WCDMA 시스템에서 셀 탐색의 단계별 직렬 처리 및 병렬 처리의 성능 비교

오 호 근, 송 문 규
원광대학교 전기 전자 및 정보 공학부
전화 : 063-850-6341

Comparision of Performance of stepwise serial processing and stepwise parallel processing for Cell Search in WCDMA System

Ho-Guen Oh, Moon-Kyou Song
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Wonkwang University

Abstract

We investigate the stepwise parallel processing of the serial search which can success the cell search at low E_c/I_0. The single path Rayleigh fading channel which is worst-case channel model is considered. The typical 3-step cell search is used. The probabilities of detection, miss and false alarm for each step are used in closed forms based on the statistics of CDMA noncoherent demodulator output. The optimal power allocation to each channel and The optimal number of post-detection integrations for each step is obtained. Also, the cumulative probability distribution of the average cell search time for serial search methods are compared.

I. 서론

WCDMA 이동국은 순방향 링크에서 서로 다른 512개의 스크램블링 코드를 사용하여 셀을 탐색한다. 512개의 스크램블링 코드를 탐색하기 때문에 초기 셀 탐색 시간이 많이 요구된다[2]. WCDMA 시스템에서 초기 셀 탐색 시간을 줄이기 위해 3단계 셀 탐색 알고리즘을 사용한다[1].

셀 탐색 과정에 대한 성능 해석은 최적의 셀 탐색 기법을 설계하고 개선된 수신기를 설계하기 위해 필요하다. 평균 획득 시간과 분산을 통해 셀 탐색 성능을 해석함으로써 시스템의 최적의 채널 전력 할당과 수신기의 사후 검파 적분의 최적의 파라미터를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 3GPP의 표준을 근거하여 셀 탐색의 성능을 해석하였다[2][3]. 직렬 탐색의 단계별 병렬 처리에 대한 최적의 파라미터를 얻고, 누적 확률 분포를 이용하여 단계별 직렬 처리와 단계별 병렬 처리의 성능을 비교하였다.

II. 셀 탐색 알고리즘

셀 탐색 과정은 일련의 확산 코드에 대한 획득과정으로 간주될 수 있으며, 직렬 탐색의 획득과정은 본질적으로 Markovian 이다. 동기 획득 성능을 결정하기 위해 통합된 방법의 흐름도 모델을 사용할 수 있다[5][8]. 그 흐름도를 이용한 그림 1과 2는 직렬 셀 탐색의 단계별 직렬 처리와 단계별 병렬 처리의 신호 흐름도 이다.

흐름도에서 L_i는 i번째 단계에서 사후 검파 수를 나타낸다. i=1,2,3. H_1는 사후 검파의 적분 구간에서 정확한 신호가 존재할 가설이다. H_0는 H_1와 반대되는 가설이다. 첫 번째 단계에서 H_1는 수신된 신호가 하나의 코드 칩 구간에서 정렬되는 가설이다. 나머지 단계에서 H_1는 전 단계가 성공적으로 수행한 가설이다. P_{D_i}, P_{M_i}, P_{F_i}는 i 번째 단계에서 각각 검파, 실패, 오경보 확률이다. $P_{D_i|H_j}$, $P_{M_i|H_j}$, $P_{F_i|H_j}$은 i번째 단계에서 H_j 가설에 대한 조건부 검파 확률, 실패 확률, 오경보 확률들을 나타낸다, j=0,1. K는 오경보에 따른 벌칙 시간을 나타낸다. M은 프레임 당 슬롯의 수이다.

그림 1과 2의 신호 흐름도의 전달함수 $U(z)$는 Mason의 이득 공식을 이용하여 구한다. 단 변수 z의 지수는 $T_{slot}/2$ 시간임을 주의한다. 셀 탐색의 평균시간 $\overline{T_{ACQ}}$은 $U(z^{T_{slot}})$의 도함수에 $z=1$을 대입함으로써 얻어진다. 즉

