

Sub-Nyquist 표본화 시스템의 하드웨어 사용 효율 개선

장재혁, 이흥노 교수

GIST

전기전자컴퓨터 공학부
INFONET 연구실

목차

❖ Backgrounds

- 신호의 표본화
- 고전 표본화 시스템: Shannon-Nyquist sampling theorem
- 표본화 효율
- Sub-Nyquist 표본화 시스템: Modulated Wideband Converter

❖ Problem formulation

- MWC의 표본화 효율: PRBS 신호 발생기 성능에 따라 표본화 효율이 결정

❖ Proposed system: Aliased MWC

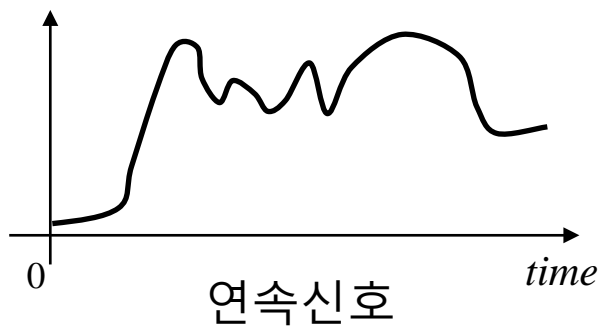
- AMWC의 표본화 효율: 에일리어싱 현상을 이용한 표본화 효율 개선

❖ Results

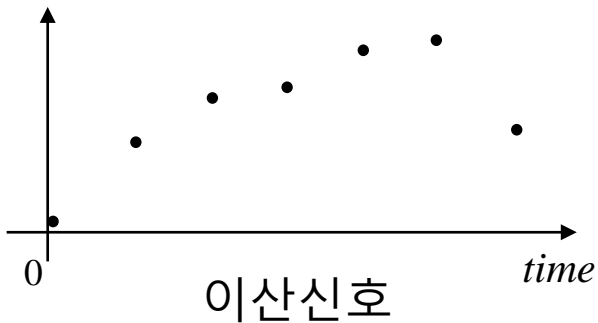
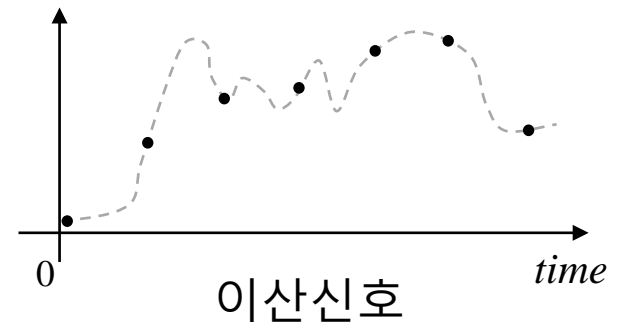
❖ AMWC의 활용 안: Electronic support

신호 표본화로 인한 정보 손실

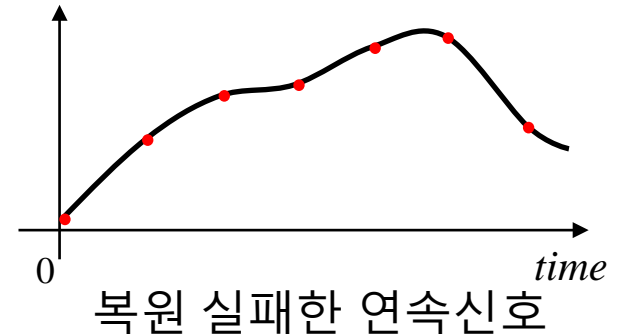
- ❖ 표본화란 연속 신호에서 일부 표본들만 취하는 과정
- ❖ 표본화로 인해 신호의 정보가 손실 될 수 있다
- ❖ 표본으로부터 연속신호를 복원 가능한가?



표본화



100% 복원
가능한가?



고전 표본화 시스템: S-N sampling theorem

❖ Shannon-Nyquist Sampling Theorem

- ADC의 표본화 속도가 신호 최대주파수의 2배 이상이면 (*Nyquist rate*)
- 표본 → 연속 신호 100% 복원 가능

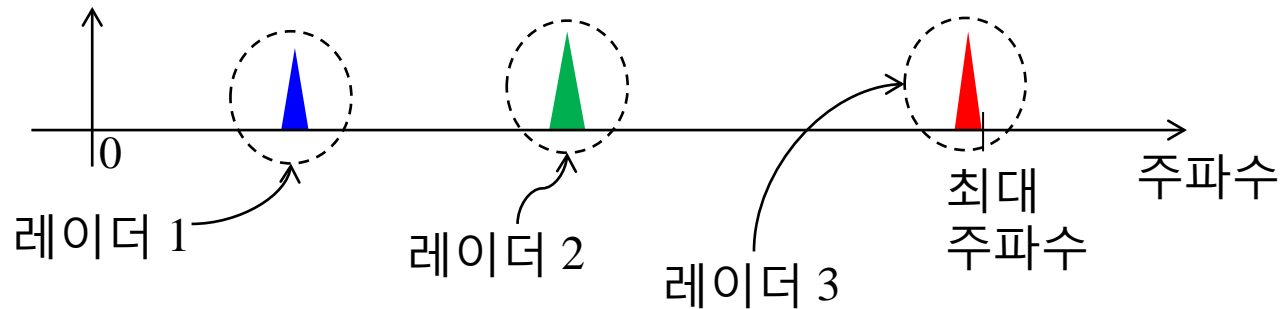
❖ SNST의 단점

- 충분조건을 제시했으나 필요조건은 아님
- 최대 주파수의 2배 만큼의 표본화 속도가 필요 없는 경우도 있음
- 즉, Nyquist rate가 비 효율적인 경우가 있음
- ADC의 표본화 속도는 곧 비용

