

가능도 점수 분석을 통한 OVFSF 코드 검출

최윤성*, 정대교*, 문병호**, 최원석***, 김동우°

OVSF Code Detection Based on Likelihood Scores

Yunsung Choi*, Dae-Kyo Jeong*, Byung-ho Mun**, Won-seok Choe***, Dongwoo Kim°

요약

본 논문은 코드 도메인 전력(code domain power, CDP)의 확률 분포를 도출하고, 이를 바탕으로 얻어진 가능도 점수(likelihood score)를 이용하여 WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 시스템 하향링크의 사용자들에게 할당된 OVFSF (Orthogonal Variable Spreading Factor) 코드를 검출하는 방법을 제안하고 성능을 분석한다. 제안하는 검출 방법은 CDP의 확률 분포를 이용하여 얻어진 임계값을 사용하여 1차적으로 사용되었을 가능성이 높은 OVFSF 코드를 선별한다. 2차 검색에서는 이전 단계에서 검색된 코드들을 부모 자식 관계를 가진 코드들의 그룹으로 나누고, 각 그룹 내에서 가능도 점수를 계산하여 점수가 가장 높은 OVFSF 코드를 최종적으로 검출한다. 컴퓨터 실험을 통하여 제안하는 방법이 기존의 방법 보다 사용된 OVFSF 코드에 대해 높은 감지 확률과 낮은 오인 경보 확률을 달성하는 것을 보인다.

Key Words : WCDMA, OVFSF code, code detection

ABSTRACT

In this paper, we present a maximum likelihood detection method of OVFSF codes used in WCDMA systems. We investigate the probability distribution of CDP for each code investigated and devise a threshold that is used to determine the existence of an OVFSF code in the first stage of the code search. In the second stage, the searched codes at the first stage are grouped according to whether they have a parent-children relationship in the OVFSF code tree. And with likelihood scores computed for the codes in a code group, the code that has the maximum value is determined to be used in the group. With computer simulation, we show that the proposed method provides better detection probability and lower false alarm probability.

1. 서론

3GPP(Third Generation Partnership Project)의 3세대 이동통신 기술 표준인 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access) 시스템은 대표적인 이동통신 표준 시스템의 하나이다. WCDMA 하향 링

크 신호 분석에서 사용자 단말(user equipment)이 정상 동작하지 않을 때 문제점을 찾아내기 위하여 연결 정보를 사용자로부터 얻는 것은 오동작의 요소가 추가될 수 있기 때문에 바람직하지 않다. 따라서 신호 분석을 위해서는 별도의 장치에 연결하는 동작 없이도 가장 낮은 수준의 정보를 방송되는 신호로부터 정

※ 본 연구는 국방과학연구소 광대역저피탐 DSSS 신호 탐지 및 분석시험장치대 과제 수행 결과의 일부임.

♦ First Author : Hanyang University Industry-University Cooperation Foundation, cew09@hanyang.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Hanyang University Division of Electrical Engineering, dkim@hanyang.ac.kr, 정회원

* Hanyang University Department of Electronics and Communications Engineering, daekyo12@hanyang.ac.kr, 학생회원

** LIGNex1, bhmoons123@lignex1.com

*** Agency for Defense Development, bbolse@hanmail.net, 정회원

논문번호 : 201911-276-0-SE, Received October 31, 2019; Revised December 6, 2019; Accepted December 6, 2019

확히 추정하는 것이 매우 중요하다. [1]에서는 인접 기지국에서 오는 간섭 신호를 제거하기 위하여 해당 신호를 구성하는 사용자 코드를 검출하고 이를 바탕으로 간섭신호를 제거하는 방법에 대하여 논하였다. [2]에서는 OVFS(Orthogonal Variable Spreading Factor) 코드의 종류와 길이를 추정하기 위해 역 확산된 신호들의 주파수 오프셋(offset)을 검출하는 알고리즘을 제시하였다. [3]에서는 OVFS코드의 부모 코드가 전송되었을 때 자식 코드로 역 확산 시키면 수신 전력이 0에 가까워지는 횡수인 제로 크로싱 율 (zero crossing rate, ZCR) 을 활용하여 사용자들에 할당된 OVFS 코드를 검출하는 알고리즘을 제안 하였다. [4]에서는 WCDMA 상향 링크 신호 분석에서 수신 신호의 고유값(eigenvalue) 및 고유벡터(eigenvector)로 송신에 사용된 OVFS코드를 추정하는 방법을 제시 하였다. 이러한 OVFS 코드 검출 방법들은 개별 코드 검출에 집중하기 때문에 코드 간 상관관계를 활용하지 못한다는 한계를 지니고 있다.

