

탐색레이더에서의 압축센싱기술 기반 ISAR 영상획득 기법

I. 서론

압축센싱기술은 부족한 샘플링 데이터로부터 원래 디지털 신호를 복원하는 기술로, 2006년 Donoho에 의해 처음 제안되었다^[1-2]. 압축센싱 기술은 디지털 신호의 복원뿐만 아니라, 데이터 압축, 안티 노이즈, 디지털 신호의 해상도 개선 등 다양한 신호처리분야에 이용되고 있다. 이에 본 논문에서는 압축센싱기술에 대한 소개와 레이더 영상 분야의 활용법에 대해서 기술하도록 한다.

항공기와 같은 레이더 표적의 2차원 영상을 획득하기 위해서는 넓은 대역폭을 가지는 레이더를 이용하여, 움직이는 표적에 대한 다양한 관측각도에서 연속적으로 획득된 표적의 산란신호를 필요로 한다. 다양한 관측각도에서 연속적인 표적의 산란신호를 획득하기 위해 추적레이더가 이용되며, Fourier 기반의 영상처리과정을 통하여 표적의 산란점을 down-range와 cross-range로 표현되는 2차원의 축에 나타내면 2차원 표적 영상을 획득할 수 있다. 하지만, 이와 같이 움직이는 표적을 추적하여 표적의 산란신호를 수집하는 추적레이더는 설치비용이 비싸고, 제한된 탐색영역을 가진다는 특징이 있다. 한편, 탐색레이더는 추적레이더보다 상대적으로 설치비용이 저렴하고, 일반적으로 회전형 안테나를 채택하고 있으므로, 탐색영역을 보다 넓힐 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 탐색레이더의 경우 회전형 안테나 채택함으로 인해 획득하게 되는 표적의 산란신호가 연속적이지 못하고 불충분하다는 특징을 지니게 된다. 따라서 이와 같은 불연속적이고 불충분한 표적의 산란신호를 획득하게 되는 탐색레이더에 대해 압축센싱기술을 적용할 경우, 영상의 품질측면에서는 다소 손해를 보지만, 보다 저렴한 비용으로 표적의 레이더 영상을 획득 할 수 있다는 장점을 가지게 된다. 2장에서는 압축센싱기술의 원리와 레이더 영상 분야에 적용하는 과정에 대해서 기



김 형 주
한국과학기술원 전기 및 전자공학부



송 원 영
한국과학기술원 전기 및 전자공학부



명 로 훈
한국과학기술원 전기 및 전자공학부

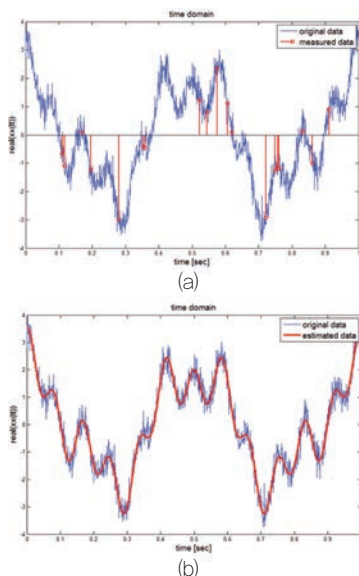
술하고, 3장에서는 압축센싱기술을 바탕으로 획득된 표적의 레이더 영상의 결과 및 분석을 제공한 뒤, 4장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 압축센싱 기술 및 레이더 영상분야의 적용

1. 압축센싱 기술

〈그림 1(a)〉의 파란색으로 표시된 그래프와 같은, 측정하고자하는 원래의 신호가 있다고 가정을 하자. 이 신호는 1001개의 샘플로 이루어져 있으며, 원하지 않는 노이즈(SNR = 20 dB) 또한 내포하고 있다. 〈그림 1(a)〉의 파란색으로 표시된 것과 같은 그래프를 획득하기 위해 1001개의 모든 샘플이 있으면 용이하지만, 보다 적은 수의 샘플로 원래의 그래프를 획득하고자 한다. 이때, 압축센싱기술을 이용하면, 〈그림 1(a)〉의 빨간색 샘플과 같이 random한 위치에서 측정된 20개의 샘플만으로 〈그림 1(b)〉와 같이 원래의 신호를 복원할 수 있다.

