

무선 ATM 서비스를 위한 CDMA 시스템: 다중 무선 링크 구성과 전력 제어 알고리즘

정회원 임 광 재*, 광 경 섭**

A CDMA System for Wireless ATM Service: Multiple Radio Link and Power Control Algorithm

Kwang Jae Lim*, Kyung Sup Kwak** *Regular Members*

요 약

본 논문은 무선 멀티미디어 시스템에서 잦은 핸드오프로 인하여 발생하는 문제점을 개선하기 위해 다중 무선 링크의 구성과 시물캐스팅 방식을 도입한 CDMA 시스템을 제시한다. 제안된 시스템은 사용자 단말과 무선 포트들 사이에 다중 링크를 구성하며, 시물캐스팅 방식에 의해 빠르고 효율적인 핸드오프를 수행할 수 있다. 또한, 다중 링크의 구성과 요구 서비스 품질의 보장을 위해 상방향 링크에서의 전송 전력 제어 알고리즘을 제시한다. 9개의 무선 포트를 갖는 시스템에 대한 모의 실험을 통하여 양방향 링크에서 알고리즘의 수렴 특성과 시스템 용량을 분석하였다. 상향 링크의 경우 다중 링크를 구성함으로써 시스템 용량 증대의 효과를 얻을 수 있었으며, 사용자와 최 근접한 4개의 포트들을 통하여 합성 수신함으로써 이론적 최대 용량에 근접하였다. 반면에 하향 링크의 경우에는 다중 링크를 구성함으로써 시스템 용량은 오히려 감소하였다.

ABSTRACT

This paper introduces a wireless multimedia CDMA system using a simulcasting method and configuring multiple radio links between a user and radio ports. The CDMA system with multiple links can support seamless and soft handoffs as well as port-diversity effect. We propose two transmission power control algorithms for the multiple links which support the required service quality. We perform simulations for the capacity of the proposed system. In the simulations, a system with nine ports is configured and simulated. For the uplink, as the number of the multiple links increases, the capacity also increases and immediately approaches to the theoretical upper limit. It is shown that four radio links are enough to achieve the theoretical maximum capacity. On the other hand, for the downlink, though it has the merit of soft and seamless handoff in the wireless ATM system, the capacity rather decreases as the increase of the number of the links due to the severe multipoint interferences.

1. 서론

ATM(Asynchronous Transfer Mode) 기술과 광대역 무선 통신 기술을 결합하여 유선 ATM 망과 견줄 만한 서비스 품질(QoS: Quality of Service)을 보장하며 사용자의 이동성을 지원하는 것은 무선

ATM(Wireless ATM)에서의 주요 과제가 된다. 무선 ATM 또는 무선 LAN에 대한 연구와 개발이 현재 활발히 진행되고 있다[1,2].

CDMA 방식은 이동 통신 시스템에서 입증된 바와 같이 열악한 무선 이동 채널 환경의 극복과 시스템 용량의 증대라는 관점에서 TDMA 방식보다

* 한국전자통신연구원(kjlim@etri.re.kr)

** 인하대학교 전자공학과

논문번호: 98252-0619, 접수일자: 1998년 6월 19일

우수하다고 평가받고 있다. 그러나 무선 ATM 시스템에 기존의 셀룰러 이동 통신 시스템에서 사용되는 단일 캐리어 DS/CDMA 방식을 적용할 경우, 충분한 처리 이득(processing gain)을 가지고 고속의 전송률을 얻기 위해서는 비현실적인 매우 넓은 대역폭을 필요로 한다. 이러한 문제점은 각 서비스에 다중 캐리어(multi-carrier) 또는 다중 코드(multi-code)를 허용하여 다수의 채널로 병렬 전송함으로써 해결할 수 있다. 본 논문에서는 물리 계층의 전송 방식으로 직접 확산 방식과 직교 다중 캐리어 방식을 혼합한 직교 MC/DS-CDMA (orthogonal multicarrier/direct-sequence CDMA) 방식을 가정한다[3,4]. 이러한 방식은 각 캐리어를 직접 확산시킴으로써 RAKE 수신기에 의한 경로 다이버시티를 얻을 수 있으며, 직교 다중 캐리어에 의해 데이터의 병렬 전송과 주파수 다이버시티 등을 얻을 수 있다.

무선 ATM 시스템의 서비스 지역은 일반적으로 작은 반경의 마이크로 셀 또는 피코 셀들로 구성되어 있기 때문에, 어떤 호의 서비스 기간동안 매우 잦은 핸드오프가 발생되며, 이는 핸드오프 과정에서 ATM 전송 셀의 지연 및 손실, 호 절단(call dropping), 가상 채널 경로의 재설정(re-routing), 다량의 제어 정보 교환 등의 문제점을 일으킨다. 무선 ATM 시스템에서 효율적인 핸드오프 수행을 위한 경로 재설정 및 핸드오프 알고리즘들에 대한 연구 [5-7]가 있으나, 사용자와 포트 사이에 단일 전송 링크만을 구성하며, 근본적으로 위의 문제점을 해결하지 못하고 있다. 핸드오프 과정에서 서비스의 연속성을 보장하기 위해서는 DS/CDMA 셀룰러 시스템에서와 같은 소프트 핸드오프 기법이 필요하며, 사용자와 근접한 여러 무선 포트들 사이에 다중 무선 링크를 구성해야 한다. 그러나 기존 소프트 핸드오프 방식에서도 핸드오프에 의해 서비스 포트가 절환될 때, 새로운 포트와 가상 채널 경로를 재설정해야 하며, 이 과정에서 포트와 교환기 사이에 다량의 제어 과정이 수행되고 ATM 셀의 손실 및 지연 등이 발생된다. 이러한 문제점은 포트와 교환기 사이에 디지털 신호 처리를 거치지 않은 아날로그 신호를 전송하고 포트에서의 신호 및 호 처리 과정을 교환기에서 수행되도록 하는 시뮬케스팅[8,9] 기법을 도입함으로써 해결할 수 있다. 본 논문에서는 핸드오프에서의 문제점 해결을 위해 소프트 핸드오프에서의 다중 링크의 구성과 시뮬케스팅에서의 포트-교환기간 아날로그 전송 기법을 도입한다.

CDMA 시스템에서 사용자 및 포트에서의 전력 제어는 전송 신호의 성공적인 수신을 위해 주요한 역할을 한다. 기존 DS/CDMA 셀룰러 시스템에서는 특정 포트(기지국)의 제어를 받는 모든 사용자에게 대해 포트에서 동일한 수신 전력을 갖도록 사용자 전송 전력을 제어한다. 기존 시스템은 음성이라는 동일 서비스를 가정하기 때문에 동일 수신 전력 제어를 사용한다. 그러나 무선 ATM 시스템은 다양한 서비스를 갖으며, 각 서비스에 따라 서로 다른 통화 품질을 요구한다. 따라서, CDMA 방식의 무선 ATM 시스템에서 각기 다른 요구 품질을 만족시킬 수 있는 수신 신호대 간섭비에 따른 전력 제어(SIR-based power control)[10-12] 방식이 요구된다. 대부분의 전력 제어에 관한 연구에서 각 사용자는 근접 포트와 단일 링크만을 구성한다. 특히, 문헌 [12]는 각 사용자에게 대해 서비스 지역내의 모든 포트와 상향 링크를 구성할 경우에 대한 시스템 용량과 전력 제어 알고리즘을 제시하고 있으나, 하향 링크에서 다중 링크를 구성하는 경우에 대한 연구는 아직 없다. 본 논문은 상향 및 하향 링크에서 다중 링크를 구성하는 시스템에서 각 링크에서의 전송 전력을 제어하는 알고리즘을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 무선 ATM 서비스를 위한 다중 링크 구성을 갖는 CDMA 시스템을 제시하고, 3 장에서 제시된 시스템의 모델을 세우고 상향링크에서의 요구 전송 전력을 구한다. 4 장에서는 다중 링크 구성을 위한 전력 제어 알고리즘을 제시하고, 5 장에서는 제시된 시스템에 대한 모의 실험 결과를 제시한다. 끝으로 6 장에서 결론을 맺는다.

