

보조 파일럿 채널을 이용한 스마트 안테나 시스템의
순방향 빔형성 성능분석
Performance Analysis of Downlink Beamforming of Smart
Antenna System using Auxiliary Pilot Channel

이 원 철 (정보통신과)

Weon-Cheol Lee (Dept. of Information and Communications)

Key Words : smart antenna, beamforming, weight vector

ABSTRACT: This paper presents an application method of auxiliary pilot channel and receiving performance of downlink beamforming smart antenna system at mobile terminal in CDMA mobile communication system. Downlink beamforming maximizes the gain by transmitting the signal to the direction of desired user and minimizes the interference by nulling the direction of undesired users. The auxiliary pilot is used to provide an exact channel estimation to each mobile terminal in downlink beamforming. In this paper, we analyze the performance of fundamental channel and supplemental channel in downlink beamforming smart antenna system and compare the performance of downlink beamforming of smart antenna system using the auxiliary pilot channel to that of one antenna system under CDMA2000 1X signal environment.

1. 서론

순방향 빔형성(downlink beamforming)은 가입자 단말기 방향으로 단말기가 필요로 하는 FER(Frame Error Rate) 조건을 충족하는데 필요한 전력만을 집중시킴으로써 기지국 전체 송신 전력을 크게 감소시킬 수 있으며, 순방향 전력을 공간적으로 제어하여 CDMA 시스템 성능을 크게 개선할 수 있다. 또한, 각각의 사용자에게 미리 그 사용자의 방향으로 최대의 이득을 갖는 웨이트 벡터를 곱하여 신호를 송신하기 때문에 CDMA와 같이 여러 사용자 신호를 한꺼번에 송신하는 경우에 다중접속에 기인하는 간섭을 제거할 수 있다^(1,2).

순방향 트래픽 신호는 좁은 빔을 사용하여 전송하고 파일럿 신호는 한 섹터를 커버하는 넓은 빔을 사용하여 전송하면, 두 신호는 동일 채널로 간주되지 않으며 넓은 빔으로 전송된 파일럿 신호는 좁은 빔으로 전송된 신호보다 보다 더 많은 산란을 겪게 된다. 이러한 요인이 좁은 빔을 사용하여 전송되는 신호의 위상과 섹터 넓이의 파일

릿 채널의 위상 관계를 변화시킨다. 이러한 문제 해결을 위해 섹터내의 각 가입자에게 보조 파일럿 채널을 할당해야한다. 보조 파일럿 채널은 트래픽 채널과 동일한 채널을 통과하므로 동기복조 특성이 저하되지 않으며, 이동국은 자신의 레이크(Rake) 수신기와 관련된 보조 파일럿 채널을 검색(search)할 수 있다.

트래픽 채널은 일정한 길이의 왈쉬 부호를 사용하는 기본 채널과 고속 데이터 전송용 채널인 보조 채널로 구성되며 보조 채널은 최근 데이터 통신의 수요가 증가하고 보다 빠른 통신 속도를 필요로 하기 때문에 그 중요성이 날로 커지고 있다. 이러한 보조 채널은 전송 속도에 따라 길이가 다른 왈쉬 부호를 사용하며 기본 채널에 비해 왈쉬 길이가 짧아 확산율(spreading factor)이 작아지게 되고 이로 인한 성능 저하는 일반적으로 송신 전력을 증가시켜 보완한다. 본 논문에서는 각각의 사용자에게 보조 파일럿 채널을 할당하여 빔형성하는 스마트 안테나 시스템에서 기본 채널과 보조 채널의 단말기 수신 성능을 단일 안테나 기지국 시스템과 비교, 분석하였다.

2. 시스템 모델

그림 1은 스마트 안테나 기지국의 순방향 빔형성 송신 구조를 나타내고 있다. 기지국은 N 개의 안테나 소자로 구성되며 J 명의 사용자 신호를 동시에 송신한다. 순방향 빔형성 스마트 안테나에서 전송신호를 송신 할 때는 각 단말기로의 전송신호에 확산 부호를 곱하여 전송신호를 확산시킨 후 웨이트 벡터와 곱하여 각 안테나 소자를 통해 송신되며 기지국 기저대역 송신신호는 다음과 같다.

$$\underline{s}(t) = \sum_{j=1}^J \sqrt{P_j} \underline{w}_j^H d_j(t) c_j(t) \quad (1)$$

여기서 P_j , $d_j(t)$, \underline{w}_j 는 j 번째 사용자 신호의 송신전력, 전송신호, 전송신호의 웨이트 벡터를 나타내며, $c_j(t)$ 는 전송신호의 왈쉬 부호를 나타낸다.