Multi-band 신호와 표본화 효율 (1/2)

❖ Multi-band 신호

- 복수의 협대역 신호들이 합쳐져 안테나에 수신된 신호
- 협대역 신호들의 중심주파수는 서로 다름
- Ex) 광대역 안테나가 적들의 레이더 신호들을 수신한 경우



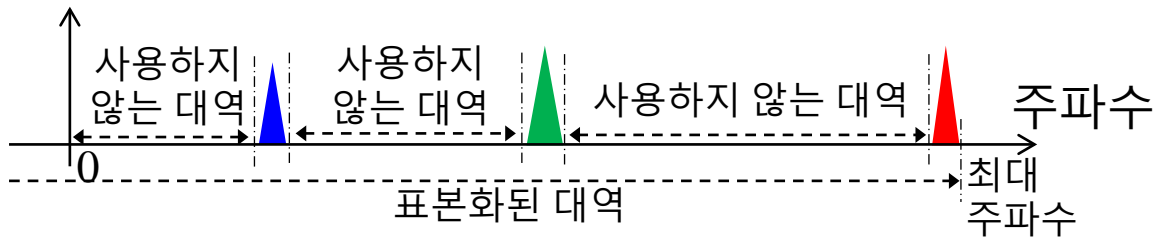
Multi-band 신호의 최대주파수는 굉장히 높지만,

실제로 사용하지 않는 대역이 많음

Multi-band 신호와 표본화 효율 (2/2)

❖ 표본화 효율

- Multi-band 신호를 SNST로 표본화 하는 것은 비 효율적
- 사용하지 않는 대역까지 모두 표본화하기 때문



$$\text{표본화 효율} = \frac{\text{실제 사용된 대역}}{\text{표본화된 대역}}$$

❖ 효율적인 표본화 방법은?

- 위의 그림에서 3개 협대역 신호의 *중심 주파수를 모두 알고 있다면*
- 주파수 천이와 필터를 이용하여 각각의 협대역 신호를 떼어내어
- 최대 주파수를 낮추고 SNST 표본화 가능

그러나, 연속 신호 상태에서 중심주파수를 미리 알 수 있을까?

Sub-Nyquist Sampling

❖ Landau Sampling Theorem [Landau67], [Eldar09]

- Multi-band 신호의 중심주파수를 모르는 경우
- 표본 → 연속신호 100% 복원을 위해서는
- 표본화 속도가 적어도 실제 사용된 대역폭 총합의 두 배 만큼은 필요하다
(Landau rate)

❖ Sub-Nyquist Sampling System

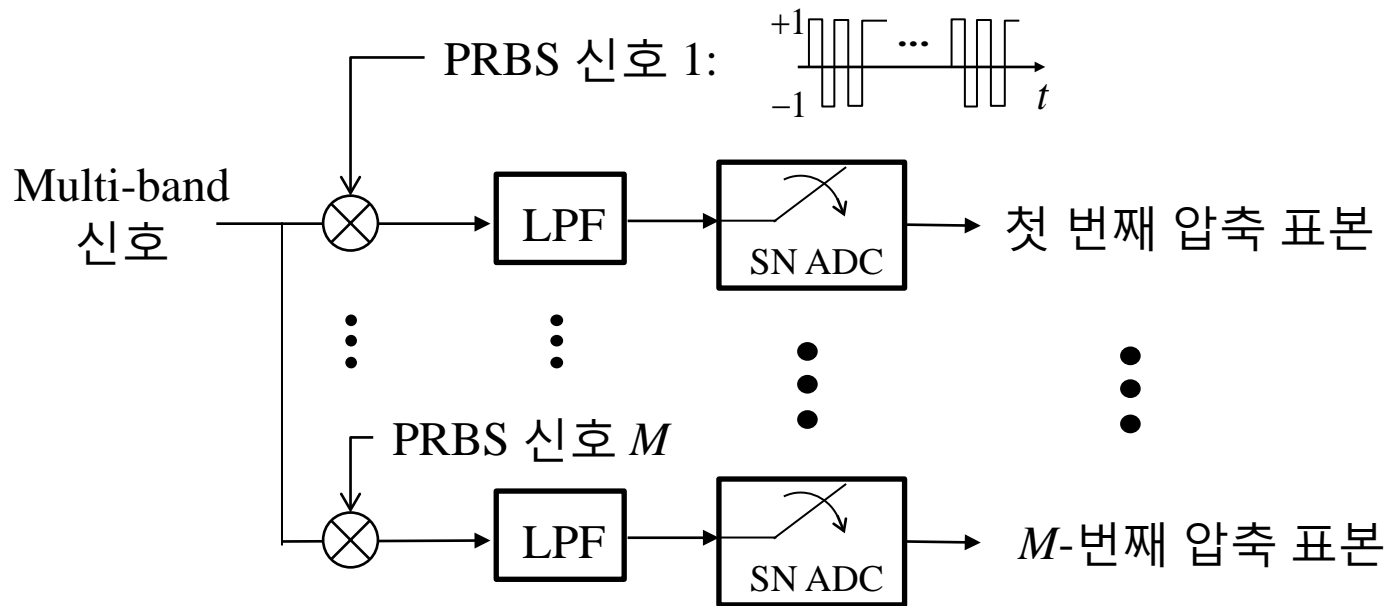
- Landau rate 실현을 목표로하는 표본화 시스템들이 최근 제안되어옴
- 스펙트럼을 압축하기 위해 의사잡음 (PRBS) 신호 발생기를 활용함
- 대표적인 시스템이 2010년 이스라엘 Technion대학의 Eldar 교수가 제안한