II. 다중 무선 링크 구성을 갖는 CDMA 시스템

시뮬케스팅 방식[8,9]은 그림 1에서와 같이 소프트 핸드오프와 마찬가지로 하나의 단말이 동시에 여러 근접 포트들과 다중 링크를 구성하며, 포트들과 교환기 사이에서는 광파이버 또는 케이블을 통해 디지털 신호 처리가 수행되지 않은 아날로그 방식으로 신호를 전송한다. 기존의 시스템에서 무선 포트들에서 수행되는 각 사용자 신호에 대한 처리 및 호 제어 기능은 모두 교환 센터에 일임된다. 포트와 단말간의 무선 채널 상에서는 동일한 주파수의 CDMA 신호를 교환하며, 포트는 사용자 단말로부터 전송된 신호를 교환기로 또는 교환기에서 각 사용자 단말로 중간 주파수(intermediate frequency)

를 이용하여 중계 역할을 수행한다. 교환기와 포트 간 교환되는 신호는 주파수 분할 다중화(frequency division multiplexing)에 의해 구별된다.

이러한 시스템에서 각 사용자들을 위한 중계 무선 포트들을 적절히 선택하고, 그 포트들을 통해 송수신 함으로써 각 사용자들을 위한 개개의 가상적인 셀(virtual cell)을 형성할 수 있다. 핸드오프가 발생할 경우, 교환기는 사용자의 측정 보고에 따라 사용자 신호의 송수신을 위한 무선 포트 집합을 선택하고, 해당 중간 주파수 대역으로 해당 사용자를 위한 신호를 송수신하게 함으로써 자연스러운 핸드오프를 수행할 수 있다. 결국, 핸드오프 시에 제어 정보의 교환 및 가상 채널 재설정은 더 이상 요구되지 않는다. 물론, 신호 처리 부분의 추가로 교환기에서의 복잡성의 증가라는 단점이 있으나, 포트까지의 제어 신호 교환이 아닌 교환기 내에서의 처리로 앞서 언급된 장점을 얻을 수 있다. 또한, 다른 서비스 지역간의 핸드오프 시에 기존 방식에서의 문제점은 역시 존재하나, 포트-교환기-교환기-포트로 연계되는 핸드오프가 아니라, 포트의 참여 없이 직접적인 교환기-교환기 사이의 핸드오프가 된다.

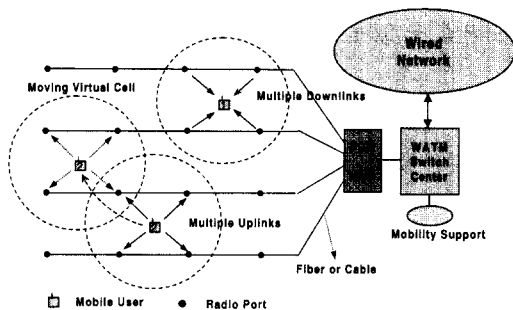


그림 1. 다중 무선 링크 구성과 시물케스팅.

위와 같이 다중 링크를 구성하는 CDMA 시스템에서 각각의 사용자에 대해 가상적인 셀을 형성하기 위해 무선 링크를 구성하는 포트들의 집합을 적절히 선택하고, 형성된 각각의 다중 링크에서 전송 전력을 제어해야 한다. 이 때 각 사용자의 요구 서비스 품질은 신호대 간섭비에 따른 전력 제어(SIR-based power control) 방식에 의해 무선 링크에서의 품질을 만족시킴으로써 셀 손실률, 셀 지연 시간 등의 상위 레벨에서의 품질을 만족시킬 수 있으며, 이를 위해 각 무선 링크에서 수신 신호대 간섭비에 따른 전력 제어 방식이 요구된다. 다중 링크에 의해 수신되는 신호는 하향 링크(downlink)의 경

우 무선 단말에서, 상향 링크(uplink)의 경우 교환기에서, 최대비 합성(maximal ratio combining) 수신 함으로써 포트 다이버시티(port-diversity)를 얻는다.

본 논문의 CDMA 시스템에서 직교 MC/DS-CDMA 방식에 의해 병렬로 전송되는 다중 캐리어의 수와 각 캐리어에서의 비트 전송률을 조절하고, 또한 각 서비스에서 할당된 무선 링크에서 신호대 간섭비에 따라 전송 전력을 제어함으로써 각 서비스가 요구하는 다양한 서비스 품질과 대역폭을 지원할 수 있다. 각 캐리어의 확산 대역폭이 W_s , 어떤 서비스 호에서 요구되는 무선 링크 품질을 만족시키기 위해 요구되는 수신 비트에너지대 간섭전력밀도의 비가 $(E_b/I_0)_{req}$, 요구 데이터 전송률을 지원하기 위한 각 캐리어에서의 비트 전송률이 R_s 일 때, 각 무선 링크에서의 수신 신호대 간섭비는 $S/I = R_s/W_s \cdot (E_b/I_0)_{req}$ 이 만족되도록 제어되어야 한다.

서비스 중에 있는 모든 사용자는 하나 이상의 무선 포트와 다중 링크를 구성한다. 하향 호(down-call)의 경우, 단말은 형성된 다중 하향 링크를 통해 수신된 신호의 신호대 간섭비를 측정하고 이를 측정 보고 메시지를 통해 교환기에 보고한다. 보고된 측정 정보는 교환기에서 다음 하향 링크에서 요구되는 전송 전력을 계산하는데 이용된다. 상향 호(up-call)의 경우, 교환기는 각 사용자로부터 다중 상향 링크를 통해 수신된 신호의 신호대 간섭비를 측정하고 다음 상향 링크에서의 전송 전력을 계산하여 각 단말로 제어 메시지를 통해 전달한다.

설정된 상향 및 하향 호를 가진 모든 사용자 단말은 정보 전송의 유무에 관계없이 포트들로부터 전송되는 파일럿 신호에 대한 신호대 간섭비를 측정하여 교환기에 주기적으로 보고한다. 또한 파일럿에 대한 주기적인 측정 보고는 각 사용자 단말과 무선 링크를 구성할 무선 포트들의 집합을 선택하는데 이용되며, 각 사용자에 대해서 무선 포트들의 집합을 적절히 선택함으로써 무선 포트들간의 핸드오프가 이루어진다.

III. 시스템 모델

그림 1과 같이 하나의 교환기와 K 개의 무선 포트들로 이루어지는 무선 포트 그룹에 의해 구성되는 하나의 서비스 지역을 고려하며, 서비스 지역 내에 M 개의 사용자 단말이 있다고 가정한다. 서비스 지역 내의 각 사용자 단말은 호 설정 과정을 거쳐 하나의 상향 호 또는 하향 호를 갖는다.

