

論文2001-38TC-4-1

# 레이리 페이딩 채널에서 W-CDMA 시스템의 초기 셀 탐색 성능 해석

## (Performance Analysis of Initial Cell Search in WCDMA System over Rayleigh Fading Channels)

宋文圭\*

(Moon Kyou Song)

## 요약

W-CDMA 시스템에서 각 셀마다 고유하게 할당된 스크램블링 부호의 신속한 획득을 위해 3 단계 셀 탐색 기법의 사용이 고려되어 왔다. 본 논문에서는 레이리 페이딩 채널에서 초기 셀 탐색 기법의 성능을 해석한다. 셀 탐색 방법에 대한 시스템 파라미터와 수신기의 설계 파라미터의 영향을 고찰한다. 각 단계마다 검파 확률과 실패 확률, 오경보 확률을 CDMA 넌코히런트 복조기 출력의 통계량을 근거로 하여 closed form 으로 유도하였다. 해석을 통해 각 단계의 임계값과 사후 검파 적분의 효과를 고찰하였으며, 동기 채널들에 대한 최적의 전력비를 고찰하였다. 각 단계에 대한 사후 검파 적분의 횟수는 수신기에 대한 설계 파라미터이며, 그 최적값은 셀 탐색을 위한 채널의 전력 할당비 뿐 아니라 오경보 페널티 시간 등에 의존한다. 이들 파라미터의 최적값을 얻기 위해 본 논문의 해석이 사용될 수 있음을 보인다. 또한 해석을 통해 평균 셀 탐색 시간의 누적 확률 분포를 얻는다.

## Abstract

The 3-step cell search has been considered for fast acquisition of the scrambling code unique to a cell in the W-CDMA system. In this paper, the performance of the cell search scheme is analyzed in Rayleigh fading channels. And the system parameters for cell search scheme and the design parameters for the receivers are examined. The probabilities of detection, miss and false alarm for each step are derived in closed forms based on the statistics of CDMA noncoherent demodulator output. Through the analysis, the effect of threshold setting and post-detection integration for each step is investigated, and the optimal values of the power allocation for the synchronization channels are also considered. The number of post-detection integrations for each step is a design parameter for the receiver, and the optimum values may depend on not only the power allocation for each channel related to the cell search, but the false alarm penalty time. It is shown that optimal values could be determined through the analysis. Also, the cumulative probability distribution of the average cell search time is obtained.

\* 正會員, 圓光大學校 電氣電子工學部

(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, WonKwang University)

※ 이 논문은 한국과학재단의 국비 과학기술 연수(해외 Post-doc. 연수) 사업으로 지원된 결과(과제번호: 98-08-02-2)입니다.

接受日: 2000年8月8日, 수정완료일: 2001年3月12日

## I. 서론

셀간 비동기 시스템의 기지국들은 GPS와 같은 어떤 외부의 시간 제공 시스템도 요구하지 않는다<sup>[1,2]</sup>. 이로 인해 실외에서 실내로의 기지국 전계가 무척 용이하게 된다. 셀간 비동기 셀룰러 시스템의 기지국들은 공통적인 시간 기준을 가지지 않으므로 셀간 동기 시스템에

서처럼 상대적인 시간 오프셋에 의해서 기지국들이 구별될 수 없다. 대신 이를 위해 각 셀에 유일한 스크램블링 코드를 할당한다. 사용되는 코드의 수가 제한적이어서 발생할 수 있는 코드 할당 문제를 감소하기 위해서 최소 수백 개의 긴 스크램블링 코드가 필요하다<sup>[3]</sup>. 이동국들은 스크램블링 코드의 동기를 얻고 가장 바람직한 셀을 찾기 위해 많은 수의 스크램블링 코드를 탐색해야 하므로, 셀마다 서로 다른 스크램블링 코드를 사용하는 것은 일반적으로 셀 탐색 시간을 증가시키게 된다.

이와 같은 셀 탐색 시간을 줄이기 위해 스크램블링 코드의 그룹화<sup>[3]</sup> 개념과 CP(Cyclically permutable) 코드를 사용하는 방법<sup>[8]</sup>이 도입되었다. 시스템에서 사용하는 모든 스크램블링 코드를 그룹화하고 각 셀은 그룹을 나타내는 시퀀스를 전송하므로써 이동국이 모든 스크램블링 코드를 탐색하는 것을 피할 수 있다. 또한 그룹의 식별을 위해 CP 코드를 사용함으로써 코드 그룹 뿐만 아니라 프레임 동기를 동시에 결정할 수 있다. 셀 탐색의 성능을 개선하기 위해 많은 노력<sup>[3~11]</sup>이 있어왔으나 주로 성능을 평가하기 위해 많은 시간이 요구되는 시뮬레이션이나 실험 연구를 기반으로 한다. 본 논문에서는 셀간 비동기 W-CDMA 시스템에 대한 셀 탐색의 성능을 해석하고자 한다. 셀 탐색 성능의 해석은 셀 탐색 기법의 시스템 파라미터와 수신기의 설계 파라미터의 영향을 해석하는데 유용하며, 셀 탐색 기법을 최적화하고 개선된 셀 탐색 성능을 갖는 수신기를 설계하기 위해 사용될 수 있다.

## II. 시스템 설명

### 1. 동기 채널의 구조

W-CDMA 시스템은 512개의 스크램블링 코드를 사용한다. 512개의 스크램블링 코드 집합은 셀 탐색을 용이하기 위해 각각 8개의 스크램블링 코드로 이루어진 64개의 그룹으로 나누어진다. 각 셀에 고유하게 할당된 스크램블링 코드는 그림 1에 보인 바와 같이 P-CCPCH(primary common control physical channel)와 P-CPICH(primary common pilot channel)를 스크램블링하기 위해 사용된다. 셀 탐색을 위해 사용되는 SCH(synchronization channel)는 P-SCH과 S-SCH로 구성된다. 심볼 율은  $R_s=15\text{kspss}$ , 확산 인자는  $SF=256$ ,

$R_c=3.84\text{Mcps}$ 으로 정해진다<sup>[12]</sup>. 10ms의 각 프레임은 15개의 슬롯으로 이루지며, 각 슬롯의 길이는  $T_{slot}=0.667\text{ms}$ 이다.