Modulated Wideband Converter (MWC) [Eldar10]

Modulated Wideband Converter?

❖ 신호 스펙트럼을 압축, 저속으로 표본화

- PRBS신호 발생기를 이용해서 multi-band 신호의 스펙트럼을 압축
- 스펙트럼 압축으로 인해 최대주파수가 낮아짐
- 낮아진 최대주파수에 *Shannon-Nyquist sampling* 적용

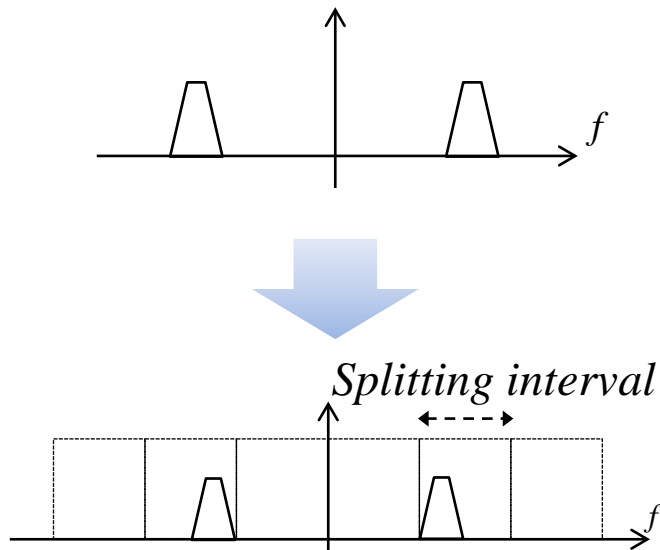


MWC의 스펙트럼 압축

1. Multi-band 신호 스펙트럼을 등 간격의 부분대역들로 분할한다.

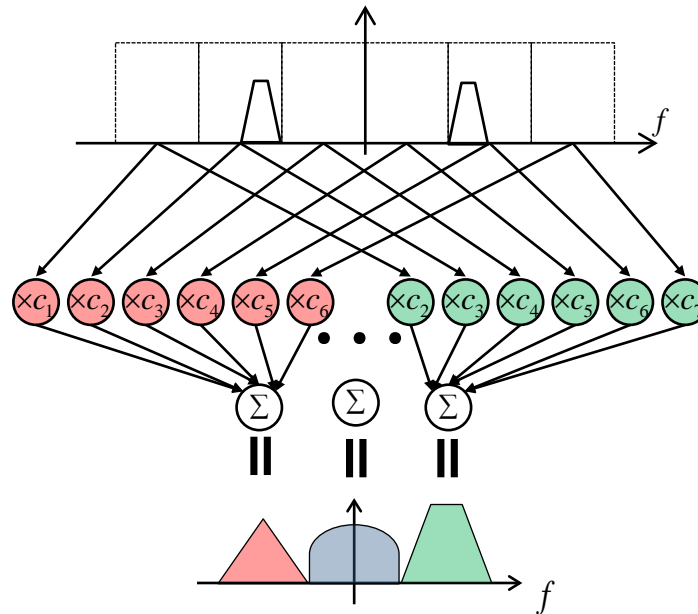
※ 분할 간격: *Splitting interval*

Multi-band 신호 스펙트럼



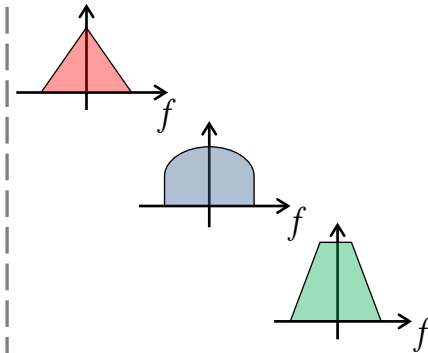
2. 분할 대역들에 계수를 곱하고 더한다.

※ 곱해진 상수는 PRBS 신호의 스펙트럼 성분이다.