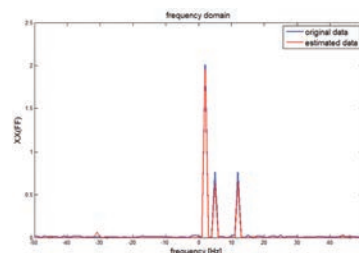
〈그림 1(b)〉에 복원된 신호는 빨간색으로 나타내었으며 원래의 신호와 겹쳐 나타내보면, 정확히 원래의 신호를 복원하였을 뿐만 아니라, 원래 신호에 섞여 있었던 노이즈 또한 완벽히 제거한 모습을 확인할 수 있다. 1001



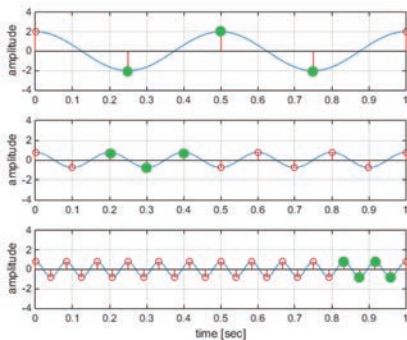
〈그림 1〉 압축센싱기술을 이용한 신호복원 (a) 원래의 data 및 샘플링된 data (b) 복원된 data

개의 샘플 중 단 20개의 샘플만으로 나머지 981개의 샘플을 추정한다는 것을 불가능을 가능으로 바꾼 매우 놀라운 기술로 보이지만, 그 원리는 의외로 간단하다. 압축센싱기술의 가장 핵심적인 요소는 신호의 sparsity와 random sampling이다. 압축센싱기술을 처음 제안한 Donoho는 우리가 다루는 대부분의 신호는 sparse한 특성을 지니고 있다는 점을 지적하며, 이로부터 압축센싱기술을 고안하게 되었다. 우리가 복원하고자 하는 신호를 우리가 알고 있는 형태의 신호로 변환하게 되면 (ex- Fourier transform, wavelet transform 등), 소수의 major component(coefficient)와 다수의 minor component(coefficient)의 형태로 이루어지며, 신호가 이러한 특성을 가질 때, 이 신호는 sparse하다고 표현한다. 〈그림 1〉의 신호를 Fourier 변환한 뒤, 그 결과를 〈그림 2〉에 나타내었다.

〈그림 2〉의 파란색 그래프를 통해, 〈그림 1〉에 나타난 신호는 3개의 큰 값을 가지는 major component(coefficient)와 영(zero)에 가까운 다수의 minor component(coefficient)의 형태로 이루어지므로, 이 신호는 sparse한 특징을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 복원하고자 하는 신호가 sparse한 특성을 가질 경우, 변환된 domain에서 〈그림 2〉의 빨간색으로 표시된 major component(coefficient)만 추정하게 되면, 본래의 domain으로 다시 변환하여 원래의 신호를 복원할 수 있게 된다. 이때, major component를 추정하기 위해 random sampling이 필요하다. 〈그림 1〉의 신호는 〈그림 2〉에 나타난 것과 같이 3개의 주파수 성분을 가지는 신호로 구성되며, 각 주파수 성분이 시간영역에서 가지는 그래프의 형상을 〈그림 3〉에 나타내었다. 편의상 〈그림



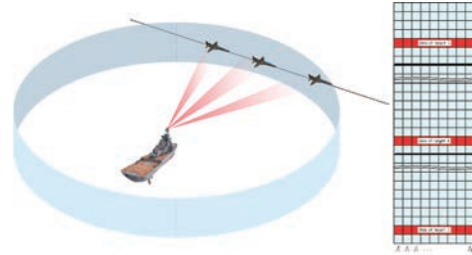
〈그림 2〉 주파수 domain의 신호



〈그림 3〉 복원대상 신호의 주파수별 분해

3)의 위에서 아래 순으로 각 신호의 주파수를 f_1, f_2, f_3 으로 명명하였다.

