} \right) / \left(\sum_{k=0}^N \frac{\tilde{\lambda}_i^k}{k! \mu^k} \right) \right]$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^n \tilde{\lambda}_i = \tilde{\lambda}$$

$$\tilde{\lambda}_i \leq N\mu, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\tilde{\lambda}_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

(P1)에서 $n, N, \mu, \tilde{\lambda}$ 는 주어진 상수로서 일정하며, 결정변수는 $\tilde{\lambda}_i, i = 1, 2, \dots, n$ 이다. 문제를 간단히 하기 위해 $\tilde{\lambda}/\mu = \rho, \tilde{\lambda}_i/\mu = \rho_i, i = 1, \dots, n$ 이라고 두면 (P1)은 다음과 같이 된다.

$$(P2) \text{에서 Minimize } \mu \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\rho_i^{N+1}}{N!} \right) / \left(\sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} \right) \right]$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^n \rho_i = \rho$$

$$\rho_i \leq N, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\rho_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

부록에 보인 바와 같이, 라그랑지 함수(Lagrangian function)를 이용하여 (P2)에 대한 최적해를 구하면 $\rho_1^* = \rho_2^* = \dots = \rho_n^* = \rho/n$ 이 된다. $\rho_i = \tilde{\lambda}_i/\mu$ 이고 μ 는 상수이므로, 이결과는 모든 기지국의 통화요구율 $\tilde{\lambda}_i$ 를 동일하게 해줄 때 시스템의 단위시간당 평균 호손실수가 최소가 된다는 것을 의미한다.

III. 채널의 출력제어를 통한 셀룰라 이동통신 시스템의 최적설계

시스템 최적화를 위해서 각 기지국이 균등한 통화요구율을 갖도록 하는 것은 셀을 처음 설계하는 단계에서 고려할 수 있겠으나, 균등한 트래픽을 갖는 셀을 설계하는 것은 지형적, 경제적으로 볼 때 매우 어려우며 만약 이것이 이루어진다 하더라도 시간대에 따라 통화요구율의 차이가 심각할 수 있으므로⁽¹⁰⁾ 트래픽의 불균등성은 필연적으로 존재한다. 이러한 트래픽의 불균형을 해소하여 이동통신 시스템의 성능을 향상시키기 위한 하나의 방법으로 설정채널의 출력제어를 통해서 균등한 트래픽 분포를 달성하고자 하는 채널 출력제어(Channel Power Control: CPC) 방법을 제안한다.

3.1 CPC의 개요

CPC는 각 기지국의 통화요구율이 다를 때 설정채널의 송신출력(이하 출력이라 함)을 조정하여 모든 기지국의 통화요구율이 같아지도록 함으로써 시스템의 호손실수를 최소화하고자 하는 방식이다. 이동전화의 접속은 가장 강한 설정채널 수신전력을 갖는 기지국으로 이루어지므로, 출력을 낮춘 기지국의 가장 자리에서 발생하는 호 요청이 주위의 다른 기지국으로 접속되게 함으로써 셀 내의 각 기지국이 감당해야 할 트래픽의 균등화를 도모할 수 있다. 아울러, 통화

채널의 출력도 설정채널과 동일한 방법으로 조정하되, 출력을 줄이고자 하는 기지국에서 현재 사용중인 통화채널이 있을 때에는, 우선 설정채널의 출력만 낮추어 새로운 접속을 줄이고 통화채널의 출력은 통화가 끝난 후에 조정함으로써 불필요한 핸드오프를 피하도록 한다.

