



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0094904  
(43) 공개일자 2021년07월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04L 27/26 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H04L 27/2657 (2013.01)

H04L 27/265 (2021.01)

(21) 출원번호 10-2020-0008727

(22) 출원일자 2020년01월22일

심사청구일자 2020년01월22일

(71) 출원인

서강대학교산학협력단

서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)

(72) 발명자

김영록

서울특별시 마포구 월드컵북로 47 길 37 102동 602호(상암동, 카이저팰리스클래식)

김대현

경기도 수원시 팔달구 창룡대로 194 주공4단지아파트 401동 909호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

장완수

전체 청구항 수 : 총 24 항

(54) 발명의 명칭 주파수 오프셋 추정 방법 및 장치

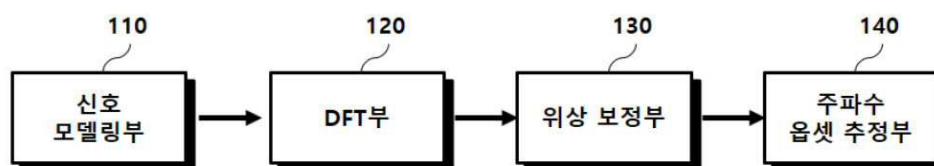
(57) 요약

주파수 오프셋 추정 방법 및 장치를 개시한다.

본 실시예는 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 신호에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리한 신호를 기반으로 위상을 보정하고 이를 통해 주파수 오프셋을 추정하여 가장 이상적인 경우 CRB(Cramer-Rao Bound)와 유사해 지는 결과를 갖도록 하는 주파수 오프셋 추정 방법 및 장치를 제공한다.

대표도 - 도1

100



(52) CPC특허분류

**H04L 27/2695** (2021.01)

(72) 발명자

**김중윤**

광주광역시 북구 양일로 52, 204-606

**유한봉**

서울특별시 강동구 상암로 11, 선사현대아파트  
104동 601호

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 신호 모델링부;

상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 DFT부;

상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 위상 보정부; 및

상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 주파수 오프셋 추정부

를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 오프셋 추정부는

상기 위상 보정 신호의 DFT 최대값의 인덱스(Index)인  $k_p$ 를 찾고, 상기 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서의 DFT 값  $X_0$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 -1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p-1$ 에서의 DFT 값  $X_{-1}$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 +1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p+1$ 에서의 DFT 값  $X_1$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수( $N$ ), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수( $m$ ),  $d_p(m)$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 4

제3항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는,

$Y_p(m)$ ,  $Y_p(-m)$ 을 기반으로 상기  $d_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 5

제3항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는,

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$Y_p(m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta - m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학적식으로 상기  $Y_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 6

제3항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는,

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$Y_p(-m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta + m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학적식으로 상기  $Y_p(-m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 7

제3항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는,

$$\frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)}$$

의 수학적식으로 상기  $d_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 8

제1항에 있어서,

상기 위상 보정부는,

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학적식으로 상기 DFT 값에 위상을 보정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 9

시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호(x[n])를 출력하는 신호 모델링부;

상기 샘플링 신호(x[n])를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호(X[k])를 출력하는 DFT부; 및

상기 DFT 신호(X[k])를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 위상 보정부  
를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 10

제9항에 있어서,

상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 주파수 오프셋 추정부를 추가로 포함하며,

상기 오프셋 추정부는 상기 위상 보정 신호의 DFT 최대값의 인덱스(Index)인  $k_p$ 를 찾고, 상기 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서의 DFT 값  $X_0$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 -1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p-1$ 에서의 DFT 값  $X_{-1}$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 +1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p+1$ 에서의 DFT 값  $X_1$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 11

제10항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m),  $d_p(m)$  을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

#### 청구항 12

제11항에 있어서,

상기 주파수 오프셋 추정부는,

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N),  $\tan\left(\frac{\pi}{N}m\right)$ 의 치환인  $T_m$ ,  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$ 의 치환인  $C_m$ , 상기  $d_p(m)$ 의 제곱인  $d_p^2(m)$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정

하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치.

### 청구항 13

시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 과정;

상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 과정;

상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 과정; 및

상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 과정

을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

### 청구항 14

제13항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

상기 위상 보정 신호의 DFT 최대값의 인덱스(Index)인  $k_p$ 를 찾고, 상기 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서의 DFT 값  $X_0$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 -1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_{p-1}$ 에서의 DFT 값  $X_{-1}$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 +1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_{p+1}$ 에서의 DFT 값  $X_1$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

### 청구항 15

제14항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수( $N$ ), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수( $m$ ),  $d_p(m)$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

### 청구항 16

제15항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

$Y_p(m)$ ,  $Y_p(-m)$ 을 기반으로 상기  $d_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

### 청구항 17

제15항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수( $N$ ), DFT 최대값의 인덱스

( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$Y_p(m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학식으로 상기  $Y_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

#### 청구항 18

제15항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스

( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$Y_p(-m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta+m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학식으로 상기  $Y_p(-m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

#### 청구항 19

제15항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

$$\frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)}$$

의 수학식으로 상기  $d_p(m)$ 을 산출하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

#### 청구항 20

제14항에 있어서,

상기 위상을 보정하는 과정은,

주파수 오프셋( $\delta$ ), 상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수(N), DFT 최대값의 인덱스

( $k_p$ )를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수(m)를 기반으로

$$e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

의 수학식으로 상기 DFT 값에 위상을 보정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

## 청구항 21

시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 과정;

상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 과정; 및

상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 과정

을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

## 청구항 22

제21항에 있어서,

상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 과정을 추가로 포함하며,

상기 주파수 오프셋( $\hat{\delta}_P(m)$ )을 추정하는 과정은

상기 위상 보정 신호의 DFT 최대값의 인덱스(Index)인  $k_p$ 를 찾고, 상기 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서의 DFT 값  $X_0$ , DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 -1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p-1$ 에서의 DFT 값  $X_{-1}$ , DFT 최대값의 인덱스

$k_p$ 에서 +1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p+1$ 에서의 DFT 값  $X_1$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋( $\hat{\delta}_P(m)$ )을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

## 청구항 23

제22항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수( $N$ ), DFT 최대값의 인덱스( $k_p$ )를 기준으로 인

덱스 차이를 표현하기 위한 변수( $m$ ),  $d_P(m)$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

## 청구항 24

제23항에 있어서,

상기 주파수 오프셋을 추정하는 과정은

상기 위상 보정 신호의 한 주기 안에 존재하는 DFT 포인트 개수( $N$ ),  $\tan\left(\frac{\pi}{N}m\right)$ 의 치환인  $T_m$ ,  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$ 의 치환인  $C_m$ , 상기  $d_P(m)$ 의 제곱인  $d_P^2(m)$ 을 기반으로 상기 주파수 오프셋을 추정하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 실시예는 주파수 오프셋 추정 방법 및 장치에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 이하에 기술되는 내용은 단순히 본 실시예와 관련되는 배경 정보만을 제공할 뿐 종래기술을 구성하는 것이 아니다.

[0003] 레이더 시스템은 신호를 방사하여 표적을 맞고 돌아온 수신 신호를 통해 표적의 거리, 속도, 각도 등의 정보를 파악할 수 있다. 표적의 거리와 속도에 따라 수신 신호의 주파수가 결정된다. 수신 신호의 주파수를 계산하기 위해 DFT(Discrete Fourier Transform)를 하며, DFT 주파수 분해능 한계의 의해 주파수 오프셋이 발생하게 된다. 주파수 오프셋이 발생할 경우, 표적의 정확한 거리와 속도 정보를 추정할 수 없다는 문제가 있다.