f_1 의 주파수를 가지는 신호를 정확히 측정하기 위해서는 Nyquist 이론에 의해 $2f_1$ 보다 큰 샘플링 주파수로 측정을 수행해야 한다. f_2, f_3 의 주파수를 가지는 신호 또한 각각 $2f_2, 2f_3$ 보다 큰 샘플링 주파수를 필요로 한다. 하지만, f_1 주파수를 가지는 신호에서, 피측정 신호가 단일 주파수 성분의 신호로 이루어진 주기적인 신호라면, $2f_1$ 보다 큰 샘플링 주파수가 필요할 뿐, 〈그림 3〉의 녹색점으로 표시된 것과 같이 3~4개의 소수의 측정샘플만 있으면 주파수 f_1 추정 가능하다. 이는 f_2, f_3 주파수를 가지는 신호의 주파수를 추정에도 동일하게 적용된다. 즉, 다양한 주파수 성분을 가지는 신호의 주파수 스펙트럼을 추정하기 위해서, Nyquist 이론에서는 $2f_{\max}$ ($f_{\max} = f_3$) 이상의 샘플링 주파수를 요구하게 되는데, 이 경우 f_1 과 같이 작은 주파수 성분을 가지는 신호에 대해서는 지나친 샘플링을 초래하게 된다. 따라서 모든 주파수 영역에 대해 적절한 샘플링수를 결정하기 위해 Donoho는 원래 신호의 총 샘플수보다 적은 수의 random sampling을 권하게 된다. 다시 〈그림 1(a)〉에서 빨간색으로 표시된 측정 샘플의 시간좌표를 보면, 압축센싱기술에서는 큰 간격으로 떨어진 샘플들을 이용하여 낮은 주파수 성분을 추정하게 되고, 작은 간격으로 측정한 샘플들을 통하여 높은 주파수 성분을 추정하게 된다. 즉, random sampling을 통하여 필요한 측정 샘플수를 줄이고, 최소의 측정 샘플들로부터 복원하고자 하는 신호의 major component(coefficient)를 추정함으로써 원래의 신호를 복원하게 된다.



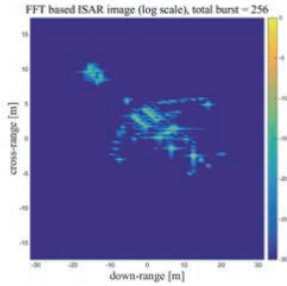
〈그림 4〉 탐색레이더를 이용한 표적산란신호 획득

2. 레이더 영상분야 적용

앞서 설명한 압축센싱기술은 탐색레이더를 이용한 표적영상획득 기술에 적용할 수 있다. 움직이는 표적을 관측하면서 연속적으로 표적의 산란신호를 획득하는 추적레이더와 달리, 탐색레이더를 이용하여 표적의 산란신호를 획득하게 될 경우, 〈그림 4〉에 도시한 바와 같이 불연속인 표적의 산란신호를 수집하게 된다. 레이더 안테나가 회전을 하면서 표적을 정확히 향할 경우, 표적의 산란신호를 획득하게 되지만, 레이더 안테나가 다른 방향을 향할 경우 아무런 신호를 획득하지 못하게 된다. 이는 〈그림 1(a)〉의 측정샘플과 같이, 필요로 하는 전체의 데이터 중 소수의 측정샘플을 수집한 것과 같은 상황이므로 이러한 불연속적이고 불충분한 표적의 산란신호에 압축센싱기술을 적용할 경우, 전체 표적의 산란신호를 추정할 수 있어 표적의 레이더 영상을 획득할 수 있다.