이 논문에서는 OVFS 코드의 부모 자식 간 상관관계를 고려하여 코드 도메인 전력(code domain power, CDP)의 확률 분포와 이것을 바탕으로 얻은 가능도 점수(likelihood score)를 이용해 사용자들에게 할당된 OVFS 코드를 검출하는 방법을 제안하고 검출 성능을 실험한다. 제안된 방법은 CDP의 확률 분포를 이용하여 얻어진 임계값을 사용해 1차적으로 사용되었을 가능성이 높은 OVFS 코드를 선별 한다. 2차 검색에서는 이전 단계에서 검색된 코드들을 부모 자식 관계를 가진 코드들의 그룹으로 나누고, 각 그룹 내에서 가능도 점수를 계산하여 점수가 가장 높은 OVFS 코드를 최종적으로 검출한다.

II. 가능도 점수 분석을 통한 2단계 OVFS 코드 검출

2.1 WCDMA 하향링크 및 코드 도메인 전력

WCDMA 시스템은 코드들 간 서로 직교하는 성질을 가진 OVFS 코드를 채널화 코드로 이용한다. OVFS 코드는 확산인자(spreading factor, SF)에 따라 코드의 길이가 달라지지만 길이가 다른 코드들 간의 직교성(orthogonality)을 유지한다. 그리고 코드의 길이는 전송되는 데이터의 속도에 따라 변화한다. 낮은 데이터 속도에는 긴 코드가 대응되고 높은 데이터 속도에는 짧은 코드가 대응된다.

OVFS 코드는 코드 트리 (tree) 구조로 생성할 수 있다. 코드 트리의 구조는 하나의 부모코드(mother

code)에서 두 개의 자식코드(child code)로 뿔어나가는 구조이다. 자식코드의 길이는 부모코드에 비해 확산길이가 2배가 되는 특징을 가지고 있다. 따라서 확산 길이가 길어질수록 더 많은 코드를 선택할 수 있다. 또한 자식코드 간은 서로 직교하지만, 부모코드와 자식코드는 서로 직교하지 않는 구조이다. OVFS 코드를 생성시키는 방법은 다음과 같다. 부모코드를 이용하여 자식코드를 생성하게 된다. 위쪽 가지(upper branch)는 부모코드를 두 번 반복하여 생성하고 아래쪽 가지(lower branch)는 부모코드를 한 번은 그대로 사용하고 나머지는 한 번은 반전하여 사용한다.

WCDMA 하향링크는 10ms의 단위로 1개의 프레임을 구성하며 해당 프레임은 38400개의 칩(chip)으로 구성된다. 해당 신호는 개별의 사용자에게 전송하고자 하는 심볼(symbol)을 할당된 채널화 코드를 사용하여 확산 시키고, 이렇게 확산된 신호들의 선형 조합을 전송하게 된다. 먼저 사용자 i 에게 OVFS 코드의 확산인자와 코드 번호가 F_i, I_i 인 OVFS 코드 C_{F_i, I_i} 가 할당되어 있다고 가정 하자. 사용자 i 에게 전송하고자 하는 m 번째 심볼을 $x_i(m)$ 라고 하고 $E[x_i(m)^2] = P_T$ 를 심볼의 전력이라고 하자. 이때 전체 사용자 N 명에 대한 WCDMA 하향링크 신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$S(t) = \sum_{i=1}^N x_i(\lceil t/F_i \rceil) C_{F_i, I_i}(\text{mod}(t, F_i)), \quad (1)$$

여기서 t 는 WCDMA 하향링크 신호의 칩의 번호를 나타낸다. 수신기가 수신하는 신호는 다음과 같이 정리된다.

$$y(t) = S(t) + n(t), \quad (2)$$

여기서 $n(t)$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)으로 N_0 의 전력을 가진다.