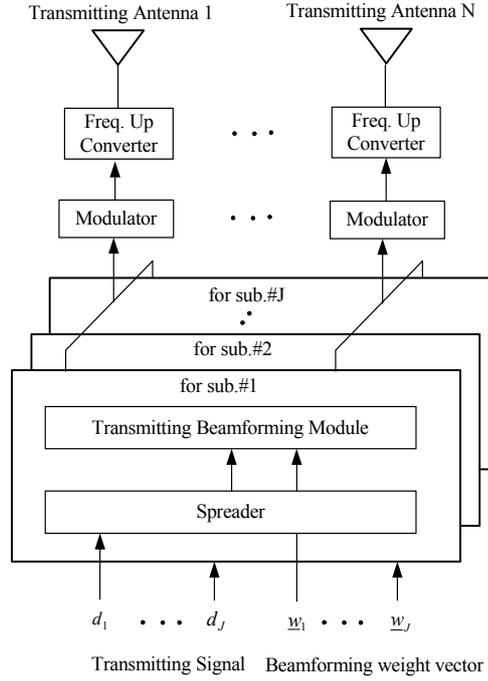


그림 1. Structure of smart antenna base station with downlink beamforming

또한 H 는 복소 공액 전치(complex conjugate transpose)를 나타낸다. 기지국에서 전송되는 신호가 j 번째 단말기에 수신된 기저대역 신호는 다음과 같다.

$$r_j(t) = \sum_{k=1}^K s(t - \tau_k) \cdot \underline{h}_k + n_j(t) \quad (2)$$

여기서 K 는 다중경로의 수, $n_j(t)$ 는 AWGN, \underline{h}_k 는 채널벡터를 나타낸다. FDD 시스템의 순방향/역방향 통신에서는 단지 신호의 입사각만 변하지 않기 때문에, 단말기와 기지국간의 채널벡터 \underline{h}_k 는 다음 과 같이 표현 된다⁽³⁾.

$$\underline{h}_k = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{q=1}^Q \alpha_{k,q} \underline{a}(\theta_k) \quad (3)$$

여기서 $\alpha_{k,q}$ 는 q 번째 산란체(scatter)의 페이딩 인자(fading factor)로 심볼 주기 동

안 일정한 값을 갖는 것으로 가정하며, $\underline{a}(\theta_k)$ 는 θ_k 방향으로의 방향 벡터(steering vector)를 나타낸다. 기지국 안테나가 선형 배열 안테나일 경우 식 (3)의 방향벡터는 다음과 같다⁽⁴⁾.

$$\underline{a}(\theta_k) = [1, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta_k}, \dots, e^{-j(N-1)\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta_k}]^T \quad (4)$$

여기서 d 는 안테나 소자들간의 거리, λ 는 캐리어 주파수의 파장, T 는 전치을 나타낸다. 최종적으로, 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 단말기 수신신호는 다음 식과 같다.

$$r_j(t) = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \alpha_{k,q}(t) s(t - \tau_k) \cdot \underline{a}(\theta_k) + n_j(t) \quad (5)$$

식 (5)에서 주어진 각 경로의 모든 산란체들의 전파지연은 동일하다고 가정하였다.

