

# 1 차 동기 신호 시퀀스 요구 사항에 따른 최적 시퀀스 설계 방법

곽병재, 김진경, 조원철, 고영조, 이희수  
한국전자통신연구원

{bjkwak, jkkim, woncheol, koyj, heelee}@etri.re.kr

## Optimal Sequence Design Method Driven by Primary Synchronization Signal Sequence Requirements

Kwak, Byung-Jae; Kim, Jin Kyeong; Cho, Woncheol; Ko, Young Jo; Lee, Heesoo  
Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요약

본 논문은 차세대 이동통신 시스템을 위한 새로운 1차 동기 신호(PSS) 시퀀스 설계 방법으로 PSS 시퀀스 설계를 최적화 문제로 정의하여, 요구되는 PSS 시퀀스 특성을 반영하는 비용함수를 정의한 뒤 경사 하강 알고리즘을 통해 시퀀스를 반복 업데이트함으로 비용함수를 최소화하는 최적 PSS 시퀀스를 도출하는 방법을 제시하고 성능을 확인한다.

### I. 서론

이동 단말은 네트워크에 접속하기 위해서 우선적으로 1차 동기 신호(PSS: Primary Synchronization Signal) 시퀀스를 탐색한다. PSS 시퀀스 중 하나를 발견하게 되면 단말은 시스템 타이밍 정보를 획득하게 된다. PSS는 또한 핸드오버 과정에서 핸드오버 할 목표 셀을 탐색할 때에도 사용된다. PSS는 이와 같이 시스템 타이밍 획득하고, 2차 동기화 신호와 결합하여 셀 ID를 획득하는 등 가장 기본적인 기능을 수행하는데 사용되기 때문에 PSS의 성능이 전체 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 PSS는 다양한 이동통신 채널 환경에서도 검출이 가능하도록 설계되어야 한다[1].

기존에는 PSS 시퀀스 설계는 다음 단계를 거쳐 이루어졌다:

1. 시스템 요구사항 수집
2. 요구사항을 (일부) 만족하는 수학적 시퀀스 선택
3. 시퀀스 컨디셔닝 수행
4. 얻어진 동기화 시퀀스를 테스트하고, 필요 시 2 또는 3 단계부터 반복

단계 3의 "시퀀스 컨디셔닝"에는 시퀀스 확장(예: 0 추가), 평처링, 심볼 매핑, 정규화, 윈도잉, 등 PSS 시퀀스로서 요구되는 특성을 보다 잘 만족시키기 위한 기타 변환이 포함된다.

그러나 수학적 시퀀스는 동기화 목적으로 설계된 것이 아니기 때문에, 동기화 시퀀스로서 유용한 특성을 일부 가지고 있더라도 일반적으로 고성능 동기화 시퀀스가 갖추어야 할 특성이 갖추고 있지 못하다. 더불어 수학적 시퀀스는 각각 고유의 조건을 만족해야 하기 때문에 그대로 사용하는 것이 불가능한 경우가 많다. 예를 들어 Zadoff-Chu 시퀀스는 길이가 소수가 아닐 경우 Zadoff-Chu 시퀀스가 가지는 유용한 장점을 상실한다[2]. 그리고  $m$ -시퀀스의 길이는 정수  $m$ 에 대해 항상  $2^m - 1$ 로 주어진다[3]. 이러한 제한 조건을 극복하기 위한 대표적인 우회 방법이 제로 패딩 또는 평처링이다.

본 논문에서는 PSS 시퀀스를 설계하는 새로운 방법을 제안한다. 이를 위해 먼저 PSS 시퀀스가 만족해야 하는 요구사항을 도출하고, 탐색하려는 PSS 시퀀스가 이를 만족하도록 비용함수를 정의하고, 정의된 비용함수를 최소화하는 최적 PSS 시퀀스를 찾는다. 다음으로 이렇게 해서 얻어진 최적화된 PSS 시퀀스가 기존의 설계 방법을 이용하여 얻은 PSS 시퀀스에 비해 월등한 성능임을 확인한다.

### II. 제안하는 PSS 시퀀스 설계 방법

본 논문에서 제안하는 PSS 시퀀스 설계 방법은 다음의 단계를 거쳐 이루어진다.