시스템 모델에서 다중 캐리어 전송 중 하나의 캐리어에 대해서 다루며 주파수 다이버시티는 고려하지 않는다. 사실, 각 사용자들에게 할당되는 다중 캐리어의 수와 대역이 동일할 경우, 각 캐리어에서 모델은 서로 일치한다. 직접 확산에 의해 얻어지는 경로 다이버시티 또한 고려되지 않으며, 사용자와 포트들간에 형성되는 다중 링크에 의한 합성 수신만을 고려한다. 다음의 시스템 모델에서 사용될 변수들을 다음과 같이 정의한다.

$G_u(i, j, l, t)$, $G_d(j, i, l, t)$: 프레임 l 의 슬롯 i 에서 사용자 u 와 포트 j 사이의 상향 및 하향 전송 손실.

$A_u(i, t)$, $A_d(i, t)$: 프레임 l 에서 사용자 u 와 다중 상향 링크를 구성하는 포트들의 집합과 다중 하향 링크를 구성하는 포트들의 집합.

$B_u(l, t)$, $B_d(l, t)$: 상향 또는 하향 프레임 l 의 슬롯 i 에서 전송 허가된 패킷 전송들의 집합.

$\gamma_u^*(i)$, $\gamma_d^*(i)$: 상향 또는 하향 호 i 에 대한 요구 신호대 간섭비.

특정 교환기에 의해 제어되는 서비스 지역 내에서 모든 단말과 포트에서의 전송 신호는 프레임이라는 주기적인 시간에 동기되어 전송된다. 프레임은 다수의 슬롯들로 구성되며, 각 슬롯에 패킷화된 ATM 셀을 전송함으로써 무선 ATM 서비스를 받는다. 구체적인 매체 접속 제어, 프레임 구성 및 전송 제어에 대한 부분은 문헌 [13]에서 상술한다. 시스템 모델에서 어떤 전송 프레임 시간 내에서의 전송 손실은 거의 변화가 없으며, 측정 보고 주기는 페이딩의 상관 시간에 비해 매우 작다고 가정한다.

1. 상향링크 수신 신호대 간섭비와 전송전력

서비스 중에 있는 어떤 상향 호 i 를 위해 프레임 l 의 슬롯 i 에서 데이터 패킷이 전송되고, 전송된 패킷은 호 i 에 대한 활성 포트 집합 $A_u(i, t)$ 에 속한 포트들을 거쳐 교환기로 수신된다고 가정했을 때, $A_u(i, t)$ 에 속한 특정 포트 j 를 거쳐 수신되는 패킷의 수신 신호대 간섭비 $\gamma_u(i, j, l, t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_u(i, j, l, t) = \frac{G_u(i, j, l, t)P_u(i, l, t)}{I_u(i, j, l, t)} \tag{1}$$

위 식에서 $P_u(i, l, t)$ 는 프레임 l 의 슬롯 i 에서 사용자 u 의 전송 전력이며, $I_u(i, j, l, t)$ 는 동일 슬롯 i 에서 포트 j 를 거쳐 수신되는 간섭으로 집합 $B_u(l, t)$ 에 속한 모든 패킷 전송에 의한 간섭과 포트 j 에서의 잡음 전력 $n_u(j)$ 와의 합이 되고 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$I_u(i, j, l, t) = \sum_{m \in B_u(l, t)} G(m, j, l, t)P_u(m, l, t) + n_u(j) \tag{2}$$

위의 식에서 해당 패킷 자신에 의한 간섭 또한 포함되어 있으며, 다음 식과 같이 해당 패킷 자신에 의한 간섭은 전체 총 간섭에 비해 매우 적다고 가정한다.

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in B_u(l, t)} G(m, j, l, t)P_u(m, l, t) \\ & \cong \sum_{m \in B_u(l, t), m \neq i} G(m, j, l, t)P_u(m, l, t) \end{aligned} \tag{3}$$

호 i 에 대한 활성 포트 집합 $A_u(i, t)$ 에 속한 포트들을 거쳐 수신되는 신호는 교환기에서 최대비 합성 수신될 때, 합성된 신호대 간섭비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_u(i, l, t) &= \sum_{j \in A_u(i, t)} \gamma_u(i, j, l, t) \\ &= P_u(i, l, t) \sum_{j \in A_u(i, t)} \frac{G_u(i, j, l, t)}{I_u(i, j, l, t)} \end{aligned} \tag{4}$$

수신 패킷이 성공적으로 복원되기 위해서는 합성 수신 신호대 간섭비는 다음 조건

$$\gamma_u(i, l, t) \geq \gamma_u^*(i) \tag{5}$$

를 만족해야 하며, 이를 위한 사용자 u 의 전송 전력은 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$P_u(i, l, t) \geq \gamma_u^*(i) \left[\sum_{j \in A_u(i, t)} \frac{G_u(i, j, l, t)}{I_u(i, j, l, t)} \right]^{-1} \tag{6}$$

식 (6)으로부터 다음과 같은 사실에 대하여 주목해야 한다. 상향 링크에서 하나 이상의 다중 링크를 구성할 경우, 특정 신호대 간섭비를 만족하기 위한 전송 전력은 단일 링크만을 구성할 경우에 비해 더 적은 전력을 요구하며, 결국 동시에 성공적으로 전송 가능한 사용자의 수는 증가한다. 또한, 서비스 지역 내의 모든 포트들을 통하여 수신된 신호를 합

성 수신할 경우 최대 시스템 용량을 얻을 수 있으며, 문헌 [9]는 모든 포트들을 이용하여 얻을 수 있는 최대 시스템 용량을 제시하고 있다. 본 논문의 경우에 다음과 같은 이론 1을 얻을 수 있으며, 부록에서 증명하였다.

이론 1: 전송 집합 $B_u(l, t)$ 과 각 사용자 $i \in B_u(l, t)$ 에 대한 활성 포트 집합으로 서비스 지역의 모든 포트들로 $A_u(i, t) = \{1, 2, \dots, K-1, K\}$ 와 같이 주어졌을 때, 모든 사용자에게 대한 수신 신호대 간섭비가 요구 신호대 간섭비 $\gamma_u^*(i)$ 보다 크기 위한 필요 충분 조건은

$$\sum_{i \in B_u(l, t)}^M \gamma^*(i) \leq K \quad (7)$$

이다. 또한, 모든 사용자 $i \in B_u(l, t)$ 에 대해 활성 포트 집합 $A_u(i, t)$ 의 크기가 상수 C 로 같을 때, 필요 조건은

$$\sum_{i \in B_u(l, t)}^M \gamma^*(i) \leq C \quad (8)$$

이다.

2. 하향링크 수신 신호대 간섭비와 전송전력

서비스 중에 있는 하향 호 i 를 위해 프레임 l 의 슬롯 i 에서 데이터 패킷을 전송하고, 전송된 패킷은 호 i 에 대한 활성 포트 집합 $A_d(i, t)$ 에 속한 포트들을 거쳐 사용자 i 에 수신된다고 가정했을 때, $A_d(i, t)$ 에 속한 특정 포트 j 를 거쳐 수신되는 패킷의 수신 신호대 간섭비 $\gamma_d(j, i, l, t)$ 는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_d(j, i, l, t) = \frac{G_d(j, i, l, t)P_d(j, i, l, t)}{I_d(j, i, l, t)}. \quad (9)$$

여기서 $P_d(j, i, l, t)$ 는 프레임 l 의 슬롯 i 에서 포트 j 의 전송 전력이고, $I_d(j, i, l, t)$ 는 동일 슬롯 i 에서 수신되는 간섭으로 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$I_d(j, i, l, t) = \sum_{m \in B_d(l, t)}^M \sum_{k \in A_d(m, t)}^K G_d(k, i, l, t)P_d(k, m, l, t) + n_d(i) \quad (10)$$

위의 간섭은 포트 j 로부터의 간섭을 포함하여 이외의 모든 포트들로부터 수신되는 간섭과 사용자 단

말에서의 잡음 전력의 합이 된다. 식 (10)은 호 i 를 위한 포트 j 의 전송 전력 그 자신에 의한 간섭 또한 포함하고 있다.

