

# 광 대역 통신 시스템의 협 대역 간섭 제거를 위한 압축센싱 기술

## I. 서론

기존의 정보통신 및 신호처리 연구는 Shannon Nyquist sampling 이론에 기반을 둔 디지털 시스템 위주로 발전해 왔다. 이 이론은 우리가 원래 아날로그 신호를 복원하기 위해서 최소한 신호의 최고 주파수의 2배 이상으로 Sampling을 해야 한다는 것이다. 이렇게 대역폭에 비례하여 표본 추출율이 결정되어야 하는 방식은 현대의 광 대역을 이용하는 통신 시스템에서는 표본 추출 율 및 표본의 량 측면 등에서 시스템 디자인 시 장점보다는 부담으로 작용하는 경우가 많다. 우선 빠른 표본율의 Analog-to-Digital Converter(ADC)를 설계하는 것은 매우 어렵다. 또한, 꾸준한 ADC의 표본율 성능의 향상에도 불구하고, ADC는 광 대역을 이용하는 통신 시스템에서 새롭게 나오는 응용분야의 필요를 충족해주지 못하고 있다.

앞에서 언급한 이유 때문에 최근에 압축센싱(Compressive Sensing)기술은 정보통신 및 신호처리 분야에 있어서 집중 조명 받고 있으며, 많은 연구자들의 관심을 끌며 연구가 활발하게 진행되고 있다.

압축센싱의 주요한 사항은 두 가지로 표현된다. 자연적인 신호는 어떤 특정 기저(basis)에서 성긴 신호로 표현(sparse representation)된다는 점과 그런 성긴 신호는 표면적으로 보여지는 신호의 차원보다  $M \ll N$  랜덤화된 선형 측정을 이용하여 길이가  $N$ 인 신호를 효과적으로 취득하고 복구 할 수 있다는 점이다<sup>[1-2]</sup>. 따라서, 압축센싱을 이용하면, 우리는 신호를 Shannon Nyquist Sampling rate보다 훨씬 낮은 표본율로 추출하고, 정보손실 없이 저장, 또 그로부터 복원할 수 있다는 것이다. 즉, 현재 ADC 시스템



신 중 목  
광주과학기술원



강 주 성  
광주과학기술원



이 흥 노  
광주과학기술원



으로 해결하지 못 할 정도로 빠른 표본율이 필요한 응용분야에 압축센싱이 긴요하게 사용 될 수 있다. 그런데, 정보통신 및 신호처리 분야에 있어서 간섭은 종종 일어난다. 간섭이 일어나면 신뢰성 있는 통신이 어렵고 우리가 원하는 신호를 검출하는 것이 어렵다. 그러므로 간섭의 제거는 필수적이다.

특히, 광 대역 통신 시스템에서 협 대역 간섭(Narrow Band Interference, NBI)은 통신시스템에서 문제가 되고 있다<sup>[18]</sup>. 광 대역 통신 시스템에서 NBI는 크게 두 가지 원인에 의해서 발생한다. 의도적인 NBI를 발생하는 경우와 다른 통신시스템과 일부 대역이 겹치며 NBI가 존재하는 경우이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 시도는 광 대역 OFDM 시스템<sup>[19]</sup>과 초 광 대역(Ultra Wideband, UWB) 시스템<sup>[20]</sup>에서 연구 되어왔다.

최근에는 광 대역 OFDM과 UWB시스템에서 NBI 제거를 위해 압축센싱 기술을 이용한 연구가 진행 되었다<sup>[12-17]</sup>. 위에서 언급한 의도적인 NBI와 다른 통신 시스템과 일부 대역이 겹쳐서 생기는 NBI 두 경우 모두 광 대역 중 일부 협 대역에서 NBI가 발생되기 때문에 NBI는 주파수 영역에서 성긴 신호로 볼 수 있고 압축센싱을 이용해서 NBI제거가 가능하다.

우리는 본 논문에서, 압축센싱 이론을 이용해서 광 대역 통신시스템에서 NBI를 제거 하는데 초점을 맞추어서 살펴 보도록 한다.

제2장에서는 압축센싱 이론에 대해서 간단히 소개하고 제3장에서는 압축센싱을 이용한 간섭제거 방법을 소개하며, 제 4장에서는 압축센싱을 이용한 간섭제거 방법을 광 대역 OFDM 시스템과 초 광 대역(Ultra Wideband) 시스템에 응용되는 사례에 대해 살펴본다. 제 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 압축센싱 이론

본 장에서는 압축센싱 이론에 대한 기본적인 개념에

대해서 설명한다.

