

CDMA 데이터 서비스망의 전력 및 확산 이득 차별제어

정 광 섭, 박 은 영, 강 병 호, 신 한 섭, 홍 순 목
 경북대학교 전자공학과
 E-mail : smhong@ee.knu.ac.kr

Differentiated Control of Power and Spreading Gain in CDMA Data Service Networks

Kwang-Seop Jung, Eun-Young Park, Byung-Ho Kang, Han-Seop Shin, Sun-Mog Hong
 Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University
 E-mail : smhong@ee.knu.ac.kr

Abstract

In this paper, we consider an algorithm for effectively providing data services for mobile users with different levels of priorities in a DS-CDMA system. The priority level of a user is specified by a factor that is a weighting on the instantaneous data throughput of the user. We define the weighted instantaneous aggregate data throughput and use it to characterize the performance of the prioritized data service. Our prioritized data service is implemented so that the weighted instantaneous aggregate data throughput is maximized via efficient power and spreading gain allocation. We present efficient algorithms for computing the optimal power and spreading gain allocation.

I. 서론

이동 무선망을 통한 데이터 통신의 증가로 무선 데이터 통신에서 제한된 무선 자원의 효율적 사용이 중요한 문제로 대두되고 있다. 음성 통화와 비교해 볼 때, 데이터 통신은 대체로 시간 지연에 덜 민감하지만 오류에 더 민감하기 때문에 'Best-Effort' 서비스를 기본으로 한다. 효과적인 무선 자원 할당을 통해 높은 순시적 총 데이터 전송량을 얻기 위해서 데이터 통신에서의 시간 지연 허용을 활용한 연구가 되어왔다. 이런 연구 중 하나로 DS-CDMA 시스템에서 총 데이터 처리량을 최대화 하기 위해 전력 제어와 확산 이득 할

당이 시도된바 있다[1-4].

이 논문에서는 DS-CDMA에서 사용자들 사이에 상대적 우선 수준이 부여된 데이터 서비스를 효과적으로 제공하는 방법을 다룬다. 먼저, 상대적 우선 수준이 부여된 데이터 서비스를 나타내는 성능지수를 정의한다. 성능지수는 가중치가 부여된 총 데이터 처리량이며 가중치는 상대적 우선 수준이 부여된 서비스 등급을 의미한다. 상대적 우선 수준이 부여된 서비스는 효율적인 전력과 확산 이득 할당으로 성능지수를 최대화함으로써 수행된다. 그리고 성능지수를 최대화하는 최적해의 성질을 얻는다. 이 최적해의 성질을 이용하여 성능을 최대로 하는 최적 전력 및 확산 이득 할당을 효율적으로 얻는 알고리즘을 제안한다.

II. 차별제어를 위한 성능지수 및 최적해의 특성

2.1 시스템 모델 및 성능지수

M개의 무선 데이터 사용자와 단일 셀로 구성된 DS-CDMA 무선 이동 데이터망의 역방향 링크를 고려한다. 임의의 시점에서 i 번째 사용자와 기지국 사이에 무선 채널의 순간 이득을 $g_i(>0)$ 로 정의한다. 채널 이득 g_i 의 크기는 전파 손실(propagation loss)과 페이딩(fading)에 영향을 받는다. $i=1, 2, \dots, M$. i 번째 사용자는 최대값과 최소값으로 제한된 전송 전력 $0 \leq p_i \leq p_{\max}$

와 양의 실수 값으로 정해진 확산이득(spreading gain) $N_i \in \mathbf{R}_+$ 를 가진다.