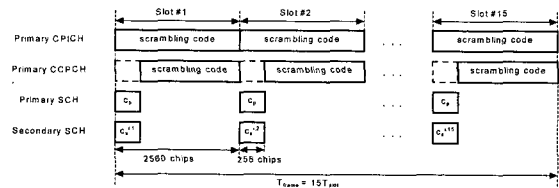


그림 1. 셀 탐색을 위한 채널 구조

Fig. 1. Channel structure for cell search.

P-CCPCH는 각 슬롯의 첫 번째 심볼 구간(256칩)에는 전송되지 않는다. 대신 이 구간동안 P-SCH와 S-SCH가 전송된다. P-SCH는 매 슬롯마다 한 번씩 전송되는 256칩의 PSC (primary synchronization code)  $c_p$ 로 구성된다. PSC는 시스템의 모든 셀에 공통이며 최상의 셀을 선택하고 확산 코드의 동기를 획득하기 위해 사용된다.

S-SCH는 15개의 SSC(secondary synchronization code)로 구성되는 S-SCH 시퀀스를 반복적으로 전송하는 것으로 구성된다. 각 SSC  $c_s^i$ 는 16개의 길이 256의 직교 코드의 집합에서 선택된다. 여기서  $i=1,2,\dots,64$ 는 스크램블링 코드 그룹 번호를 나타내고  $k=1,2,\dots,15$ 는 슬롯 번호를 나타낸다. SSC는 PSC와 직교하며, P-SCH와 병렬로 전송된다. S-SCH 시퀀스 ( $c_s^{i,1}, c_s^{i,2}, \dots, c_s^{i,15}$ )는 64개 스크램블링 코드 그룹 중 하나를 나타내기 위해 사용된다. 이 시퀀스가 CP 부호를 사용하여 구성되므로 코드 그룹뿐만 아니라 프레임 동기가 동시에 결정된다. 그 이유는 CP 부호 집합에 속한 임의의 부호어에 대한 순회 천이는 자기 자신을 포함한 어떤 부호어에 대한 순회 천이와도 동일하지 않은 성질을 갖는 것에서 기인한다. CP 부호는  $q$ 진  $(n,k)$  RS 부호의 부분 집합으로 선택될 수 있으며, 여기서  $n$ 은 프레임당 슬롯의 수  $M=15$ 와 같다.  $q$ 진  $(n,k)$  RS 코드에서  $q^{k-1}$ 개의 CP 부호어가 유용하므로 64개의 S-SCH 시퀀스는  $(15,3)$  RS 부호에서 선택될 수 있다.

### 2. 셀 탐색 과정

셀 탐색 과정에서 이동국은 최상의 셀을 탐색하고 그 셀의 순방향 스크램블링 코드와 프레임 동기를 결

정한다. 셀 탐색은 전형적으로 슬롯 동기, 프레임 동기 및 코드 그룹 결정, 스크램블링 코드 결정 등 3 단계로 수행된다<sup>[2,13]</sup>. 이동국의 셀 탐색 흐름도는 그림 2에 보인다.

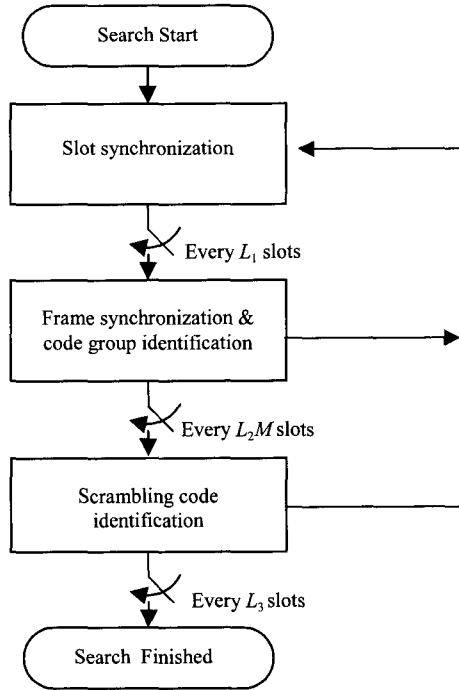


그림 2. 셀 탐색 과정의 흐름도  
Fig. 2. Operational flow of cell search.

III. 레일리 페이딩 채널에서 성능 해석

셀 탐색 과정은 일련의 확산 코드에 대한 동기 획득 과정으로 간주될 수 있으며, 여기서 성능 평가의 주 기준은 평균 동기 시간과 그 분산이다<sup>[14-18]</sup>. 획득 과정은 본질적으로 Markovian이며, 획득 성능을 결정하기 위해 흐름도 모델을 사용할 수 있다<sup>[14-18]</sup>. 셀 탐색 과정의 신호 흐름도는 그림 3에 보인다. 그림 3에서 변수 \$z\$의 지수는 \$T\_{slot}/2\$의 시간 단위를 갖는다. \$L\_i\$는 \$i\$번째 단계(\$i=1,2,3\$)에서 사후 검파 적분의 횟수를 나타낸다. \$H\_1\$는 시험 적분에서 옳은 신호가 존재할 가설이다. \$H\_0\$는 \$H\_1\$와 반대되는 가설이다. 결국 첫 번째 단계에서 \$H\_1\$는 수신된 신호가 한 칩 이내로 정렬될 가설을 나타낸다. 나머지 단계에서 \$H\_1\$는 이전 단계가 성공적으로 수행된 경우에 대한 가설을 의미한다. \$P\_{D\_i}\$, \$P\_{M\_i}\$,