수신 단에서 수신한 1프레임의 WCDMA 신호는 칩 (Chip) 길이가 38400인 복소 신호로 구성된다. CDP P_{F_i, I_i} 를 1 프레임 수신 신호를 OVFS 코드 C_{F_i, I_i} 로 역 확산하여 얻어진 심볼의 평균 전력이라고 정의 해 보자. 이 경우 역 확산된 심볼과 CDP는 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{x}_{F_i, I_i}(m) = \frac{1}{F} \sum_{t=F(m-1)+1}^{Fm} y(t) C_{F_i, I_i}(\text{mod}(t, F)), \quad (3)$$

$$P_{F,I} = \frac{F}{38400} \sum_{m=1}^F |\widehat{x}_{F,I}(m)|^2. \quad (4)$$

2.2 OVFS 코드 검출

그림 1은 OVFS 코드와 본 논문에서 제시하는 가 능도 점수를 통한 OVFS 코드 검출 과정을 담고 있다. 해당 그림은 위에서부터 SF값이 작은 코드가 배치되 며 각각의 코드들은 하단에 자식 코드를 2개씩 배치 되는 식으로 구성 되어 있다.

OVFS 코드 검출은 1차적으로 최초 검출(primary detection) 단계와 2차적으로 최대 가 능도 점수 검출 (maximum likelihood score) 단계로 나뉘게 된다. 최초 검출은 CDP 값들의 임계값을 바탕으로 사용되었 을 가 능성이 높은 OVFS 코드를 선별한다. 노란색으 로 표기된 사용되었을 가 능성이 높은 OVFS 코드는 데시전 으로 표시된 부모 자식 관계를 가지는 코드들 의 그룹으로 나뉘게 된다. 해당 그룹의 OVFS 코드들 은 동시에 사용 될 수 없는 관계를 가지며 이들 중 누 가 사용되었는지를 판단하기 위하여 2차 적으로 가 능도 점수를 측정한다. 부모 자식 관계를 가지는 코드들 은 공통된 자식 코드를 가지며 이를 그림에서 점선 안 에 위치한 붉은 색의 공통 자식 코드로 나타난다. 공 통 자식 코드들의 CDP 값들을 바탕으로 각각의 사용 가 능성이 있는 OVFS 코드들이 사용되었을 확률을 가 능도 점수로 정의 하며 해당 값이 가장 높은 코드를 최종적으로 검출한다. 해당 작업을 모든 부모 자식 관 계를 가지는 코드 집합에 대하여 반복하게 된다.

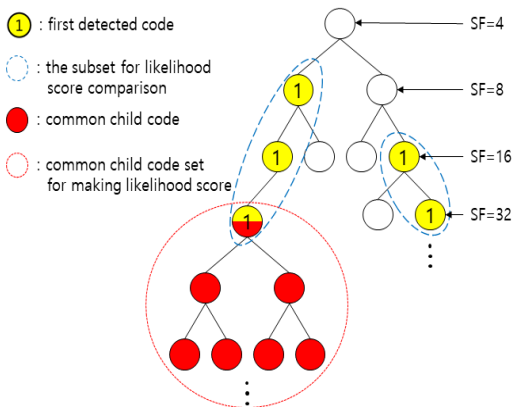


그림 1. OVFS 코드 검출 예시
Fig. 1. OVFS code detection example

2.3 1단계 검출(Primary detection)

최초 검출은 CDP의 확률 분포를 이용하여 얻어진 임

표 1. CDP값 $P_{F,I}$ 의 최소값 $\gamma_{F,\min}$ 과 최댓값 $\gamma_{F,\max}$ (dB)
Table 1. Minimum ($\gamma_{F,\min}$) and maximum($\gamma_{F,\max}$) of CDP ($P_{F,I}$)