DS-CDMA 무선 데이터망에서 순시적 총 데이터 전송량 $S^M: \mathbf{R}_+^M \times \mathbf{R}_+^M \rightarrow \mathbf{R}_+^M$ 은 다음과 같이 주어진다 [3-4].

$$S^M(\mathbf{p}, \mathbf{N}) = \sum_{i=1}^M \frac{\beta}{N_i} f_s(\Gamma_i) = \sum_{i=1}^M \frac{\beta}{N_i} f_s \left(\frac{N_i p_i g_i}{\alpha \sum_{j=1, j \neq i}^M p_j g_j + \eta} \right) \quad (1)$$

여기서, β 는 패킷 당 비트수에 대한 사용자들에 의해 결정되는 채널 부호율(channel code rate)이며, $f_s(\Gamma_i)$ 는 패킷 전송이 성공할 확률로서, 사용자의 E_b/I_0 를 변수로 가진 단조증가 함수이다. 위의 식(1)을 살펴보면, 시스템의 성능을 최대화하는 전송 전력과 확산이득을 결정하는 변수로 각 사용자의 채널 이득만을 고려하고 있다. 이는 서비스를 제공받는 사용자를 결정함에 있어 사용자가 처한 전송환경만을 고려하는 경우로 볼 수 있다. 그러나 제공되는 서비스의 품질에 대한 사용자의 요구가 다를 수 있으므로, 전송환경과 서비스 품질에 따라 사용자에게 상대적 서비스 수준의 제공을 생각해 볼 수 있다. 이 논문에서는 각 사용자가 요구하는 서비스 품질에 대응되는 사용자의 서비스 수준을 결정하고, 서비스 수준에 따라 사용자의 데이터 전송량에 다른 가중치를 부여하는 방법을 차별제어로 고려하였다. 이 차별제어는 기지국에서 사용자에게 부여된 서비스 등급과 전송 환경인 사용자의 채널상태를 함께 고려하여 서비스를 제공받을 사용자를 결정할 것이다. 차별제어를 위한 CDMA 무선 데이터망의 성능지수를 다음과 같이 정의하였다.

$$W^M(\mathbf{p}, \mathbf{N}) = \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i \beta}{N_i} f_s(\Gamma_i) = \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i \beta}{N_i} f_s \left(\frac{N_i p_i g_i}{\alpha \sum_{j=1, j \neq i}^M p_j g_j + \eta} \right) \quad (2)$$

여기서, ω_i 은 i 번째 사용자의 서비스 수준(level)을 나타내는 사용자의 가중치를 나타내며, L 개의 양의 실수 중 등급에 따라 하나의 값을 가진다. 위의 성능지수는 각 사용자에게는 서비스 수준을 나타내는 가중치 ω 의 크기에 비례하는 상대적인 데이터 처리량을 의미한다. 사용자 인덱스는 채널 이득(g)과 서비스 등급(w)의 곱의 크기가 감소하는 순서로 부여하기로 한다. ($w_i g_i > w_{i+1} g_{i+1}$) 이러한 성능지수를 최대화하는 사용자의 전송 전력과 확산이득 값을 구하는 최적화 문제는 다음과 같이 주어진다.

$$(P1) \quad \max_{(\mathbf{p}, \mathbf{N}) \in \mathcal{F}} W^M(\mathbf{p}, \mathbf{N})$$

여기서, 최적해가 존재하는 영역 \mathcal{F} 는 다음과 같다.

$$\mathcal{F} = \{(\mathbf{p}, \mathbf{N}) : 0 \leq p_i \leq p_{\max} \text{ and } N_i \in \mathbf{R}_+, i = 1, 2, \dots, M\}$$

2.2 최적 확산이득 할당

식 (2)의 성능지수는 확산이득 N 에 대하여 분리 가능하므로 최적화문제 (P1)을 해결하기 위하여 각 사용자의 채널이득과 전송전력으로 결정되는 최적의 확산이득을 먼저 구한다. 그 때 최적 확산이득 할당 후에 p 에 대한 성능지수를 최대화한다.