$$U(z^{T_{slot}}) = \frac{dU(z)}{dz}\Big|_{z=1} \quad (1)$$

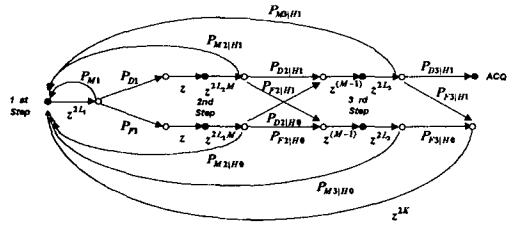

그림 1 단계별 직렬 처리 신호 흐름도

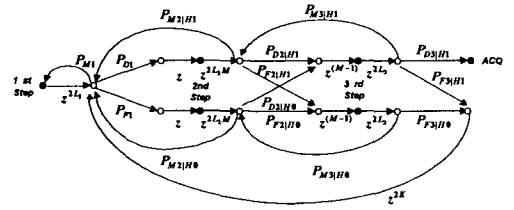

그림 2 단계별 병렬 처리 신호 흐름도

이다. 셀 탐색 시간의 분산은 $U(z)$의 첫 번째 2차 도함수로부터 유도된다[8].

$$\sigma^2_{ACQ}=\left[\frac{d^2U(z)}{dz^2}+\frac{dU(z)}{dz}\left(1-\frac{dU(z)}{dz}\right)\right]\Bigg|_{z=1} \quad (2)$$

n 단위시간 이전에 셀 탐색 획득이 이루어질 확률 $P_{ACQ}(n)$은 역 Z변환과 유사한 contour 적분으로 계산될 수 있다[8].

$$P_{ACQ}(n)=\frac{1}{2\pi j}\oint_{\Gamma}\frac{U(z)}{(1-z)z^{(n+1)}}dz \quad (3)$$

위 방정식의 시간 단위는 슬롯 시간 T_{slot}이다.

III. 검파 확률, 실패 확률, 오경보 확률

CDMA noncoherent 가설 시험 장치 출력 성분들의 통계량은 잘 알려져 있다[5]. 가설 H_0과 H_1 상태에서 L개 사후 검파 적분이후의 결정 변수는 레일리 페이딩에서 $2L$개 자유도를 가지는 카이 제곱 분포이고 결정 변수의 pdf는

$$f_\eta(\eta|H_0)=\frac{\eta^{L-1}e^{-\eta/V}}{(L-1)!\,V^L} \quad (4)$$

$$f_\eta(\eta|H_1)=\frac{\eta^{L-1}e^{-\eta/V_F}}{(L-1)!\,V_F^L} \quad (5)$$

여기서, $V=NI_0$ $V_F=N^2\overline{E_c}R^2(\tau)+V_iN$는 적분 시험 구간의 칩 수, I_0는 셀간 간섭, 배경잡음 그리고 다중 접속 간섭으로 인한 성분들의 합, $\overline{E_c}$는 평균 칩 에너지, τ는 타이밍 오차이다. $R(\tau)$는

$$R(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}|H(f)|^2\cos(2\pi f\tau)df \quad (6)$$

이다. $H(f)$는 파형 성형 필터의 전달 함수를 나타낸다.

3.1 슬롯 동기

슬롯 동기는 모든 셀에 공통적이 PSC에 정합된 정합 필터나 이와 유사한 장치로 이루어진다. PSC가 매 슬롯마다 한 번씩 반복되므로 일치 검출기를 사용하는 대신 L_1개 사후 검파 적분이 수행된다. 셀의 ML 슬롯 동기는 $q_1=ln_{slot}$개 출력 중 최고 값을 검출하여 임계값 θ_1과 비교함으로써 얻을 수 있다. l은 칩 당 샘플의수, $n_{slot}=2560$은 슬롯 당 칩 수를 나타낸다. 1단계에서 검파 확률은

$$P_{D_1}=\int_{\theta_1}^{\infty}\frac{z^{L_1-1}e^{-z/V_{F_1}}}{(L_1-1)!\,V_{F_1}^{L_1}}\left[1-e^{-\frac{z}{V_1}}\sum_{k=0}^{L_1-1}\frac{1}{k!}\left(\frac{z}{V_1}\right)^k\right]^{(q_1-1)}dz \quad (7)$$

이다.

$$\int_\theta^n z^n e^{-az}dz=e^{-a\theta}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{n!}{k!}\frac{\theta^k}{a^{n-k+1}},\quad a>0 \quad (8)$$

이항 전개, 다항 정리 그리고 식(8)를 사용하여 Closed form을 유도한다[6].