SF	$\gamma_{F,\min}$	$\gamma_{F,\max}$	SF	$\gamma_{F,\min}$	$\gamma_{F,\min}$
512	0.0091	0.0144	32	0.0369	0.045
256	0.011	0.0165	16	0.669	0.0772
128	0.0146	0.0206	8	0.1275	0.1411
64	0.022	0.0287	4	0.2498	0.2683

계값을 사용해 사용 가 능성이 높은 OVFS 코드 1차적 으로 구분하여 검색 후보 OVFS 코드의 수를 줄이고, 부모 자식 관계를 가진 OVFS 코드들의 소 집합을 구 성한다. 그림 2는 $P_T/N_0=-20$ dB인 환경에서 서로 다 른 확산인자를 가진 OVFS 코드로 확산된 신호가 전 송 되었을 때 확산에 사용된 OVFS 코드로 다시 역 확산된 신호들의 CDP의 누적분포 함수를 나타낸다. 해당 그래프에 따르면 $C_{F=512,I}$ 가 사용되었을 경우 $P_{F=512,I}$ 가 0.0091 dB보다 작거나 0.0144 dB보다 큰 값을 가질 수 없다. $P_T/N_0=-20$ dB일 때 각각의 OVFS 코드가 사용되었을 때 나올 수 있는 $P_{F,I}$ 의 최 소값 $\gamma_{F,\min}$ 과 최댓값 $\gamma_{F,\max}$ 이라 정의 하고 SF에 따 른 해당 값은 표 1과 같이 정리된다. 그림 2의 결과를 바탕으로 $\gamma_{F,\min} < P_{F,I} < \gamma_{F,\max}$ 를 만족하지 않는 코 드 도메인 전력을 가진 OVFS 코드는 전송에 사용되 지 않았음을 식별 할 수 있다.

2.4 2단계 최대 가 능도 점수 (Maximum likelihood score) 검출

이전에 이야기 된 최초 검출을 진행 하더라도 여전 히 부모 자식 관계를 가진 OVFS 코드가 동시에 검출 될 수 있다. 하지만 OVFS 코드는 부모와 자식 코드가 동시에 사용 될 수 없으므로 최종적으로 사용된 OVFS 코드를 검출이 필요하다. 이를 위하여 우리는 최대 가 능도 점수 검출법을 제시한다. 여기서 가 능도 점수란 각각의 OVFS 코드가 사용 되었을 때 공통된 자식 코드로 역 확산한 CDP 값들이 나올 수 있는 확 률 값으로 정의한다. 이를 얻기 위해서 우선 최초 검출 에서 임계값을 벗어나지 않은 OVFS 코드들의 집합을 G_p 라고 하자. 다음으로 G_p 에 속한 코드 임의의 OVFS 코드 C_{F_p,I_p} 자신과 G_p 에 속한 모든 부모 코드의 집합 을 G_{F_p,I_p} 이라 정의 하면 다음과 같이 정리된다.

$$G_{F_p,I_p} = \{C_{F_p,I_p}, C_{F_p/2, \lfloor I_p/2 \rfloor}, C_{F_p/4, \lfloor I_p/4 \rfloor}, \dots\}. \quad (5)$$

이때 최초 검출에서 사용 되었을 경로 추정되는 OVFS 코드들 중 서로 부모 자식 관계를 가져서 동시에 사용 될 수 없는 OVFS 코드들은 G_{F_a, I_b} 가 적어도 하나 이상의 공통된 OVFS코드를 포함하게 된다. 이러한 OVFS 코드들의 집합 H_l 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$H_l = \{C_{F_a, I_a} | G_{F_a, I_a} \cup G_{F_b, I_b} \neq \emptyset\}. \quad (6)$$

H_l 에 속하는 OVFS 코드는 한 개 혹은 0개의 OVFS 코드가 실제로 사용 되었을 수 있다. 최대 가능도 점수 검출법은 각각의 H_l 에 속하는 OVFS 코드들의 가능도 점수를 비교하고 이들 중 가장 높은 가능도 점수를 가지는 OVFS 코드를 선택하는 작업을 모든 H_l 그룹별로 진행함으로써 최종적으로 사용된 OVFS 코드를 검출한다.