[0004] 종래의 주파수 오프셋 추정 방법으로 zero padding을 통한 DFT, zoom DFT, chirp FT등의 방법이 있다. 주파수 분해능을 높여 주파수 오프셋의 범위를 줄이고, 이를 통해 주파수 오프셋 추정 성능을 높이는 방법이다. 결국 주파수 오프셋 추정 성능을 높이기 위해서는 높은 주파수 분해능이 필요하며, 이에 따라 복잡도가 크게 높아지는 문제점이 있다. 이런 종래의 방식은 제한적인 리소스 안에서 구현하여야 하는 시스템의 경우에는 적합하지 않다는 문제가 있다.

[0005] 또 다른 종래의 주파수 오프셋 추정 방법으로, DFT의 최대값과 그 좌우 값을 통하여 오프셋을 직접 계산하는 방법이 있다. 주파수 분해능을 높여 주파수 오프셋 추정 성능을 높이는 방법과 다르게, 주파수 오프셋을 직접 계산하기 때문에 추정 성능의 한계가 없으며 복잡도 역시 낮다. 그러므로, 제한적인 리소스 안에서 구현하는 시스템의 경우에 주파수 오프셋을 직접 계산하는 방법이 적합하다.

[0006] 주파수 오프셋을 직접 계산하는 방법의 경우 DFT 최대값과 그 좌우 값은 복소수이므로, 이로 인해 발생하는 위상 성분에 대한 보정이 필요하다. 하지만 종래의 오프셋을 직접 계산하는 방법들은 DFT 값에 대한 위상 보정을 고려하지 않았으며, 이로 인해 주파수 오프셋 추정 성능의 열화를 발생시키는 문제가 있다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0007] 본 실시예는 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 신호에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리한 신호를 기반으로 위상을 보정하고 이를 통해 주파수 오프셋을 추정하여 가장 이상적인 경우 CRB(Cramer-Rao Bound)와 유사해 지는 결과를 갖도록 하는 주파수 오프셋 추정 방법 및 장치를 제공하는 데 목적이 있다.

#### 과제의 해결 수단

[0008] 본 실시예의 일 측면에 의하면, 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 신호 모델링부; 상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 DFT부; 상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 위상 보정부; 및 상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 주파수 오프셋 추정부를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치를 제공한다.

[0009] 본 실시예의 다른 측면에 의하면, 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 신호 모델링부; 상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 DFT부; 및 상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 위상 보정부를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 장치를 제공한다.

[0010] 본 실시예의 다른 측면에 의하면, 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 과정;

상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 과정; 상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 과정; 및 상기 위상 보정 신호를 기반으로 주파수 오프셋을 추정하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법을 제공한다.

[0011] 본 실시예의 다른 측면에 의하면, 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력하는 과정;

상기 샘플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력하는 과정; 및 상기 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정 신호를 출력하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 오프셋 추정 방법을 제공한다.

### 발명의 효과

[0012] 이상에서 설명한 바와 같이 본 실시예에 의하면 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 신호에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리한 신호를 기반으로 위상을 보정하고 이를 통해 주파수 오프셋을 추정하여 가장 이상적인 경우 CRB(Cramer-Rao Bound)와 유사해 지는 결과를 갖도록 하는 효과가 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0013] 도 1은 본 실시예에 따른 주파수 오프셋 추정 장치를 개략적으로 나타낸 블록 구성도이다.

도 2는 본 실시예에 따른 신호의 주파수와 오프셋을 나타낸 도면이다.

도 3은 본 실시예에 따른 알고리즘별 RMSE( $N = 4$ ,  $SNR = 20dB$ )를 나타낸 도면이다.

도 4는 본 실시예에 따른 알고리즘별 RMSE( $N = 8$ ,  $SNR = 20dB$ )를 나타낸 도면이다.

도 5는 본 실시예에 따른 알고리즘별 RMSE( $N = 12$ ,  $SNR = 20dB$ )를 나타낸 도면이다.

도 6은 본 실시예에 따른 알고리즘별 RMSE( $N = 16$ ,  $SNR = 20dB$ )를 나타낸 도면이다.

도 7은 본 실시예에 따른 알고리즘별 worst RMSE( $N = 4$ )를 나타낸 도면이다.

도 8은 본 실시예에 따른 알고리즘별 worst RMSE( $N = 8$ )를 나타낸 도면이다.

도 9는 본 실시예에 따른 알고리즘별 worst RMSE( $N = 12$ )를 나타낸 도면이다.

도 10은 본 실시예에 따른 알고리즘별 worst RMSE( $N = 16$ )를 나타낸 도면이다.

도 11은 알고리즘 별 worst RMSE 성능이 0.04에 도달하기 위한 SNR을 나타낸 도면이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0014] 이하, 본 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0015] 도 1은 본 실시예에 따른 주파수 오프셋 추정 장치를 개략적으로 나타낸 블록 구성도이다.

[0016] 본 실시예에 따른 주파수 오프셋 추정 장치(100)는 신호 모델링부(110), DFT 부(120), 위상 보정부(130), 주파수 오프셋 추정부(140)를 포함한다. 주파수 오프셋 추정 장치(100)에 포함된 구성요소는 반드시 이에 한정되는 것은 아니다.

[0017] 주파수 오프셋 추정 장치(100)에 포함된 각 구성요소는 장치 내부의 소프트웨어적인 모듈 또는 하드웨어적인 모듈을 연결하는 통신 경로에 연결되어 상호 간에 유기적으로 동작할 수 있다. 이러한 구성요소는 하나 이상의 통신 버스 또는 신호선을 이용하여 통신한다.

[0018] 도 1에 도시된 주파수 오프셋 추정 장치(100)의 각 구성요소는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 소프트웨어적인 모듈, 하드웨어적인 모듈 또는 소프트웨어와 하드웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0019] 신호 모델링부(110)는 시간축 신호를 샘플링 주기로 샘플링한 샘플링 신호( $x[n]$ )를 출력한다. DFT 부(120)는 샘플링

플링 신호( $x[n]$ )를 주파수 분해능( $f_T$ )을 이용한 각 주파수 분해능( $\omega_T$ ) 간격으로 샘플링한 DFT(Discrete Fourier Transform) 처리를 수행한 DFT 신호( $X[k]$ )를 출력한다.

[0020] 위상 보정부(130)는 DFT 신호( $X[k]$ )를 기반으로 위상을 보정한 위상 보정된 DFT 신호(위상 보정 신호)를 출력한다. 주파수 오프셋 추정부(140)는 위상 보정된 DFT 신호(위상 보정 신호)를 기반으로 주파수 오프셋을 추정한다.

[0021] 이하, 신호 모델링부(110)의 신호 모델링을 처리하는 방식에 대해 설명한다.

[0022] 단일 주파수 신호  $x(t) = e^{j\omega_0 t}$  을 샘플링 주파수  $f_s = 1/T_s$  로 샘플링한 discrete-time 신호  $x[n]$ 은 [수학식1]과 같이 표현된다.

### 수학식 1

$$x[n] = e^{j\omega_0 T_s n} = e^{j\tilde{\omega}_0 n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

[0023]

[0024]  $x[n]$ 은 시간 축 신호를  $T_s = 1/f_s$  주기로 샘플링한 신호를 의미한다.  $x[n]$ 은  $0 \sim T$  ( $T = (N-1)T_s$ ) 시간 동안의 신호이며  $N$ 개의 샘플을 갖는다.

[0025]  $\omega_0$  은 신호의 각 주파수( $\omega_0 = 2\pi f_0$ )를 의미한다.  $f_0$  은 신호의 주파수를 의미한다.  $T_s$ 는 샘플링 주기를 의미한다.  $\tilde{\omega}$  는 각 주파수  $\omega$  를  $f_s$  로 정규화한 각 주파수( $\tilde{\omega} = 2\pi f / f_s$ )를 의미한다.  $n$ 은 샘플링된 시간 축 신호의 인덱스(예컨대, 시간 축 신호의  $n$ 번째 샘플)를 의미한다.  $N$ 은  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수를 의미한다.