집합 $A_u(i, t)$ 에 속한 포트들로부터 수신되는 신호는 사용자 단말에서 최대비 합성 수신될 때, 합성된 신호대 간섭비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_u(i, l, t) &= \sum_{j \in A_u(i, t)}^K \gamma_d(j, i, l, t) \\ &= \sum_{j \in A_u(i, t)}^K \frac{G_d(j, i, l, t)P_d(j, i, l, t)}{I_d(j, i, l, t)}. \end{aligned} \quad (11)$$

상향 링크에서와 마찬가지로 수신 패킷이 성공적으로 복원되기 위해서는 합성 수신 신호대 간섭비는 다음 조건

$$\gamma_d(j, i, l, t) \geq \gamma_d^*(i) \quad (12)$$

를 만족해야 하며, 이를 위한 전송 전력을 얻기 위해 식 (11)을 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\sum_{j \in A_u(i, t)}^K \frac{G_d(j, i, l, t)P_d(j, i, l, t)}{I_d(j, i, l, t)} \geq \sum_{j \in A_u(i, t)}^K \omega(j, i, l, t)\gamma_d^*(i) \quad (13)$$

여기서 $\omega(j, i, l, t)$ 는 포트 j 에 대해 할당되는 전력 할당비(power allocation ratio)이며,

$\sum_{j \in A_u(i, t)}^K \omega(j, i, l, t) = 1$ 을 만족한다. 위의 식 (13)으로부터 조건 (12)를 만족하기 위한 포트 j 에서의 전송 전력을 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$P_d(j, i, l, t) \geq \gamma^*(i)\omega(j, i, l, t) \left[\frac{G_d(j, i, l, t)}{I_d(j, i, l, t)} \right]^{-1}. \quad (14)$$

위의 식 (14)를 만족하는 전력 할당비 $\omega(j, i, l, t)$ 를 다르게 설정함으로써 그에 따른 전송 전력 $P_d(j, i, l, t)$ 의 해는 무수히 많이 존재한다. 각 포트에 대한 전력 할당비를 각 포트에 대한 전송 손실대 간섭비(GIR: pathGain-to-Interference Ratio)에 비례하게 다음 식 (15)와 같이 정의할 수 있다. 또한 간단한 전력 할당 방법으로 전력 할당비를 다음 식 (16)과 같이 각 포트에 대해 동일 비율로 전력을 배분할 수 있다.

방법 1. 다중 하향 링크에서 전송 손실대 간섭비에 비례한 전력 배분 (GIR-proportional power allocation method):

$$\begin{aligned} \omega(j, i, l, t) &= \frac{G_d(j, i, l, t) / I_d(j, i, l, t)}{\sum_{k \in A_d(i, t)} G_d(k, i, l, t) / I_d(k, i, l, t)} \\ &= \frac{G_d(j, i, l, t)}{\sum_{k \in A_d(i, t)} G_d(k, i, l, t)}. \end{aligned} \quad (15)$$

방법 2. 다중 하향 링크에서 동일 비율 전력 배분 (Equal-portion power allocation method):

$$\omega(j, i, l, t) = 1/|A_d(i, t)| \quad (16)$$

위의 방법 1에 의한 전력 배분은 다음과 같은 이유에서 타당성을 얻을 수 있다. 상향 링크에서의 경우와 달리 하향 링크에서의 다중 링크의 구성은 오히려 요구되는 전송 전력을 증가시키며, 또한 시스템의 용량을 감소시킬 수 있다. 하향 링크의 경우, 다중 링크를 구성하기 위해서는 추가적인 전송 전력이 요구되며, 이는 다른 사용자 신호에 대해 추가적인 간섭을 일으킨다. 가장 근접한 하나의 포트와 단일 하향 링크를 구성할 경우에 시스템 용량은 최대가 된다. 그러나 2장에서 기술된 바와 같이 다중 링크의 구성으로 효율적인 핸드오프를 수행할 수 있으며, 따라서 하향 링크에서도 다중 링크를 구성하되 그로 인한 추가적인 전력 소모 및 간섭 증가 등의 영향을 최소화해야 한다. 식 (15)에서와 같이 전송 손실대 간섭비에 비례한 포트들간의 전력 배분 방법은 이를 이룰 수 있는 하나의 방법이 된다.

IV. 전송 전력 제어

많은 연구에서 과거에 측정 보고된 신호대 간섭비를 바탕으로 특정 신호대 간섭비를 만족할 수 있는 현재의 필요 전송 전력을 계산하는 전력 제어 알고리즘들이 제시되었다[10-12]. 그러한 연구에서 전력 제어 알고리즘은 사용자간에 반복적인 상호작용에 의해 최적 해에 도달한다.

식 (6)과 (14)로부터 다음과 같은 알고리즘 1과 알고리즘 2를 얻을 수 있으며, 본 논문의 다중 링크를 가지는 CDMA 시스템에서 어떤 사용자 i 에 대한 상향 및 하향 링크에서 요구되는 전송 전력을 계산하는데 이용된다. 시스템의 안정성을 위해서는 위의 반복 알고리즘은 유일한 특정 해(unique solution)에 수렴해야 한다. 알고리즘 1과 알고리즘 2는 이론 2와 같이 특정 해에 수렴하며, 부록에서 증명되었다.

알고리즘 1. 상향링크를 위한 전송전력제어:

$$\tilde{P}_u(i, l, t) = \gamma_u^*(i) \left[\sum_{j \in A_u(i, t)} \frac{G_u(i, j, l, t-1)}{I_u(i, j, l, t-1)} \right]^{-1}. \quad (17)$$

알고리즘 2. 하향링크를 위한 전송전력제어:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_d(j, i, l, t) &= \gamma_d^*(i) \omega(j, i, l, t-1) \left[\frac{G_d(j, i, l, t-1)}{I_d(j, i, l, t-1)} \right]^{-1} \\ &\quad \forall j \in A_d(i, t). \end{aligned} \quad (18)$$

이론 2: 모든 사용자에게 요구 수신 신호대 간섭비를 만족하는 전송 전력에 대한 해가 존재한다면, 알고리즘 1과 알고리즘 2는 어떠한 초기 전송 전력에 대해서도 유일 해에 수렴한다.

상향 링크의 경우, 교환기는 사용자와 다중 상향 링크를 구성하는 포트들을 통해 수신되어 오는 신호의 전력과 간섭을 측정하여, 현 프레임의 각 링크에서의 전송 손실과 간섭을 얻을 수 있고, 알고리즘 1에 의해 해당 사용자에서의 전송 전력을 계산하여 제어 메시지를 통해 사용자에게 알린다. 사용자는 다음 프레임에서 할당된 전력으로 신호를 전송한다.

하향 링크의 경우, 사용자 단말은 할당된 활성 포트 집합에 속한 포트로부터 전송되어오는 해당 신호의 전력과 간섭비를 측정하고 교환기에 보고한다. 교환기는 해당 사용자의 측정 보고로부터 활성 포트 집합에 속한 포트와 단말간의 전송 손실과 단말에서의 수신 간섭을 얻을 수 있고, 알고리즘 2에 의해 다음 프레임에서의 전송 전력을 계산하고 해당 사용자를 위한 신호를 전송한다.