3.2 CPC를 이용한 3-섹터 셀의 최적 설계

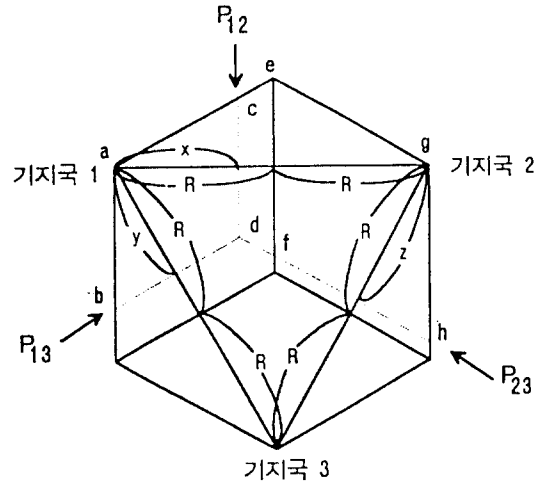
3-섹터 셀은 각 기지국에서 120° 안테나 3개를 가지고 3개의 셀을 1/3씩 서비스하고 있는 것으로 볼 수 있고, 하나의 셀의 측면에서 보면 세개의 기지국이 하나의 셀을 서비스하고 있는 셈이 된다. 그림 2는 3-섹터 셀의 구성을 나타낸다. 3-섹터 셀의 최적 설계에 CPC를 적용한다는 것은 세 기지국의 단위면적당 통화요구율을 알고 있을 때 각 기지국의 통화요구율이 같아지도록 각 기지국의 설정채널 출력을 결정해 주는 것이라고 할 수 있다. 이를 위해 우선 각 기지국의 채널출력과 서비스 범위 간의 관계식을 구한다. 그리고 출력조정 후에 각 기지국의 통화요구율이 전체의 1/3이 되어야 한다는 조건을 이용하여 서비스범위와 단위면적당 통화요구율 간의 관계를 구하고, 최종적으로 단위면적당 통화요구율과 채널출력 간의 관계를 찾아내면 모든 기지국의 통화요구율을 같게 하는 채널출력을 구할 수 있다. 단, 각 기지국의 서비스영역 내의 트래픽은 균일하게 분포하고 있다고 가정한다.

3.2.1 각 기지국의 출력조정에 따른 서비스범위와 통화요구율 기호

- P 기본출력 (출력조정 전의 세 기지국 출력)
- R 기지국의 출력이 P 일 때의 서비스 범위
- $\beta_i P$ 기지국 i 의 조정된 출력 ($i=1, 2, 3$)
- P_{ij} 출력조정 후 기지국 i, j 간의 수신전력이 같은 지점에서의 수신전력 ($i \neq j, i, j=1, 2, 3$)
- λ_i 기지국 i 의 서비스지역의 단위면적당 통화요구율 ($i=1, 2, 3$)
- $\tilde{\lambda}_i$ 기지국 i 의 서비스지역의 전체 통화요구율 ($i=1, 2, 3$)
- x 기지국 1에서 기지국 2 방향으로의 서비스범위

- y 기지국 1에서 기지국 3 방향으로의 서비스범위
- z 기지국 2에서 기지국 3 방향으로의 서비스범위
- α 비례상수
- 출력 조정후 각 기지국의 서비스 범위

그림 4는 CPC에 의한 서비스 면적의 변화를 나타낸다. 즉 기지국 1, 2, 3의 단위면적당 통화요구율의 관계가 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 라고 할 때, 각 기지국의 트래픽이 같게 되도록 출력을 서로 조정하면 서비스 영역의 크기가 3, 2, 1 순으로 된다는 것을 보여 주고 있다. 또한 그림 4는 세 기지국의 출력이 모두 P 일 때는 각 방향으로의 서비스 거리가 R 로 모두 같지만, 출력을 각각 $\beta_1 P, \beta_2 P, \beta_3 P$ 로 조정하면 각 서비스 거리가 모두 바뀌는 것을 나타내고 있다.



— : 출력변경전의 서비스지역 경계
 - - - : 출력변경후의 서비스지역 경계

그림 4. 출력조정 후 각 기지국의 서비스범위
 Fig 4. Service area of each cell site after power control

일정한 출력 하에서 수신전력은 기지국으로부터의 거리의 네제곱에 반비례한다.^(7,8) 또한, 그림 4에서 수신전력이 P_{12}, P_{13}, P_{23} 가 되는 지점들은 양쪽 기지국으로부터의 수신전력이 같은 곳이다. 따라서 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$P_{12} = \alpha(\beta_1 P)x^{-4} = \alpha(\beta_2 P)(2R-x)^{-4} \quad (3)$$

$$P_{13} = \alpha(\beta_1 P) y^{-4} = \alpha(\beta_3 P)(2R - y)^{-4} \quad (4)$$

$$P_{23} = \alpha(\beta_2 P) z^{-4} = \alpha(\beta_3 P)(2R - z)^{-4} \quad (5)$$

또한, 식 (3)과 (4)를 다시 정리하면

$$\beta_2 = \beta_1 (2R/x - 1)^4 \quad (6)$$

$$\beta_3 = \beta_1 (2R/y - 1)^4 \quad (7)$$

과 같이 각각 나타낼 수 있다.