3. 보조 파일럿 채널을 이용한 빔형성

순방향에서의 다중경로는 섹터 넓이의 파일럿 채널과 빔형성된 트래픽 채널 사이의 위상관계를 왜곡시키기 때문에 별도의 파일럿 채널이 각각의 가입자에게 할당될 때에만 각 경로의 위상이 올바르게 보상될 수 있다. 즉, 스마트 안테나 기지국에서 공통 파일럿 채널과 빔형성된 트래픽 채널을 사용할 경우 단말기에 수신된 두 채널은 다중경로 환경에서 서로 다른 위상 특성을 나타낼 수 있다. 예를 들어, 그림 2와 같이 τ_1, τ_2 의 지연 시간을 가지는 두개의 경로가 단말기에 한 칩(T_c) 이내의 시간으로 수신되는 경우 ($|\tau_1 - \tau_2| < T_c$)에는 단말기가 수신한 공통 파일럿 채널의 위상과 빔형성된 트래픽 채널의 위상이 서로 다르게 된다. 이는 단말기의 수신 신호 복조 과정에서 기준 위상의 오차를 야기하며 수신 신호의 오류를 증가시키는 요인이 된다. 순방향 스마트 안테나 시스템에서는 이를 해결하기 위해 각각의 트래픽 채널마다 보조 파일럿 채널을 할당하여 각 경로의 위상 특성을 제거해 줄 수 있다.

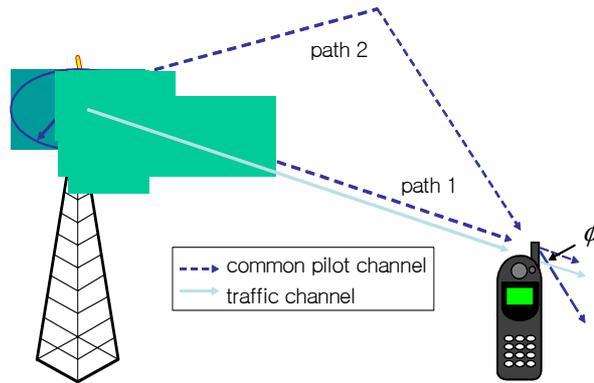


그림 2. Beamforming for using common pilot channel

스마트 안테나 시스템의 순방향 빔형성에서는 앞절에서 언급한 문제점을 해결하기 위해 각 트래픽 채널마다 보조 파일럿 채널을 사용하여 각 경로의 위상 특성을 제거해야 한다. 즉, 스마트 안테나 기지국에서는 트래픽 채널과 동일한 웨이트 벡터를 사용하여 보조 파일럿 채널을 빔형성한 후 각 사용자에게 송신한다. 각 단말기는 자기 자신에게 할당된 보조 파일럿 채널을 이용하여 채널의 위상 특성을 찾아냄으로써 위상 특성의 오류를 방지 할 수 있다. 그림 3은 트래픽 채널과 함께 파일럿 채널을 빔형성한 경우를 나타내고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 트래픽 채널과 함께 빔형성되는 파일럿 채널, 즉 보조 파일럿 채널을 사용함으로써 그림 2에서 발생하는 단말기에서 기준 위상의 오차 ϕ 를 제거 할 수 있다.

보조 파일럿 채널을 각 사용자별로 빔형성하기 위해서는 트래픽 채널과 같이 왓쉬 부호를 이용한 사용자별 채널 구분이 필요하다. 왓쉬 부호의 사용은 트래픽 채널에서 사용하는 왓쉬 부호와 동일한 부호의 사용을 고려 할 수 있다. 그러나 여분의 트래픽 채널을 보조 파일럿 채널에 할당하는 경우 다음과 같은 문제가 발생한다. 트래픽 채널의 왓쉬 부호 길이가 64인 상황에서 왓쉬 0번은 공통 파일럿 채널, 왓쉬 1~7번은 호출(paging) 채널, 왓쉬 32번은 동기(sync) 채널에 할당되어져 있다고 가정해 보자. 각 사용자마다 보조 파일럿 채널을 사용할 경우 최대 27명(보조 파일럿 채널 27, 트래픽 채널 27)만 수용 가능하며 호출 채널을 하나만 사용하더라도 최대 30명을 수용할 수 있을 뿐이다.