위의 알고리즘은 각 사용자에 대해 다중 링크를 구성하는 포트의 집합, 즉 활성 포트 집합이 이미 파일럿 측정 보고로부터 정해져 있다고 가정하였을 때, 전송 전력을 계산하는 알고리즘이다. 실제로로는 사용자의 이동에 따라 다중 링크를 구성하는 포트 집합의 변화가 발생하며, 새로이 다중 링크 구성에 참가한 포트에 대한 전송 손실과 간섭에 대한 정보를 필요로 한다. 따라서 사용자는 근접 포트들에 대한 파일럿 신호의 전력과 간섭을 측정 보고해야 한다. 그리고 교환기는 파일럿 측정 보고로부터 적절한 새로운 활성 포트 집합을 각 사용자에게 할당하고, 각 링크에서의 필요 전송 전력을 계산하여야 한다.

또한, 위의 알고리즘은 과거 프레임에서 측정된 전송 손실 및 간섭이 현 프레임에서 거의 변화하지

않을 때, 각 사용자에 대해 반복적인 상호 작용에 의해 최적의 해에 도달할 수 있다. 사실 이러한 형태의 알고리즘은 음성과 같이 지속적인 트래픽을 가진 호를 서비스하는 시스템을 위한 것으로 사용자 상호간의 간섭과 전송 손실의 변화는 거의 일어나지 않는다는 가정에 기반을 둔 것이다. 그러나 무선 ATM 시스템은 VBR 또는 ABR과 같이 시변적이고 간헐적인 트래픽을 가진 서비스를 가지고 있으므로, 그러한 가정은 더 이상 유효하지 않게 된다. 따라서 알고리즘은 트래픽 변화에 의한 간섭량 변화를 추정하는 과정을 포함하여야 한다.

각 사용자에 대해 다중 링크를 구성하는 포트 집합의 적절한 선택, 트래픽 변화에 의한 간섭량 변화의 추정, 전송 시점의 제어, 측정 보고 메시지와 제어 메시지의 전달 등은 매체 접속 제어 방식과 밀접한 관련을 가지며, 문헌 [13]에서 매체 접속 방식과 이러한 기능을 포함한 알고리즘을 제시한다.

V. 모의 실험

제시된 전력 제어 알고리즘의 특성과 시스템 용량을 분석하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에서 서비스 지역은 그림 2와 같이 9 개의 직사각형 격자로 나뉘어져 있다. 각 격자의 중심에 무선 포트가 있으며, 직사각형 한 변의 길이는 100m로 하였다. 모의 실험 중에 발생하는 사용자 단말은 임의적으로 위치가 정해지며, 각 사용자는 일정 속도 v 를 가지고 임의의 보행과정(random walk process)에 따라 이동한다. 실험에서는 보행자 속도를 기준으로 $v = 5 \text{ km/h}$ 를 사용하였다. 사용자 단말을 포함하여 모든 무선 포트들은 전 방향성(omni-directional) 안테나를 이용하여 송수신하는 것으로 가정한다.

일반적으로 이동 통신에서의 전송 손실은 거리에 따른 손실과 음영 효과에 의한 장구간 페이딩 그리고 다중 경로 수신에 의한 단구간 빠른 페이딩 등에 의해 변화한다. 본 논문의 모의 실험에서 전송 손실은 다음 식 (19)와 같이 거리에 따른 지수 감쇠 손실과 로그-노말(log-normal) 분포에 따르는 페이딩의 두 성분으로 이루어진다. 여기서 레일레이 페이딩(Rayleigh fading)에 의한 전송 손실의 단구간 변화는 포함되지 않았으며, 프레임 또는 측정 보고 주기가 페이딩의 상관 시간보다 매우 작아 느린 페이딩으로 가정되었기 때문이다. 다중 캐리어에 의한 CDMA 전송 방식에서 각 서브 채널의 대역폭은

무선 채널의 상관 대역폭에 비해 작고, 다중 캐리어에서의 주파수 다이버시티에 의해 다중 경로에 의한 페이딩의 영향을 무시할 수 있다고 가정한다. 어떤 프레임 시간 t 에서 사용자 i 와 포트 j 의 전송 손실 $G(i, j, t)$ 는

$$G(i, j, t) = D(i, j, t)^{-\alpha} 10^{\xi(i, j, t)/10} \tag{19}$$

으로 표현된다. 여기서 $D(i, j, t)$ 는 사용자 i 와 포트 j 사이의 거리이고, $\xi(i, j, t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\xi(i, j, t) = c\xi(i, j, t-1) + W_f(t) \tag{20}$$

위 식에서 c 는 거리에 따라 지수적으로 감소하는 상관 인자로 어떤 기준 거리 a 에 의해 $c = \exp(-\nu/a)$ 로 주어진다. $W_f(t)$ 는 평균 0과 분산 $(1-c^2)\sigma_f^2$ 을 갖는 가우시안 과정(Gaussian process)이며, 여기서 σ_f^2 는 로그-노말 페이딩의 분산이 된다. 실험에서 사용자 단말이 이동함에 따라 전송 손실은 식 (19)에 의해 상관성을 가지며 변화한다. 각 사용자에 대한 전송 손실은 독립적으로 가정되었고, 파라미터 값으로 $\alpha=3.5$, $a=20\text{m}$, $\sigma_f^2=12\text{dB}$ 을 사용하였다.

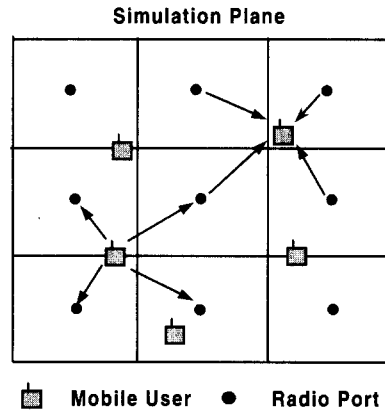


그림 2. 모의 실험 평면.

실험에서 각 포트로부터 전송되는 파일럿 전력으로 하향 링크에서의 파일럿에 의한 간섭 영향을 줄이기 위해 작은 전력인 $1 \mu \text{ W}$ 로 하였다. 사용자 단말 및 포트에서 전체 대역폭 64 MHz에 걸쳐 전력 밀도 -160 dBm/Hz 를 가지고 배경 잡음이 발생하는 것으로 하였고, 사용자와 포트 사이에서 구성

되는 각 무선 링크에서의 최대 출력 전력은 1 W로 제한하였다. 실험에서 상향 및 하향 호를 가진 모든 사용자에게 대해 동일한 요구 신호대 간섭비 -10 dB를 가정하였다.

모의 실험에서 전력 제어에 관한 측정 보고 및 제어 메시지의 전달 과정에서 오류는 없으며, 그에 관한 정보는 정확한 실제값에 의해 전달된다고 가정한다. 즉, 측정 보고 또는 전력 갱신에 있어 제어 비트의 제한으로 인한 오차는 포함되지 않았다. 실 상황에서 사용자 단말과 교환기 사이에 전력 제어에 대한 정보를 전달하는데 있어, 무선 채널에서의 오류, 대역폭 및 전송 정보량의 제한에 따라 정확한 제어 정보의 전달은 제한 받는다.