출력 조정 후 기지국의 트래픽

서비스 영역을 구분하는 경계는 두 기지국의 수신 전력의 같은 점들을 이은 것으로서 그림 4에서 점선으로 나타나는 부분이다. 즉, 각 기지국의 서비스 영역을 다각형으로 근사화하고자 한다. 그림 4에서 출력조정 후 기지국 1이 담당해야 하는 서비스 범위는 높이가 x 이고 밑변이 $2/\sqrt{3} \cdot y$ 인 평행사변형 $abcd$ 가 되고 기지국 1의 통화요구율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{기지국 1의 통화요구율} = \frac{2}{\sqrt{3}} yx\lambda_1 \quad (8)$$

유사한 방법으로, 기지국 2의 통화요구율은 원래 기지국 2의 서비스 영역 중 평행사변형 $efgh$ 의 면적에 λ_2 를 곱한 것과 원래 기지국 1의 영역 중 사다리꼴 $cdef$ 의 면적에 λ_1 을 곱한 것과의 합으로 다음과 같다.

$$\text{기지국 2의 통화요구율} = \frac{2zR}{\sqrt{3}} \lambda_2 + \frac{(y+z)(R-x)}{\sqrt{3}} \lambda_1 \quad (9)$$

한편 전체 시스템의 통화요구율은 출력조정 전과 후에 따라 차이가 없으므로

$$\text{전체 시스템의 통화요구율} = \frac{2R^2}{\sqrt{3}} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (10)$$

와 같이 나타낼 수 있으므로, 기지국 3의 통화요구율은 식 (10)에서 식 (8)과 (9)를 빼서 얻을 수 있다.

3.2.2 최적출력 결정방법

단위면적당 통화요구율과 서비스 범위의 관계식 출력조정 후 기지국 1과 2의 통화요구율은 전체의

1/3이 되어야 하므로 식 (8), (9), (10)을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{2}{\sqrt{3}} xy\lambda_1 = \frac{2R^2}{3\sqrt{3}} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (11)$$

$$\frac{2zR}{\sqrt{3}} \lambda_2 + \frac{(y+z)(R-x)}{\sqrt{3}} \lambda_1 = \frac{2R^2}{3\sqrt{3}} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (12)$$

이제, 각 기지국의 서비스 범위 x, y, z 를 구하기 위해 식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 z 를 x, y 로 표현할 수 있다. 즉,

$$z = \frac{yR(2R-x)}{yR - xy + xR} \quad (13)$$

식 (11), (12), (13)은 단위면적당 통화요구율과 서비스 범위의 관계를 나타낸다. 이 연립 방정식의 해는 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (12)에 식 (13)을 대입하고 양변에 y 를 곱해 정리하면

$$12\lambda_2 R^3 y^2 - 6\lambda_2 R^2 x y^2 + 3\lambda_1 R^2 y^3 - 6\lambda_1 R x y^3 + 3\lambda_1 x^2 y^3 + 6\lambda_1 R^3 y^2 - 6\lambda_1 R^2 x y^2 - (2R^3 y^2 - 2R^2 x y^2 + 2R^3 x y) (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 0 \quad (14)$$

이 된다. 식 (14)에 식 (11)을 대입해서 y 의 차수에 따라 정리하면 다음과 같은 y 에 대한 3차 방정식을 얻을 수 있다.

$$u(y) = 3\lambda_1 y^3 + (2\lambda_1 + 8\lambda_2 - 4\lambda_3) R^3 = 0 + \frac{\lambda_3^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)^2}{\lambda_1} R^2 y - \frac{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2}{3\lambda_1} R^3 = 0 \quad (15)$$

식 (15)의 해를 구하는 데 있어서, 이 식의 특성을 밝히는 다음의 두 정리를 이용할 수 있다.