압축센싱 이론의 핵심은 (1)과 같은 등식의 해를 찾는 것이다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ 는 원래의 신호를 나타내고,  $\mathbf{A}$ 는  $M \times N$  측정행렬이고 일반적으로  $M \ll N$ 을 만족한다.  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^M$ 은  $\mathbf{A}$ 행렬에 의해 선형 측정된 신호라고 정의한다.

만약 측정행렬  $\mathbf{A}$ 가 정방행렬이고 Full Rank를 가진다면 원래의 신호  $\mathbf{x}$ 와 측정된 신호  $\mathbf{y}$ 는 길이가 같게 되고, 압축이 일어나지 않게 된다. 하지만 압축센싱 방법에서 측정된 신호의 길이는 원신호 길이보다 짧아 지기 때문에 원신호의 압축이 일어나는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 압축센싱은  $N$ 보다 훨씬 적은 샘플을 가지고 원 신호를 얻을 수 있다는 것을 말한다. 단, 여기서  $\mathbf{x}$ 는 성긴 신호이어야 한다. 특히, 우리는 성긴 신호를 0

이 아닌 신호의 값을 가지는 sparsity라고 표현하고 이 값들의 수를 변수  $K$ 로 표현하면  $M, N, K$ 의 관계는  $K < M \ll N$ 이 만족되어야 한다.

만약에 신호  $\mathbf{x}$ 가 직접적으로  $K$ -sparse한 신호가 아니라면 어떠한 선형변형 과정을 통해서  $K$ -sparse한 신호로 표현될 수 있도록 모델링 하면 된다. 즉,  $\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{s}$ 로 나타내지고  $\mathbf{B}$ 는 역 행렬이 존재하는  $N \times N$  선형 변형 행렬로 sparsity basis라고 정의되고  $\mathbf{s}$ 는  $K$ -sparse 신호가 된다.

이러한 압축센싱 이론을 보면 과연  $\mathbf{A}$  행렬은 만족스러운 센싱 시스템의 성능을 보장하는가에 대해서 궁금할 것이다. 논문 [4]에서, Candes와 Tao는  $\mathbf{A}$  행렬이 Restricted Isometry Property(RIP)라는 조건을 만족해야  $\mathbf{x}$ 를  $\mathbf{y}$ 로부터 왜곡 없이 복원 할 수 있다는 것을 증명하였다. RIP 조건을 간략히 요약하면, 행렬  $\mathbf{A}$ 가 모든 sparse한 원래 신호  $\mathbf{x}$ 를 균일한 에너지로 투사해야 한다는 의미이다. 원래 신호  $\mathbf{x}$ 의 0이 아닌 위치는 일반적으로 신호에 따라 다르기 때문에 sparsity가 동일한 어떤  $\mathbf{x}$ 라도 일정하게 투사할 수 있어야 신호를 안

정적이며 복원이 가능하다<sup>[5]</sup>.  $\mathbf{A}$ 가 특정 부분공간에 속한  $\mathbf{x}$ 를 더 잘 투사하는 경우 어떠한 상황이 생기는지 생각해보자. 이것은 곧  $\mathbf{A}$ 가  $\mathbf{x}$ 를 잘 투사하지 않는 부분공간도 존재하게 된다는 말이다. 이러한 경우에 선호 부분공간에 속한  $\mathbf{x}$ 는 측정값이 대체로 크기 때문에 그를 이용한 복원이 잘 이뤄지는 반면, 비 선호부분공간에 속한 신호는 복원할 때 에러가 크게 발생하게 되는 문제가 생기게 된다. 그러므로, 측정 에너지가 주어졌을 때, 모든 공간의 신호를 균일하게 커버 하려면, 행렬  $\mathbf{A}$ 는 어떤 임의의 벡터  $\mathbf{x}$ 에 대해서도 균일한 에너지로 투사 해야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 일반적인  $\mathbf{A}$ 는 독립적이고 동일한 분포(Independent Identically distributed, I.I.D)를 가지는 가우시안 행렬이나 베르누이 행렬로 알려져 있다.