먼저, 전력 제어 알고리즘의 다중 링크 수에 따른 수렴 특성을 비교하기 위해 서비스 지역 내에 10명의 사용자를 발생시키고 임의의 초기 전송 전력을 할당하였다. 여기서 각 사용자를 위해 다중 링크를 구성하는 포트들의 집합은 사용자의 파일럿 측정 보고를 바탕으로 파일럿 수신 신호대 간섭비가 상대적으로 큰 순서로 다중 링크의 수만큼 선정된다. 모의 실험이 진행되는 동안 전력 제어 알고리즘은 다중 링크를 통하여 합성 수신된 신호대 간섭비가 -10 dB의 요구 신호대 간섭비를 만족시키기 위해 전송 전력을 제어한다.

그림 3과 4는 알고리즘 1에 의해 전송 전력이 제어되었을 때, 각각 단일 상향 링크를 구성할 경우와 4 개의 다중 상향 링크를 구성할 경우에 대해 교환기에서 최대비 합성 수신된 신호대 간섭비를 슬롯 시간에 따라 나타낸 것이다. 두 그림으로부터 4 개의 다중 링크를 구성할 경우가 단일 링크를 구성하는 경우에 비해 빠른 수렴 속도를 갖는다. 따라서 상향 링크에서 다중 링크의 구성은 빠른 수렴 특성에 의해 트래픽 변동에 의한 간섭량 변화에 대해 상대적으로 빠른 대응을 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5와 6은 알고리즘 2에 의해 4 개의 다중 하향 링크에 대한 전송 전력이 제어되고, 각각 전송 손실대 간섭비에 따른 전력 배분 방식과 동일 비율 전력 배분 방식을 사용하였을 경우 사용자에서 최대비 합성 수신된 신호대 간섭비를 슬롯 시간에 따라 나타낸 것이다. 알고리즘 1과 알고리즘 2는 단일 링크를 구성할 경우 동일한 특성을 가지므로, 4 개의 다중 링크에 대한 결과만을 제시한다. 먼저, 그림 4와 비교해 볼 때, 다중 하향 링크를 구성할 경우 상향 링크에 비해 보다 긴 수렴 시간을 갖는 것

을 볼 수 있다. 이는 다중 하향 링크의 경우 각각의 링크에서의 전송 전력이 제어되고 전송되어, 다중 링크를 구성하더라도 실제적으로 다중 전송이 없고 합성 수신 이득을 얻을 수 있는 상향 링크에 비해, 사용자 상호 간의 작용 요소가 많기 때문에 더 느린 수렴 속도를 갖는다. 또한, 그림 5와 6을 비교해 볼 때, 손실대 간섭비에 따른 전력 배분의 경우 모든 사용자에게 대해 요구 신호대 간섭비를 만족시키도록 수렴되고 있으나, 반면에 동일 비율 전력 배분의 경우 특정 사용자에게 대해 요구 신호대 간섭비를 만족시키지 못한 채 수렴되고 있다. 이는 4 개의 다중 하향 링크를 구성할 때, 동일 비율 전력 배분 방식의 경우 서비스 가능한 동시 사용자가 10 명 이하가 된다는 것을 의미한다.

그림 7은 주어진 호의 수에 따라 알고리즘 1과 알고리즘 2가 수렴하는 평균 수신 신호대 간섭비를 나타낸다(그림에서 A는 다중 링크의 수). 주어진 호의 수가 특정 수 이상이 되면, 요구 수신 신호대 간섭비 -10 dB를 더 이상 만족시킬 수 없는 사용자가 존재하게 되며, 평균 수렴값은 점점 감소한다. 이로 부터 다중 링크의 수에 따른 동시 허용 가능한 사용자 수를 얻을 수 있으며, 그림 8은 상향 및 하향 링크에서 다중 링크의 수에 따른 시스템 용량을 나타낸다. 여기서 시스템 용량은 동시 수용 가능한 사용자들의 요구 신호대 간섭비의 합을 의미한다. 실험에서 요구 신호대 간섭비로 모든 사용자에게 동일하게 -10 dB(=0.1)를 사용하였으므로, 예를 들어, 용량 9는 동시 사용자 수가 90(=9/0.1)임을 의미한다. 이러한 용량 표현은 서로 다른 요구 신호대 간섭비를 갖는 사용자에게 대해 시스템이 수용할 수 있는 수를 계산하는데 유용하다.

이론 1에 의해 모든 포트들과 다중 상향 링크를 사용하였을 때의 최대 시스템 용량을 구할 수 있으며, 본 논문의 모의 실험의 경우 최대 시스템 용량은 9가 된다. 그림 8에서 상향 링크의 경우, 다중 링크의 수에 따라 용량은 증가하고 4 개의 다중 링크의 구성으로 이론적 최대 용량에 근접한다. 그러나 하향 링크의 경우, 앞의 3 장에서 논의된 바와 같이 다중 링크 수의 증가에 따라 시스템 용량은 오히려 감소한다. 또한 하향 링크에서 다중 링크를 구성하는 각 포트들의 전송 손실대 간섭비에 비례하여 전송 전력을 배분한 경우(그림에서 GIR-prop)의 용량은 각 포트에 대해 동일한 비율로 배분한 경우(그림에서 Eq-portion)에 비해 높은 값을 갖는다.

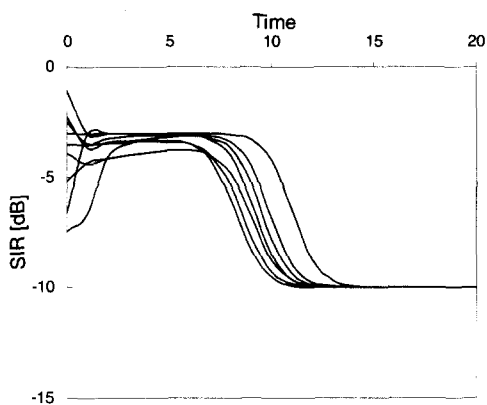


그림 3. 단일 상향 링크에 대한 수신 신호대 간섭비.

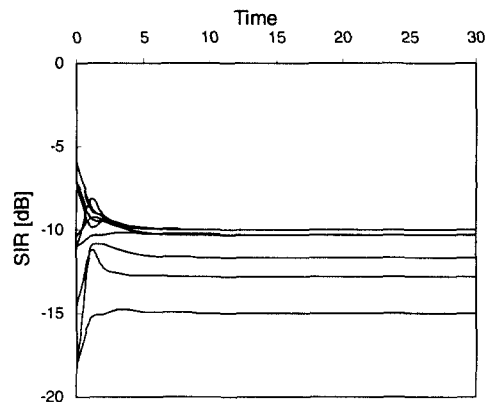


그림 6. 4 개의 다중 하향 링크에 대한 수신 신호대 간섭비 (방법 2에 의한 전력 배분)

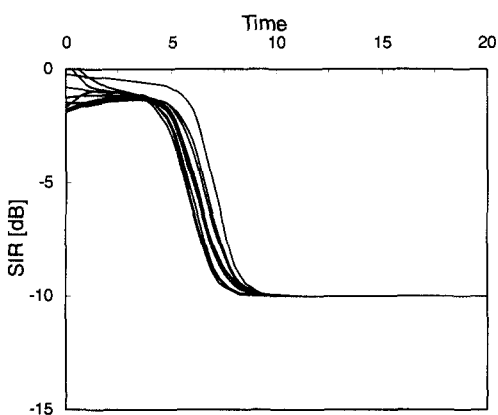


그림 4. 4 개의 상향 링크에 대한 수신 신호대 간섭비.