결과물: 압축된 스펙트럼

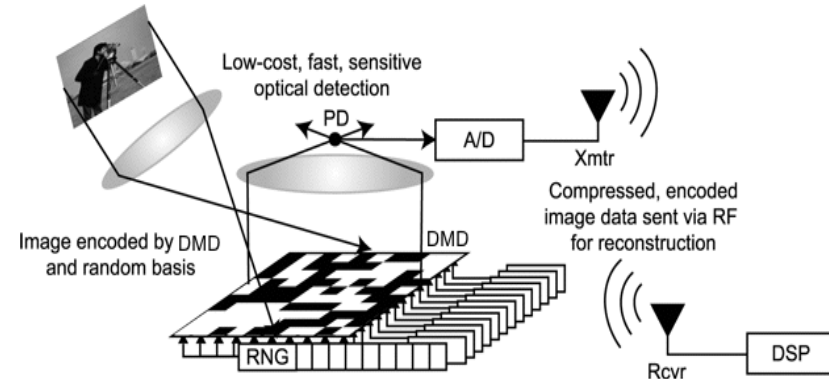
3. 압축 스펙트럼을 저속으로 표본화한다.



압축센싱 알고리즘으로 0이 아닌 부분대역 복원 가능

(참고) 압축 센싱 (Compressed Sensing)

- ❖ Compressed sensing (CS)
 - New signal acquisition techniques [Donoho06], cited >4000 times.
 - MIT 2007 Tech Review, “Top 10 Emerging Technologies”
- ❖ CS is to find sparse solution from an under-determined linear system.
 - Real, complex field
- ❖ Many application areas: Cameras, Medical Scanners, ADCs, Radars, ...



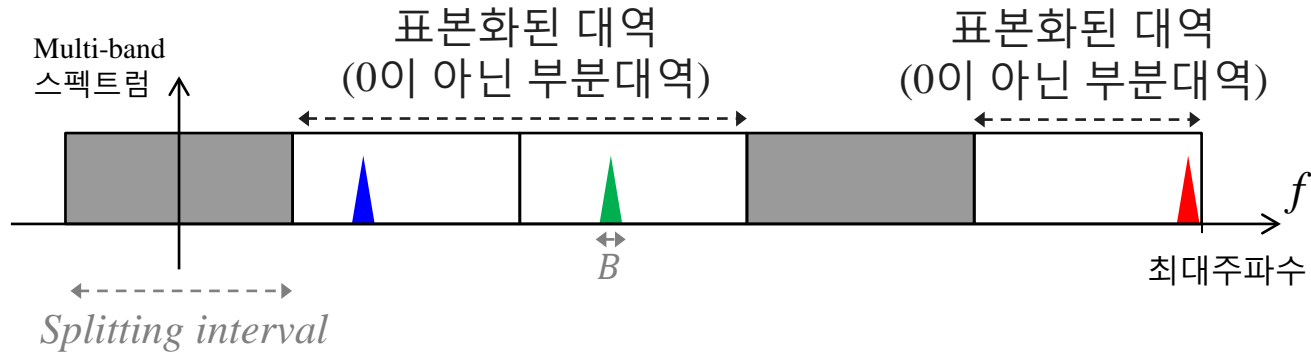
$$M < N$$

$$\begin{bmatrix} y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \end{bmatrix}$$

$y \in \mathbb{R}^M$
 $F \in \mathbb{R}^{M \times N}$
 $x \in \mathbb{R}^N$

$$\hat{x} = \arg \min_x \|x\|_0 \quad \text{subject to } Fx = y$$

MWC의 표본화 효율



표본화 효율 := $\frac{\text{실제 사용된 대역}}{\text{표본화된 대역}}$

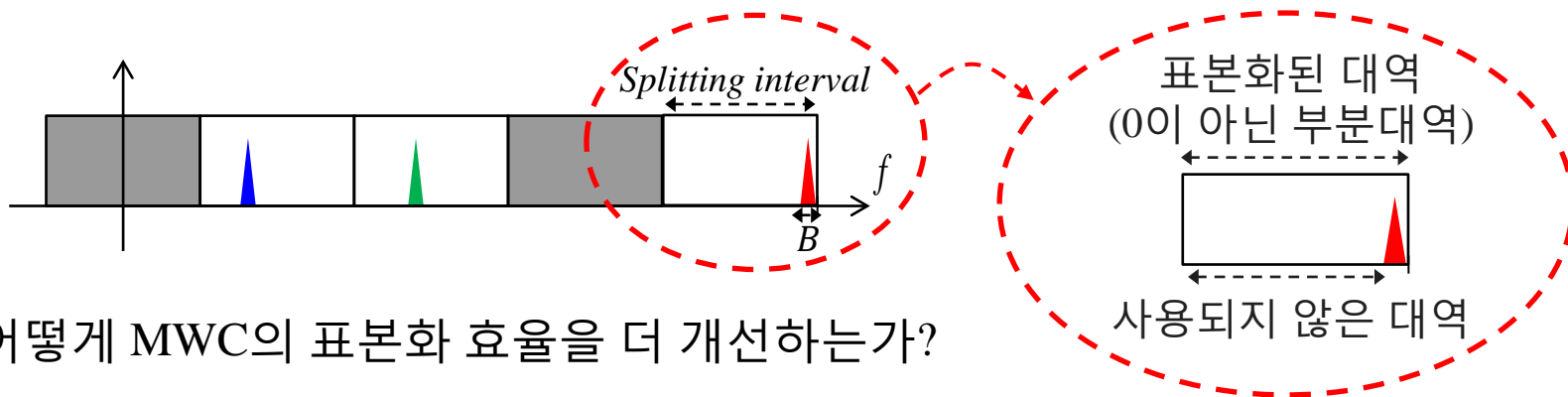
※ 실제 사용된 대역 = $3B$
 표본화된 대역 = $3 \times \text{splitting interval}$