그러나  $\mathbf{A}$ 행렬이  $M \ll N$ 인 Under-determined 시스템이기 때문에 일반적으로 해는 무수히 많다. 즉, 측정 벡터  $\mathbf{y}$ 로 부터  $\mathbf{x}$ 를 복원하는 것은 쉽지 않다. 압축센싱에서 신호  $\mathbf{x}$ 를 복원하는데 사용되는 가장 논리적으로 합당한 방법은 L0-norm 최소화를 이용한 복원 방법이다. 이 방법을 간단히 설명하면,  $\mathbf{A}$ 와  $\mathbf{y}$ 를 알 때,  $\mathbf{y}=\mathbf{A}\mathbf{x}$ 를 만족하는 모든  $\mathbf{x}$ 중 0이 아닌 원소의 개수가 최소인  $\mathbf{x}$ 를 찾는 것이다. 하지만, 불행히도 이 방법은 NP-hard 문제가 되어 실용적이지 못하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, L1-norm 최소화를 이용한 복원방법이 제안됐다. 이 방법을 이용하면 오직 (2)의 식을 만족시키는 I.I.D 가우시안 측정행렬을 통해서 높은 확률로  $K$ -sparse 신호를 복원 할 수 있다<sup>[2-3]</sup>.

$$M \geq cK \log(N/K) \quad (2)$$

이 문제는 간단히 Basis pursuit<sup>[6]</sup>라고 불리는 선형 문제(linear program)로 변형해서 풀 수 있고, 이것의 계산 복잡도는 약  $O(N^3)$ 이다. 하지만 신호 자체가 처음부터 큰 경우에는 여전히 이 방법의 복잡도는 높고, 따라서 구현하기 어려운 문제를 안고 있다. 따라서

Orthogonal Matching Pursuit(OMP)<sup>[7]</sup>, Least Shrinkage and Selection Operator(LASSO)<sup>[8]</sup>, Least Angle Regression(LARS)<sup>[9]</sup> 등과 같은 알고리즘이 제안 됐다.

### III. 압축센싱을 이용한 간섭 제거방법

압축센싱 기반 신호 획득은 기존의 신호획득 방법보다 간섭과 잡음에 약한 특징을 가지고 있다<sup>[3]</sup>. 따라서, 신호 처리 단계 이전에 가능한 한 최대한 간섭과 잡음을 제거해서 더욱 신뢰성 있는 통신을 할 수 있도록 해야 한다. 먼저, 압축센싱 시스템에서 잡음에 대한 고려 없이 간섭을 제거하는 방법을 소개하고 더 나아가 잡음과 간섭을 모두 고려한 간섭제거 방법을 소개한다.

우리는 압축센싱(Compressive Sensing) 시스템에서 간섭 신호에 의해서 손상된 관심 있는 신호를 얻는 상황을 고려한다. 즉, 압축센싱 시스템에서 얻어진 압축 측정은 원하지 않는 간섭을 포함한 신호 공간을 획득하는 현실적인 경우를 고려한다. 논문 [10]에서는, 관심 있는 신호의 집합의 구조는 유지하면서 신호 간섭을 제거하는 효과적인 압축 영역 필터 방법을 고안해 냈다. 특히, 만약 간섭신호가 알려진 부분공간에서 관심 있는 신호와 직교하면 압축 측정을 직교하는 부분공간에 영사해서 간섭을 간단하게 제거 할 수 있음을 보였다. 또한, 영사 연산자는 관심 있는 신호의 집합에 대해 RIP를 유지한다는 것을 보였다. 즉, 영사된 측정은 관심 있는 신호를 바로 복구하는데 충분한 정보를 가지고 있다. 각각의 증명은 본 논문의 범위를 벗어나므로 [10]를 참조하고 우리는 간단히 여기서 간섭 제거 방법에 집중한다.

신호  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$ 를  $K$ -sparse 즉, 성긴 신호라고 가정한다. 위에서 설명한대로 신호를 표현하면

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_S + \mathbf{x}_I \quad (3)$$

식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\mathbf{x}_S$ 는 관심 있는

신호이고,  $\mathbf{x}_I$ 는 우리가 제거 하고 싶어 하는 간섭 신호이다. 우리는 이 두 신호를 동시에 획득하는 상황을 고려하므로 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_S + \mathbf{x}_I) \quad (4)$$

우리는  $\mathbf{A}$ 와  $\mathbf{x}_I$ 에 대한 정보를 알고 있다는 가정 아래 측정 벡터  $\mathbf{y}$ 에 동작하며  $\mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x}_I = \mathbf{0}$ 을 만족하는 직교 연산자를 고안함으로써 간섭을 제거 할 수 있다<sup>[10]</sup>. 즉, 아래와 같이 식 (5)로 나타내지고  $\mathbf{P}\mathbf{y}$ 를  $\tilde{\mathbf{y}}$ ,  $\mathbf{P}\mathbf{A}$ 를  $\tilde{\mathbf{A}}$ 라고 둔다면  $\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}_S$ 로 나타내지고 이는 압축센싱의 기본 식인 (1)과 같고  $\mathbf{x}_S$ 를 복구 할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\mathbf{y} &= \mathbf{P}\mathbf{A}(\mathbf{x}_S + \mathbf{x}_I) \\ &= \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x}_S + \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x}_I \\ &= \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x}_S \end{aligned} \quad (5)$$