$$P_{D_1}=\sum_{r=0}^{q_1-1}\frac{(-1)^r}{(L_1-1)!\,V_{F_1}^{L_1}}\binom{q_1-1}{r}\cdot\sum_{k=0}^{r(L_1-1)}\frac{\beta_{kr}(k+L_1-1)!}{V_1^k}e^{-\left(\frac{r}{V_1}+\frac{1}{V_{F_1}}\right)\theta_1}\cdot\sum_{m=0}^{k+L_1-1}\frac{1}{m!}\frac{\theta_1^m}{\left(\frac{r}{V_1}+\frac{1}{V_{F_1}}\right)^{k+L_1-m}} \quad (9)$$

여기서 β_{kr}는 위 전개에서 계수들의 집합이다. 이 계수들을 계산하기 위해 반복 공식이 [6]에 의해 주어진다.

$$\beta_{kr}=\sum_{i=k-(L_1-1)}^{k}\beta_{i(r-1)}\frac{1}{(k-i)!}I_{[0,(r-1)(L_1-1)]}(i) \quad (10)$$

여기서 $\beta_{00}=\beta_{0r}=1$, $\beta_{k1}=1/k!$이고

$$I_{[a,b]}(i)=\begin{cases}1, & a\le i\le b\\ 0, & otherwise.\end{cases} \quad (11)$$

q_1개 시험 셀 중 임계값을 초과하는 것이 존재하지 않을 경우에 해당하는 실패 확률은

$$P_{M_1}=\left[1-e^{-\frac{\theta_1}{V_{F_1}}}\sum_{k=0}^{L_1-1}\frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_1}{V_{F_1}}\right)^k\right]\left[1-e^{-\frac{\theta_1}{V_1}}\sum_{k=0}^{L_1-1}\frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_1}{V_1}\right)^k\right]^{(q_1-1)} \quad (12)$$

그리고 오경보 확률은

$$P_{F_1}=1-P_{D_1}-P_{M_1} \quad (13)$$

특별한 사전 정보가 없을 경우 모든 q_1개 출력이 적중(hit)할 확률은 동일하다. 따라서 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로의 평균 전이 시간은 $0.5T_{slot}$이다.

3.2 프레임 동기 및 부호 그룹 식별

2단계에서 이동국은 수신된 신호를 모든 가능한 SSC와 병렬로 상관을 취한다. SSC는 ML방법에 의해 결정된다. 2 단계의 적분시간 N_2T_c는 또한 1 단계의 지속시간과 동일하다. 이 과정은 S-SCH 시퀀스 길이의 L_2배에 해당하는 L_2M회 반복된다. $M=15$ L_2는 S-SCH 시

퀀스의 사후 검파 적분의 횟수이다. S-SCH 시퀀스를 식별을 위해 일반적으로 ML 결정을 사용된다[3]. 합리적인 거리에 있는 식별된 S-SCH 시퀀스에서 가장 가까운 시퀀스가 "hit"으로 선택된다. 이러한 시퀀스가 없다면 "miss"로 선언된다.

가설 H_1에 대한 각 적분 시간에서 정확한 SSC가 검파될 확률은

$$t_1 = \sum_{r=0}^{C_2-1} \frac{(-1)^r}{(L_2-1)!\ V_{F_2}^{L_2}} \binom{C_2-1}{r} \sum_{k=0}^{\gamma(L_2-1)} \frac{\beta_{kr}}{V_2^k} e^{-\left(\frac{r}{V_2}+\frac{1}{V_{F_2}}\right)\theta_2} \cdot \sum_{m=0}^{k+L_2-1} \frac{(k+L_2-1)!}{m!} \frac{\theta_2^m}{\left(\frac{r}{V_2}+\frac{1}{V_{F_2}}\right)^{k+L_2-m}} \tag{14}$$

이다. 모든 부정확한 SSC이 동일한 확률로 발생한다고 가정하면 H_1가설에서 검파된 부정확 SSC의 확률은

$$p_1 = (1-t_1-m_1)/(C_2-1) \tag{15}$$

이다. m_1은 가설 H_1의 적분에서 SSC에 대한 실패 확률이다. C_2=16는 사용하는 SSC의 수이다.