\$P\_{F\_i}\$는 각각 \$i\$번째 단계에서 검파, 실패, 오경보 확률을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

\$P\_D\$ = 옳은 셀에서 가설 시험 출력 중 하나가 가장 크고 임계값을 초과할 확률

\$P\_M\$ = 임계값을 초과하는 가설 시험 출력이 존재하지 않을 확률

\$P\_F\$ = 옳지 않은 셀의 가설 시험 출력 중 하나가 가장 크고 임계값을 초과할 확률

\$P\_{D\_i|H\_j}\$, \$P\_{M\_i|H\_j}\$, \$P\_{F\_i|H\_j}\$은 각각 \$i\$번째 단계에서 \$H\_j, j=0,1\$ 가설에 대한 조건부 검파, 실패 및 오경보 확률들을 나타낸다. \$K\$는 오경보 벌칙 시간을 나타낸다.

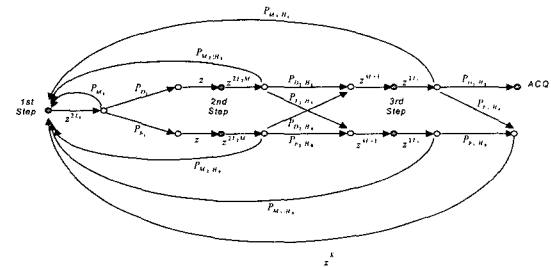


그림 3. 셀 탐색 과정의 흐름도  
Fig. 3. Signal flow graph for cell search.

Mason의 이득 공식을 이용하면 그림 3의 신호 흐름도에서 전달함수 \$U(z)\$는

$$U(z) = \frac{P(z)}{\Delta(z)} \tag{1}$$

으로 구해진다. 여기서

$$P(z) = (P_{D_1}P_{D_2|H_1} + P_{F_1}P_{D_2|H_0})P_{D_3|H_1}z^{2L_1+(2L_2+1)M+2L_3} \tag{2}$$

$$\Delta(z) = 1 - P_{M_1}z^{L_1} - (P_{D_1}P_{M_2|H_1} + P_{F_1}P_{M_2|H_0})z^{2L_1+1+2L_2M} - \{(P_{D_1}P_{D_2|H_1} + P_{F_1}P_{D_2|H_0})P_{M_3|H_1} + (P_{D_1}P_{F_2|H_1} + P_{F_1}P_{F_2|H_0})P_{M_3|H_0}\}z^{2L_1+(2L_2+1)M+2L_3} - \{(P_{D_1}P_{D_2|H_1} + P_{F_1}P_{D_2|H_0})P_{F_3|H_1} + (P_{D_1}P_{F_2|H_1} + P_{F_1}P_{F_2|H_0})P_{F_3|H_0}\}z^{2L_1+(2L_2+1)M+2L_3+K} \tag{3}$$

평균 셀 탐색 시간 \$\overline{T\_{ACQ}}\$은<sup>[14-18]</sup>

$$U(z^{T_{slot}}) = \left. \frac{dU(z)}{dz} \right|_{z=1}$$

이고 셀 탐색 시간의 분산은<sup>[14-18]</sup>

$$\sigma_{ACQ}^2 = \left[ \left. \frac{d^2U(z)}{dz^2} + \frac{dU(z)}{dz} \left( 1 - \frac{dU(z)}{dz} \right) \right] \right|_{z=1} \tag{5}$$

과 같이 유도된다.  $n$  이하의 시간 단위에서 셀 탐색의 획득 확률  $P_{Acq}(n)$ 은 역  $z$  변환과 유사한 contour 적분으로

$$P_{Acq}(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{\Gamma} \frac{U(z)}{(1-z)z^{(n+1)}} dz \quad (6)$$

와 같이 구해진다<sup>[16]</sup>. 위 수식 (4-6)은 모두 슬롯 시간  $T_{slot}/2$ 의 단위를 갖는다.

### 1. 가설 검증의 1차와 2차 통계량

본 논문에서 레이리 페이딩의 진폭과 위상은  $N$  칩

구간동안 일정할 정도로 느리지만, 연속적인  $N$  칩 구간은 서로 독립적일 정도로 빠르다고 가정한다. 넌코히어런트 가설 시험 장치의 출력 성분의 통계량은 잘 알려져 있으며<sup>[17]</sup>, 레이리 페이딩에서 가설  $H_0$ 과  $H_1$  상태에서  $L$ 개 사후 검파 적분이후의 결정 변수는  $2L$ 개 자유도를 갖는 카이 제곱 분포이며, 그 확률밀도함수는

$$f_y(\eta|H_0) = \frac{\eta^{L-1} e^{-\eta/V}}{(L-1)! V^L} \quad (7)$$

$$f_y(\eta|H_1) = \frac{\eta^{L-1} e^{-\eta/V_F}}{(L-1)! V_F^L} \quad (8)$$

와 같다. 여기서

$$V = N I_0 \quad (9)$$

$$V_F = N^2 \bar{E}_c R^2(\tau) + V \quad (10)$$

이다. 여기서  $N$ 은 적분 시험 구간의 칩 수를 나타내며, 간섭 성분  $I_0$ 는 칩간 간섭, 배경잡음, 다중접속 간섭으로 인한 성분들의 합이다. 간섭은 타이밍 오차에 대해서 민감하지 않으므로 간섭 성분들은 모든 시험 셀에서 동일한 통계적 특성을 갖는다고 가정할 수 있다.  $\bar{E}_c$ 는  $i$ 번째 사용자에게 대한 평균 칩 에너지,  $\tau$ 는 타이밍 오차를 나타낸다. 한편

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 \cos(2\pi f\tau) df \quad (11)$$

이고, 여기서  $H(f)$ 는 파형 성형 필터의 전달 함수를 나타낸다.