하지만 논문[10]의 방법은 잡음에 대한 것을 고려하지 않았다. 또한,  $M \ll N$ 의 조건을 만족하는  $M \times N$  행렬의 기저는 종종 서로 상관관계가 있고, 이것은 즉,  $\mathbf{A}\mathbf{x}_S$ 와  $\mathbf{A}\mathbf{x}_I$ 가 직교하지 않을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 따라서, 우리가 위에서 한 가정은 때때로 현실적이지 않다. 이러한 이유로 인해서 잡음도 고려하면서 더 실질적인 간섭을 제거하는 방법의 필요성을 느끼고 MMSE(Minimum Mean Square error) 알고리즘에 기반한 압축 영역에서 간섭 제거 방법이 나왔다<sup>[11]</sup>. 이 방법에서는 간섭부분 제거에 있어서 잡음의 영향도 고려했다. 그러므로 신호는 (6)과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_S + \mathbf{x}_I + \mathbf{w} \quad (6)$$

$\mathbf{x}_I$ 와  $\mathbf{w}$ 는 평균이 0인 독립적이고 동일한 가우시안 분포를 가진다고 가정한다. 여기서  $\mathbf{x}_S$ 와  $\mathbf{x}_I$ 는 앞의 논문 [10]의 관계와 같이 각각 우리가 관심 있는 신호와 제거하고 싶어하는 관섭 신호를 나타낸다. 그리고  $\mathbf{w}$ 는 잡음을 의미한다. 또한, 논문 [10]에서와 마찬가지로 통계적 간섭 정보가 필요하고 선형 연산자를 만들기 위

해서 잡음 분산이 필요하다.

$\mathbf{x}$ 로부터 측정된  $\mathbf{y}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_S + \mathbf{x}_I + \mathbf{w}) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}_S + \mathbf{A}\mathbf{x}_I + \mathbf{A}\mathbf{w} \end{aligned} \quad (7)$$

측정된  $\mathbf{y}$ 신호로부터 간섭과 잡음 부분을 없애기 위해서, 우리는 원하는 신호와 추정된 신호 사이의 MSE(Mean Square Error)를 최소화하는 간섭 제거 선형 연산자 행렬을 디자인 해야 한다. 즉, 복구하고자 하는 성진 신호를  $\mathbf{s} = \mathbf{A}\mathbf{x}_S$ ,  $\hat{\mathbf{s}}$ 를 추정된 신호라고 두고 MMSE 방법을 통해서 해를 풀면 최종적으로  $\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{P}_{MMSE}\mathbf{y}$  형태가 나오게 된다. 그러므로, 압축 영역에 기반한 MMSE의 간섭 제거 선형 연산자를 정의 할 수 있다.

#### IV. 광대역 통신 시스템에서 NBI 제거

본 장에서는 앞에서 알아본 가장 기본적인 압축영역에서의 간섭제거 방법이 광 대역 통신 시스템의 OFDM 시스템과 UWB 시스템에 존재하는 NBI 제거를 위해서 어떻게 응용되는지 검토해 보도록 한다.

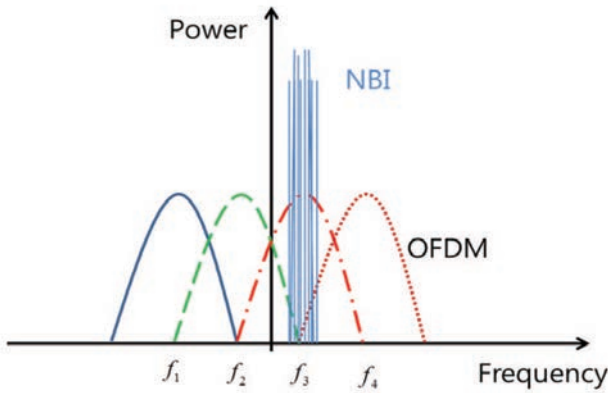
압축센싱 이론을 이용한 간섭 제거 방법으로 먼저 잡음에 대한 고려 없이 간섭을 제거하는 방법을 소개하고 나아가 잡음과 간섭을 포함한 상황에서 MMSE를 이용한 보다 현실적인 간섭 제거 방법을 제시

##### 1. OFDM 시스템의 NBI 제거

먼저 압축센싱을 이용해서 광대역 OFDM시스템에서 문제가 되고 있는 의도적인 NBI가 어떻게 제거 될 수 있는지 살펴 보도록 하자.