사용자의 확산이득은 확산 후의 신호의 대역폭(채널 대역폭 또는 칩 비율(chip rate))에 대한 확산 전의 신호의 대역폭의 비이다. 또는 비트 지속시간에 대한 칩 지속시간의 비로도 볼 수 있다. i 번째 사용자의 최적 확산이득 N_i^* 는 참고논문[3]의 결과를 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$N_i^* = \frac{\gamma^*(\eta + \alpha \sum_{j=1, j \neq i}^M p_j g_j)}{p_i g_i}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

여기서, $\gamma^* = \arg \max_{\gamma \geq 1} \left\{ \frac{1}{\gamma} f_s(\gamma) \right\}$ 이다. $\gamma \geq 1$ 경우에 대하여 $f_s(\gamma)/\gamma$ 는 일반적으로 의사-컨케이브(Quasi-concave)형태이다. 식 (3)에서 최적 확산이득 N^* 는 사용자의 SINR에 반비례함을 볼 수 있다. 전송률은 확산이득과 반비례하므로 확산이득과는 반대로 사용자의 SINR이 증가함에 따라 함께 증가한다.

2.3 최적 전력 할당

위의 식 (2)과 식 (3)의 최적 확산이득 제안 하에서 차별제어를 위한 데이터망의 성능지수는 다음과 같다.

$$W^M(\mathbf{p}, \mathbf{N}^*) = \frac{\beta}{\gamma^*} f_s(\gamma^*) \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i p_i g_i}{\alpha \sum_{j=1, j \neq i}^M p_j g_j + \eta} \quad (4)$$

식 (4)에서 최적화 문제 (P1)이 사용자의 최적 전송 전력만을 결정하는 문제로 간략화 됨을 알 수 있다. 위의 성능지수를 최대화하는 것은 데이터 사용자의 서비스등급을 나타내는 가중치와 SINR의 곱의 합을 최대화하는 것과 같다. 최적 확산이득의 결정 후의 최적화 문제 (P1)은 다음의 (P2)가 된다.

$$(P2) \quad \max_{\mathbf{p} \in \mathcal{L}} W^M(\mathbf{p}, \mathbf{N}^*)$$

최적해가 존재하는 영역 \mathcal{L} 은 다음과 같다.

$$\mathcal{L} = \{ \mathbf{p} : 0 \leq p_i \leq p_{\max}, i = 1, 2, \dots, M \}$$

위의 식 (4)는 각 사용자의 전송전력 p_i 에 대해서는 컨벡스(convex)이지만, 전체 사용자에 대한 전송전력 벡터 \mathbf{p} 에 대해서는 컨벡스하지 않다. 그러므로 식 (4)를 각 사용자에 대해 부분미분을 통하여 구한 해가 최적해를 보장할 수 없다. 그러나 다음의 정리1을 통하여 최적해가 존재 할 수 있는 영역 \mathcal{L} 을 영역 안의 두 정점인 유한한 집합으로 줄일 수 있으며, 아울러 최적화 문제 (P2)의 최적해인 전송 전력을 전력 제의 문제에서 전력 할당 문제로 간단하게 얻을 수 있다. 또한 정리2의 필요조건을 통하여 전력 할당 문제에 대한 계산량을 줄일 수 있다. 다음 두 정리에 대한 증명은 생략한다.

정리 1. 만약 전송 전력 벡터 $\mathbf{p}^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_M^*)$ 가 최적화 문제 (P2)를 만족 시킨다면, 모든 사용자의 전송 전력 $p_i^* (1, 2, \dots, M)$ 는 0 또는 p_{\max} 값을 가진다.

정리 2. 만약 전송 전력 벡터 $\mathbf{p}^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_M^*)$ 가 최적화 문제 (P2)를 만족 시킨다면 $p_i^* = p_{\max}$ 이면 $w_i g_i > w_j g_j, w_i \geq w_j$ 를 만족하는 모든 i 에 관해서 $p_i^* = p_{\max}$ 이다.