그림 2는 $P_T/N_0 = -20$ dB 환경에서 잡음만 전송될 경우, $C_{F=4, I=0}$ 로 확산된 신호만 전송되는 경우, $C_{F=8, I=0}$ 로 확산된 신호만 전송되는 경우 $P_{F=8, I=0}$ 의 분포를 나타낸다. 그림에는 나타나지는 않지만 $C_{F=8, I=0}$ 의 자식 코드로 확산된 신호를 전송한 경우에는 $C_{F=8, I=0}$ 로 확산된 신호만 전송된 경우와 같은 분포를 가진다. $P_{F, I}$ 는 F 보다 작은 확산인자를 가지는 모든 부모 OVFS 코드에 대하여 다른 분포를 가지게 된다. 따라서 H_l 에 속하는 OVFS 코드 중 가장 높은 확산인자를 가지는 코드의 모든 자식 코드 들은 실제로 사용된 OVFS 코드에 따라 서로 다른 분포들을

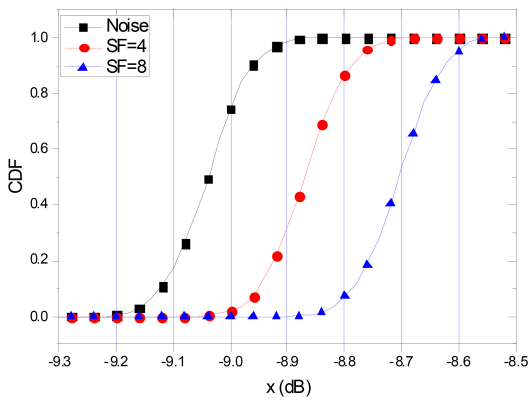


그림 2. $P_T/N_0 = -20$ dB 환경에서의 코드 도메인 전력의 누적분포함수
Fig. 2. Cumulative distribution function of code domain power in -20 dB Environment

가지게 된다는 것을 알 수 있다. H_l 에 속하는 OVFS 코드 중 가장 높은 확산인자를 가지는 코드와 해당 코드의 모든 자식 코드들의 집합을 T_l 이라고 가정할 때 H_l 에 속하는 임의의 코드 C_{F_a, I_a} 가 사용될 확률은 다음과 같이 정리된다.

$$Q_{F_a, I_a} = \prod_{\forall C_{F, I} \in T_l} f_{P_{F, I} | C_{F_a, I_a}}(x_{F, I}), \quad (7)$$

여기서 $x_{F, I}$ 는 $C_{F, I}$ 에 대한 측정된 코드 도메인 전력의 값이며 $f_{P_{F, I} | C_{F_a, I_a}}(x)$ 는 C_{F_a, I_a} 가 사용되었을 때 $P_{F, I}$ 의 확률 밀도 함수이다. 최종적으로 H_l 에 속하는 OVFS 코드 중 사용된 경로 추정되는 코드 \widehat{C}_{F_l, I_l} 는 다음과 같이 결정된다.

$$\widehat{C}_{F_l, I_l} = \operatorname{argmax}_{C_{F_a, I_a}} Q_{F_a, I_a}, \quad \text{s.t. } C_{F_a, I_a} \in H_l \quad (8)$$

위의 추정을 모든 H_l 에 대하여 반복하여 실제로 사용된 모든 OVFS 코드를 추정한다.

III. 모의실험 결과

실험에 사용된 OVFS 코드는 총 20개로 SF가 4, 8, 16인 코드는 각각 1개씩, 32, 64인 코드는 각각 2개씩, 128인 코드는 3개, 그리고 마지막으로 256, 512인 코드는 각각 5개씩임의 할당을 한다. 시뮬레이션 하는 P_T/N_0 대역은 $-20 \sim -12$ dB 이다. 각각의 P_T/N_0 별로 4000번 시뮬레이션을 시행한다. 성능 비교를 위해서 [3]의 영교차율을 이용하는 알고리즘을 결과에 포함하였으며 이를 위하여 영교차 여부를 판별하는 영교차 비율 임계값은 OVFS 코드 감지 확률을 최대화 하는 값들을 몬테 칼로 시뮬레이션 (Monte carlo simulation)로 획득 적용 하였다. CDP의 평균과 확률 분포를 이용하는 알고리즘에 해당되는 결과는 ML로 나타낸다. CDP와 영교차율을 이용하는 알고리즘의 결과는 ZCR로 표시한다.