### 2. 검파 확률, 실패 확률, 오경보 확률의 유도

(1) 1 단계 : 슬롯 동기

슬롯 동기는 모든 셀에 공통적인 PSC에 정합된 정

합 필터나 이와 유사한 장치로 이루어진다.  $L_1$ 개 사후 검파 적분이 수행된 후 셀의 최대우도(ML) 슬롯 동기는  $a_1 = Ln_{slot}$ 개 출력 중 최고 값을 검출하여 임계값  $\theta_1$ 과 비교함으로써 얻을 수 있다. 여기서  $l$ 은 칩당 샘플의 수,  $n_{slot} = 2560$ 은 슬롯당 칩 수를 나타낸다. 정합 필터의 복잡성을 고려하고 해석을 단순화를 위해  $l=1$ 로 가정하면 1단계에서 검파 확률은

$$P_{D_1} = \int_{\theta_1}^{\infty} f_z^{(1)}(z|H_1) \left[ \int_0^z f_x^{(1)}(x|H_0) dx \right]^{(a_1-1)} dz \quad (12)$$

와 같이 주어진다<sup>[18]</sup>. (7)과 (8)를 (12)에 대입하면,

$$P_{D_1} = \int_{\theta_1}^{\infty} \frac{z^{L_1-1} e^{-z/V_{F_1}}}{(L_1-1)! V_{F_1}^{L_1}} \left[ 1 - e^{-\frac{z}{V_1}} \sum_{k=0}^{L_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{z}{V_1} \right)^k \right]^{(a_1-1)} dz \quad (13)$$

을 얻는다. 식 (13)을 closed form으로 표현하기 위해서 이항 전개와 다항 정리 그리고 다음의 적분 공식 사용한다<sup>[19]</sup>.

$$\int_{\theta}^{\infty} z^n e^{-az} dz = e^{-a\theta} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n!}{k!} \frac{\theta^k}{a^{n-k+1}}, \quad a > 0 \quad (14)$$

그러면 다음과 같이 검파확률에 대한 Closed form을 유도할 수 있다.

$$P_{D_1} = \sum_{r=0}^{a_1-1} \frac{(-1)^r}{(L_1-1)! V_{F_1}^{L_1}} \binom{a_1-1}{r} \sum_{k=0}^{L_1-1} \frac{\beta_{kr}(k+L_1-1)!}{V_1^k} e^{-\left(\frac{r}{V_1} + \frac{1}{V_{F_1}}\right)\theta_1} \sum_{m=0}^{k+L_1-1} \frac{1}{m!} \frac{\theta_1^m}{\left(\frac{r}{V_1} + \frac{1}{V_{F_1}}\right)^{k+L_1-m}} \quad (15)$$

여기서  $\beta_{kr}$ 는 위 전개식에서 계수들의 집합으로 다음의 반복 공식을 이용하여 구할 수 있다<sup>[19]</sup>.

$$\beta_{kr} = \sum_{i=k-(L_1-1)}^k \beta_{i(r-1)} \frac{1}{(k-i)!} I_{[0, (r-1)(L_1-1)]}(i) \quad (16)$$

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

$$I_{[a, b]}(i) = \begin{cases} 1, & a \leq i \leq b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

이다.

1단계의 실패 확률은

$$\begin{aligned}
 P_{M_1} &= \int_0^{\theta_1} f_z^{(1)}(z|H_1) dz \left[ \int_0^{\theta_1} f_x^{(1)}(x|H_0) dx \right]^{(q_1-1)} \\
 &= \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_1}{V_{F_1}}} \sum_{k=0}^{L_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\theta_1}{V_{F_1}} \right)^k \right] \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_1}{V_1}} \sum_{k=0}^{L_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\theta_1}{V_1} \right)^k \right]^{(q_1-1)} \quad (18)
 \end{aligned}$$

과 같고 오경보 확률은

$$P_{F_1} = 1 - P_{D_1} - P_{M_1} \quad (19)$$

과 같다. 특별한 사전 정보가 없을 경우 모든  $q_1$ 개 출력이 적중(hit)할 확률은 동일하다. 따라서 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로의 평균 전이 시간은  $0.5T_{slot}$ 과 같이 주어진다.

(2) 2 단계 : 프레임 동기 및 부호 그룹 식별

2단계는 두가지 과정으로 구성된다. 우선 매 슬롯마다 수신 신호를 모든 16개의 SSC와 병렬로 상관을 취하여 전송된 SSC를 구한다. 프레임에 해당하는 15개의 SSC가 모두 결정되면, 그 시퀀스를 64개의 S-SCH 시퀀스와 그들 각각에 대한 15개의 천이형 시퀀스로 구성되는 총 960개의 시퀀스들과 비교함으로써 S-SCH 시퀀스를 결정한다.

첫 번째 과정에서 각 SSC는 최대우도(maximum likelihood; ML) 방법에 의해 결정된다. 즉, 최대 상관값을 선택하여 임계값  $\theta_2$ 과 비교한다. PSC와 SSC의 길이가 같으므로 2 단계의 적분시간  $N_2T_c$ 는 또한 1 단계의 지속시간과 동일하다. S-SCH 시퀀스의 길이는 프레임 당 슬롯의 수  $M=15$ 와 같으므로 2단계 사후검파 적분의 횟수를  $L_2$ 라 하면 이 적분 과정은 총  $L_2M$ 회 반복된다. 부호 그룹의 확인과 프레임의 동기는 S-SCH 시퀀스의 식별을 통해 얻어진다. 실제로 S-SCH 시퀀스를 식별을 위해 일반적으로 최고우도(most likely) 판정이 사용될 수도 있다<sup>[13]</sup>. 그러나 이 방법에 대한 해석은 S-SCH 시퀀스로 사용된 모든 부호어들 간 해밍 거리의 지루하고 철저한 탐색이 요구된다. 그러나 다행이  $t = \lfloor (d_{min} - 1)/2 \rfloor$ 라 할 때,  $t$ 개의 에러가 발생할 확률이  $t+1$ 개의 에러 확률보다 훨씬 크다면 최고추정 판정은 최대우도(ML) 판정과 동일한 것으로 간주될 수 있다<sup>[20]</sup>. 여기서  $d_{min}$ 는 부호어들 사이의 최소거리이다. 따라서 여기서 S-SCH 시퀀스를 식별하기 위해 최대우도(ML) 판정을 가정한다. 즉 수

신 시퀀스와 최소 거리 이내에서 가장 가까운 유효한 S-SCH 시퀀스를 성공으로 선언하며, 이러한 시퀀스가 없다면 실패로 선언한다.