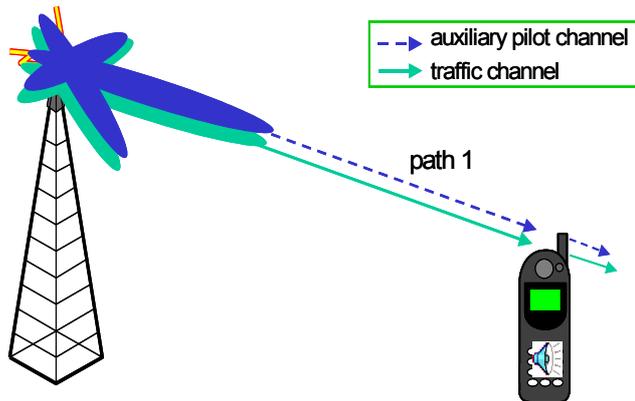


그림 3. Beamforming for using auxiliary pilot channel

따라서 스마트 안테나 시스템으로 통신 용량을 증대 시키더라도 더 이상은 할당할 채널이 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 길이 64인 왈쉬 부호를 보조 파일럿 채널에 사용하지 않고 128, 256, 512의 길이로 왈쉬 부호를 확장하여 보조 파일럿 채널 할당에 사용한다. 표 1은 보조 파일럿 채널에 사용된 왈쉬 부호의 길이와 이에 따른 기지국에서 사용 가능한 사용자 수를 나타낸다. 표 1에서는 CDMA2000 1X 시스템에서 파일럿, 동기, 호출 3개의 채널이 공통 채널로 사용된다고 가정하였고, T는 트래픽 채널을 A는 보조 파일럿 채널을 의미한다. 보조 파일럿 채널을 추가로 할당하여 기지국 순방향 빔형성에 사용할 때, 기지국의 사용자 용량은 RC(Radio Configuration) 3과 RC 4에서 각각 최대 54, 97명이 된다.

표 1. The number of users according to Walsh code length

extension	RC 3, 5 (Walsh length 64)	RC 4 (Walsh length 128)
128	40 (T41 + A40)	61 (T61 + A61)
256	48 (T49 + A48)	81 (T81 + A82)
512	54 (T54 + A56)	97 (T97 + A100)

4. 성능분석

본 논문의 모의실험은 3GPP2 CDMA2000 1X 신호 환경의 물리계층 표준 [6]에 맞추어 순방향 빔형성 성능을 분석하였다. 본 논문에서 이용한 모의실험 파라미터는

표 2와 같다. 성능분석을 위한 모의실험에서 사용된 채널은 단일 경로로 기본 채널과 보조 채널을 사용하였으며 선형 배열 안테나로 안테나 소자간의 간격은 반파장으로 가정하였다.

표 2. Simulation parameters

Item	Value
Uplink carrier frequency	1,776,250Hz
Downlink carrier frequency	1,866,250Hz
Mobile speed	100km/h
Number of scatter	20
Mobile distribution	uniform from -60° to 60°
Beamforming algorithm	Lagrange algorithm[7]
Auxiliary pilot channel	Walsh length 128
# of uplink antenna elements	6
# of downlink antenna elements	4

그림 4는 단일 안테나 기지국과 스마트 안테나 기지국으로부터 단말기가 수신한 기본 채널의 평균 부호화되지 않은 BER을 나타내고 있다. BER 10^{-2} 을 기준으로 비교해 할 때, 단일 안테나에 비해 순방향 빔형성 스마트 안테나로 2배의 용량 증가를 확인 할 수 있다.

그림 5는 기지국 송신신호가 한 칩 구간내에 두개의 경로로 수신될 때 ($|\tau_1 - \tau_2| < T_c$)의 단말기 기본 채널의 성능을 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 파일럿 채널만을 사용하는 스마트 안테나 기지국은 파일럿 채널과 트래픽 채널의 위상 차이를 극복하지 못하고 많은 오류를 야기함 볼 수 있다. 하지만, 트래픽 채널과 동일한 웨이트로 빔형성된 보조 파일럿 채널을 사용할 경우에는 보조 파일럿 채널과 트래픽 채널이 동일한 채널 위상정보를 갖고 수신되어 단말기 수신 성능이 향상됨을 알 수 있다.