III. 모의 실험

본 절에서는 B-727 항공기 표적에 대하여 시뮬레이션으로 획득된 표적산란신호와 측정으로 획득된 표적산란신호를 이용하여 영상획득 실험을 수행하였다. 우선 시뮬레이션으로 획득된 표적산란신호는 많은 논문들에서 이미징 결과의 검증을 위해 자주 인용되는 신호로, 64×256 픽셀의 해상도, 9 GHz의 중심주파수, 150 MHz의 대역폭을 가지는 표적산란신호를 이용하였다^[3]. 〈그림 5〉에는 추적레이더를 이용하여 획득된 B-727 항공기 표적산란신호로부터 기존의 Fourier 기반 영상획득 기법을 적용하여 획득된 ISAR 영상을 나타내었다. 추적레이더를 이용할 경우, 표적산란신호의 손실이 없기 때문에 깨끗한 영상을 획득할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

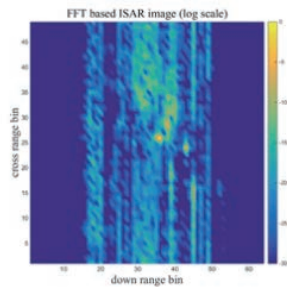


〈그림 5〉 시뮬레이션된 B-727 표적 (추적레이더)

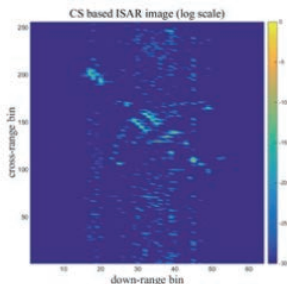
〈표 1〉 시뮬레이션 B-727 표적에 대한 시뮬레이션 설정

Parmeter	Value
RPM (분당 회전 속도)	30
레이더-표적간 거리	20 km
표적 이동 벡터	(1, 5)
표적 속력	340 m/s
주파수 샘플링 수	64
각도 샘플링 수 (탐색레이더/추적레이더)	49 / 256

〈표 1〉에 명시된 파라미터를 가지는 탐색레이더를 이용하여 획득된 표적의 산란신호로부터 기존의 Fourier 기반 영상획득 기법을 적용하여 획득된 ISAR 영상을 〈그림 6〉에 나타내었다. 탐색레이더는 추적레이더와 달



〈그림 6〉 19.1%로 감축된 신호로부터 기존의 FFT 기법을 이용하여 획득한 ISAR 영상 (탐색레이더)



〈그림 7〉 19.1%로 감축된 신호로부터 압축센싱 기법을 이용하여 획득한 ISAR 영상 (탐색레이더)

리 신호의 손실을 가지게 되므로, 〈그림 6〉과 같이 표적의 형상을 알아 볼 수 없는 결과를 얻게 되었다.

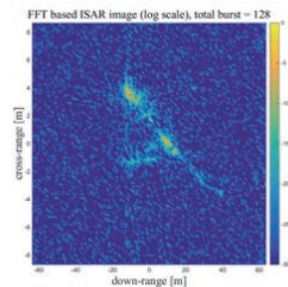
하지만, 압축센싱기술을 탐색레이더를 이용하여 수집된 표적산란신호에 적용하여 표적의 레이더 영상을 획득할 경우, 〈그림 7〉과 같은 결과를 얻을 수 있다. 〈그림 7〉을 〈그림 5〉와 비교해 보면, 추적레이더의 신호를 이용한 결과보다 영상의 품질이 다소 떨어지지만 표적을 식별할 수 있을 정도의 결과를 얻을 수 있다.

동일한 실험을 시뮬레이션으로 합성된 표적의 산란신호가 아닌, 측정된 B-727 표적산란신호에 적용하여 반복하였다. 실제 탐색레이더를 이용하여 표적 산란신호를 측정하기에는 환경적인 제약이 따른다. 이에, 본 논문에서는 추적레이더를 이용하여 측정된 B-727 표적산란신호로부터 〈표 2〉에 정리된 탐색레이더 파라미터에 의해 일부 신호만을 탐색레이더에서 측정된 신호로 가정하고, 이와 같이 불충분한 신호로부터 압축센싱기술을 적용하여 표적의 영상을 획득하도록 하였다.