[정리 1] 식 (15)는 0과 R 사이에서 항상 하나 이상의 해를 갖는다.

(증명)

(1) $u(y)$ 는 y 에 대한 3차 다항식이므로 연속함수이다.

$$(2) u(0) = -\frac{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2}{3\lambda_1} R^3 < 0$$

$$(3)u(R) = R^3 \left[3\lambda_1 + 2\lambda_1 + 8\lambda_2 - 4\lambda_3 + \frac{\lambda_3^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)^2}{\lambda_1} - \frac{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2}{3\lambda_1} \right]$$

$$= \frac{R^3}{3\lambda_1} (10\lambda_1^2 - 5\lambda_2^2 + \lambda_3^2 + 14\lambda_1\lambda_2 - 4\lambda_2\lambda_3 - 16\lambda_1\lambda_3)$$

$$= \frac{R^3}{3\lambda_1} [5(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + 14\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_3) + 4(\lambda_1^2 - \lambda_2\lambda_3) + (\lambda_1 - \lambda_3)^2]$$

$\geq 0 \quad (\because \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$

위의 (1), (2), (3)에 의해 0과 R 사이에는 항상 해가 존재하게 되며, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ 일 때 0과 R 사이의 해는 $y = R$ 이다.

[정리 2] $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ 가 아닐 경우, 즉 $u(R) > 0$ 이면 식 (15)는 0보다 큰 실근을 하나만 갖는다.

(증명) 정리 1에서 실근이 하나 이상 존재하므로 다음 두가지 경우로 나누어 생각한다.

(1) 실근 하나, 허근 둘을 가지는 경우

앞의 증명에 의해 실근은 0보다 크다.

(2) 실근 셋을 가지는 경우 (중근 포함)

세 실근을 a, b, c 라고 하면 다음의 두 관계식을 얻을 수 있다.

$$abc = \frac{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2}{3\lambda_1} R^3 > 0$$

$$ab + bc + ca = \frac{\lambda_3^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)^2}{\lambda_1} R^2 < 0$$

이들을 동시에 만족하려면 두 근은 음이고 나머지 한근만 양이 되어야 함을 알 수 있다. 따라서, 위의 (1)과 (2)에 의해 식 (15)는 0보다 큰 실근을 하나만 갖는다.

즉, 식 (15)는 정리 1과 2에 의해 0과 R 사이에서 항상 하나의 가능해를 갖게 됨을 알 수 있다. 이렇게 구한 y 를 식 (11)과 (13)에 대입하면 x, z 를 차례로 구할 수 있다.

통화요구율과 최적출력 비율 간의 관계식

식 (11), (12), (13)으로 이루어진 연립방정식의 해를 x^*, y^*, z^* 라 하면, 식 (3), (4), (5)를 이용하여 각 기지국의 최적출력의 비율을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\beta_2/\beta_1 = (2R/x^* - 1)^4 \tag{16}$$

$$\beta_3/\beta_1 = (2R/y^* - 1)^4 \tag{17}$$

$$\beta_3/\beta_2 = (2R/z^* - 1)^4$$

기지국 최적출력 결정

시스템의 트래픽을 균등하게 분산시키는 각 기지국의 출력의 비율은 구해졌으므로 그 개별적인 출력 값은 다음과 같이 구할 수 있다. 기지국 1과 2의 서비스 영역의 경계에서 수신되는 전력의 세기를 출력조정 전과 후에 같은 정도로 유지하도록 한다면, 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$P_{12} = \alpha(\beta_1 P) x^{-4} = \alpha P R^{-4} \tag{18}$$

식 (18)로부터 β_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_1 = (x/R)^4 \tag{19}$$

식 (19)를 식 (16)과 (17)에 대입하면 β_2, β_3 를 구할 수 있으며, 따라서 기지국 1, 2, 3의 최적 설정채널 출력은 각각 $\beta_1 P, \beta_2 P, \beta_3 P$ 로 결정된다.