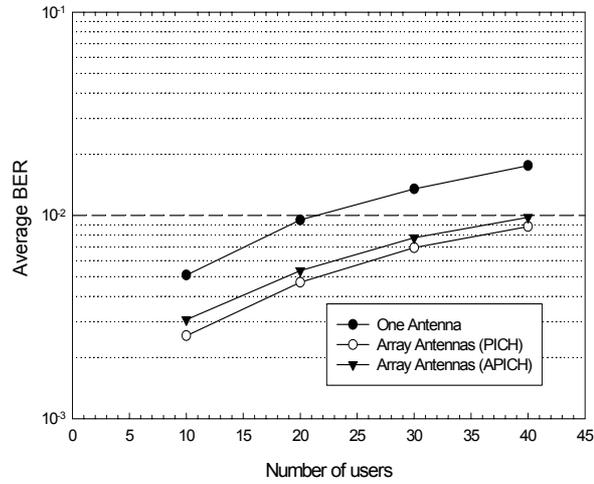


그림 4. Error probability of downlink beamforming

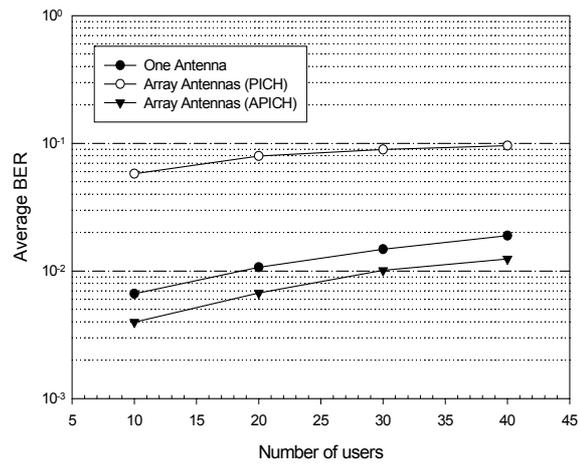
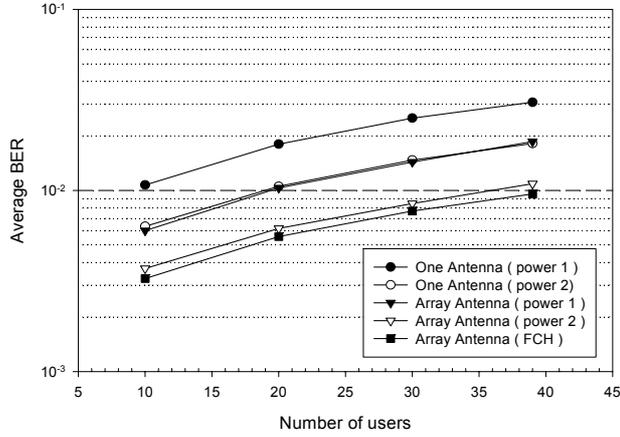


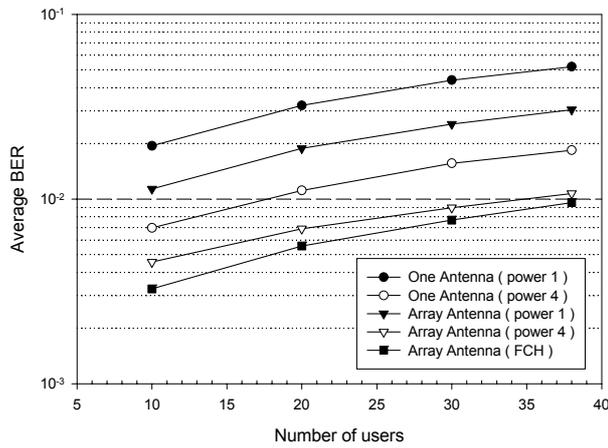
그림 5. Error probability of downlink beamforming ($|\tau_1 - \tau_2| < T_c$)

그림 6은 19.2, 38.4, 153.6kbps의 보조 채널 사용할 때 사용자 수에 따른 단말기 수신 성능을 각각 나타낸다. 19.2kbps의 보조 채널은 9.6kbps의 기본 채널과 비교하여 1/2 길이의 왈쉬 부호를 사용하므로 기지국 송신 전력을 2배 증가시킴으로써 기본 채널과 유사한 성능 결과를 얻을 수 있다. 38.4kbps의 경우는 기본 채널에 비해 1/4 길이의 왈쉬 부호를 사용하므로 송신 전력을 4배 증가시킴으로써 기본 채널의 성과 비슷한 결과를 얻을 수 있지만, 192kbps인 경우와 비교해 보면 기본 채널과의 성