❖ SNST의 표본화 효율 = $\frac{3B}{2 \times (\text{최대주파수})}$

❖ MWC의 표본화 효율 = $\frac{3B}{3 \times (\text{splitting interval})}$

MWC의 한계: *splitting interval* 조절 한계

$$\text{MWC의 표본화 효율} = \frac{3B}{3 \times (\textit{splitting interval})}$$



❖ 어떻게 MWC의 표본화 효율을 더 개선하는가?

– *Splitting interval*을 B 에 가깝게 조절한다

❖ *Splitting interval*은 어떻게 조절하는가?

– 의사잡음 패턴이 더 길어지도록 PRBS 신호 발생기를 업그레이드 한다

그러나, 의사잡음 패턴이 매우 긴 PRBS 신호 발생기는 구현이 어려움

“Due to extremely high chip speed up to tens of Gigahertz, implementing PR signal generators having a high chip length poses problems in terms of power consumption and fabrication area.” [Lee18]

새로운 Sampling System: Aliased MWC

❖ PRBS로 한 번 압축 + Aliasing으로 한번 더 압축

- PRBS신호를 이용해서 multi-band 신호의 스펙트럼을 압축
- 압축 신호 Nyquist rate보다 몇(*Aliasing parameter*) 배 더 느린 속도로 표본화 함
- 표본화 과정에서 Aliasing 현상 발생

명제 1

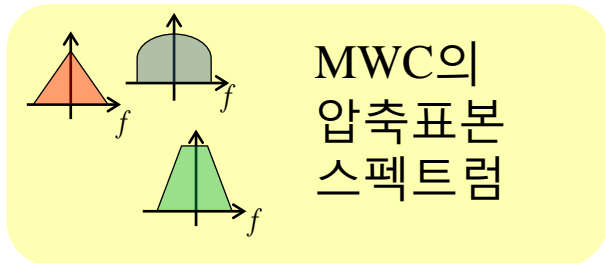
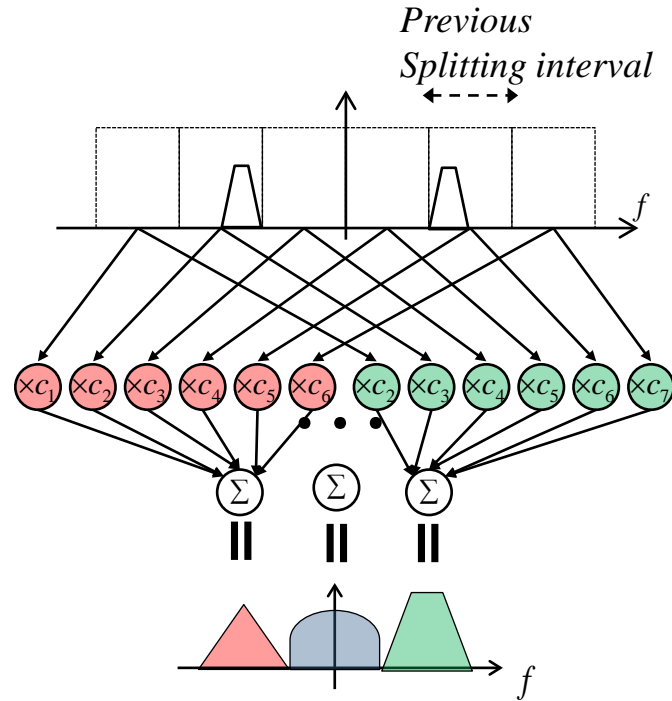
Aliasing이 발생하지만, 정보는 잃지 않는다 (100% 복원 할 수 있다) [Lee18]

명제 2

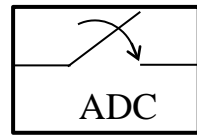
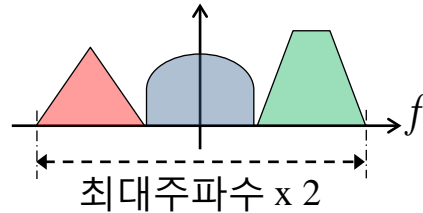
- 신호를 100% 복원하기 위해 필요한 표본화 속도가 MWC보다 Aliasing parameter만큼 더 적다.
- 혹은, 같은 표본화 속도를 사용할 때 MWC보다 AMWC의 복원 성능이 더 우수하다.