설정채널 출력조정 후에는 각 기지국의 서비스 영역이 달라지므로 통화품질을 같은 상태로 계속 유지시키기 위해서는 통화채널의 출력도 조정해 주어야 하는 데, 앞서서도 언급하였듯이 역시 같은 방법을 적용하면 된다. 그러나 여러 가지 시스템 제약으로 인해 채널 출력의 조정범위는 제한되어야 하므로 그 최대허용한계를 지정해 주고 조정된 출력이 이를 초과하지 않도록 해야 한다. 최대허용한계는 다수의 시스템 파라미터에 의해 설정될 수 있지만, 그 중에서도 특히 인접한 동일채널색터에 미치는 동일채널간섭의 영향을 반드시 고려해야 한다. 예를 들어, 동일채널간섭의 보호비를 18dB라 하면⁽¹³⁾ 최대허용출력은 대략 기본출력의 2.36배 정도가 됨을 보일 수 있다. 앞서서 제안된 출력조정절차에 의해 구한 값 중에서 하나라도 최대허용한계를 초과하면 이를 최대허용한계로 낮춰 주어야 한다.

3.3 수치예제 및 적용효과분석

지금까지 설명한 출력제어 방법을 수치예로 설명하면 다음과 같다. 각 색터에 대한 통화요구율이 λ_i :

$\lambda_2:\lambda_3=3:2:1$ 으로 주어진 경우, 계산의 편의상 $R=1$ (km)라고 하면 식 (15)는 다음과 같이 정리된다.

$$9y^3 + 18y^2 - 8y - 8 = 0$$

이 방정식의 해를 구하기 위해 Cardano 방법⁽¹⁾을 적용하면 $y=0.7523$ 을 얻을 수 있으며, 다시 식 (11)과 (13)을 이용하면 $x=0.8862$ 와 $z=0.8622$ 를 얻을 수 있다. 이 결과를 식 (16), (17), (19)에 대입하면 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = (0.6167, 1.5391, 4.6659)$ 가 얻어지며 따라서 각 기지

국의 통화요구율을 동일하게 하는 최적출력은 $(P_1^*, P_2^*, P_3^*) = (0.6167P, 1.5391P, 4.6659P)$ 로 결정된다. 여기서 최대허용출력을 $2.36P$ 라고 할 때, 기지국 3의 출력인 $4.6659P$ 가 이를 초과하므로 기지국 3의 출력을 $2.36P$ 로 낮추어 준다. 따라서, 최종적인 출력조정 결과는 $(P_1', P_2', P_3') = (0.6167P, 1.5391P, 2.36P)$ 과 같이 얻어진다. 이와 같은 설정채널의 출력조정으로 인한 단위시간당 호손실수의 변화를 다음 표 1에 제시하였다. 단, 평균통화시간은 1.76분, 셀 전체에 대한 통화요구율은 1분당 15호, 통화채널의 수는 기지국당

표 1. 출력조정에 의한 호손실률과 호손실수 변화
Table 1. Blocking probabilities and the numbers of blocked calls for the three combinations of channel powers

| 기지국 | (P, P, P) | | (P_1^*, P_2^*, P_3^*) | | (P_1', P_2', P_3') | |
|-----|-------------|--------|-------------------------|--------|----------------------|--------|
| | 호손실률 | 호손실수 | 호손실률 | 호손실수 | 호손실률 | 호손실수 |
| 1 | 0.1221 | 0.9161 | 0.0173 | 0.0863 | 0.0319 | 0.1765 |
| 2 | 0.0173 | 0.0863 | 0.0173 | 0.0863 | 0.0303 | 0.1665 |
| 3 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0173 | 0.0863 | 0.0032 | 0.0128 |
| 계 | 0.1394 | 1.0025 | 0.0519 | 0.2589 | 0.0654 | 0.3558 |