$$m_1 = \left[1-e^{-\theta_2/V_{F_2}} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_2}{V_{F_2}}\right)^k\right] \cdot \left[1-e^{-\theta_2/V_2} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_2}{V_2}\right)^k\right]^{(C_2-1)} \tag{16}$$

S-SCH 시퀀스는 (15,3)RS 코드에서 선택되었으므로 최소거리 $d_{\min}$=13은 S-SCH 시퀀스를 식별하기 위한 임계값으로 취할 수 있다. P_i^j는 가설 H_i(i=0,1)하에서 수신된 시퀀스가 가중치 j의 시퀀스에 대한 결정 영역 내에 있을 확률이다. m_i=0경우

$$P_i^j = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{d_{\min}-1}{2} \rfloor} \sum_{r=0}^{k} \binom{j}{k-r}\binom{M-j}{r} \cdot p_i^{j-k+r}(1-p_i)^{k-r} t_i^{M-j-r}(1-t_i)^r \tag{17}$$

그리고 m_i≠0 경우

$$P_i^j = \sum_{v=0}^{\lfloor \frac{d_{\min}-1}{2} \rfloor} \sum_{w=0}^{d_{\min}-2v-1} \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{d_{\min}-2v-w-1}{2} \rfloor} \sum_{y=0}^{d_{\min}-2v-w-2x-1} \sum_{z=0}^{\lfloor \frac{d_{\min}-2v-w-2x-y-1}{2} \rfloor} \binom{M-j}{v}\binom{M-j-v}{w}\binom{j}{x}\binom{j-x}{y}\binom{j-x-y}{z} (C_2-1)^v (C_2-2)^x p_i^{j+v-y-z} m_i^{w+y} t_i^{M-j-v-w+z} \tag{18}$$

이다. 2단계에서 가설 H_1의 검파 확률과 오경보 확률은

$$P_{D_2|H_1} = \sum_{j=0}^{\lfloor (d_{\min}-1)/2 \rfloor} \binom{M}{j} t_1^{M-j}(1-t_1)^j \tag{19}$$

$$P_{F_2|H_1} = \sum_{j=d_{\min}}^{M} A_j P_1^j \tag{20}$$

이다. 여기서 A_j는 S-SCH 시퀀스 집합에서 시퀀스들 사이의 해밍거리가 j인 시퀀스의 수이다. [2]에서 사용된 S-SCH 시퀀스에 대해서 A_{13}, A_{14}, A_{15}는 각각 1854, 748, 1430의 값을 갖는다.

2 단계에서 H_1의 실패 확률은 다음과 같다.

$$P_{M_2|H_1} = 1 - P_{D_2|H_1} - P_{F_2|H_1} \tag{21}$$

유사하게 H_0 가설 상태에서 검파, 오경보 그리고 실패 확률은 각각

$$P_{D_2|H_0} = \sum_{j=0}^{\lfloor (d_{\min}-1)/2 \rfloor} \binom{M}{j} t_0^{M-j}(1-t_0)^j \tag{22}$$

$$P_{F_2|H_0} = \sum_{j=d_{\min}}^{M} A_j P_0^j \tag{23}$$

$$P_{M_2|H_0} = 1 - P_{D_2|H_0} - P_{F_2|H_0} \tag{24}$$

이다. 여기서

$$t_0 = \sum_{r=0}^{C_2-1} \frac{(-1)^r}{(L_2-1)!\ V_2^{L_2}} \binom{C_2-1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{\gamma(L_2-1)} \frac{\beta_{kr}}{V_2^k} e^{-\left(\frac{r+1}{V_2}\right)\theta_2} \sum_{m=0}^{k+L_2-1} \frac{(k+L_2-1)!}{m!} \frac{\theta_2^m}{\left(\frac{r+1}{V_2}\right)^{k+L_2-m}} \tag{25}$$

$$m_0 = \left[1-e^{-\theta_2/V_2} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_2}{V_2}\right)^k\right]^{C_2} \tag{26}$$

$$p_0 = (1-t_0-m_0)/(C_2-1) \tag{27}$$

t_0는 가설 H_0상태에서 각각 SSC에 대한 검파 확률, m_0는 실패 확률, p_0는 오경보 확률이다.

2단계에서 3단계까지의 전이 시간은 0~$(M-1)$배의 슬롯 시간 범위의 슬롯 시간의 배수이다. 따라서 각 슬롯이 프레임의 시작 슬롯일 확률은 동일하므로 3단계로 평균 전이 시간은 $0.5(M-1)T_{slot}$로 주어진다.