가설  $H_1$ 에 대한 각 적분 시간에서 정확한 SSC가 검파될 확률은

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{\beta_{kr}(k+L_1-1)!}{V_{F_2}^k} e^{-\left(\frac{r}{V_2} + \frac{1}{V_{F_2}}\right)\theta_2} \\
 &\sum_{m=0}^{k+L_2-1} \frac{(k+L_2-1)!}{m!} \frac{\theta_2^m}{\left(\frac{r}{V_2} + \frac{1}{V_{F_2}}\right)^{k+L_2-m}} \quad (20)
 \end{aligned}$$

이다. 모든 부정확한 SSC이 동일한 확률을 가지고 발생한다고 가정하면  $H_1$ 가설에서 검파된 부정확 SSC의 확률은

$$p_1 = (1 - t_1 - m_1)/(C_2 - 1) \quad (21)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \left[ 1 - e^{-\theta_2/V_{F_1}} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\theta_2}{V_{F_1}} \right)^k \right] \\
 &\left[ 1 - e^{-\theta_2/V_2} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\theta_2}{V_2} \right)^k \right]^{(C_2-1)} \quad (22)
 \end{aligned}$$

은 가설  $H_1$ 의 적분에서 SSC에 대한 실패 확률이다.  $C_2=16$ 는 유용한 SSC의 수이다.

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

$$\begin{aligned}
 P_i^j &= \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{d_{min}-1}{2} \rfloor} \sum_{r=0}^k \binom{j}{k-r} \binom{M-j}{r} p_i^{j-k+r} (1-p_i)^{k-r} \\
 &t_i^{M-j-r} (1-t_i)^r \quad (23)
 \end{aligned}$$

그리고  $m_i \neq 0$  경우

$$\begin{aligned}
 P_i^j &= \sum_{v=0}^{\lfloor \frac{d_{min}-1}{2} \rfloor} \sum_{w=0}^{d_{min}-2v-1} \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{d_{min}-2v-w-1}{2} \rfloor} \sum_{y=0}^{d_{min}-2v-w-2x-1} \\
 &\sum_{z=0}^{\lfloor \frac{d_{min}-2v-w-2x-y-1}{2} \rfloor} \binom{M-j}{v} \binom{M-j-v}{w} \binom{j}{x} \binom{j-x}{y} \\
 &\binom{j-x-y}{z} (C_2-1)^v (C_2-2)^x p_i^{j+v-y-z} m_i^{w+y} \\
 &t_i^{M-j-v-w+x} \quad (24)
 \end{aligned}$$

과 같이 주어진다<sup>[21]</sup>.

2단계에서 가설  $H_1$ 에 대한 검파 확률과 오경보 확률은 각각

$$P_{D_3|H_1} = \sum_{j=0}^{\lfloor (d_{\max}-1)/2 \rfloor} \binom{M}{j} t_1^{M-j} (1-t_1)^j \quad (25)$$

$$P_{F_3|H_1} = \frac{1}{960} \sum_{j=d_{\min}}^M A_j P_1^j \quad (26)$$

으로 주어진다. 여기서  $A_j$ 는 S-SCH 시퀀스 집합에서 시퀀스들 사이의 해밍거리가  $j$ 인 시퀀스의 수이다. [12]에서 사용된 S-SCH 시퀀스에 대해서  $A_{13}$ ,  $A_{14}$ ,  $A_{15}$ 는 각각 348870, 168240, 403530의 값을 갖는다.

2 단계에서  $H_1$ 의 실패 확률은 다음과 같다.

$$P_{M_3|H_1} = 1 - P_{D_3|H_1} - P_{F_3|H_1} \quad (27)$$

유사하게  $H_0$  가설 상태에서 검파, 오경보 그리고 실패 확률은 각각

$$P_{D_3|H_0} = \sum_{j=0}^{\lfloor (d_{\max}-1)/2 \rfloor} \binom{M}{j} t_0^{M-j} (1-t_0)^j \quad (28)$$

$$P_{F_3|H_0} = \frac{1}{960} \sum_{j=d_{\min}}^M A_j P_0^j \quad (29)$$

$$P_{M_3|H_0} = 1 - P_{D_3|H_0} - P_{F_3|H_0} \quad (30)$$

과 같이 주어진다. 여기서

$$t_0 = \sum_{r=0}^{C_2-1} \frac{(-1)^r}{(L_2-1)! V_2^{L_2}} \binom{C_2-1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{r(L_2-1)} \frac{\beta_{kr}}{V_2^k} e^{-\left(\frac{r+1}{V_2}\right)\beta_2} \cdot \sum_{m=0}^{k+L_2-1} \frac{(k+L_2-1)!}{m!} \frac{\theta_2^m}{\left(\frac{r+1}{V_2}\right)^{k+L_2-m}} \quad (31)$$

$$m_0 = \left[ 1 - e^{-\theta_2/V_2} \sum_{k=0}^{L_2-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\theta_2}{V_2}\right)^k \right]^{C_2} \quad (32)$$

$$p_0 = (1 - t_0 - m_0)/(C_2 - 1). \quad (33)$$

는 각각 가설  $H_0$  상태에서 SSC에 대한 검파, 실패, 오경보 확률이다.