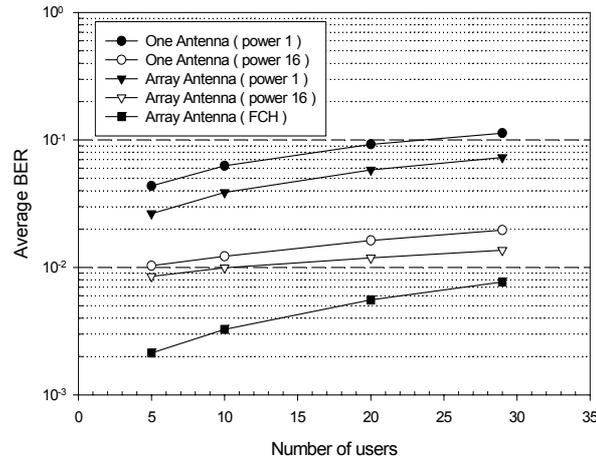
능 격차가 더 커졌음을 알 수 있다. 이러한 결과는 153.6kbps와 같이 고속 보조 채널인 경우에 더욱 심화됨을 알 수 있다.



(a) 19.2kbps



(b) 38.4kbps



c) 153.6kbps

그림 6. Downlink beamforming error probability of supplemental channel

표 3은 기본 채널과 보조 채널의 성능 비교로 단말기 수신 성능 BER 10^{-2} 기준으로 하여 단일 안테나 기지국과 스마트 안테나 기지국의 성능을 비교하였다. 표 3에서 알 수 있듯이 기본 채널과 보조 채널의 성능은 전체적으로 단일 안테나 기지국에 비해 약 2배 정도 우수함을 알 수 있다.

표 3. Capacity of fundamental and supplemental channel

채널 종류	단일안테나	배열안테나	용량 증가
9.6kbps FCH	20명	40명	2배
19.2kbps SCH	19명	36명	1.9배
38.4kbps SCH	17명	36명	2.1배
76.8kbps SCH	13명	27명	2배
153.6kbps SCH	5명	10명	2배

5. 결론

본 논문에서는 CDMA2000 1X 신호 환경에서 보조 파일럿 채널을 이용하는 순방향 빔형성 방법을 제안하고, 두개의 경로가 한 칩 이내로 수신되는 상황에서 공통 파일럿 채널을 사용 할 경우 기준 위상이 왜곡되어 올바른 채널 보상이 이루어지지 않음을 확인하였다.

또한, 고정된 데이터 전송 속도와 일정한 길이의 왈쉬 부호를 사용하는 기본 채널과 데이터 전송 속도에 따라 왈쉬 부호의 길이를 달리 사용하는 보조 채널의 순방향 빔형성 스마트 안테나 시스템의 성능을 단일 안테나 시스템과 비교 및 분석하여 평균적으로 단일 안테나 시스템에 비해 약 2배의 용량 증가를 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) J. Liberti and T. Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communications, Prentice Hall PTR. 1999.
- (2) J. Winters, "Smart antennas for wireless systems," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 5, pp. 23-27, Feb., 1998.
- (3) W. Lee, S. Choi, J. Choi and M. Suk, "An adaptive beamforming technique for smart antennas in WCDMA system," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 86-B, no. 9, pp. 2838-2843, Sept. 2003.
- (4) G. Xu and H. Liu, "An Effective Transmission Beamforming Scheme for Frequency Division Duplex Digital Wireless Communication Systems", in *Proc. ICASSP*, vol. 3, pp. 1729- 1732. May 1995.
- (5) G. Raieigh, S. Diggavi, V. Jones and A. Paulraj, "A Blind Transmit Antenna Algorithm for Wireless Communication," in *Proc. ICC*, U.S.A., pp. 1494-1499, June 1995.
- (6) 3GPP2, "Physical layer standards for cdma2000 spread spectrum systems", C.S0002-D, v1.0, 2003.
- (7) S. Choi and D. Shim, "A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 5, pp. 1795-1799, Sep., 2000.