[0026] 여기서,  $N$ ,  $T_s$ ,  $\omega_0$ ,  $\tilde{\omega}_0 = \omega_0 T_s$  는 각각 샘플 개수, 샘플 주기, 신호 각 주파수, 정규화 각 주파수이다. [수학식1] 신호의 DTFT(Discrete-Time Fourier Transform)는 [수학식2]와 같이 표현된다.

### 수학식 2

$$X(e^{j\tilde{\omega}}) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\tilde{\omega}_0 n} \cdot e^{-j\tilde{\omega} n} = \exp\left(j \frac{(N-1)}{2} (\tilde{\omega}_0 - \tilde{\omega})\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{N}{2} (\tilde{\omega}_0 - \tilde{\omega})\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} (\tilde{\omega}_0 - \tilde{\omega})\right)}$$

[0027]

[0028]  $X(e^{j\tilde{\omega}})$  는  $x[n]$ 의 DTFT를 의미한다. 샘플링  $x[n]$ 된 시간 축 신호  $x[n]$ 을 주파수에 관한식으로 변환한 것을 의미한다. 주파수 축에서 샘플링 주파수  $f_s$  마다 반복되는 값을 갖는다.

$$X(e^{j\tilde{\omega}}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\tilde{\omega}n}$$

[0029]  $\tilde{\omega}$  는 각 주파수  $\omega$  를  $f_s$  로 정규화한 각 주파수 ( $\tilde{\omega} = 2\pi f / f_s$ )를 의미한다.  $\tilde{\omega}_0$ 는 신호의 각 주파수  $\omega_0$ 를  $f_s$ 로 정규화한 값 ( $\tilde{\omega}_0 = 2\pi f_0 / f_s$ )을 의미한다. N는 x[n] 신호의 전체 샘플 개수를 의미한다.

[0030] 이때, 정규화된 주파수인  $\tilde{\omega}$ ,  $\tilde{f}_0$ 는 [수학식 3]과 같이 표현된다.

### 수학식 3

$$\tilde{\omega} = \omega T_s = 2\pi \frac{\omega}{\omega_s}, \quad \tilde{f}_0 = \frac{f_0}{f_s} = f_0 T_s$$

[0032]  $\tilde{\omega}$  는 각 주파수  $\omega$  를  $f_s$  로 정규화한 각 주파수 ( $\tilde{\omega} = 2\pi f / f_s$ )를 의미한다.  $\omega$ 는 각 주파수 ( $\omega = 2\pi f$ )를 의미한다.  $T_s$ 는 샘플링 주기를 의미한다.

[0033]  $\omega_s$ 는 샘플링 각 주파수 ( $\omega_s = 2\pi f_s$ )를 의미한다.  $\tilde{f}_0$ 는 신호의 주파수  $f_0$ 를  $f_s$ 로 정규화한 값 ( $\tilde{f}_0 = f_0 / f_s$ )을 의미한다.  $f_0$ 는 신호의 주파수를 의미한다.  $f_s$ 는 샘플링 주파수를 의미한다.

[0034] 이하, DFT 부(120)에서 DFT를 수행하는 방식에 대해 설명한다.

[0035] [수학식2]의 DTFT를 다시  $f_T = F_s / N$ 을 이용한  $\omega_T = 2\pi f_T$  간격으로 샘플링하면 [수학식 4]와 같이 DFT(Discrete Fourier Transform)된다.

[0036] 이때,  $k=0,1,\dots,N-1$ 이다.

### 수학식 4

$$X[k] = X(e^{j\omega T_s}) \Big|_{\omega=k\omega_T} = \exp\left(j\pi\left((N-1)\tilde{f}_0 + \frac{k}{N}\right)\right) \cdot \frac{\sin(\pi N \cdot \tilde{f}_0)}{\sin\left(\pi \cdot \left(\tilde{f}_0 - \frac{k}{N}\right)\right)}$$

[0038]  $X[k]$ 는 x[n]의 DFT를 의미한다.  $X[k]$ 는 샘플링된 시간 축 신호 x[n]을 주파수 축 신호로 변환한 것을 의미한다. 즉,  $X[k]$ 은  $X(e^{j\tilde{\omega}})$ 을 주파수 축에서  $f_T = f_s / N$  주기로 샘플링하여 나타낸 것을 의

미한다.  $X[k]$  은  $N$  point마다 반복되는 값( $X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ )을 갖는다.

[0039]  $\omega$  는 각 주파수( $\omega = 2\pi f$ )를 의미한다.  $T_s$  는 샘플링 주기를 의미한다.

[0040]  $k$  는 DFT한 주파수 축 신호의 인덱스(예컨대, DFT한 주파수 축 신호의  $k$ 번째 샘플)를 의미한다.  $\omega_T$  는 각 주파수 분해능( $\omega_T = \omega_s / N$ )을 의미한다.

[0041]  $\tilde{f}_0$  는 신호의 주파수  $f_0$  를  $f_s$  로 정규화한 값( $\tilde{f}_0 = f_0 / f_s$ )을 의미한다.  $N$  는  $X[k]$  의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0042] DFT 최대값의 인덱스(Index)가  $k_p$  일 경우 추정 주파수는  $k_p \cdot f_T$ 이며, 실제 주파수와의 차이를  $\Delta f = f_0 - k_p \cdot f_T$  로 정의하고 주파수 오프셋이라고 한다. 주파수 오프셋을  $f_T$ 로 정규화하여  $\delta = \Delta f / f_T$  라 하며, 오프셋의 범위는  $|\delta| \leq 0.5$ 이다. 신호의 주파수와 오프셋의 관계는 [수학식5]와 같이 표현할 수 있으며, 도 2에 도시된 바와 같다.

#### 수학식 5

[0043]  $f_0 = (k_p + \delta) \cdot f_T$ ,  $\tilde{f}_0 = (k_p + \delta) / N$

[0044]  $f_0$  는 신호의 주파수를 의미한다.  $k_p$  는 DFT 최대값의 인덱스를 의미한다.  $\delta$  는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $f_T$  는 주파수 분해능을 의미한다.  $f_T$  는 주파수 축에서의 샘플링 주기( $f_T = f_s / N$ )를 의미한다.  $\tilde{f}_0$  는 신호의 주파수  $f_0$  를  $f_s$  로 정규화한 값( $\tilde{f}_0 = f_0 / f_s$ )을 의미한다.  $N$  는  $X[k]$  의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0045] [수학식4]를 [수학식5]를 통해 정리하면 [수학식6]과 같다.

#### 수학식 6

[0046] 
$$X_m = X[\text{mod}_N(k_p + m)] = \frac{\sin(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta - m)\right)} \exp\left(j\frac{\pi}{N}m + j\frac{\pi(N-1)}{N}\delta\right)$$

[0047]  $X_m$  는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$  에서 인덱스가  $m$ 만큼 차이 나는 DFT point의 값을 의미(예컨대,  $X_m = X[k_p + m]$  을 의미)한다.  $X$  는 대괄호 안의 인덱스에 맞는 DFT 결과값을 의미한다.  $X[k_p + m]$  는  $k_p + m$ 번째 DFT point의 값을 의미한다.

[0048]  $\text{mod}_N(x)$  는  $x$ 를  $N$ 으로 나눈 나머지를 의미한다. 여기서,  $X[k]$  는  $N$  point 마다 반복되는 값을 가지므로  $\dots = X[k - 2N] = X[k - N] = X[k] = X[k + N] = X[k + 2N] = \dots$  임을 의미하기 때문에  $\text{mod}_N(x)$  가 사용되었다.