2단계에서 3단계로의 전이 시간은  $0 \sim (M-1)$ 배의 슬롯 시간 중 하나이다. 각 슬롯이 프레임의 시작 슬롯일 확률은 동일하므로 결국 3단계로의 평균 전이 시간은  $0.5(M-1)T_{slot}$ 이다.

(3) 3 단계 : 스크램블링 코드 식별

셀 탐색 과정의 3단계에서는 2단계에서 식별된 부호 그룹 내의 모든  $C_3=8$ 개의 스크램블링 코드와 P-CPICH간에 심볼간 상관을 취함으로써 스크램블링 코드를 찾는다. 앞과 마찬가지로 최대우도(ML) 판정을 가정하면 상관값들은  $L_3$ 회의 사후 검파 적분 이후 임계값  $\theta_3$ 과 비교된다.

3단계에서 가설  $H_1$ 하의 검파, 실패 그리고 오경보 확률은 각각 다음과 같다.

$$P_{D_3|H_1} = \sum_{r=0}^{C_3-1} \frac{(-1)^r}{(L_3-1)! V_{F_3}^{L_3}} \binom{C_3-1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{r(L_3-1)} \frac{\beta_{kr}(k+L_1-1)!}{V_3^k} e^{-\left(\frac{r}{V_3} + \frac{1}{V_r}\right)\theta_3} \cdot \sum_{m=0}^{k+L_3-1} \frac{1}{m!} \frac{\theta_3^m}{\left(\frac{r}{V_3} + \frac{1}{V_r}\right)^{k+L_3-m}} \quad (34)$$

$$P_{M_3|H_1} = \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_3}{V_r}} \sum_{k=0}^{L_3-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\theta_3}{V_r}\right)^k \right]^{C_3-1} \quad (35)$$

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

$$P_{F_3|H_1} = 1 - P_{M_3|H_1} - P_{D_3|H_1} \quad (36)$$

가설  $H_0$ 에 대한 검파, 실패 및 오경보 확률은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_{D_3|H_0} = 0 \quad (37)$$

$$P_{M_3|H_0} = \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_3}{V_3}} \sum_{k=0}^{L_3-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\theta_3}{V_3}\right)^k \right]^{C_3} \quad (38)$$

$$P_{F_3|H_0} = 1 - P_{M_3|H_0} \quad (39)$$

스크램블링 코드가 식별되면 셀 탐색을 종료하게 되며, P-CCPCH를 통해 방송되는 셀 고유 및 시스템 고유의 정보를 읽을 수 있게 된다.

#### IV. 수치 해석과 시뮬레이션

이 절에서는 레이리 페이딩 채널에서 셀 탐색 과정의 성능에 대한 해석의 수치적 계산 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한다. 비교를 용이하게 하기 위하여 타 이밍 오차는 0으로 가정하였다. 평가에서 오경보 패널 티 시간은 250ms로 가정한다. 셀 탐색의 각 단계에서 최대우도(ML) 판정의 유효성에 대한 임계값은 각각 0으로 설정한다.

셀 탐색에 대한 최적화는 각 단계에서 사후 검파 적분의 횟수와 각 채널에 할당하는 전력의 비를 결정하는 두 가지 면을 가지고 있다. 본 논문에서 각 단계의 임계값은 단지 최대우도(ML) 판정 결과의 유효성을 시험하는 기준으로 직렬 탐색이나 정합 필터 방식에서의 임계값과는 다른 의미를 가지며, 본 논문에서는 이 임계치의 최적값에 대한 논의는 생략한다.

각 단계에 대한 사후 검파 적분의 수는 수신기에 대한 설계 매개 변수이다. 2단계에서 사후검파 적분을 수행하는 것이 그렇지 않는 경우보다 훨씬 나은 성능을 보이므로  $L_2=2$ 가 합리적인 선택이며, 이를 위해 30 슬롯시간이 소요된다. 이제  $L_1$ 과  $L_3$ 의 최적의 조합을 찾으려 한다. 시간 표류 현상으로 인해 셀 탐색에 대한 최소 처리 시간은 48개 슬롯 시간보다 훨씬 길어지는 안 된다. 이것은 초기 획득하는 동안 2ppm의 수신기 클럭 정확도에 대한 1/4 칩 표류에 대응한다[8]. 따라서 본 논문에서는  $L_1$ 과  $L_3$ 의 합을 16개 슬롯으로 일정하게 고정한 경우를 고찰하였다.

채널간 전력 비의 고찰을 위해서 P-SCH loading factor,  $\alpha$ 의 영향을 조사하였다.  $\alpha$ 는 전체 SCH에 대한 P-SCH의 전력비로 정의된다. P-CPICH와 SCH 신호의 전력 비  $R$ 은 클수록 우수한 성능을 보이며, 본 논문에서는 0[dB]의 경우를 가정한다.

본 논문의 해석에 따라 여러가지 값의  $\alpha$ 와 사후 검파 적분의 수에 대하여 평균 셀 탐색 시간을 구하였다. 주어진 셀 탐색 시간에 대하여 최소의  $\overline{E_c/I_0}$ 을 요구하는 최적의 사후 검파 적분의 수는 채널 간의 전력 비에 의존한다.  $\overline{E_c/I_0}$ 은 특별한 언급이 없으면 P-CPICH 채널을 기준으로 한다.  $\alpha$ 가 클수록 정해진 성능을 위해 요구되는  $L_1$ 의 값은 감소하고,  $\alpha$ 가 작을수록 요구되는  $L_1$ 은 증가한다. 그림 4는  $L_1=12, L_2=2, L_3=4$ 로 설정하였을 때  $\alpha$ 에 따른 성능의 변화를 보인 것이다. 본 논문에서는 결국 수치 평가를 위해 파라미터로서 P-CPICH에 대한 SCH의 전력비는  $R=0$ [dB]이고 P-SCH loading factor는 0.4,  $L_1=12, L_2=2, L_3=4$ 로 설정하였다.