3.3 스크램블링 코드 식별

셀 탐색 과정의 3단계에서는 전형적으로 2단계에서 식별된 부호 그룹 내의 모든 스크램블링 코드를 P-CCPCH에 대해 심볼간 상관을 취한다. 일반적인 경우 동기 획득시간을 감소시키기 위해 다중 적분 직렬 탐색이 실행된다[1]. 그러나 탐색 시간에 한계가 존재하는 경우에는 다중 적분보다 긴 적분시간(N_3T_c)과 다중 L_3 사후 검파 적분이 보다 나은 선택이 될 수 있다.

3단계에서 가설 H_1하의 검파, 실패 그리고 오경보 확률은 각각 다음과 같다.

$$P_{D_3|H_1} = \sum_{r=0}^{C_3-1} \frac{(-1)^r}{(L_3-1)!\ V_{F_3}^{L_3}} \binom{C_3-1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{\gamma(L_3-1)} \frac{\beta_{kr}(k+L_1-1)!}{V_3^k} e^{-\left(\frac{r}{V_3}+\frac{1}{V_{F_3}}\right)\theta_3} \cdot \sum_{m=0}^{k+L_3-1} \frac{1}{m!} \frac{\theta_3^m}{\left(\frac{r}{V_3}+\frac{1}{V_{F_3}}\right)^{k+L_3-m}} \tag{28}$$

$$P_{M_3|H_1} = \left[1-e^{-\frac{\theta_3}{V_{F_3}}} \sum_{k=0}^{L_3-1} \frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_3}{V_{F_3}}\right)^k\right]\left[1-e^{-\frac{\theta_3}{V_3}} \sum_{k=0}^{L_3-1} \frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_3}{V_3}\right)^k\right]^{(C_3} \tag{29}$$

$$P_{F_3|H_1} = 1 - P_{M_3|H_1} - P_{D_3|H_1} \tag{30}$$

C_3는 그룹내의 스크램블링 수이다. 가설 H_0에 대한 검

파, 실패 및 오경보 확률은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_{D_3|H_0}=0 \tag{31}$$

$$P_{M_3|H_0}=\left[1-e^{-\frac{\theta_3}{V_3}}\sum_{k=0}^{L_3-1}\frac{1}{k!}\left(\frac{\theta_3}{V_3}\right)^k\right]^{C_3} \tag{32}$$

$$P_{F_3|H_0}=1-P_{M_3|H_0} \tag{33}$$

스크램블링 코드가 식별되면 셀 탐색을 종료하게 된다.

IV. 수치 해석과 최적화

셀 탐색의 성능 해석은 단일 경로 레일리 페이딩 채널에서 수치적으로 계산하였다. 각 단계의 적분 시간은 심벌 길이와 동일하게 256 칩으로 설정한다. 칩 당 샘플의 수는 1로 가정한다. 타이밍 오차는 최악의 경우를 가정하여 $\pm T_c/2$ 설정한다[5]. $R(\tau)$ 는 대역 제한된 파형 필터이다. 셀 탐색의 임계값은 0으로 설정한다.

α는 전체 SCH에 대한 P-SCH의 전력 비이다. P-CPICH와 SCH 신호의 전력 비 R이 0[dB]라고 가정한다. 시간 표류 때문에 셀 탐색에 대한 최소 처리 시간은 48개 시간 슬롯보다 훨씬 길어서는 안 된다. 이것은 초기 획득하는 동안 2ppm의 수신기 클럭 정확도에 대한 1/4 칩 표류에 대응한다[7]. 2단계에서 L_2=2가 합리적인 선택이라는 것을 2단계 검파, 오경보, 실패확률들 계산을 통해 알 수 있다. 그러므로 사후 검파 적분 수의 최적화는 L_1과 L_3의 최적 조합에서 찾을 수 있다. L_1과 L_3의 합은 16개 슬롯으로 한정하였다. 2개의 슬롯은 여유로 남겨두었다.