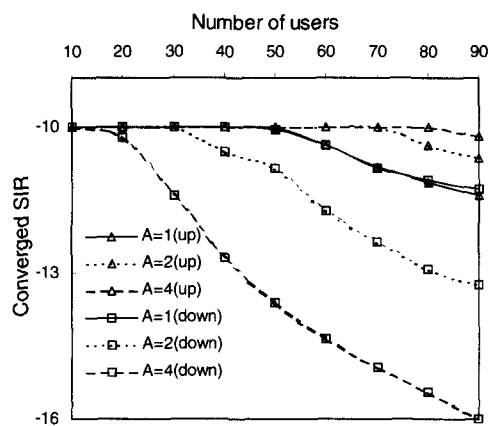


그림 7. 동시 사용자 수에 따른 신호대 간섭비의 수렴값.

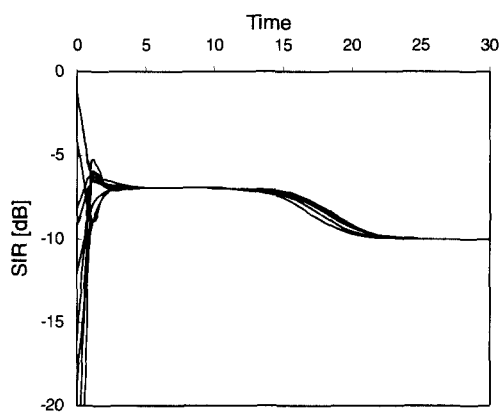


그림 5. 4 개의 다중 하향 링크에 대한 수신 신호대 간섭비 (방법 1에 의한 전력 배분).

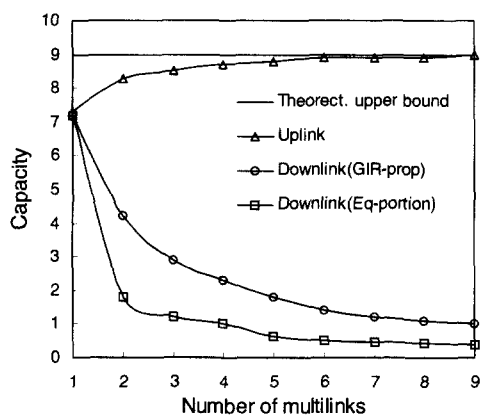


그림 8. 시스템 용량.

VI. 결론

본 논문에서 무선 ATM 시스템에서의 잦은 핸드 오프 시에 발생하는 문제점의 개선을 위해 다중 링크의 구성과 시플케스팅 방식을 도입한 CDMA 시스템을 제시하고, 다중 링크를 위한 전력 제어 알고리즘을 제시하였다. 상향 링크에서 다중 링크를 구성함으로써 시스템 용량 증대를 얻을 수 있으나, 하향 링크의 경우에는 용량은 오히려 저하된다. 하향 링크에서 다중 링크의 구성으로 인한 용량 감소와 빠른 핸드오프와 포트-교환기간 제어신호교환의 감소의 측면에서 이점을 동시에 고려해야 하며, 이에 대한 비교 실험 결과는 앞으로 이루어져야 할 과제가 된다.

하향 링크에서 각 사용자마다 서로 다른 수의 다중 링크를 구성하게 함으로써 다중 링크에 의한 간섭 증대를 감소시킬 수 있다. 어떤 사용자 단말이 하나의 특정 포트와 근접하고, 다른 포트와는 상대적으로 먼 거리에 있을 경우, 다중 링크 구성으로 핸드오프와 합성 수신에서 의한 이점을 기대할 수 없고, 따라서 이 경우 근접 포트와 단일 링크만을 구성하게 한다. 이와 달리 사용자 단말이 여러 개의 포트와 비슷한 거리에 있을 경우, 핸드오프의 가능성이 높으며 합성 수신에 의한 이점을 충분히 얻을 수 있으므로, 이 경우 다중 링크를 구성하게 한다. 또한, 포트에서 섹터화된 안테나를 사용함으로써 하향 링크 간섭을 감소시킬 수 있다. 이에 대한 실험은 앞으로 수행되어야 할 과제가 된다.

본 고에서 제시된 전력 제어 알고리즘은 과거에 측정된 전송 손실 및 간섭이 현 프레임에서 거의 변화하지 않을 때, 특히 지속적인 트래픽을 가진 서비스에 대해 각 사용자들이 요구하는 특성 신호대 간섭비를 만족시킬 수 있다. 그러나 무선 ATM 시스템은 다양한 트래픽 형태를 가지고 있으며, 특히 시변적인 트래픽을 가진 서비스에 대한 적절한 서비스를 제공할 수 없다. 따라서 문헌 [13]에서는 트래픽 변화에 의한 간섭량 변화의 예측을 포함하는 알고리즘과 CDMA 시스템에서 전송 제어를 위한 매체 접속 방식을 제시하고 있다.

참고 문헌

- [1] Issue on Wireless ATM, *IEEE Personal Commun.*, Aug. 1996.
- [2] Issue on Introduction to Mobile and Wireless ATM, *IEEE Commun. Magazine*, Nov. 1997.
- [3] A. Chouly, Americo Brajal and Sabine Jourdan., "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems", *Proc. GLOBECOM'93*, pp. 1723-1728, 1993.
- [4] Norihiko Morinaga, Masao Nakagawa and Ryuji Kohno, "New Concepts and Technologies for Achieving Highly Reliable and High-Capacity Multimedia Wireless Communications Systems", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 34-40, Jan. 1997.
- [5] A. S. Acampora and M. Naghshineh, "An Architecture and Methodology for Mobile-Executed Handoff in Cellular ATM Networks", *IEEE Jour. on Select. Areas in Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 1365-1375, Oct. 1994.
- [6] Hui-Tang Lin and Herman D. Hughes "A Handoff Scheme for Wireless ATM Networks," *Proc. ICUPC96*, pp. 397-402, 1996.
- [7] B. A. Akyol and D. C. Cox, "Rerouting for Handoff in a Wireless ATM Network", *IEEE Personal Communications*, pp. 26-33, Oct. 1996.
- [8] Sirikiat Ariyavitakul, Tomas E. Darcie, Larry J. Greenstein, Mary R. Phillips and N. K. Shankaranarayannan, "Performance of Simulcast Wireless Techniques for Personal Communication Systems", *IEEE Jour. on Selected Areas in Commun.*, vol.14, no.4, pp. 632-643, May 1996.
- [9] Per-Erik Ostling, "Handover with Simulcasting", *IEEE VTC'92*, pp.823-826, 1992.
- [10] R. D. Yates, "A Framework for Uplink Power Control in Cellular Systems,"*IEEE Jour. on Selected Areas in Commun.*, vol. 13, no. 7, pp. 1341-1347, Sep. 1995.
- [11] Zhao Liu, "SIR-based Call Admission Control for DS-CDMA Cellular Systems", *IEEE Jour. on Selected Areas in Commun.*, vol. 12, no. 4, pp. 638-644, May 1994.
- [12] Stephen V. Hanly, "Capacity and Power

Control in Spread Spectrum Macrodiversity Radio Networks”, *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 247-257, Feb. 1996.

- [13] 임광재, 광경섭, “무선 ATM 서비스를 위한 CDMA 시스템: 접속 방식과 무선망 제어 알고리즘”. 통신학회논문지, 1999.