[0049]  $k_p$  는 DFT 최대값의 인덱스를 의미한다.  $m$ 는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$  를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수를 의미한다.  $\delta$  는  $f_T$  로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $N$ 는  $X[k]$  의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0050] 이때, DFT의 최대값과 좌우 양쪽의 값은 [수학식7], [수학식8], [수학식9]와 같이 정리된다.

### 수학식 7

$$X_0 = \frac{\sin(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)} \cdot \exp\left(j\frac{\pi(N-1)}{N}\delta\right)$$

[0051]

[0052]  $X_0$  는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$  에서의 DFT 값( $X_0 = X[k_p]$ )을 의미한다.  $\delta$  는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $N$ 는  $X[k]$  의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

### 수학식 8

$$X_{-1} = \frac{\sin(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta+1)\right)} \cdot \exp\left(-j\frac{\pi}{N} + j\frac{\pi(N-1)}{N}\delta\right)$$

[0053]

[0054]  $X_{-1}$  는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$  에서 -1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p - 1$ 에서의 DFT 값( $X_{-1} = X[k_p - 1]$ )을 의미한다.  $\delta$  는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $N$ 는  $X[k]$ 의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

### 수학식 9

$$X_1 = \frac{\sin(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-1)\right)} \cdot \exp\left(j\frac{\pi}{N} + j\frac{\pi(N-1)}{N}\delta\right)$$

[0055]

[0056]  $X_1$ 는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 에서 +1만큼 차이가 나는 인덱스  $k_p+1$ 에서의 DFT 값 ( $X_1 = X[k_p+1]$ )을 의미한다.  $\delta$ 는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다. N는  $X[k]$ 의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며, x[n] 신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0057] 이하, 위상 보정부(130)의 동작 알고리즘에 대해 설명한다.

[0058] 본 실시예에 따른 알고리즘은 [수학식10]에 위상을 보정해 주는 방식으로 [수학식11]와 같이 정리된다.

[0059]  $X_m X_0^*$ 에 [수학식6]을 대입하여 정리하면 [수학식10]과 같다.

### 수학식 10

$$X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)} \exp\left(j\frac{\pi}{N}m\right)$$

[0060]

[0061]  $X_m X_0^*$ 는  $X_m$ 에  $X_0$  conjugation을 곱한 값을 의미한다.

[0062]  $\delta$ 는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $m$ 는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수를 의미한다. N는  $X[k]$ 의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며, x[n] 신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

### 수학식 11

$$e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

[0063]

[0064]  $e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^*$ 는 위상을 보정해 주는 방식으로, 본 실시예에서 제안하는 방식을 의미한다.

[0065]

$X_m X_0^*$ 를 전개하면 
$$X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)} \cdot e^{j\frac{\pi}{N}m}$$
와 같고, 여기서 exponential 항

[0066]

의 제거, 즉 위상을 보정하기 위해  $X_m X_0^*$ 에  $e^{-j\frac{\pi}{N}m}$ 을 곱해준다.  
 $\delta$ 는  $f_T$ 로 정규화한 주파수 오프셋을 의미한다.  $m$ 는 DFT 최대값의 인덱스  $k_p$ 를 기준으로 인덱스 차이를 표현하기 위한 변수를 의미한다.  $N$ 는  $X[k]$ 의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0067]

[수학식11]은 실수이며,  $Y_p(m)$ 은 추가적으로 [수학식11]에  $\text{Re}\{\cdot\}$ 를 씌어 잡음인 허수 부분을 제거해 줌으로써 성능이 개선되게 된다.

[0068]

$d_p(m)$ 에 [수학식11]과 같이 정리된  $Y_p(m)$ 을 대입하여 정리하면 [수학식12]와 같다.

## 수학식 12

[0069]

$$d_p(m) = \frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)} = \frac{T_m T_\delta}{T_m^2 C_m - (C_m + 1) T_\delta^2}$$

[0070]

[수학식12]를  $T_\delta$ 의 2차 방정식으로 정리하면 [수학식13]과 같다.

[0071]

$$d_p(m) \text{ 는 } \frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)} \text{의 치환을 의미한다.}$$

[0072]

$Y_p(m)$ 는  $\text{Re}\left\{e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^*\right\}$ 의 치환을 의미한다.  $Y_p(m)$ 은  $X_m$ 과  $X_0$ 를 넣어 계산한다. 계산값

$$Y_p(m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

은  $\frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$ 과 같다.

[0073]

$Y_p(-m)$ 는  $\text{Re}\left\{e^{j\frac{\pi m}{N}} X_{-m} X_0^*\right\}$ 의 치환을 의미한다.  $Y_p(-m)$ 은  $X_{-m}$ 과  $X_0$ 를 넣어

$$Y_p(-m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta+m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

계산한다. 계산값은  $\frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta+m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$ 과 같다.

[0074]  $Y_p(0)$  는  $\text{Re}\{X_0 X_0^*\}$  의 치환을 의미한다.  $Y_p(0)$  은  $X_0$ 를 넣어 계산한다. 계산값은

$$Y_p(0) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

과 같다.

[0075]  $T_m$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.  $T_\delta$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)$  의 치환을 의미한다.  $T_m^2$  는  $T_m$ 의 제곱을 의

미한다.  $C_m$  는  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.  $T_\delta^2$  는  $T_\delta$ 의 제곱을 의미한다.

### 수학식 13

[0076] 
$$(C_m + 1)d_p(m)T_\delta^2 + T_m T_\delta - T_m^2 C_m d_p(m) = 0$$

[0077]  $C_m$  는  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.  $d_p(m)$  는  $\frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)}$  의 치환을 의미한다.

[0078]  $T_\delta^2$  는  $T_\delta$ 의 제곱을 의미한다.  $T_m$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.  $T_\delta$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)$  의 치환을

의미한다.  $T_m^2$  는  $T_m$ 의 제곱을 의미한다.  $C_m$  는  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.

[0079] [수학식13]의 2차 방정식을 근의 공식을 통해 풀면 [수학식14]와 같이 정리된다.

### 수학식 14

[0080] 
$$T_\delta = \frac{-T_m \pm \sqrt{T_m^2 + 4T_m^2 C_m (C_m + 1)d_p^2(m)}}{2(C_m + 1)d_p(m)} = \frac{-T_m \pm T_m \sqrt{1 + 4C_m (C_m + 1)d_p^2(m)}}{2(C_m + 1)d_p(m)}$$

[0081]  $T_\delta$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)$  의 치환을 의미한다.  $T_m$  는  $\tan\left(\frac{\pi}{N}m\right)$  의 치환을 의미한다.  $C_m$  는  $\cos\left(\frac{\pi}{N}m\right)$

의 치환을 의미한다.  $d_p^2(m)$  는  $d_p(m)$ 의 제곱을 의미한다.  $d_p(m)$  는

$$\frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)} \text{의 치환을 의미한다.}$$

[0082]  $m$ 은 양의 정수이며 [수학식14]의 근의 공식의  $(\pm)$ 해 중  $(-)$ 해는 오프셋의 범위가  $|\delta| > 0.5$ 로 나오기 때문

에, 최종적으로 본 실시예에 따른 알고리즘의 추정 오프셋은 [수학식15]의  $\hat{\delta}_p(m)$ 로 정리된다.

[0083] 이하, 주파수 오프셋 추정부(140)의 동작 알고리즘에 대해 설명한다.