표 1는 단계별 병렬 처리 방법을 통해서 평균 셀 탐색 시간이 100ms일 때 α와 L_1 그리고 L_3에 따른 필요한 $\overline{E_c}/I_0$을 보여준다. α의 최적의 값은 약 0.4이고 이 경우에 대한 L_1=12, L_2=2, L_3=4 등의 최적의 설계 파라미터를 가진다.

표 1 α와 L_1, L_3에 따른 단계별 병렬 처리의 E_c/I_0

α = 0.3		α = 0.4		α = 0.5		α = 0.6		α = 0.7	
L_1, L_3	$\overline{E_c}/I_0$	L_1, L_3	$\overline{E_c}/I_0$	L_1, L_3	$\overline{E_c}/I_0$	L_1, L_3	$\overline{E_c}/I_0$	L_1, L_3	$\overline{E_c}/I_0$
13,3	-16.12	12,4	-16.30	12,4	-16.05	12,4	-15.39	11,5	-14.28
12,4	-16.09	13,3	-16.30	11,5	-16.03	11,5	-15.39	10,6	-14.27
14,2	-16.05	11,5	-16.25	13,3	-16.03	10,6	-15.36	12,4	-14.26
11,5	-16.00	14,2	-16.21	10,6	-15.97	13,3	-15.34	9,7	-14.26
10,6	-15.88	10,6	-16.16	14,2	-15.91	9,7	-15.31	8,8	-14.23

그림 3은 단계별 병렬 처리와 직렬 처리의 평균 셀 탐색 시간의 누적 확률 분포이다. 병렬 처리가 직렬 처리보다 동일한 시간에서 셀 탐색 확률이 높은 것을 알 수 있다.

V. 결론

셀 탐색을 보다 낮은 $\overline{E_c}/I_0$에서 실행할 수 있는 단계

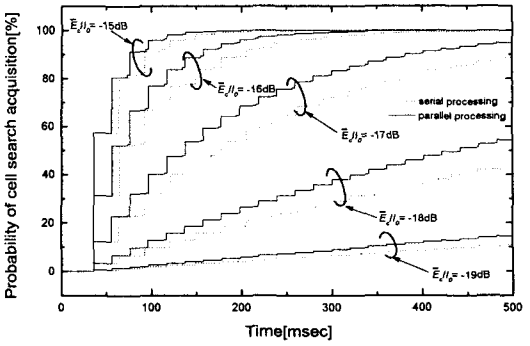

그림 3 평균 셀 탐색의 누적 확률 분포

별 병렬 처리 기법에 대한 성능 해석을 하였다. 레일리 페이딩 채널에서 CDMA noncoherent 복조기 출력의 통계량을 근거하여 Closed form의 검파 확률, 실패 확률, 오경보 확률을 유도하였다. 동기 채널의 최적 전력 할당과 사후 검파 적분 수의 최적의 값을 계산하였다. 누적 확률 분포를 통해서 알 수 있듯이 단계별 병렬 처리 기법이 직렬 처리 기법 보다 성능이 우수하다.

참 고 문 헌

[1] K. Higuchi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Fast Cell Search Algorithm in Inter-Cell Asynchronous DS-CDMA Mobile Radio," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 7, Jul. 1998.

[2] 3GPP TSG-RAN WG1, "Spreading and Modulation (FDD)," TS 25.213 v3.1.1, ETSI, Dec. 1999.

[3] 3GPP TSG-RAN WG1, "Physical layer procedure (FDD)," TS 25.214 v3.2.0, ETSI, Mar 2000.

[4] Yi-Pin Eric Wang and Tony Ottosson, "Cell Search Algorithms and Optimization in W-CDMA," *Proc. 51th IEEE V도. Technol. Conf.*, VTC'00, Tokyo, Japan, May 15-18, 2000.

[5] A. J. Viterbi, *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

[6] V. Aalo,O. Ugweje, and R. Sudhakar,"Performance Analysis of a DS/CDMA System with Noncoherent M-ary Orthogonal Modulation in Nakagami Fading," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp 20-29, Feb. 1998.

[7] S. Sriram and S. Hosur,"Fast Acquisition Method for DS-CDMA Systems," *Proc. of 1999 IEEE International Conference on Communications*, vol. 3, pp. 1928-1932, Jun. 1999.

[8] M.K. Simon, J.K. Omur, R.A. Scholtz and B.K. Levitt, *Spread Spectrum Communications,Vol. III*, Computer Science Press, 1985