1. PSS 시퀀스의 요구사항 수집
2. 요구사항이 반영된 비용함수 정의
3. 경사 하강(Gradient descent) 알고리즘을 사용하여 비용함수를 최소화하는 시퀀스 탐색
4. 얻어진 시퀀스의 특성을 시험하고 필요 시 2 또는 3 단계부터 반복

#### 가. 요구되는 PSS 시퀀스의 특성

설계되는 PSS 시퀀스가 효과적인 동기화 시퀀스로 자리매김하기 위해서는 다양한 요구 사항을 만족시켜야 하지만 본 논문에서는 특히 다음의 세가지 특성을 만족시키는 PSS 시퀀스를 설계하는 방법을 도출하고자 한다.

- 비주기적(Aperiodic) 자기상관의 측엽(Sidelobe) 값이 작아야 한다.
- 서로 다른 두개의 시퀀스 간의 비주기적 교차상관 값이 작아야 한다.
- 평탄한 스펙트럼(Spectrally flat)을 가져야 한다.

처음 두개의 특성은 신뢰성 있는 초기 셀 검색 과정에 필수적이며, 세번째 특성은 이동통신 채널과 같은 다중 경로 채널을 통해 전송되는 신호의 경우 주파수 선택적 페이딩의 영향을 완화하기 위해 필요한 매우 바람직한 특성이다. 여기서 주기적 상관 특성이 아닌 비주기적 상관의 특성을 고려하는 이유는 단말기가 아직 시스템 타이밍을 획득하지 못한 상태이며, 따라서 OFDM 심볼의

위치를 알 수 없기 때문에 시간 영역에서 탭 지연 선 필터(Tapped-delay-line filter)를 사용하여 비주기적 상관관을 계산해야 하기 때문이다.

#### 나. 비용함수 정의

$P = 3$ 을 PSS 시퀀스의 개수이며,  $X_i[k]$ ,  $i = 0, 1, \dots, P-1$ 를 길이가  $N$ 인 주파수 영역에서의 PSS 시퀀스라 하고,  $x_i[n]$ ,  $i = 0, 1, \dots, P-1$ 를  $X_i[k]$ 의 IDFT 라하면, PSS 시퀀스에 대한 요구사항으로부터 비용함수를 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$J = \sum_{i=0}^{P-1} \sum_{\substack{n=-(N-1) \\ n \neq 0}}^{N-1} |r_{ii}[n]|^4 + \sum_{i=0}^{P-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{P-1} \sum_{\substack{n=-(N-1) \\ n \neq 0}}^{N-1} |r_{ij}[n]|^4 \quad (1)$$

이때,  $r_{ii}[n]$ 와  $r_{ij}[n]$ 는 각각  $x_i[n]$ 의 비주기적 자기상관 함수 및 교차상관 함수이다.

#### 다. 최적 PSS 시퀀스 탐색

최적화된 PSS 시퀀스는 경사 하강 알고리즘을 이용하여 식 (1)의 비용함수를 최소화하는  $X_i[k]$ 를 탐색하여 구할 수 있다. 식 (1)의 경사 벡터(Gradient vector)는 식 (1)을  $X_i[k]$ 에 대하여 미분하여 구할 수 있다[4]:

$$\begin{aligned} \nabla J = & 4 \sum_{\substack{n=-(N-1) \\ n \neq 0}}^{N-1} \times \begin{pmatrix} X_i^H Q_n^H X_i X_i^H Q_n X_i \\ Q_n^H X_i X_i^H Q_n X_i \\ + Q_n X_i X_i^H Q_n^H X_i \end{pmatrix} \\ & + 4 \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{P-1} \sum_{\substack{n=-(N-1) \\ n \neq 0}}^{N-1} (X_i^H Q_n^H X_j X_j^H Q_n X_i) (Q_n^H X_j X_j^H Q_n X_i) \end{aligned} \quad (2)$$

이때,  $Q_n = (W^{-1})^H Z^T P_{2N}^n Z W^{-1}$ 로 정의되며,  $W^{-1}$ 는  $(N \times N)$  IDFT 행렬,  $Z$ 와  $P_{2N}^n$ 는 각각 다음과 같이 정의되는  $(2N \times N)$  제로 패딩 행렬과  $(2N \times 2N)$  치환(Permutation) 행렬이다:

$$Z = \begin{bmatrix} I_N \\ 0_N \end{bmatrix}, \quad P_{2N}^n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^n$$

식 (2)로부터 다음과 같이 두 단계로 이루어진 경사 하강 알고리즘을 정의한다:

$$\text{Step 1: } \mathbf{X}_i := \mathbf{X}_i - \mu \nabla J \quad (3)$$

$$\text{Step 2: } X_i[k] := X_i[k] / |X_i[k]| \quad (4)$$

식 (3)에서  $\mu$ 는 수렴속도를 조절하는 경험치 매개 변수로 본 논문에서는  $\mu = 0.1$ 을 사용하였다. 식 (4)는 PSS 시퀀스의 요구사항 중 세번째 요구사항인 평탄한 주파수 특성을 만족시키기 위한 것이다.