표 2. 출력조정에 의한 호손실수 감소 (단위:%)
Table 2. Reduction of the number of blocked calls by channel power control (%)

| $\lambda_1:\lambda_2:\lambda_3$ | ρ | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1:1:1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1.5:1:1 | 78.7 | 71.5 | 63.2 | 53.9 | 44.2 | 34.9 | 26.8 | 20.2 | 15.1 | 11.2 | 8.4 |
| 1.5:1.5:1 | 59.4 | 52.4 | 46.1 | 40.0 | 33.4 | 27.4 | 22.0 | 17.3 | 13.5 | 10.5 | 8.2 |
| 2:1:1 | 94.6 | 91.1 | 85.9 | 79.0 | 70.4 | 60.8 | 50.9 | 41.7 | 33.5 | 26.6 | 21.0 |
| 2:2:1 | 67.2 | 62.9 | 57.6 | 51.9 | 45.9 | 40.0 | 34.3 | 29.2 | 24.5 | 20.5 | 17.0 |
| 3:1:1 | 98.7 | 97.2 | 94.6 | 90.5 | 84.9 | 77.8 | 69.9 | 61.7 | 53.4 | 46.0 | 39.1 |
| 3:2:1 | 89.4 | 84.6 | 78.4 | 70.9 | 62.9 | 54.9 | 47.5 | 40.8 | 34.9 | 30.0 | 25.5 |
| 3:3:1 | 67.5 | 62.7 | 57.5 | 52.2 | 46.9 | 42.0 | 37.5 | 33.5 | 30.0 | 26.6 | 23.7 |
| 4:1:1 | 99.3 | 98.4 | 96.5 | 93.4 | 88.9 | 83.1 | 76.5 | 69.4 | 62.3 | 55.3 | 48.8 |
| 4:2:1 | 95.9 | 92.9 | 88.3 | 82.2 | 74.9 | 67.0 | 59.1 | 51.7 | 45.0 | 39.1 | 34.0 |
| 4:3:1 | 82.6 | 76.5 | 69.4 | 62.0 | 54.7 | 48.1 | 42.4 | 37.6 | 33.4 | 30.0 | 26.8 |
| 4:4:1 | 66.9 | 61.7 | 56.3 | 50.9 | 45.7 | 41.1 | 37.0 | 33.4 | 30.3 | 27.6 | 25.3 |
| 5:1:1 | 99.5 | 98.8 | 97.2 | 94.5 | 90.6 | 85.6 | 79.7 | 73.3 | 66.8 | 60.4 | 54.4 |
| 5:2:1 | 97.8 | 95.6 | 92.1 | 87.1 | 80.8 | 73.7 | 66.3 | 59.1 | 52.3 | 46.2 | 40.6 |
| 5:3:1 | 91.8 | 87.1 | 80.7 | 73.0 | 65.0 | 57.2 | 50.2 | 44.2 | 39.1 | 34.8 | 31.2 |
| 5:4:1 | 77.6 | 71.1 | 64.1 | 56.9 | 50.3 | 44.5 | 40.0 | 35.5 | 32.1 | 29.2 | 26.7 |
| 5:5:1 | 66.3 | 61.0 | 55.5 | 50.0 | 44.8 | 40.2 | 36.3 | 32.9 | 30.1 | 27.6 | 25.5 |

15개로 하였다.

설정채널의 출력조정 전에는 전체 호손실수가 1본에 1.0025호였던 것이 조정 후에는 0.3558호로 감소되었다. 이는 전체 호손실수 관점에서 약 64.5%의 잠재적인 성능개선을 의미한다.

한편, 다음 표 2에서는 출력조정이 이루어질 경우에 기대되는 호손실수의 감소를 각 섹터에 대한 통화요구율의 비율을 다양한 값으로 변화시켜 가면서 제시하였다. 단, 통화채널의 수는 기지국당 15개로 하였으며 ρ 는 2.2절에서 정의된 바와 같고 최대허용출력은 2.36P로 제한하였다.