### 수학식 15

$$\hat{\delta}_p(m) = \frac{N}{\pi} \operatorname{atan} \left( \frac{T_m \left( \sqrt{1 + 4C_m(C_m + 1)d_p^2(m)} - 1 \right)}{2(C_m + 1)d_p(m)} \right)$$

$$d_p(m) = \frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)}$$

$$Y_p(m) = \operatorname{Re} \left\{ e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^* \right\}$$

[0084]

[0085]  $\hat{\delta}_p(m)$ 는 본 실시예에 따른 알고리즘으로 추정된 주파수 오프셋을 의미한다.  $N$ 는  $X[k]$ 의 한 주기 안에 존재하는 DFT point 개수를 의미하며,  $x[n]$  신호의 전체 샘플 개수와 동일하다.

[0086]  $T_m$ 는  $\tan \left( \frac{\pi}{N} m \right)$ 의 치환을 의미한다.  $C_m$ 는  $\cos \left( \frac{\pi}{N} m \right)$ 의 치환을 의미한다.

[0087]  $d_p^2(m)$ 는  $d_p(m)$ 의 제곱을 의미한다.  $d_p(m)$ 는  $\frac{Y_p(-m) - Y_p(m)}{2Y_p(0) + Y_p(-m) + Y_p(m)}$ 의 치환을 의미한다.

[0088]  $Y_p(m)$ 는  $\operatorname{Re} \left\{ e^{-j\frac{\pi m}{N}} X_m X_0^* \right\}$ 의 치환을 의미한다.  $Y_p(m)$ 는  $X_m$ 과  $X_0$ 를 넣어 계산한다. 계산값

$$Y_p(m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin \left( \frac{\pi}{N}(\delta - m) \right) \cdot \sin \left( \frac{\pi}{N}\delta \right)}$$

은  $\frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin \left( \frac{\pi}{N}(\delta - m) \right) \cdot \sin \left( \frac{\pi}{N}\delta \right)}$ 과 같다.

[0089]  $Y_p(-m)$ 는  $\operatorname{Re} \left\{ e^{j\frac{\pi m}{N}} X_{-m} X_0^* \right\}$ 의 치환을 의미한다.  $Y_p(-m)$ 는  $X_{-m}$ 과  $X_0$ 를 넣어

$$Y_P(-m) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta+m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

계산한다. 계산값은  $Y_P(0)$  과 같다.

[0090]

$Y_P(0)$  는  $\text{Re}\{X_0 X_0^*\}$  의 치환을 의미한다.  $Y_P(0)$  는  $X_0$ 를 넣어 계산한다. 계산값은

$$Y_P(0) = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)}$$

과 같다.

[0091]

$X_m X_0^*$  는  $X_m$  에  $X_0$  conjugation을 곱한 값을 의미한다.

$$X_m X_0^* = \frac{\sin^2(\pi\delta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\delta-m)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\delta\right)} \cdot e^{j\frac{\pi}{N}m}$$

[0092]

계산값은  $Y_P(0)$  과 같다.

[0093]

이하에서는 주파수 오프셋 추정을 위한 보간 장치(100)의 성능에 대해 비교 분석 결과를 설명한다.

[0094]

본 실시예에 알고리즘을 기존의 알고리즘들과 성능을 비교하면 다음과 같다. DFT 세 점을 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 기존의 대표적인 알고리즘으로 Bertocco, Quinn, Macleod, Jacobsen 가 있으며, [표1]에 도시된 바와 같다.

## 표 1

| 알고리즘          | 주파수 오프셋 추정                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bertocco[1,5] | $\hat{\delta}_B = \begin{cases} \delta_B(1), & \text{if }  X_1  \geq  X_{-1}  \\ \delta_B(-1), & \text{otherwise} \end{cases},$ $\delta_B(m) = \frac{N}{2\pi} \cdot \arg(d_B(m)), \quad d_B(m) = \frac{X_0 - X_m}{X_0 - X_m \cdot e^{-j\frac{2\pi m}{N}}}$                                              |
| Quinn[2,5]    | $\hat{\delta}_Q = \begin{cases} \delta_Q(1), & \text{if } Y_Q(1) < 0 \text{ and } Y_Q(-1) > 0 \\ \delta_Q(-1), & \text{otherwise} \end{cases},$ $\delta_Q(m) = \frac{N}{\pi} \cdot \text{atan}\left(\frac{T_m \cdot Y_Q(m)}{Y_Q(m) - 1}\right), \quad Y_Q(m) = \text{Re}\left\{\frac{X_m}{X_0}\right\}$ |
| Macleod[3,5]  | $\hat{\delta}_M(m) = \frac{N}{\pi} \cdot \text{atan}\left(\frac{T_m \left(\sqrt{1 + 8d_M(m)^2} - 1\right)}{4d_M(m)}\right),$ $d_M(m) = \frac{Y_M(-m) - Y_M(m)}{2Y_M(0) + Y_M(-m) + Y_M(m)}, \quad Y_M(m) = \text{Re}\{X_m X_0^*\}$                                                                      |
| Jacobsen[4,5] | $\hat{\delta}_J(m) = \frac{N}{\pi} \cdot \text{atan}(T_m \cdot d_J(m)), \quad d_J(m) = \text{Re}\left\{\frac{X_{-m} - X_m}{2X_0 - X_{-m} - X_m}\right\}$                                                                                                                                                |

[0095]

[0096]

도 3 내지 도 6은 각 N에 따라,  $f_0$ 를 0~(N-1) $f_T$  구간을  $f_T/20$  간격으로 설정하여 SNR이 20 dB에서 각 알고리즘의

RMSE(Root Mean Square Error)를 확인한 모의실험 결과이다. 총 10,000번의 반복 실험을 진행하여 그것의 평균 값을 사용하여 결과를 확인하였으며, RMSE는 [수학식 16]과 같이 계산하였다.

### 수학식 16

$$\text{RMSE} = \frac{1}{f_T} \cdot \sqrt{E\left\{\left|f_0 - \hat{f}_0\right|^2\right\}}$$

$f_T$  : 주파수 분해능을 의미한다.  $f_T$  는 주파수 축에서의 샘플링 주기( $f_T = f_s / N$ )를 의미한다. E는  $E\{X\}$ 는 집합 X의 기대값을 의미한다. 여기서, X의 평균을 의미한다.  $f_0$  는 신호의 주파수를 의미한다.  $\hat{f}_0$  는 신호의 주파수  $f_0$  를  $f_s$  로 정규화한 값( $\hat{f}_0 = f_0 / f_s$ )을 의미한다.

RMSE 분석 시 Cramer-Rao Bound(CRB)를 함께 표현하였으며, CRB 식은 [수학식 17]과 같다.

### 수학식 17

$$\text{var}(\hat{\delta}) \geq \frac{6}{(2\pi)^2 N \cdot \text{SNR}}$$

$\text{var}(\hat{\delta})$  에서  $\hat{\delta}$  는 추정된 주파수 오프셋을 의미하며  $\text{var}(\hat{\delta})$  는  $\hat{\delta}$  의 분산을 의미한다. 즉,  $\hat{\delta}$  의 분산은 CRB(Cramer-Rao bound)인  $\frac{6}{(2\pi)^2 N \cdot \text{SNR}}$  보다 작아질 수 없다는 것을 의미한다. 제안하는 알고리즘 및 기존의 알고리즘들을 통해 주파수를 추정할 경우, 가장 이상적인 경우 CRB와 유사해 지며, 모든 시뮬레이션 결과들의 성능에 대한 기준이 된다. SNR(Signal to Noise Ratio)는 신호대잡음비를 의미한다.

수신 신호는 [수학식 1]과 같은 단일 복소 지수 신호를 구성하였으며 신호 분석 시 필요한 시스템 파라미터는 [표 2]와 같다.