NBI는 <그림 1>에서 보이는 바와 같이 광 대역 OFDM 을 활용 하는 통신 시스템에 나타나게 된다. 이 NBI는 무선통신 시스템의 성능을 열화 시킨다. 따라서, 의도적인 NBI(Jamming이라고도 불림)를 통해서 군사 응용에서 사용되는 무선 네트워크에 성능 열화를 가하는 공격을 하기도 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 무선통신의 일반적인 채널인 시간이 변하는 주파수 선택적인 페이딩 채널을 겪는 OFDM 시스템에서 압축센싱을 이용하여 NBI 신호를 제거하는 방법에 대해서 소개한다. 여기서 OFDM



〈그림 1〉 OFDM 시스템에서 NBI 발생

시스템은 zero padding(ZP)을 guard sequence로 사용하고, 사용된 표기법의 대부분은 [12]을 따른다.

주파수 영역에서 수신된 신호는 다음과 같이 식(8)로 나타내어 진다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{X} + \mathbf{Z} + \mathbf{J} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{A}$ 는  $P \times P$ 의 크기를 가지는 채널 행렬부분, ( $P$ 는 데이터 길이  $N$ 과 guard sequence길이  $\nu$ 의 합이고,  $\nu \ll N$  만족한다.)  $\mathbf{V}$ 는  $P \times N$ 의 크기를 가지는 ZP 전송 행렬 부분,  $\mathbf{Z}$ 는  $P \times 1$  크기를 가지는 잡음,  $\mathbf{J}$ 는  $P \times 1$  크기를 가지고  $K$ 개의 부 반송파에 협 대역으로 간섭이 일어나는 NBI 신호를 나타낸다. NBI 신호는 전체 광 대역에서 일부분만이 간섭을 일으키기 때문에 성긴 신호로써 고려된다. 즉,  $K$ -sparse 신호이다. 따라서, 압축센싱 이론을 이용해서 수신된 신호  $\mathbf{Y}$ 로부터  $\mathbf{J}$  값을 찾을 수 있다. 여기서 나머지 신호들은 알려지지 않았기 때문에 잡음으로써 모델 된다. 잡음 레벨을 줄이기 위해서 알려지지 않은 데이터 부분을 없앤다. 이것은  $\mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{V} = \mathbf{0}$ 을 만족시키는  $P \times P$ 의 크기의  $\mathbf{W}$ 행렬을  $\mathbf{Y}$ 에 곱함으로써 가능하게 된다. 즉,  $\mathbf{W}$ 는  $\mathbf{A}\mathbf{V}$ 의 왼쪽 영-부분공간(null-subspace) 영사 행렬로 디자인 되어야 한다<sup>[10]</sup>.  $\mathbf{W}$ 행렬을  $\mathbf{Y}$ 에 곱하면 식(8)은 식(9)와 같이 나타난다.

**압축센싱 간섭제거 방법을 의도적인 NBI가 존재하는 광 대역 OFDM 시스템에 적용 가능함**

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{Y}} &= \mathbf{W}\mathbf{Y} = \mathbf{W}(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{X} + \mathbf{Z} + \mathbf{J}) \\ &= \mathbf{W}\mathbf{J} + \tilde{\mathbf{Z}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{W}$ 는 rank  $\nu$ 를 가지는 측정행렬이 되기 때문에 식(9)는 under determined 시스템이 된다. 이 식은 압축센싱 기본식 (1)에서 잡음  $\tilde{\mathbf{Z}}$ 이 추가된 형태로 제한된 L1-norm 최소화<sup>[3]</sup>를 이용해서  $\mathbf{J}$ 를 찾는 것이 가능하다.  $\mathbf{J}$ 를 찾으면  $\mathbf{Y}$ 에서  $\mathbf{J}$ 를 빼면  $\mathbf{Y} - \mathbf{J} = \mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{X} + \mathbf{Z}$ 와 같이 나타내지므로 NBI가 없이 통신이 가능하다.

이러한 기본적인 시스템은 NBI가 원하는 신호와 동기화가 되어 있지 않은 주파수 오프셋인 경우에도 NBI 신호는 성긴 신호의 특징을 그대로 가짐을 보였다<sup>[12]</sup>. 따라서 이러한 환경에도 앞에서 보인 식과 비슷하게 모델링 되고 압축센싱 문제를 이용해서 풀 수 있다. 뿐만 아니라, 논문 [12]에서는 cyclic-prefix를 guard sequence로 이용 했을 때도 NBI를 제거 할 수 있음을 보였다.