그림 3은 P_T/N_0 에 따른 올바른 OVFS 코드의 감지 확률(detection probability)을 나타낸다. 감지 확률 이랑 올바르게 감지된 OVFS 코드와 실제 사용된 OVFS의 비율로 정의한다. SF가 16보다 큰 경우의

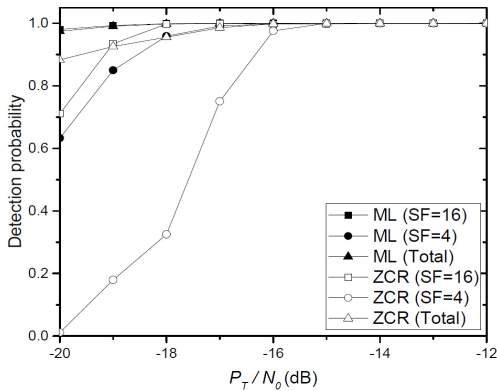


그림 3. P_T/N_0 에 따른 올바른 OVFSF 코드 감지 확률
Fig. 3. Detection probability of OVFSF code

감지 확률은 모든 P_T/N_0 구간에서 0.9보다 큰 값을 유지하여 비교에서 제외 하였다. SF가 16인 경우에는 -19 dB 이상에서 ML과 ZCR 모두 0.9 이상의 감지 확률을 보여준다. -20 dB에서 ML이 ZCR 대비 약 38% 향상된 감지 확률을 보여 준다. SF가 4인 경우에는 더욱더 두드러진 성능 차이를 보여준다. SF 4인 경우에는 P_T/N_0 -16 dB부터 ML과 ZCR 모두 0.97이상의 확률을 가진다. -20 dB에서 ML의 감지 확률이 ZCR 대비 약 51% 향상되었다. 사용된 모든 코드를 고려할 때 감지 확률은 -16 dB부터 ML과 ZCR 모두 0.99이상의 확률을 가진다. -20 dB에서 ML은 ZCR의 올바른 OVFSF 코드의 감지 확률 대비 10% 이상 향상된 감지 확률을 보여 준다.

그림 4는 P_T/N_0 에 따른 오인 경보 확률 (false alarm probability)을 나타낸다. 오인 경보 확률은 사

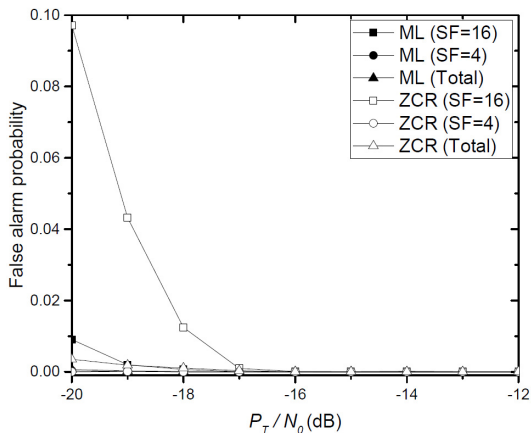


그림 4. P_T/N_0 에 따른 오류 검출 확률
Fig. 4. False alarm probability of OVFSF code

용되지 않은 OVFSF 코드 중 사용된 경로 검출된 OVFSF 코드의 비율이다. SF가 16보다 큰 경우의 오인 경보 확률은 모든 P_T/N_0 구간에서 0.01보다 큰 값을 유지하여 비교에서 제외 하였다. SF가 16 경우에는 -20 dB에서 0.01보다 작은 값을 가지고 ZCR 대비 1/10의 값을 가진다. SF가 4인 경우에는 -20에서 ML은 0.0005보다 작은 값을 보이고 있다. ZCR의 경우에는 어떠한 오류도 보이지 않는 결과를 보였다. 사용된 모든 코드를 고려할 때에는 -20 dB에서 제안된 ML이 ZCR 대비 81% 감소하는 결과를 보였다.