부 록

A. 이론 1의 증명

이론 1의 증명을 위해 먼저 반증을 이용하여 식 (7)이 충분조건이 됨을 보인다. 부등식 (6)에서 등호를 만족하는 전송 전력들에 대한 해집합이 존재하고, $\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma^*(i) \geq K$ 의 조건을 만족한다면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u(i, l, t) = \frac{\sum_{i \in B_u(l,t)} \sum_{j \in A_u(i,t)} G_u(i, j, l, t) P_u(i, l, t)}{\sum_{m \in B_u(l,t)} G_u(m, j, l, t) P_u(m, l, t) + n_u(j)} \geq K. \quad (A.1)$$

위의 식에서 전송 집합 $B_u(l, t)$ 에 속한 모든 전송 i 에 대한 활성 포트 집합 $A_u(i, t) = \{1, 2, \dots, K-1, K\}$ 이다. 그러나, 모든 포트에서 배경 잡음 전력이 같다고 가정하면, 즉 $n_u = n_u(j) \forall j$ 이면

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \frac{G_u(i, j, l, t) P_u(i, l, t)}{\sum_{m \in B_u(l,t)} G_u(m, j, l, t) P_u(m, l, t) + n_u} < 1 \quad (A.2)$$

이고, 이를 $A_u(i, t)$ 에 대해 합을 취하면 식 (A.1)을 위배된다. 따라서 $\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma^*(i) \geq K$ 이면, 식 (6)을 만족하는 전송 전력에 대한 해집합은 존재하지 않는다.

다음으로 식 (7)이 부등식 (6)을 만족하는 해집합이 존재하기 위한 필요조건이 됨을 보인다. 포트 j 를 거쳐 수신되는 총 수신 전력을 배경 잡음 전력으로 정규화하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$Z_u(j, l, t) = \sum_{m \in B_u(l,t)} G_u(m, j, l, t) P_u(m, l, t) / n_u(j) + 1 \quad (A.3)$$

또한, 포트 j 를 거쳐 수신되는 모든 전송에 대해 수

신 신호대 간섭비의 합은

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u(i, l, t) = \sum_{i \in B_u(l,t)} \frac{G_u(i, j, l, t) P_u(i, l, t) / n_u(j)}{\sum_{m \in B_u(l,t)} G_u(m, j, l, t) P_u(m, l, t) / n_u(j) + 1} \quad (A.4)$$

로 나타낼 수 있다. 마찬가지로 모든 포트에서의 배경 잡음 전력이 같다고 가정하면, 위의 두 식 (A.3)과 (A.4)로부터

$$Z_u(j, l, t) = \frac{1}{1 - X_u(j, l, t)} \quad (A.5)$$

를 얻을 수 있고,

여기서 $X_u(j, l, t) = \sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u(i, j, l, t)$ 로 정의된다. 총 수신 전력 $Z_u(j, l, t)$ 는 음의 값을 가질 수 없으며, 이를 위해서는

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u(i, j, l, t) \leq 1 \quad (A.6)$$

를 만족해야 한다. 위의 부등식의 양변을 전송 i 의 활성 포트 집합 $A_u(i, t)$ 에 대해 합을 취하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \sum_{j \in A_u(i,t)} \gamma_u(i, j, l, t) \leq \sum_{j \in A_u(i,t)} 1 \quad (A.7)$$

모든 전송에 대해 $\gamma_u(i, l, t) \geq \gamma_u^*(i)$ 를 만족하는 전송 전력에 대한 해집합이 존재한다면, 위의 부등식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u^*(i) \leq \sum_{i \in B_u(l,t)} \sum_{j \in A_u(i,t)} \gamma_u(i, j, l, t) \leq \sum_{j \in A_u(i,t)} 1 \quad (A.8)$$

여기서 모든 전송에 대해 다중 링크를 구성하는 활성 포트 집합의 크기가 상수 $C (\leq K)$ 로 같다면 위의 부등식 (A.8)은 결국,

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u^*(i) \leq C \quad (A.9)$$

이 된다. 특히, 모든 전송에 대한 활성 포트 집합이 모든 포트들의 집합이 된다면,

$$\sum_{i \in B_u(l,t)} \gamma_u^*(i) \leq K \quad (A.10)$$

이다.

B. 이론 2의 증명

문헌 [10]에서 반복적 전력 제어 알고리즘은 사용자 전송 전력들에 대한 벡터 $\vec{P} = (P_1, P_2, \dots, P_M)$ 의 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{P}(t) = \vec{T}(\vec{P}(t-1)), \tag{A.11}$$

여기서 $\vec{T}(\vec{P}(t)) = (\Gamma_1(\vec{P}), \dots, \Gamma_M(\vec{P}))$ 로 정의되고, $\Gamma_i(\vec{P})$ 는 사용자 i 가 극복해야할 간섭이 된다. 문헌 [10]은 위와 같은 알고리즘에서 간섭 함수 $\vec{T}(\vec{P}(t))$ 가 다음의 세 가지 특성을 만족한다면, 전송 전력에 대한 특정 유일 해로 수렴한다는 것을 보였다.

Positivity: $\vec{T}(\vec{P}) > 0$.

Monotonicity: $\vec{P} \geq \vec{P}'$ 이면 $\vec{T}(\vec{P}) \geq \vec{T}(\vec{P}')$.

Scalability: 어떠한 $a > 0$ 에 대하여, $a\vec{T}(\vec{P}) \geq \vec{T}(a\vec{P})$.

위의 표현에서 $\vec{P} \geq \vec{P}'$ 는 벡터 내의 모든 원소에 대해 각각 $P_1 \geq P_1', P_2 \geq P_2', \dots, P_M \geq P_M'$ 을 만족함을 의미한다.

알고리즘 1과 2의 수렴성을 보이기 위해 다음과 같이 간섭 함수를 정의한다. 알고리즘 1에 대하여

$$\Gamma_u(i, l, t) = \gamma_u^*(i) \left[\sum_{j \in A_d(i, l, t)} \frac{G_u(i, j, l, t-1)}{\sum_{m \in B_d(i, l, t)} G(m, j, l, t-1) P_u(m, l, t-1) + n_u(j)} \right]^{-1}, \tag{A.12}$$

알고리즘 2에 대하여

$$\Gamma_d(j, i, l, t) = \gamma_d^*(i) \omega(j, i, l, t) \frac{\sum_{m \in B_d(i, l, t)} \sum_{k \in A_d(m, l, t)} G_d(k, i, l, t-1) P_d(k, m, l, t-1) + n_d(i)}{G_d(j, i, l, t-1)} \tag{A.13}$$

로 정의한다. 위의 식 (A.12)이 앞의 세가지 특성을 만족함을 쉽게 알 수 있으며, 식 (A.13)에서 전력 할당비 $\omega(j, i, l, t)$ 가 전송 전력에 독립이면 이 또한 앞의 세가지 특성을 만족한다. 따라서 알고리즘 1과 2는 특정 유일 해에 수렴한다.

임 광 재(Kwang Jae Lim)

정회원



1992년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사
 1994년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사
 1999년 2월 : 인하대학교 전자공학과 박사
 1999년 3월~현재 : 한국전자통신연구원(ETRI) 위성통신시스템연구부 선임연구원

<주관심 분야> 이동 및 위성 통신 시스템, 다중 접속 방식

곽 경 섭(Kyung Sup Kwak)

정회원



1977년 2월 : 인하대학교 전기공학과 학사 졸업
 1979년 2월 : 인하대학교 전기공학과 석사 졸업
 1981년 12월 : 미 Univ. of So. Calif. 전자공학 석사 졸업
 1988년 2월 : 미 Univ. of Calif. 통신 이론 및 시스템 박사 졸업

1988년 2월~1989년 2월 : 미 Hughes Network Systems 연구원

1989년 3월~1990년 3월 : 미 IBM Network Analysis Center 연구원

1990년 3월~현재 : 인하대학교 전자공학과 부교수

1999년 1월~현재 : 본학회 총무이사

<주관심 분야> 위성 및 이동 통신, 멀티미디어 통신