또한, 논문 [12]에서 사용된 방법을 MIMO-OFDM 시스템에 확장한 연구도 최근에 진행된바 있다<sup>[13]</sup>. 여기서 저자는 송신기가 2개 수신기가  $N$ 개인 상황을 고려했다. 여기서 수신된 NBI 신호들이 비상관성을 가지기 위해서 각각의 수신 안테나는 서로서로 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정한다. 따라서, 위에서 제안한 NBI추정 및 제거 방법을 각각의 안테나에 똑같이 적용시킬 수 있음을 보였다.

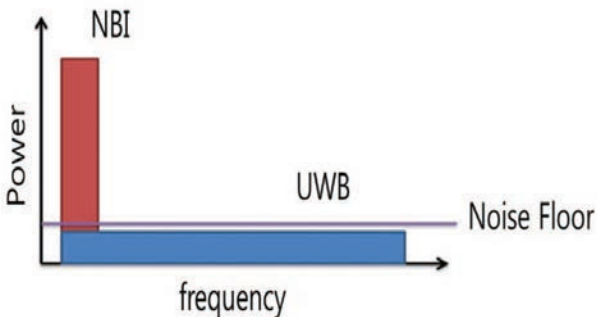
**2. UWB 시스템의 NBI 제거**

이 장에서는 압축센싱을 이용해서 초 광 대역(UWB) 시스템에서 문제가 되고 있는 다른 협 대역 시스템과의 간섭(NBI)이 어떻게 제거 될 수 있는지 살펴 보는 것을 목표로 한다.

UWB 기술은 짧은 거리의 무선 통신에서 높은 데이터 전송률을 가질 수 있을 것으로 기대되는 통신 시스템이다. 하지만, UWB 신호의 넓은 대역폭 때문에 높

은 표본 율(Sampling rate)이 필요하다는 문제점을 가지고 있다. 이 문제점은 서론 부분에서 언급했듯이 압축센싱 기술을 이용해서 해결 할 수 있다. 하지만 <그림 2>에서 보는 바와 같이 다른 협 대역 시스템이 UWB 신호의 전체 대역폭에 일부분이 공존하는 문제 또한 발생한다. 즉, 협 대역 시스템은 UWB 시스템에서 주파수 영역에서 성긴 표현으로 나타내어 지는 협 대역 간섭(NBI)으로 볼 수 있다. 따라서, 압축센싱을 이용해서 NBI는 추정되고 제거 될 수 있다. 이렇듯 압축센싱 기술은 UWB시스템에서 NBI를 제거하는데 있어서 적합한 기술이라는 것을 알 수 있다. 이제 압축센싱을 이용해서 UWB 시스템에서 어떻게 NBI를 제거 하는지에 대해서 간단히 알아 보겠다.

NBI 제거를 위해 압축센싱의 부분공간 측정 행렬과 정보의 끝 부분에 보충적인 정보나 데이터의 시작을 나타냄으로써 전송을 동기화 하는데 사용되는 training을 기반으로, 세계의 파일럿 그룹 심볼이 사용되었다<sup>[14]</sup>. 각각의 파일럿 그룹 심볼은 NBI 신호 부분공간, UWB 신호 부분공간 추정 그리고 채널 정보를 제공하기 위한 것이다. NBI 부분공간 추정은 NBI 제거 과정을 위해 필요하고, UWB 부분공간 추정은 대부분의 신호 에너지를 포함하는 채널 경로들을 찾기 위해 필요하다. NBI 뿐만 아니라 수신된 UWB 신호 또한 성긴 신호로 나타내어 질 수 있는 것이 알려져 있으므로<sup>[15]</sup> 압축센싱 기법을 이용할 수 있다.



<그림 2> UWB 시스템에서 NBI 발생

**압축센싱 간섭제거 방법을 협 대역 시스템이 혼재해서 NBI가 발생하는 UWB 시스템에 적용 가능함**

우리는 본 논문의 주제와 연관되어 있는 NBI가 UWB 시스템에서 어떻게 제거 되는지에 대해 집중해서 간단히 알아 보겠다. 부수적인 내용인 기본적인 UWB 통신 시스템 모델과 세번째 파일럿 신호를 이용한 신호 검출 등에 관한 내용은 [14,16]을 참조하길 바란다.