그림 5는  $\overline{E_c/I_0}$ 에 대한 평균 셀 탐색 시간을 보인 것이다. 본 논문의 해석에 따른 결과는 실선으로 표시하였다. 비교를 위해 동일한 파라미터에 대해 92Hz의 도플러를 갖는 레일리 페이딩 채널에서 시뮬레이션한

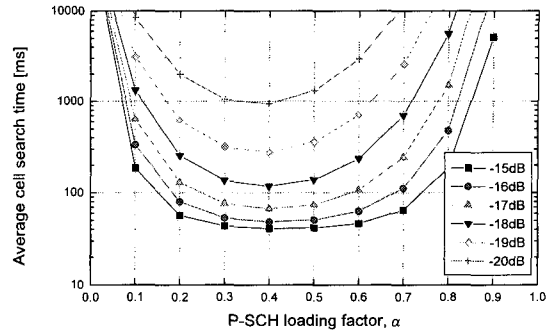


그림 4.  $\alpha$ 에 따른 평균 셀 탐색 시간  
Fig. 4. Average cell search time against  $\alpha$ .

결과를 원으로 표시하고 점선으로 연결하였다. 레일리 페이딩 시뮬레이터는 Jakes 알고리즘을 이용하였다. 시뮬레이션은 각각의 0dB에서 -25dB까지 1dB 간격의  $\overline{E_c/I_0}$ 에 대하여 수행되었으며, 각각의  $\overline{E_c/I_0}$ 마다 1,000 회씩의 셀 탐색을 수행하여 셀 탐색에 소요된 시간을 평균함으로써 평균 셀 탐색 시간을 구하였다. 그림으로부터 해석결과와 시뮬레이션 결과는 대략 1dB 정도의 오차가 존재함을 알 수 있다. 이 오차는 시뮬레이션이 수초 정도의 상당히 오랜 시간에 걸친 기간동안 수행되며, 이 기간동안 페이딩 시뮬레이터에 의한 랜덤 변수의 발생이 이론적인 결과와 차이를 보이기 때문에 기인하는 것으로 사료된다[22].

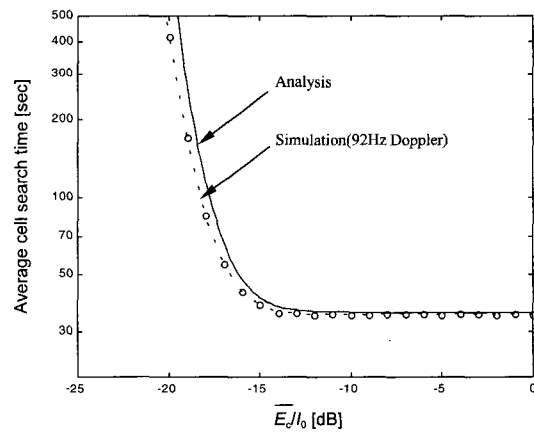


그림 5.  $\overline{E_c/I_0}$ 에 따른 평균 셀탐색 시간  
Fig. 5. Average cell search time against  $\overline{E_c/I_0}$ .

그림 6은 셀탐색 시간의 누적 확률분포를 보인다. 평균 셀탐색 시간의 누적 확률분포는 식 (6)에 의해 얻을 수 있으며, 그림 6에서 실선으로 표시하였다. 점선은 본

논문에서 실행한 시뮬레이션에 따른 누적확률분포를 참고적으로 표시한 것이다. 이론적인 해석 결과는 평균 셀 탐색 시간의 누적 분포를 보인 것이며, 시뮬레이션 결과는 본 시뮬레이션에서 고려된 경우에 대한 셀 탐색 시간의 누적 분포를 보인 것이다. 그림 6의 해석과 시뮬레이션은 모두  $R=0[\text{dB}]$ ,  $\alpha=0.4$ ,  $L_1=12$ ,  $L_2=2$ ,  $L_3=4$ 에 대하여 수행되었다.

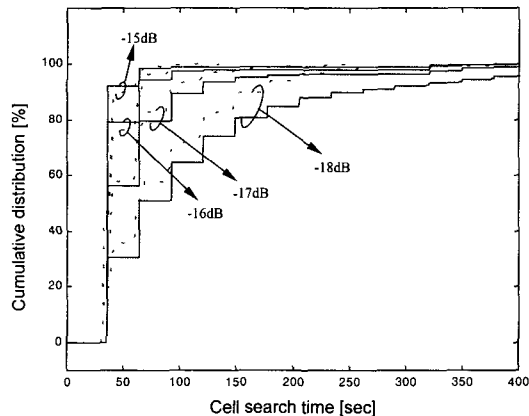


그림 6. 평균 셀 탐색 시간의 누적 분포  
Fig. 6. Cumulative distribution of average cell search time.

## V. 결 론

DS-CDMA 이동통신 시스템에서 셀간 비동기 동작이 많은 장점과 함께 셀 탐색 시간이 증가하는 문제점을 안고 있다. 본 논문에서는 WCDMA 시스템에서 사용될 3단계 셀 탐색 기법의 성능을 신호흐름도 기법을 이용하여 해석하였다. 이를 위해 특히 각 단계에서의 검파, 실패, 오경보 확률을 레이리 페이딩 채널에서 CDMA 비동기 복조기 출력의 통계량을 근거하여 Closed form으로 유도하였으며, 각 단계에서 사후 검파 적분 횟수의 최대우도(ML) 임계값의 영향을 조사하였다. 또한 평균 셀 탐색 시간의 누적 확률 분포도 얻었다.

본 논문의 성능 해석은 셀 탐색 시간을 줄이기 위해 채널 간의 전력할당비와 사후 검파 적분 회수와 같은 수신기의 설계 파라미터 등의 최적화를 위해 사용될 수 있을 것이다.