### III. 최적 PSS 시퀀스의 성능

그림 1은 최적화 과정에서 얻어진 손실 곡선이며, 약 300,000 회의 반복 후 수렴하고 있음을 보여준다.

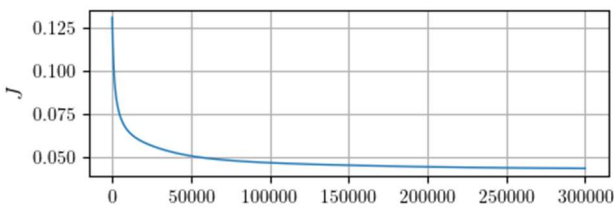


그림 1. 손실 곡선: 비용 vs. 반복 횟수

표 1. 경사 하강법을 통한 PSS 시퀀스의 비용 변화

Random-phase PSS	Optimized PSS
J = 0.1309538	J = 0.04360488

그림 2는 최적 PSS 시퀀스의 비주기적 자기 및 교차 상관특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최적 PSS 시퀀스는 스파이크가 없고 값이 균등하게 작은 우수한 상관 특성을 가지고 있다.

표 1을 통해 손실 곡선이 초기 값  $J = 0.1309538$ 로 시작하여 최적화 후 최종 값  $J = 0.04360488$ 로 수렴함을 확인할 수 있다.

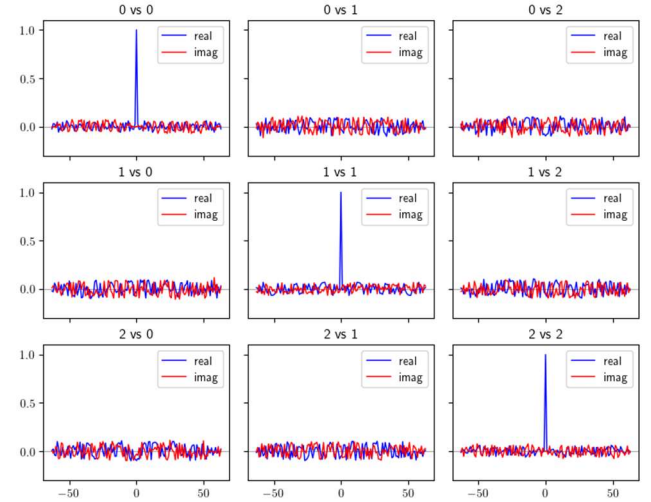


그림 2. 최적 PSS 시퀀스의 비주기적 상관특성

### IV. 결론

본 논문에서는 PSS 시퀀스가 요구하는 특성을 반영한 비용 함수를 정의하고 이를 최소화하는 경사 하강 알고리즘을 이용하는 최적 PSS 시퀀스 설계 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여 우수한 비주기적 상관 특성을 가지는 PSS 시퀀스를 설계하였다. 본 논문에서 제안한 시퀀스 설계 방법은 시퀀스가 만족하여야 할 요구사항을 설계 과정에 명시적으로 이용하는 새로운 방법으로, 실제 PSS 시퀀스의 요구사항이 반영되었기 때문에 질적으로도 우수한 성능을 보장하는 시퀀스 설계 방식이다.

향후 제안한 시퀀스 설계 방식을 활용하여 다음 세대 이동통신 시스템을 위한 PSS 시퀀스를 설계할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00746, Tbps 무선통신 기술 개발 [50%]; No. 2021-0-00972, 지능형 무선 액세스 기술 개발 [50%])

### 참고 문헌

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Elsevier Science, 2018.
- [2] D. Chu, "Polyphase codes with good periodic correlation properties (corresp.)," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 18, no. 4, pp. 531-532, 1972.
- [3] S. W. Golomb, Shift Register Sequences, 3rd ed. World Scientific, 2017.
- [4] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th ed. Prentice Hall, 2002.