III. 최적 및 준최적 알고리즘

먼저 최적해를 얻는 알고리즘을 제안한다. 최적 알고리즘은 정리2의 필요 조건을 만족하는 모든 해의 성능지수를 효율적으로 계산해서 성능지수 값을 최대로 하는 해를 얻는다. 모든 알고리즘은 모든 사용자가 전력이 할당되지 않은 상태로 시작한다. I_{pw} 와 I_{pw}^c 를 각각 전력이 할당된 사용자의 인덱스 집합과 전력이 할당되지 않은 사용자의 인덱스 집합을 나타낸다. 여기서 제안하는 최적 알고리즘은 다음과 같다. **최적 알고리즘(OPT):** I_{pw}^c 중 가장 작은 값을 i_{\min} 라고 한다. 사용자 인덱스가 i_{\min} 인 사용자에게 p_{\max} 를 할당한다. I_{pw} 의 사용자중 인덱스가 i_{\min} 보다 작고 서비스 수준이 낮은 사용자가 있다면 그 사용자들에게 0을 할당한다. 이 할당에 대해 성능지수를 계산한다. M 명의 사용자가 모두 p_{\max} 를 부여받을 때까지 이 과정을 반복 수행해서 가장 큰 성능지수를 이루는 해를 최적해로 한다.

다음은 최적 알고리즘보다 간단하고 수행시간이 짧은 준최적 알고리즘 제안한다. 여기서 준최적 알고리

즘은 두 가지를 제안한다. **준최적 알고리즘(SUB1):** I_{pw}^c 중에서 각 서비스 수준별로 인덱스가 가장 작은 사용자에게 각각 p_{\max} 를 할당하고 성능지수를 계산한다. 그중 가장 크게 증가된 성능지수를 가진 사용자를 찾아 I_{pw} 에 포함시킨다. 성능지수가 감소할 때까지 이 과정을 반복 수행한다. 최종적으로 I_{pw} 에 포함된 사용자를 준최적해로 한다. **준최적 알고리즘(SUB2):** I_{pw}^c 중에서 사용자 인덱스가 가장 작은 사용자에게 p_{\max} 를 할당하고 성능지수를 계산한다. 성능지수가 감소할 때까지 이 과정을 반복 수행한다. 최종적으로 I_{pw} 에 포함된 사용자를 준최적해로 한다.

IV. 수치 실험

앞에서 제안한 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서 수치실험을 수행했다. 수치실험에 필요한 공통된 파라미터와 그 값은 표 1과 같다.

표 1. 수치실험에 사용되는 파라미터

파라미터	파라미터 값
슬롯의 길이	0.625ms
발송 주파수	1.8GHz
셀의 수	9
기지국 사이의 거리	2000m
기지국 안테나의 높이	20m
이동국 안테나의 높이	1.5m
거리 손실 지수	4.0
α	1.0
배경 잡음 전력 및 셀간 간섭	-67dBm
이동국의 최대 전송 전력	100mW

같은 크기를 갖는 8개의 주변 셀과 한개의 중심 셀로 구성되는 환경을 고려한다. 사용자의 위치는 기지국 주변에 유니폼 분포를 갖는다고 가정한다. 사용자의 순간 채널 이득은 참고문헌[5]의 음영 페이딩(fading)을 갖는 거리 손실 모델을 이용한다. 변조 방법으로는 BPSK 방법을 사용하였다. 송신측 사용자는 채널 부호로 (255, 123) 블록 채널 부호를 이용하였고, 신호를 수신하는 기지국에서는 패킷 당 10개의 오류까지 검출 및 정정할 수 있는 제한거리 복호 방법을 사용하였다. 이를 통해 최적 확산 이득을 결정하는 상수 γ^* 는 1.8777 값을, 패킷 전송 성공 확률 $f_s(\gamma^*)$ 는 0.923 값을 얻었다. 사용자의 한 패킷 길이는 확산 이득이 1일 때 한 슬롯 시간(0.625msec) 동안 보내는 데이터 양이다.