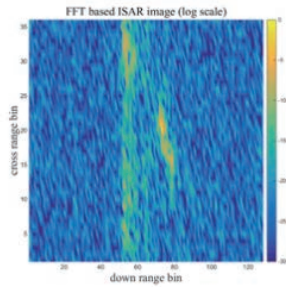
추적레이더를 이용하여 기존의 Fourier 기반 영상획득 기법을 적용할 경우, 신호의 손실없이 연속적이고 충분한 표적 산란신호를 수집하기 때문에 〈그림 8〉과 같이 깨끗한 영상을 획득하게 되는 반면, 탐색레이더를 이용할 경

〈표 2〉 측정된 B-727 표적에 대한 시뮬레이션 설정

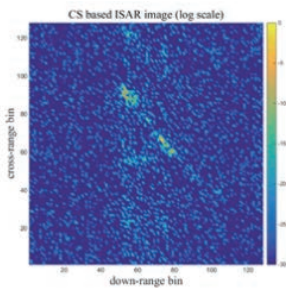
Parmeter	Value
RPM (분당 회전 속도)	22
레이더-표적간 거리	20 km
표적 이동 벡터	(1, 5)
표적 속력	340 m/s
주파수 샘플링 수	128
각도 샘플링 수 (탐색레이더/추적레이더)	36 / 128



〈그림 8〉 측정된 B-727 표적 (추적레이더)



〈그림 9〉 28.1%로 감축된 신호로부터 기존의 FFT 기법을 이용하여 획득한 ISAR 영상 (탐색레이더)



〈그림 10〉 28.1%로 감축된 신호로부터 압축센싱 기법을 이용하여 획득한 ISAR 영상 (탐색레이더)

우, 신호의 손실로 인해 〈그림 9〉와 같은 품질이 떨어지는 영상을 획득하게 된다.

하지만, 압축센싱기술을 탐색레이더를 이용하여 수집된 표적산란신호에 적용하여 표적의 레이더 영상을 획득할 경우, 〈그림 10〉과 같이 표적을 식별할 수 있는 영상을 얻을 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 압축센싱기술의 원리에 대해 설명하고, 이를 레이더 영상획득 분야에 적용한 사례를 소개하였다. 부족한 샘플링 데이터로부터 원래의 신호를 복원하는 압축센싱기술은, 연속적으로 표적의 산란신호를 수집하는 추적레이더가 아닌, 불연속적이며 불충분한 형태로 신호를 수집하게 되는 탐색레이더를 이용한 표적 산란신호에 적용하여 표적의 영상을 획득할 수 있다. 이에 본 논문에서는 시뮬레이션 신호 및 측정 신호에 본 기법을 적용하여 각 표적의 2차원 레이더 영상획득 결과를 도시하였다.

참고 문헌

- [1] David L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 52, No. 4, April 2006.
- [2] Emmanuel J. Candes and Michael B. Walkin, "An introduction to compressive sampling," IEEE Signal Processing Magazine, March 2008.
- [3] Chen VC, Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis. Norwood, MA: Artech House; 2002.



김형주

- 2010년 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사 졸업
- 2012년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
- 2012년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정

〈관심분야〉
전파수치해석, 레이더신호처리



송원영

- 2008년 한국과학기술원 전기전자공학과 학사 졸업
- 2010년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
- 2010년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

〈관심분야〉
ISAR 영상, 레이더신호처리



명로훈

- 1976년 서울대학교 전기공학과 학사 졸업
- 1982년 Ohio State University 전기공학과 석사 졸업
- 1986년 Ohio State University 전기공학과 박사 졸업
- 1986년 9월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
- 2006년 1월~2006년 12월 한국전자파학회 학회장
- 2004년 3월~2009년 12월 전파탐지 특화연구센터 소장
- 2008년 1월~2011년 12월 인공위성 연구센터 소장

〈관심분야〉

전파예측모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학
EMI/EMC/EMS 등