IV. 결론

본 연구에서 제안된 OVFSF 코드 검출 방식은 최초 검출을 통해 우선적으로 사용되지 않았을 OVFSF 코드를 선별하고, 선별된 OVFSF 코드들을 다시 부모 자식 간의 관계를 가진 집단으로 분류하여 이들의 자식 코드에 대한 CDP 값이 나올 수 있는 확률을 분석하여 사용된 OVFSF 코드를 선별하는 것으로 구성된다. 해당 OVFSF 코드 검출 방식은 $P_T/N_0 = -20$ 의 낮은 송신 전력 대비 잡음 비율 환경에서 감지확률이 평균 10.31% 상승하며 오류 검출 확률이 평균 81% 감소함을 보이고 있다. 따라서, 제안된 OVFSF 코드 검출 방식은 열악한 통신 환경이 주어지더라도 높은 블라인드 신호 탐지 성공률을 달성 할 수 있을 것으로 기대 된다.

References

- [1] D.-H. Woo, Y.-G. Yoo, and Y.-S. Byun, "Partial IC blind multiuser detection for CDMA systems," *J. KICS*, vol. 31, no. 2C, pp. 184-190, Feb. 2006.
- [2] E.-H. Lee, C.-B. Ha, and H.-K. Song, "Spreading code estimation algorithm based on code division multiplexing," in *Proc. KICS Summer Conf. 2015*, pp. 1232-1233, Jeju Island, Korea, Jun. 2015.
- [3] J. Jung, J. Lee, Y. Lim, and G. Joo, "Method for blindly estimating OVFSF code of WCDMA signal for signal analyzing equipment," Korea Patent No. 10-1757625, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Korea, 2016.
- [4] H. Gao, T. Zhang, S. Zhou, and D. He, "An

approach to blind estimation of OVSF sequence in weak WCDMA signals,” in *Proc. 2012 5th Int. Congress on Image and Sign. Process.*, pp. 1421-1425, Chongqing, China, Oct. 2012.

최 윤 성 (Yunsung Choi)



2010년 2월 : 한양대학교 전자
통신공학과(공학사)
2019년 2월 : 한양대학교 전자
통신공학과(공학박사)
<관심분야> 모바일 네트워크
[ORCID:0000-0002-7378-8711]

정 대 교 (Dae-Kyo Jeong)



2012년 2월 : 한양대학교 전자
통신공학과(공학사)
2020년 2월 : 한양대학교 전자
통신공학과(공학박사)
<관심분야> 국방통신, 무선보안
[ORCID:0000-0001-5977-4156]

문 병 호 (Byung-ho Mun)



1997년 2월 : 대구대학교 전자
공학과(공학사)
2019년 2월 : 한양대학교 통신
정보공학과(공학석사)
2020년 1월~현재 : LIG넥스원
전자전연구소 수석연구원
<관심분야> 무선통신, 통신전
자전, 신호정보

[ORCID:0000-0003-1208-200X]

최 원 석 (Won-seok Choe)



1999년 2월 : 고려대학교 전기
공학과(공학사)
2001년 2월 : 고려대학교 전기
공학과(공학석사)
2001년 3월~현재 : 국방과학연
구소 책임연구원
<관심분야> 무선통신, 레이더,
적외선, 레이저

[ORCID:0000-0002-2924-029X]

김 동 우 (Dongwoo Kim)



1994년 8월 : 한국과학기술원
(공학박사)
1994년 7월~2000년 2월 : 신
세기 통신 R&D센터 선임
과장
2000년 3월~현재 : 한양대학교
전자공학부 교수

<관심분야> 국방통신, 해양통신, 무선보안
[ORCID:0000-0001-5541-5738]