3장에서 제안한 최적 알고리즘과 준최적 알고리즘의

표 2. M=6인 경우 성능지수 및 수행시간의 평균값

	OPT	SUB1	SUB2
데이터 처리량 (packets/slot)	2.269	2.273	2.272
성능지수	1.519	1.518	1.518
수행시간	6.31 μ s	1.31 μ s	0.16 μ s

표 3. M=12인 경우 성능지수 및 수행시간의 평균값

	OPT	SUB1	SUB2
데이터 처리량 (packets/slot)	3.873	3.876	3.875
성능지수	2.626	2.625	2.625
수행시간	35.10 μ s	1.48 μ s	0.16 μ s

성능을 평가하기 위해 $L=3$ 이고 중심셀의 사용자 수가 $M=6$, $M=12$ 경우에 대해서 실험했다. 각 사용자의 수준을 나타내는 가중치 값은 각각 1, 0.5, 0.25로 정했다. 계산은 펜티엄III-933MHz 컴퓨터에서 C-언어로 수행되었다. 성능비교를 위해 각 알고리즘으로 얻어진 해에 대한 성능지수 값과 순간 데이터 처리량 그리고, 해를 얻기 위한 수행시간의 평균을 구했다. 여기서 각 사용자의 패킷길이는 매 슬롯에서 무한이라고 가정했다. 이러한 결과는 2000번 반복수행으로 얻어진 평균값이며 표2와 표3에 각각 $M=6$, $M=12$ 인 경우를 나타냈다. 표2에서 결과를 보면 SUB2의 계산시간은 다른 알고리즘에 비해서 훨씬 짧고 또한 준최적해로 얻어진 성능지수 값이 최적 성능지수 값과 비교해서 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 서비스 수준이 높은 사용자를 우선 무조건 선택하는 알고리즘(STR)과 순시적 총 데이터 전송량을 최대화하는 알고리즘(MAX)도 구현하고 실험하였다. 이 두 알고리즘 STR과 MAX는 SUB2와 성능지수의 비에서 각각 0.88과 0.93의 값을 보였다. 그리고 STR과 SUB2는 MAX에 대한 데이터 처리량의 비가 각각 0.70과 0.93로 나왔다. 이 결과는 SUB2가 STR과의 비교에서 성능지수와 채널 효율에서 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 따라서 SUB2는 채널 효율과 서비스 수준에 따른 사용자의 우선 선택의 두 가지 입장에서 균형(trade-off)을 취하는 것으로 볼 수 있다. 이 상대적 우선 서비스는 데이터 서비스 요구가 순간적으로 크게 나타나는 상황에서 고급 서비스 수준을 유지하는데 유용할 것으로 기대된다.

V. 결론

이 논문에서는 DS-CDMA에서 사용자들 사이에 상

대적 우선 수준이 부여된 데이터 서비스를 효과적으로 제공하는 방법을 다루었다. 먼저, 상대적 우선 수준이 부여된 데이터 서비스를 나타내는 성능지수를 정의했다. 상대적 우선 수준이 부여된 서비스는 효율적인 전력과 확산 이득 할당으로 성능지수를 최대화함으로 수행되었다. 그리고 성능지수를 최대화하는 최적해의 성질을 제시하고, 이 최적해의 성질을 이용하여 성능을 최대로 하는 최적 전력 및 확산 이득 할당을 효율적으로 얻는 알고리즘을 제시하였다.

* 이 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] A. Sampath, P. S. Kumar, and J. M. Holtzman, "Power control and resource management for a multimedia CDMA wireless system," *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, vol. 1, pp. 21-25 Toronto, 1995.
- [2] C. I. and K. K. Sabnani, "Variable spreading gain CDMA with adaptive control for true packet switching wireless network," *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 725-730, Seattle, June, 1995.
- [3] S.-J. Oh and K. M. Wasserman, "Optimality of greedy power control in DS-CDMA mobile networks," in *Proc. ACM/IEEE 5th Annual Internat. Conf. Mobile Comput. and Network. (MobiCom'99)*, Seattle, WA, 1999.
- [4] S.-J. Oh and K. M. Wasserman, "Dynamic spreading gain control in multi-service CDMA networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 918-927, 1999.
- [5] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1997.