### 표 2

| Parameter                    | Value         |
|------------------------------|---------------|
| $f_s$ (sampling frequency)   | 1 kHz         |
| $T_s$ (sampling period)      | 1 ms          |
| $N$ (DFT point)              | 4, 8, 12, 16  |
| $T$ (Truncation period)      | $N \cdot T_s$ |
| $f_T$ (frequency resolution) | $f_s / N$     |

Macleod, Jacobsen, 제안하는 알고리즘의 m=1로 설정하여 모의실험을 진행하였다. 도 3 내지 도 6의 (a)에  $f_0$ 가

$0 \sim (N-1)f_T$ 인 구간을 도시하고, 도 3 내지 도 6의 (b)에  $0 \sim f_T$  구간을 도시하였다.

[0105] 모의실험 결과 제안하는 알고리즘이  $f_0$  전반적으로 우수한 성능을 나타낸다. 오프셋이 0.5 부근에서 Bertocco가 성능이 우수한 경향이 있으나, 제안하는 알고리즘에 비해 성능이 우수한 구간이 협소하며 성능의 차이도 미세하다.

[0106] 도 7 내지 도 10은 각  $N$ 에 따라,  $f_0$ 를  $0 \sim (N-1)f_T$  구간을  $f_T / 20$  간격으로 설정하여 SNR을  $0 \sim 30\text{dB}$ 까지 2dB 간격으로 각 알고리즘의 worst RMSE를 확인한 모의실험 결과이다.

[0107] 모의실험 결과, 제안하는 알고리즘이 가장 우수한 성능을 나타낸다.  $N$ 이 작을수록 SNR이 클수록 제안하는 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 성능이 우수하다.

[0108] [표 3]은 worst RMSE 값이 0.04가 되는 SNR을 알고리즘 별로 확인한 결과이며, 도 11은 [표 3]을  $N$ 에 따라 표현한 결과이다. 모든  $N$ 에 대하여 제안하는 알고리즘이 가장 낮은 SNR에서 제시한 성능에 도달하는 것을 확인할 수 있고,  $N$ 이 16보다 커지면서 제안하는 알고리즘의 성능이 Macleod에 근접하는 것을 알 수가 있다.

표 3

| $N$ | Bertocco | Quinn | Jacobsen | Macleod | Proposed | Improvement |
|-----|----------|-------|----------|---------|----------|-------------|
| 4   | 19.9     | 20.8  | 19.3     | 18.0    | 15.1     | 2.9         |
| 5   | 19.2     | 19.1  | 18.0     | 16.2    | 14.4     | 1.8         |
| 6   | 18.6     | 17.8  | 17.2     | 15.0    | 13.8     | 1.2         |
| 7   | 18.1     | 17.0  | 16.4     | 14.1    | 13.2     | 0.9         |
| 8   | 17.6     | 16.2  | 15.8     | 13.5    | 12.7     | 0.8         |
| 9   | 17.1     | 15.7  | 15.2     | 12.8    | 12.3     | 0.5         |
| 10  | 16.7     | 15.1  | 14.9     | 12.3    | 11.8     | 0.5         |
| 11  | 16.3     | 14.6  | 14.4     | 11.8    | 11.4     | 0.4         |
| 12  | 15.9     | 14.2  | 14.0     | 11.5    | 11.2     | 0.3         |
| 13  | 15.6     | 13.9  | 13.7     | 11.1    | 10.8     | 0.3         |
| 14  | 15.3     | 13.5  | 13.4     | 10.7    | 10.5     | 0.2         |
| 15  | 15.0     | 13.3  | 13.1     | 10.4    | 10.2     | 0.2         |
| 16  | 14.7     | 12.9  | 12.8     | 10.1    | 9.9      | 0.2         |

[0109]

[0110] 이상의 설명은 본 실시예의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 실시예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 실시예의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 수정 및 변형이 가능할 것이다. 따라서, 본 실시예들은 본 실시예의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예에 의하여 본 실시예의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 실시예의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 실시예의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

### 부호의 설명

[0111]