표 2로부터 알 수 있듯이, 각 섹터에 대한 트래픽 부하가 불균등한 상황에서는 제안된 출력조정방법을 적용하여 호손실수의 감소를 기대할 수 있다. 특히 제안된 방법은 호손실수 감소율의 관점에서 볼 때, 전체 트래픽 부하가 비교적 작은 경우(즉, ρ 가 작은 경우) 또는 어느 한 섹터의 호요구율이 다른 두 섹터의 그것보다 특별히 큰 경우에 더욱 효과적임을 알 수 있다. 또한, 결정된 최적출력의 값이 최대허용한계를 초과하는 경우에는 앞에서 설명한 방식으로 출력값을 재조정하게 되는 데, 비록 최적의 결과는 아니지만 이 때에도 호손실수 감소율은 여전히 높다는 사실을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 셀룰라 이동통신 시스템의 평균 호손실수가 각 기지국의 트래픽이 균등할 때 최소가 된다는 것을 보였으며 이 사실을 근거로 불균등한 트래픽을 가능한 한 평활화시키기 위한 채널출력제어 방법을 제안하였다.

우선, 각 기지국의 통화요구율 관점에서 평균 호손실수를 최소화하는 최적화 모형을 수립하였으며 이를 풀기 위해 라그랑지 함수를 유도하였다. 이를 근거로 통화요구율이 모두 같을 때 평균호손실수가 최소화된다는 사실을 이론적으로 보였다. 이와 같은 형태의 통화요구율 분포는 각 기지국 서비스 영역을 변화시킴으로써 달성할 수 있으므로, 이를 위한 각 기지국 설정채널의 출력제어 방법을 개발하였다. 이 방법에 따르면 통화채널의 출력 역시 같은 방법으로 조정되기 때문에, 통화채널의 동일채널간섭을 심각하

게 증가시키지 않는 범위 내에서 출력이 조정될 수 있도록 하였다. 한편, 채널출력을 낮출 때 발생하는 통화품질의 저하를 방지하기 위해 이미 통화가 진행 중인 통화채널의 출력은 통화가 끝날 때까지 변경시키지 않는 것으로 가정하였다. 이렇게 하면, 불필요한 핸드오프가 발생하지 않으므로 제어량의 증가를 방지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 제안된 출력제어 방법의 효용성을 검증하기 위해 각 섹터에 대한 통화요구율 분포를 다양한 값으로 변화시켜 가면서 계산한 평균 호손실수의 변화를 제시하였다. 이 결과에 의하면, 제안된 출력제어 방법을 적용함으로써 통화요구율 분포에 따라 차이는 있으나 전반적으로 호손실수를 상당히 감소시킬 수 있다.

제안된 방법이 실행가능하기 위해 기본적으로 요구되는 것은 채널별 출력조정이 가능해야 한다는 점이다. 이것이 가능하다면 단위면적당 통화요구율의 변화에 대한 정보를 근거로 연속적인 출력조정을 구현할 수 있을 것이다. 이동전화가 해당 기지국에 자신의 위치를 알리는 자율등록방식을 현재 국내에서도 시행하고 있으므로⁽¹³⁾ 통화요구율의 변화를 추정할 수 있으리라 믿어진다.

본 연구에서는 각 기지국의 통화요구율을 모두 같게 하는 것이 호손실수 관점에서 최적임을 보였으나, 이 결과는 기지국 출력의 조정한계나 서비스 범위의 제약 등을 구체적으로 최적화모형에 반영하여 얻은 것은 아니다. 그러므로 이들을 포함시킨 보다 의미있는 최적화 모형의 수립과 그 결과에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 본 연구는 이상적으로 구성된 하나의 셀에 대해 수리적인 개념을 중심으로 수행되었는데, 이를 바탕으로 그 대상을 보다 현실적인 상황으로 확장하여 시뮬레이션 등을 통해 본 연구의 결과를 보완하는 것도 매우 의미있는 연구가 될 것이다. 마지막으로, 본 연구를 포함해서 동적 채널할당방식, 혼합 채널할당방식, 재시도 유도기법, 부하 분담기법 등 셀룰라 이동통신 시스템의 최적운용을 위한 많은 방법이 제안되고 있는데, 각 방법의 성능 평가를 위해 호손실수 뿐 아니라 채널 이용률, 동일채널간섭, 핸드오프 수 등 종합적인 관점에서 비교연구의 수행이 필요하다고 생각된다.