Aliasing의 압축 원리

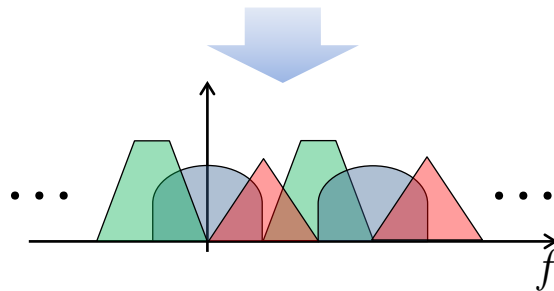
1. PRBS 신호에 의해 한 번 압축된 스펙트럼 (MWC)



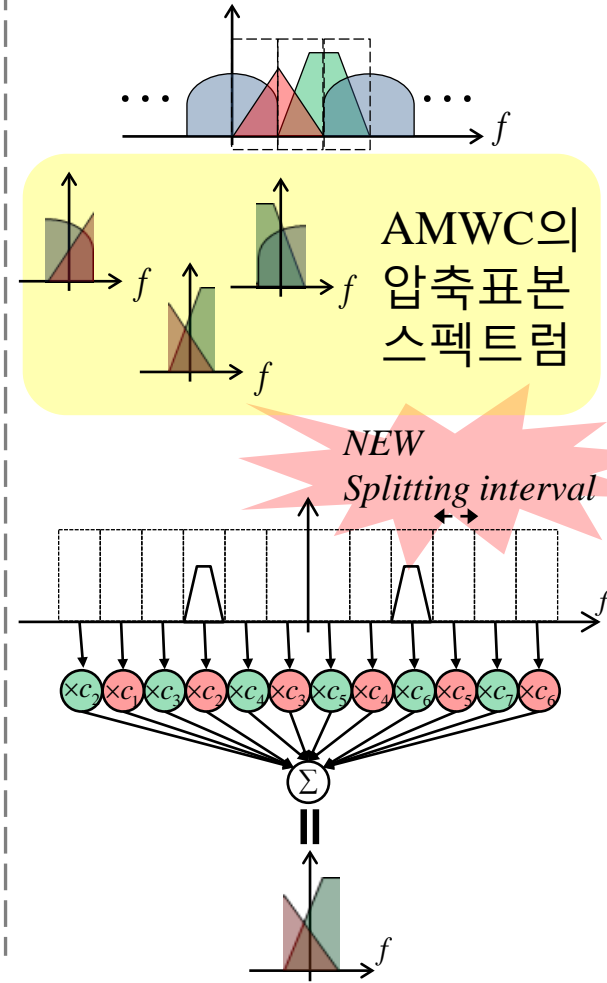
2. 압축 스펙트럼을 표본화, Aliasing 유도



표본화 속도 = 최대주파수 × 2
Aliasing parameter



최종 결과물의 Input-output 관계

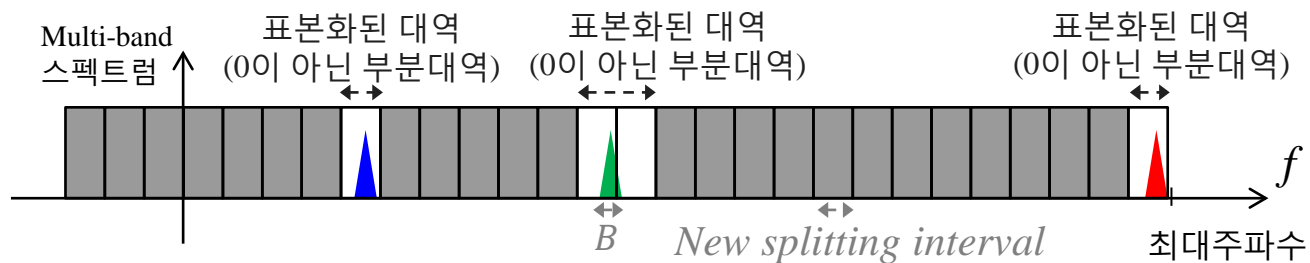


AMWC의 표본화 효율

❖ AMWC의 새로운 *splitting interval*

- Aliasing을 활용하여 *splitting interval*을 조절할 수 있음
- 다시 말해, LPF의 통과대역폭과 ADC의 표본화 속도간의 관계를 조절하는 것으로 *splitting interval*을 조절 할 수 있음
- 고성능 PRBS 신호발생기를 요구했던 MWC와는 대조적임

$$\text{AMWC의 } \textit{New splitting interval} = \frac{\text{MWC의 } \textit{Splitting interval}}{\text{Aliasing parameter}}$$