먼저 첫 번째 파일럿 그룹 심볼 동안 수신된 신호  $y_1$  는 RIP 조건을 만족시키기 위해서 NBI 부분공간 측정 행렬 크기가  $M \times N$ 이고  $M \ll N$ 인 I.I.D 베르누이 분포를 따르는  $A_1$ 에 의해 곱해진다. NBI 부분공간 추정을 할 때, UWB 심볼은 전송되지 않으므로, NBI신호 부분공간은 압축 측정에 의해 추정될 수 있다. NBI 부분공간 신호의 제거를 위한 영사 행렬  $P$ 는  $N \times N$ 의 크기를 가지고 영-부분공간(null-subspace) 영사 행렬로 디자인 되어야 한다<sup>[10]</sup>. 식으로 간단히 나타내면 아래 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Py_1 = PA_1r = P(A_1J + A_1w) = A_1w \quad (10)$$

여기서  $r, J, w$ 는  $N \times 1$ 의 크기를 가지고 각각 샘플된 수신 신호, 디지털화된 NBI신호, 디지털화된 잡음을 나타낸다. 특히,  $J$ 는  $K$ -sparse 성긴 신호로써  $K$ 개의 협 대역 시스템의 신호만 충분히 세기가 커서 UWB 시스템에 영향을 미친다고 가정한다.

다음으로 두 번째 파일럿 그룹 심볼 동안 샘플된 수신 신호  $y_2$ 는 부분공간 측정 행렬 크기가  $M \times N$ 이고  $M \ll N$ 인 측정행렬  $A_2$ 에 의해 곱해진다. 두 번째 파일럿 그룹 심볼 동안에는 UWB심볼이 전송되는 동안 NBI 신호도 포함된다. 이때,  $A_2$ 는 NBI 부분공간 추정 때 만든  $A_1$ 과  $P$ 의 정보를 이용해서  $A_2 = A_1P$ 로 만든다. 즉, NBI 부분공간 측정 행렬에 NBI 부분공간 신호의 영사 행렬을 곱해서 만든다. 따라서, NBI는 제거 될 수 있다. 식으로 간단히 나타내면 아래 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_2 &= \mathbf{A}_2 \mathbf{r} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{A}_2 \mathbf{J} + \mathbf{A}_2 \mathbf{w} \\ &= \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{A}_2 \mathbf{w} \end{aligned} \quad (11)$$

식(10)에 비해 식 (11)에서 추가된  $\mathbf{x}$ 는  $N \times 1$ 의 크기를 가지고 디지털화된 UWB 신호를 나타낸다. 식(11)에서 알 수 있듯이 UWB 신호가 존재하는 상황에서  $\mathbf{A}_2 \mathbf{J} = \mathbf{0}$ 으로 NBI가 제거 됐음을 확인 할 수 있다. 또한, 최근에는 보다 효율적인 파일럿 심볼 사용을 위해서 위에서 소개한 논문 [14]에서 더 나아가 UWB 시스템에서 압축센싱 기반 NBI제거에 필요한 파일럿 심볼 분포에 대한 연구가 진행 됐다<sup>[17]</sup>.

## V. 결론

본 논문에서는 압축센싱 이론을 이용한 간섭제거 방법을 알아보고, 압축센싱 이론이 가진 특성을 이용해 NBI가 존재하는 광 대역 통신 시스템 OFDM과 UWB 시스템에서 어떻게 NBI가 제거 되는지에 대해서 초점을 맞춰서 알아봤다. 본 논문에서 소개한 분야 외에도 압축센싱 이론은 전통적 방식의 신호 획득 방법 및 그에 의한 시스템 설계 방식을 무너뜨리는 혁신적인 방식이기 때문에 다양한 통신과 네트워크 시스템에서 활발히 활용되고 있다. 그 예로 인지 무선통신 스펙트럼 센싱, 무선 센서 네트워크, 네트워크 데이터 마이닝 등에서 전통적인 시스템으로 해결하기 어려운 문제점을 해결하는데 압축센싱 이론을 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 앞으로도 압축센싱 이론은 정보통신 및 신호처리 분야에 있어서 기존의 전통적인 시스템으로 해결하기 어려운 많은 문제들을 해결하기 위해 긴요하게 쓰일 것으로 기대된다.