부록. 호손실률을 최소화하는 트래픽의 특성

KT 조건(The Kuhn-Tucker conditions)을 만족하는 해를 구하고, 목적함수가 오목함수(convex function)임을 증명하면 최소화 문제의 최적해를 구할 수 있다.^[11] 먼저, 최적화 모형의 KT 조건을 구하기 위해 비선형문제 (P2)의 라그랑지 함수(Lagrangian function)를 구하면 다음과 같다. 단, (P2)의 목적함수에서 편의상 상수항인 μ 는 제외하였다.

$$L = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\rho_i^{N+1}}{N!} - \sum_{i=1}^n u_i (\rho_i - s_i^2) - \sum_{i=1}^n v_i (\rho_i + t_i^2 - N) - w \left(\sum_{i=1}^n \rho_i - \rho \right) \right]$$

그리고, 한 셀은 총 통화요구율 $\tilde{\lambda}$ 가 그 셀의 최대 평균처리율 $nN\mu$ 를 넘지 않도록 설계되어 있다고 가정한다. 즉, $\tilde{\lambda} \leq nN\mu$ 또는 $\rho \leq nN$ 이다. 라그랑지 함수 L 을 각 변수에 대해 편미분하여 0으로 두면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \rho_i} &= \frac{\sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} (N+1-k)}{\left(\sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} \right)^2} - u_i - v_i - w = 0, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial u_i} &= -(\rho_i - s_i^2) = 0, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial v_i} &= -(\rho_i + t_i^2 - N) = 0, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial w} &= -\left(\sum_i \rho_i - \rho \right) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial s_i} &= 2u_i s_i = 0, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial t_i} &= -2v_i t_i = 0, i=1, \dots, n \end{aligned} \tag{A1}$$

여기서, $u_i \leq 0, v_i \geq 0, i=1, \dots, n$ 이고, w 의 부호는 제약되어 있지 않다. 임의의 ρ_i 에 대해 식 (A1)이 모두 같은 형태이므로 다음의 해는 위의 KT 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \rho_i &= \rho/n, i=1, \dots, n \\ u_i &= 0, i=1, \dots, n \\ v_i &= 0, i=1, \dots, n \end{aligned} \tag{S1}$$

$$w = \frac{\sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} (N+1-k)}{\left(\sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} \right)^2}$$

따라서 최적화 모형의 목적함수가 오목함수이면 (S1)은 라그랑지 함수의 최소해이다. 그리고 최적화 모형의 목적함수가 오목함수라는 증명은 오목함수의 합은 오목함수이므로 다음의 함수가 오목함수임을 보이면 된다.

$$f(\rho_i) = \frac{\rho_i^{N+1}}{N!} - \sum_{k=0}^N \frac{\rho_i^k}{k!} \tag{A2}$$

식 (A2)를 ρ_i 에 대해서 2차 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f''(\rho_i) &= \frac{f(\rho_i)}{\rho_i^2} \{ 2f^2(\rho_i) + 2f(\rho_i) + 3(N-\rho_i)f(\rho_i) \\ &\quad + (N-\rho_i)^2 + N - 2\rho_i \} \end{aligned}$$

여기서 $f''(\rho_i)$ 가 가능해 영역에서 오목함수임을 보이기 위해서는 $f''(\rho_i)$ 가 $\rho_i \leq N$ 인 영역에서 음이 아니라는 것을 보여야 하나, 이를 수리적으로 밝힐 수는 없었다. 그러나, 현실적인 범위의 다양한 N 값에 대해 ρ_i 값을 변화시켜 가면서 $f''(\rho_i)$ 를 평가해 본 결과, $f''(\rho_i)$ 는 $\rho_i \leq N$ 의 영역에서 양의 값을 유지하는 것을 확인하였다. 예를 들어, $N=5$ 일 때는 약 16,000 이하의 ρ_i 값에서, $N=10$ 일 때는 약 18,000 이하의 ρ_i 값에서, $N=15$ 일 때는 약 20,000 이하의 ρ_i 값에서, 그리고 $N=30$ 일 때는 약 25,000 이하의 ρ_i 값에서 $f''(\rho_i)$ 가 항상 양이 됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Beyer, W. H, CRC Standard Mathematical Tables, CRC Press., Inc., 1987.
2. Cox, D. C. and Reudink, D. O., "Dynamic channel