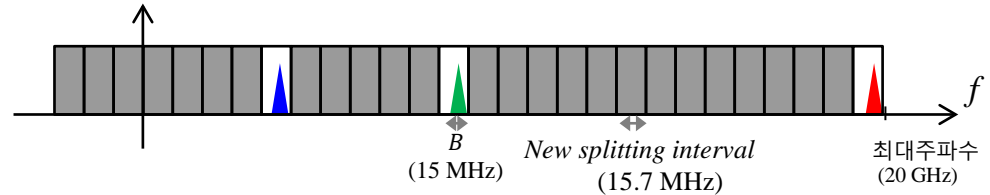
표본화 효율 비교

※ Ex) Multi-band 신호 최대주파수=20 GHz
 협대역 신호 대역폭 (B)=15 MHz

PRBS신호의 chip speed= 20GHz

PRBS 패턴 길이=127

PRBS 패턴 반복률 = $\frac{20GHz}{127} = 157MHz$



AMWC의 *aliasing parameter*=10

MWC의 *splitting interval*=157 MHz

AMWC의 **NEW *splitting interval***=15.7 MHz

❖ SNST의 표본화 효율 = $\frac{3B}{2 \times (\text{최대주파수})} = \frac{45 \text{ MHz}}{40 \text{ GHz}} \approx 10^{-3}$

❖ MWC의 표본화 효율 = $\frac{3B}{3 \times (\text{splitting interval})} = \frac{45 \text{ MHz}}{471 \text{ MHz}} \approx 0.095$

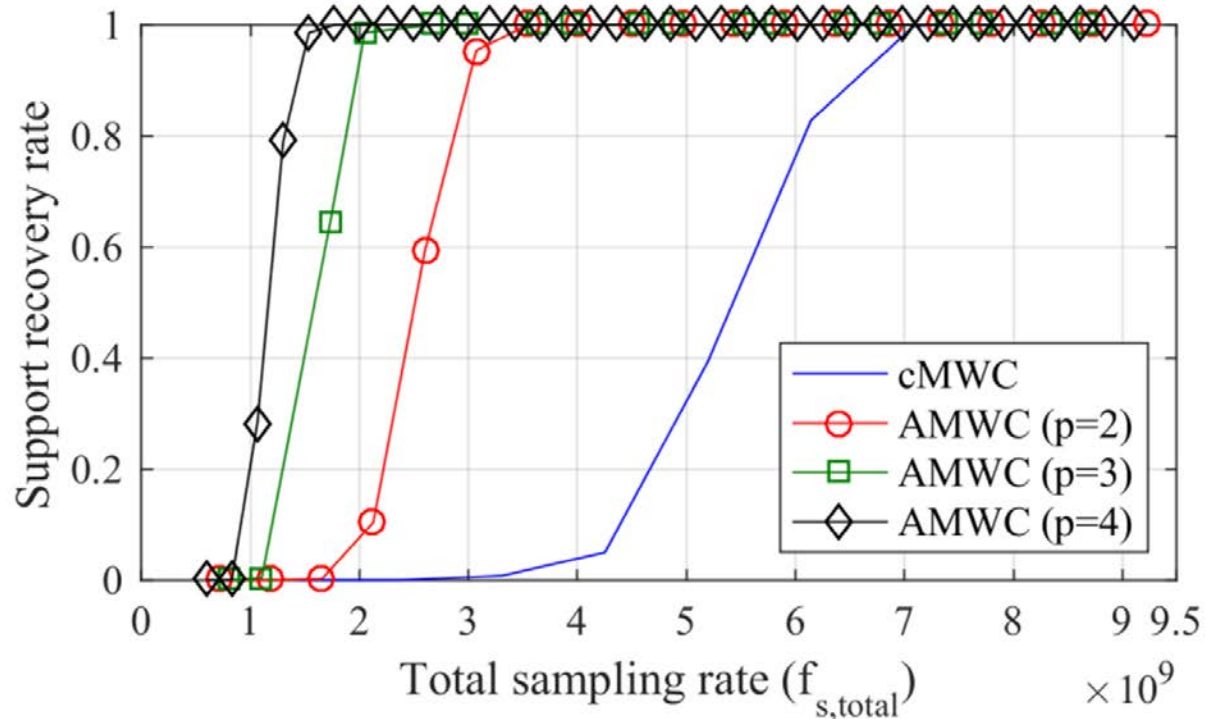
❖ AMWC의 표본화 효율 = $\frac{3B}{3 \times (\text{NEW splitting interval})} = \frac{45 \text{ MHz}}{47.1 \text{ MHz}} = 0.95$