100: 주파수 오프셋 추정 장치

110: 신호 모델링부      120: DFT 부

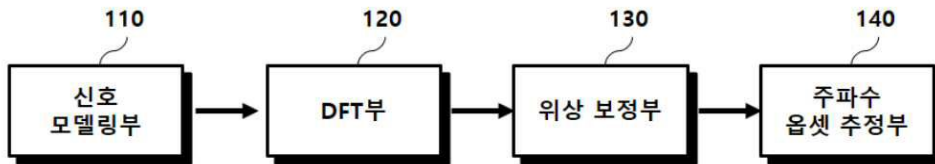
130: 위상 보정부

140: 주파수 오프셋 추정부

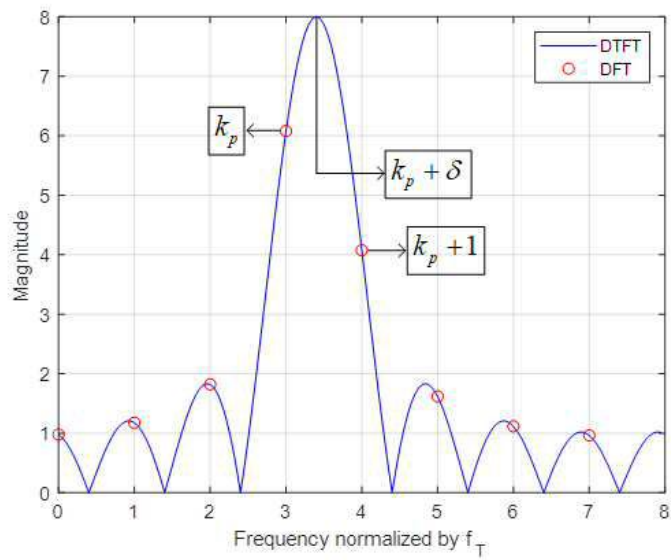
도면

도면1

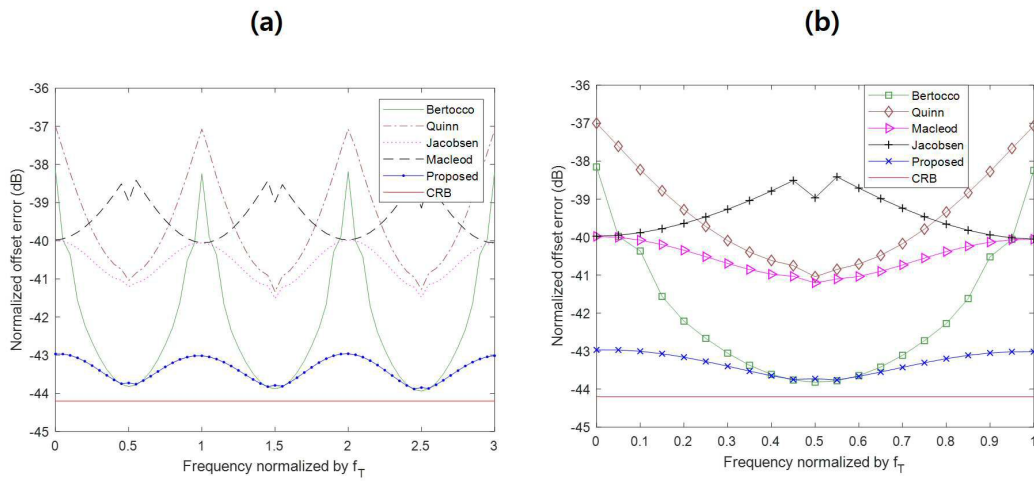
100



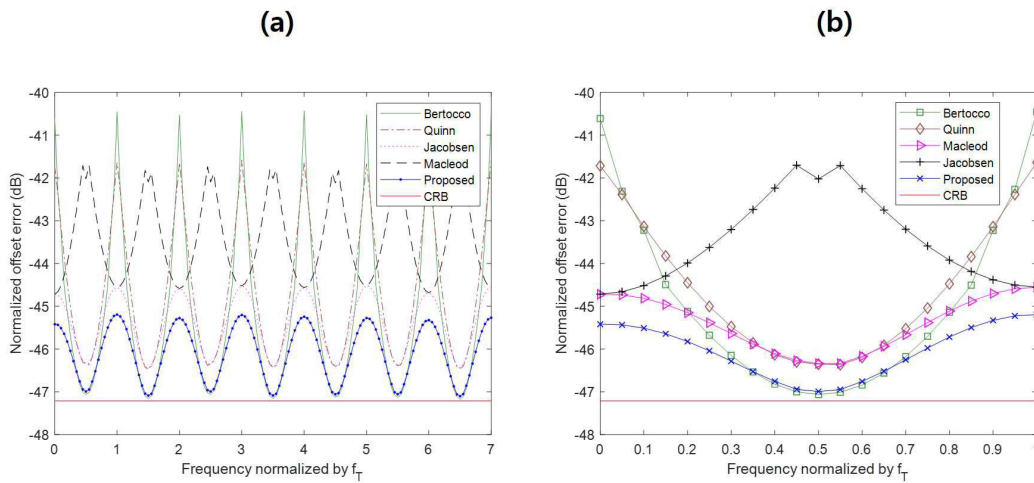
도면2