## 감사의글

본 논문은 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (중견연구자-도약연구사업, NO.2013-035295)

## 참고 문헌

- [1] E. J. Candes, "Compressive sampling," in Proc. International Congress of Mathematics, Madrid, Spain, 2006, vol. 3, pp. 1433-1452.
- [2] D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. Info. Theory, Vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, Sep. 2006.
- [3] E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements," Communications on Pure and Applied Mathematics, vol. 59, no. 8, pp. 1207-1223, Aug. 2006.
- [4] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, Feb. 2006.
- [5] 이흥노, 박상준, 박순철, "압축센싱 소개," 대한전자공학회지, 전자공학회지 vol. 38, no. 1, pp. 19-30, Jan. 2011.
- [6] S. S. Chen, D. L. Donoho, M.A Saunders, "Atomic decomposition by basis pursuit," SIAM J. Sci. Comput., Vol. 20, No. 1, pp. 33-61, 1998.
- [7] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.
- [8] Robert Tibshirani, "Regression Shrinkage and Selection via the LASSO," Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), vol. 58, no. 1, pp. 267-288, 1996.
- [9] B. Efron, T. Hastie. I. M. Johnstone, and R. Tibshirani, "Least angle regression," The Annals of Statistics, vol. 32, no. 2, pp. 407-409, 2004.
- [10] M. A. Davenport, P. T. Boufounos, and R. G. Baraniuk, "Compressive Domain Interference Cancellation," Workshop on Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations



(SPARS), Saint-Malo, France, April 2009.

[11] Seunggye Hwang, Seunghun Jang, Dongku Kim, Jeongwook Seo, "An MMSE-based Compressive Domain Interference Canceller for Wideband Systems," in IEEE ICCAE, Feb. 2010.

[12] A. Gomma and N. Al-Dhahir, "A Compressive Sensing Approach to NBI Cancellation in Mobile OFDM Systems," in IEEE GLOBECOM, Dec. 2010.

[13] A. Gomma and N. Al-Dhahir, "A Sparsity-Aware Approach for NBI Estimation in MIMO-OFDM," IEEE Trans. on Wireless Comm., vol. 10, pp. 1854-1862, June. 2011.

[14] Z. Wang, G. R. Arce, B. M. Sadler, J.L. Paredes, S. Hoyos, and Z. Yu, "Compressed UWB signal Detection with Narrowband Interference Mitigation," in IEEE ICUW, Vol.2, pp.157-160, Sep. 2008.

[15] J. L. Paredes, G. R. Arce, and Z. Wang, "Ultra-wideband compressed sensing: channel estimation," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 1, no. 3, pp. 383-395, Oct. 2007.

[16] Z. Wang, G. R. Arce, B. M. Sadler, J. L. Paredes, and X. Ma, "Compressed detection for pilot assisted ultra-wideband impulse radio," in IEEE ICUW, Sep. 2007.

[17] S. A. Alawsh, A.H. Muqalibel, "Pilot Symbols Distribution for Compressive Sensing Based NBI Mitigation in UWB Systems," in IEEE ICUWB, Sept. 2013.

[18] Andrea Giorgetti, Marco Chiani, Moe Z. Win, "The Effect of Narrowband Interference on Wideband Wireless Communication Systems," in IEEE Trans. On Comm., vol. 53, no. 12, Dec. 2005.

[19] Batra. A, Zeidler. J. R, "Narrowband interference mitigation in OFDM systems," in IEEE MILCOM, Nov. 2008.

[20] Itsik Bergel, Eran Fishler, Hagit Messer, "Narrowband interference mitigation in impulse

radio," in IEEE Trans. On Comm., vol. 53, no. 8, August 2005.



신종목

- 2013년 2월 경북대학교 전자공학부(학사)
- 2013년 3월~현재 광주과학기술원 정보통신공학부 석사과정

〈관심분야〉  
무선통신, 압축센싱, 재밍, 안티재밍



강주성

- 2012년 2월 아주대학교 전자공학부(학사)
- 2013년 3월~현재 광주과학기술원 정보통신공학부 석박사 통합과정

〈관심분야〉  
무선통신, 압축센싱, DSP





이 흥 노

- 1993년 University of California, Los Angeles  
전자공학과 (학사)
- 1994년 University of California, Los Angeles  
전자공학과 (석사)
- 1999년 University of California, Los Angeles  
전자공학과 (박사)
- 1999년 3월~2001년 11월  
Member of Technical Staff of Hughes  
Research Lab. in Malibu, California
- 2002년 1월~2008년 12월  
in Department of Electrical and  
Computer Engineering University of  
Pittsburgh, 조교수
- 2009년 1월~2013년 3월  
광주과학기술원 정보통신공학부 부교수
- 2013년 3월~현재  
광주과학기술원 정보통신 공학부 정교수

〈관심분야〉

압축센싱, 정보이론, 부호이론, 무선통신, BCI