셀 탐색의 시뮬레이션을 위해서는 통상적으로 많은 양의 실행 시간이 요구된다. 특히 SNR이 낮은 경우 셀 탐색에 소요되는 시간은 1회의 시행에 10초를 초과할

수도 있으며, 10초 동안의 시뮬레이션은 많은 시간을 소요하게 된다. 더욱이 각각의 SNR에 대해서 평균 셀 탐색 시간을 구하기 위해 이러한 시행을 1,000회씩 수행할 경우 많은 시간이 소요되며, 많은 SNR에 대하여 평균 셀 탐색 시간을 구하기 위해서는 수십 대의 Pentium 컴퓨터로 수 일 이상 소요된다. 이와 같이 엄청난 시간을 요하는 시뮬레이션을 이용할 경우 채널 간 전력비와 같은 시스템 파라미터와 여러 가지 수신기 설계 파라미터의 영향을 고찰하는 것은 쉽지 않다. 해석을 이용할 경우 이러한 과정을 훨씬 빠르고 용이하게 수행할 수 있다고 사료된다. 또한, 본 논문의 해석을 이용할 경우 경로 손실과 트래픽 분포 모델에 대한 전파 모델을 고려함으로써 이동국과 기지국사이의 거리에 따른 셀 탐색 시간의 분포를 얻을 수 있다. 이 해석을 응용하면 셀 탐색의 단계별 병렬 동작<sup>[6,11]</sup>의 성능 해석도 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for Next-Generation Mobile Communications Systems," *IEEE Comm Magazine*, vol. 47, no. 5, pp. 56-69, Sep. 1998.
- [2] E. Dahlman, P. Beming, J. Knutsson, F. Ovesjo, M. Persson, and C. Roobol, "WCDMA-The Radio Interface for Future Mobile Multimedia Communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 1105-1118, Nov. 1998.
- [3] 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.
- [4] J. Nystrom, K. Jamal, Y. E. Wang, and R. Esmailzadeh, "Comparison of Cell Search Methods for Asynchronous Wideband CDMA Cellular System," *Proc. of the IEEE 1998 ICUPC*, vol. 2, pp. 783-787, Oct. 1998.
- [5] I. G. Kim, K. C. Kim, and B. W. Lim, "A Fast Cell Search Algorithm for Inter-Cell



- Asynchronous W-CDMA System using Code Hopping Method," *Proc. of the Globecom '98*, Sydney, Australia, vol. 3, pp. 1373~1377, Nov. 8 1998.
- [6] Y. S. Park, M. K. Song, and Y. J. Jeong, "Improved Fast Cell Search Algorithm for DS-CDMA Mobile Radio System employing Asynchronous Inter-cell," *Journal of the KICS*, vol. 24, no.2, Feb. 1999.
- [7] K. Higuchi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Experiments on fast cell search algorithm for intercell asynchronous W-CDMA mobile radio," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 13, Jun. 1999.
- [8] 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.
- [9] B. Kim, B. Jeong and B. Lee, "Application of Correlation-Aided DSA(CDSA) Technique to Fast Cell Search in IMT-2000 W-CDMA Systems," *Journ. Comm Networks*, vol. 2, no. 1, Mar. 2000.
- [10] K. Higuchi, Y. Hanada, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Experimental Evaluation of 3-Step Cell Search Method in W-CDMA Mobile Radio," *Proc. 51th IEEE Veh Technol. Conf.*, VTC 00, Tokyo, Japan, May 15-18, 2000.
- [11] Yi-Pin Eric Wang and Tony Ottosson, "Cell Search Algorithms and Optimization in W-CDMA," *Proc. 51th IEEE Veh Technol. Conf.*, VTC 00, Tokyo, Japan, May 15-18, 2000.
- [12] 3GPP TSG-RAN WG1, "Spreading and Modulation (FDD)," TS 25.213 v3.2.0, ETSI, Mar. 2000.
- [13] 3GPP TSG-RAN WG1, "Physical layer procedures (FDD)," TS 25.214 v3.2.0, ETSI, Mar. 2000.
- [14] Marcos D. Katz and Savo Glisic, "Modeling of Code Acquisition Process in CDMA Networks-Asynchronous Systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 1, pp. 73~86, Jan. 2000.
- [15] Polydoros and C. L. Weber, "A unified approach to serial search spread spectrum acquisition-Part I: General theory," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, pp. 542~549, May 1988.
- [16] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications*, Vol. III, ch. 1, Computer Science Press, 1985.
- [17] A. J. Viterbi, *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*, Addison-Wesley Publishing Co., ch. 3, 1995.
- [18] H. Park and B. Kang, "On the performance of a Maximum-Likelihood Code-Acquisition Technique for Preamble Search in a CDMA Reverse Link," *IEEE Trans. Veh Technol.*, vol. 47, no. 1, pp 65~74, Feb. 1998.
- [19] 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.
- [20] I. A. Glover and P. M. Grant, *Digital Communications*, Prentice Hall Europe, p. 341, 1998.
- [21] S. B. Wicker, "Reed-Solomon Error Control Coding for Data Transmission over Rayleigh Fading Channels with Feedback," *IEEE Trans. Veh Technol.*, vol. 41, no. 2, pp. 124~133, May 1992.
- [22] David J. Young, and Norman C. Beaulieu, "The Generation of Correlated Rayleigh Random Variates by Inverse Discrete Fourier Transform," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 48, no. 7, July 2000.

## 저 자 소 개



宋文圭(終身會員)

1988년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업. 1990년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학석사. 1994년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학박사. 1994년 3월~현재 : 원광대학교 전기전자및정보공학부 부교수. 1997년 10월~1998년 12월 : 한국전자통신 연구원 초빙연구원. 1999년 9월~2000년 8월 : 캐나다 빅토리아대학교 전기및컴퓨터공학과 박사후연구원