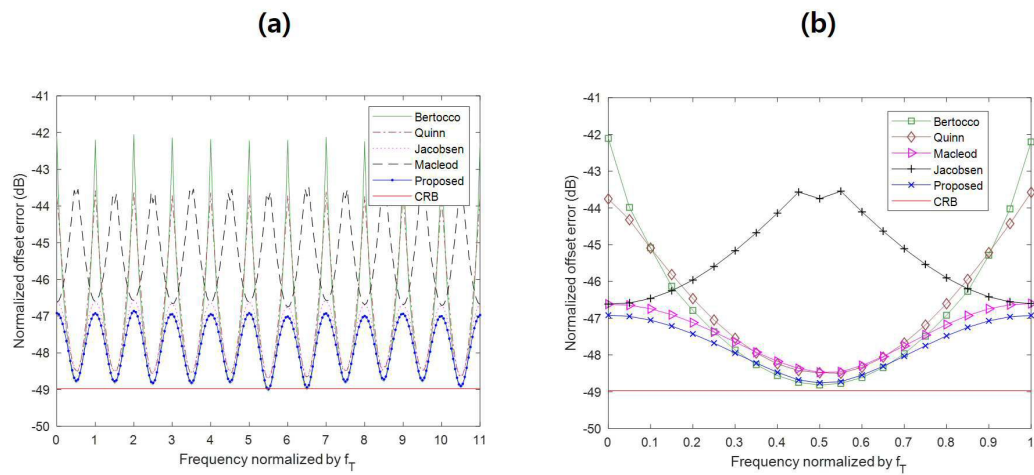
도면3



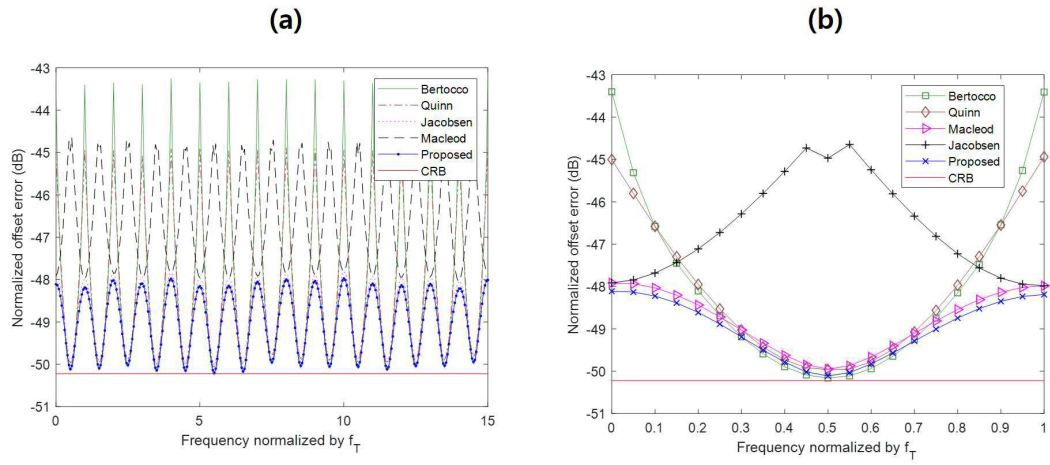
도면4



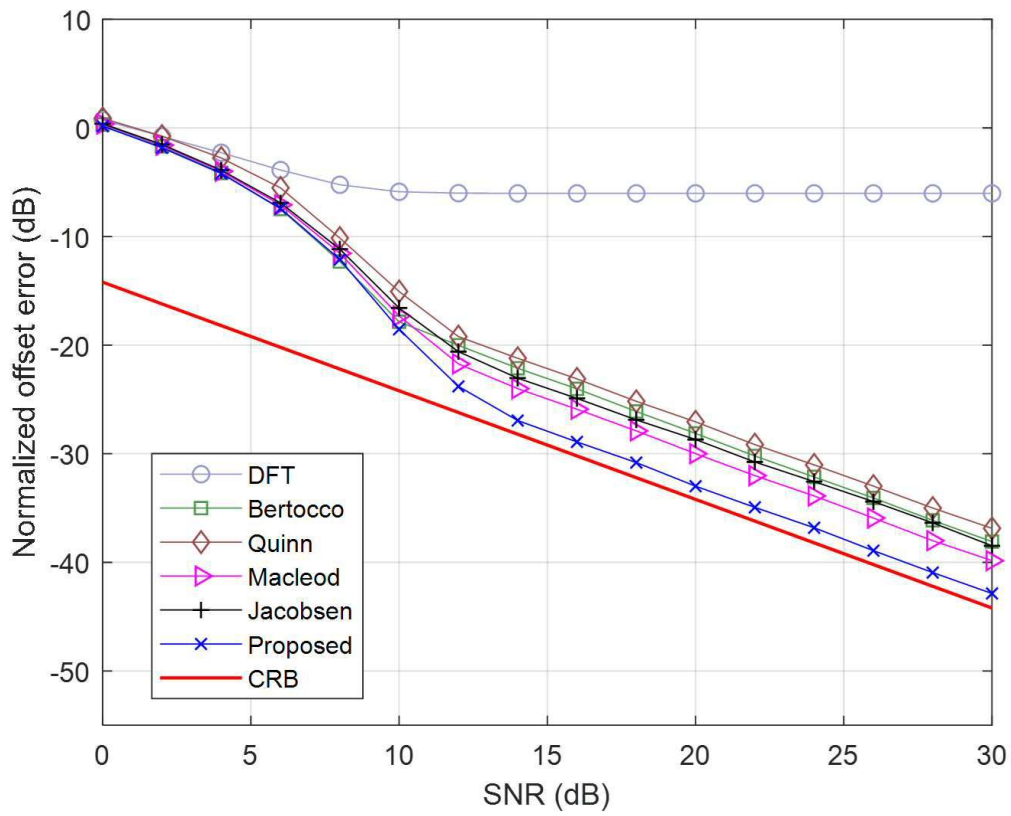
도면5



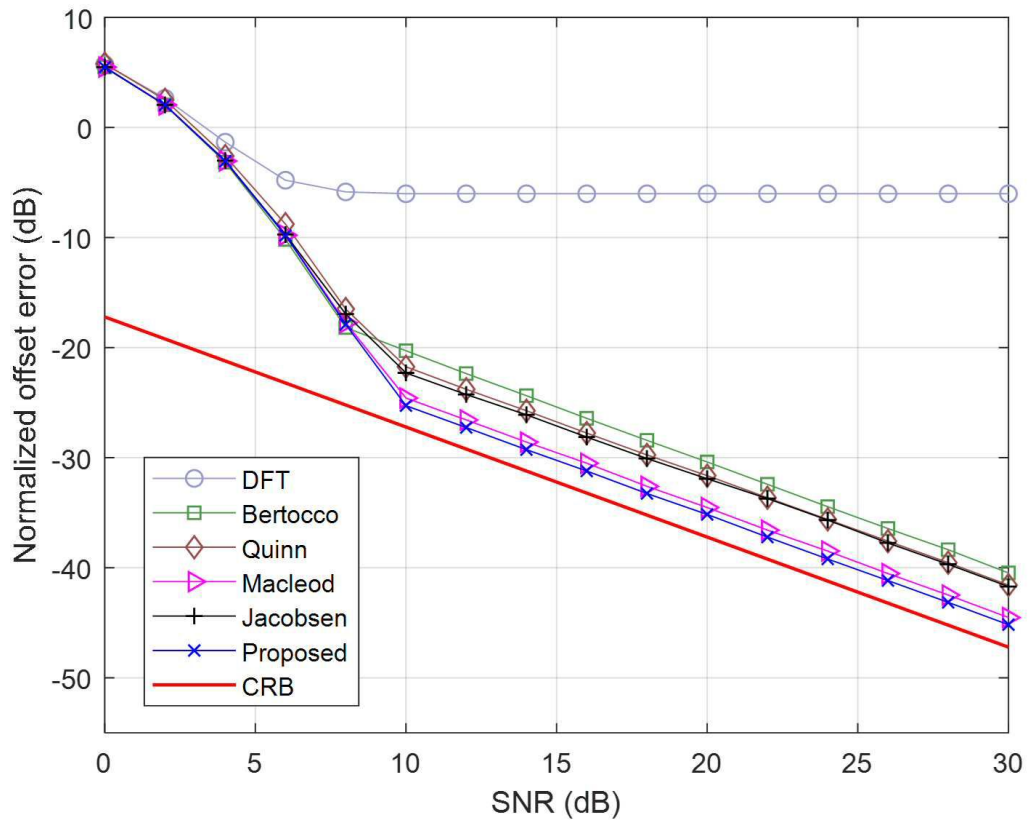
도면6



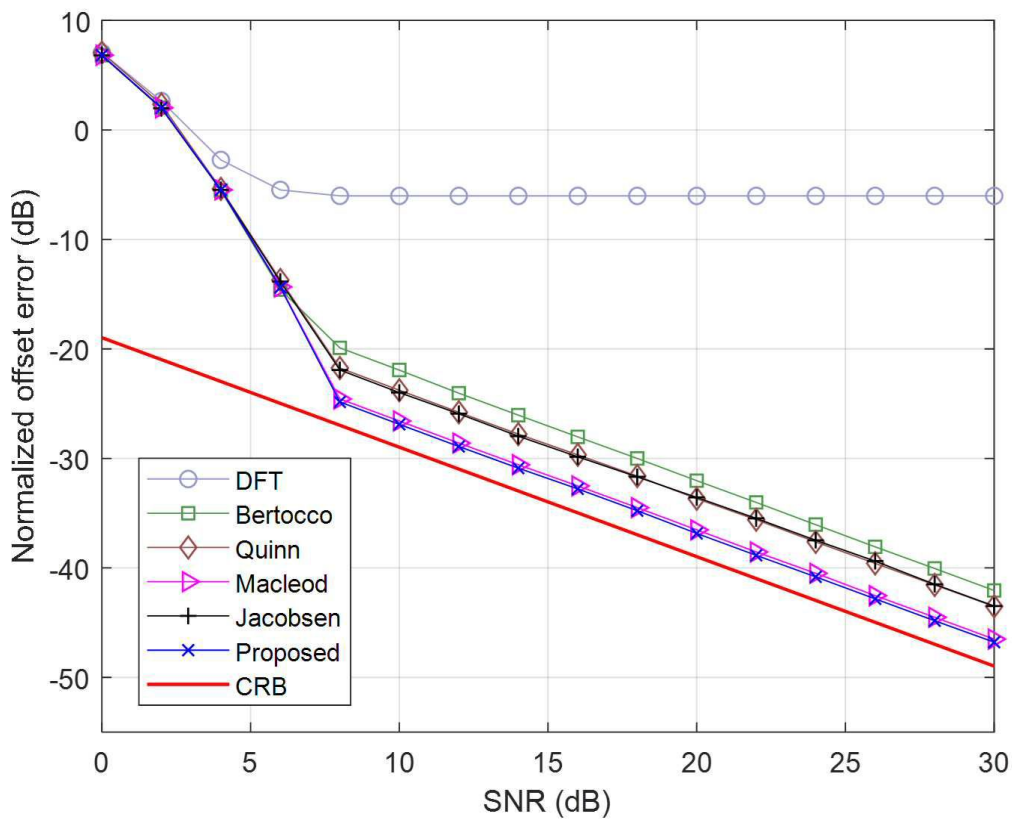
도면7



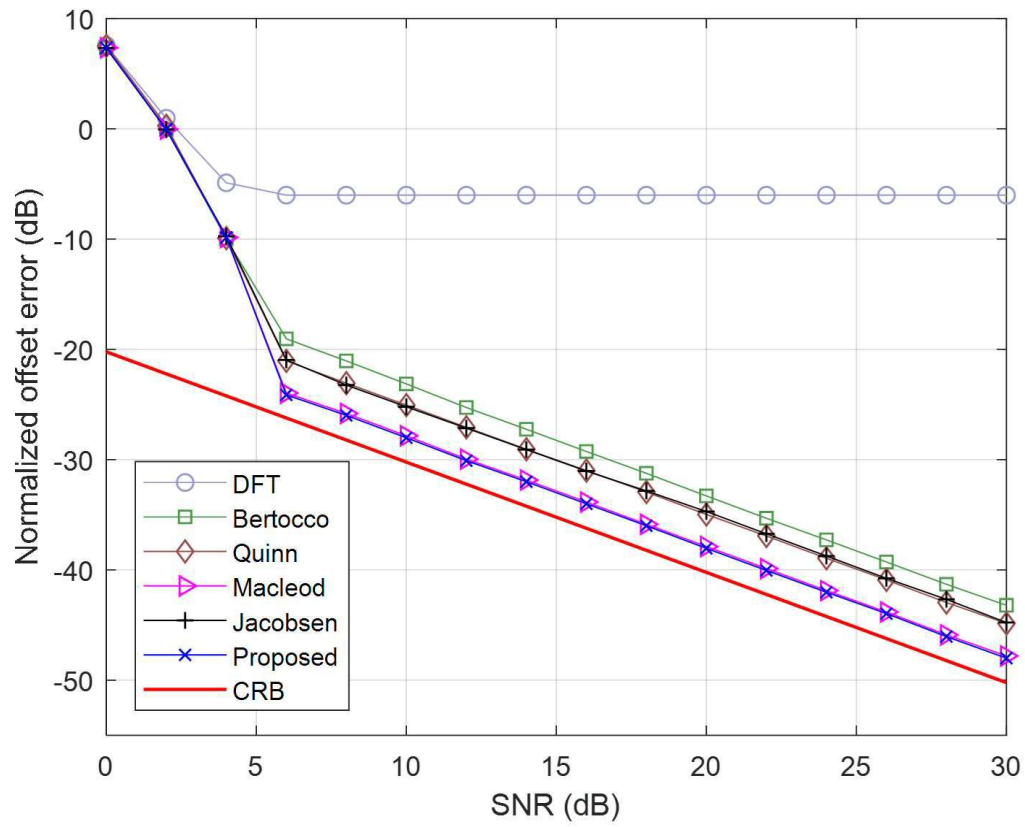
도면8



도면9



도면10



도면11