Aliasing parameter=10
 ⇒ 10배 개선

명제2: AMWC의 표본화 속도대비 복원성능

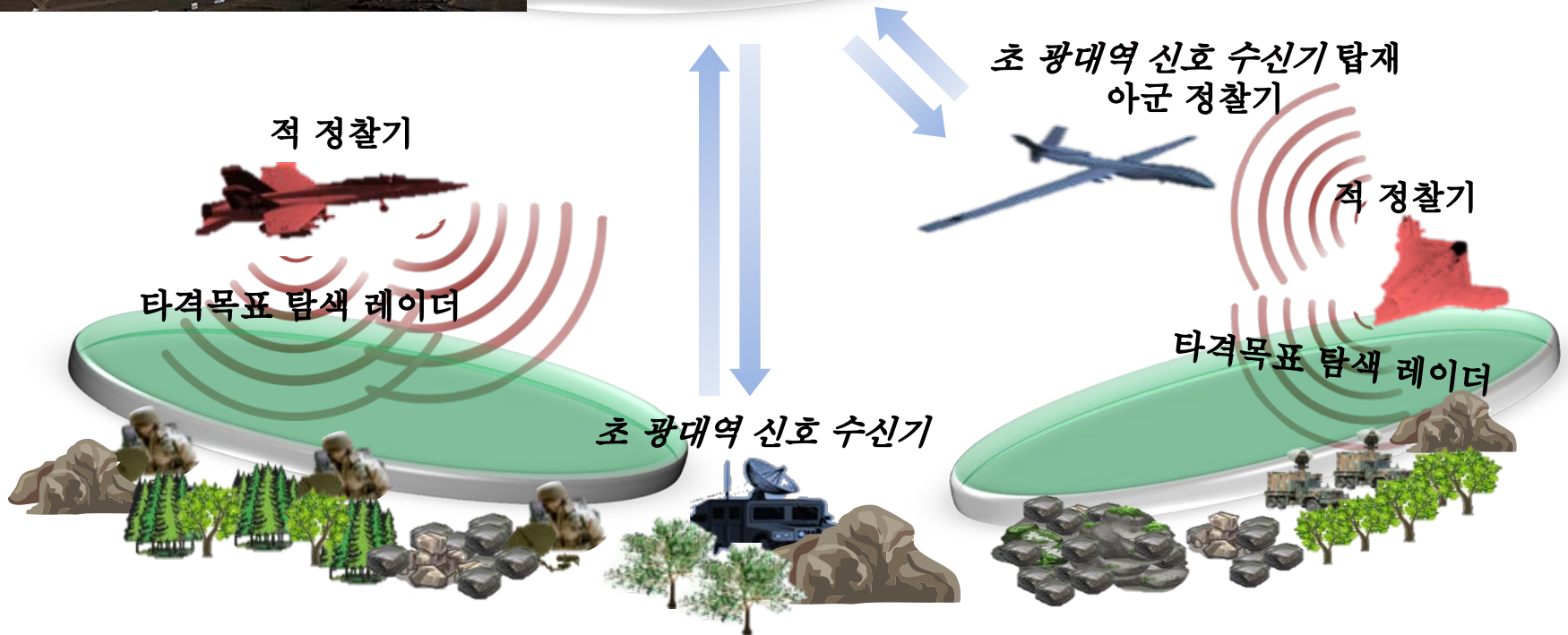
명제 2

- 신호를 100% 복원하기 위해 필요한 표본화 속도가 MWC보다 Aliasing parameter (p)만큼 더 적다.
- 혹은, 같은 표본화 속도를 사용할 때 MWC보다 AMWC의 복원 성능이 더 우수하다.



※ 가로축: ADC의 표본화 속도 / 세로축: 복원 정확도 /
cMWC: conventional MWC / 'p'는 aliasing parameter

Electronic Warfare System



Spectrum to Watch is Ultra Wide!

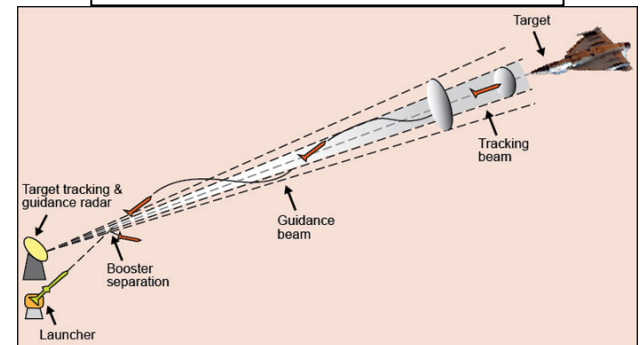
Band	Frequency	Wavelength	Example Radar Applications
HF	3–30 MHz	10–100 m	Over-the-horizon surveillance, ocean remote-sensing (skywave and ground-wave radars)
VHF	30–300 MHz	1–10 m	Very long-range air-surveillance, ground-penetrating radar, wind profilers
UHF	300–1000 MHz	0.3–1 m	Very long-range air-surveillance/airborne early-warning (AEW) radars (e.g., BMD)
L	1–2 GHz	15–30 cm	Long-range air-surveillance/AEW radars (maximum range coverage of ~500 km)
S	2–4 GHz	7.5–15 cm	Multifunction radar, terminal air traffic control (ATC) radar, marine radar
C	4–8 GHz	3.75–7.5 cm	Medium to short-range weapons fire-control, weather-mapping radar
X	8–12 GHz	2.5–3.75 cm	Airborne intercept and attack, missile defence radars, missile guidance
Ku	12–18 GHz	1.67–2.5 cm	Short-range seekers, maritime navigation radars (civil and military)
K	18–27 GHz	1.11–1.67 cm	Limited use (due to strong H ₂ O absorption)
Ka	27–40 GHz	0.75–1.11 cm	Very short-range seekers, airport surface movement detection radars

http://ed-thelen.org/index.html#ifc_acq

Medium to short range



Missile Guidance System





Standard Radar Bands* & Typical Usage



Courtesy of US Army.
Used with permission.

HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300 MHz – 1 GHz
L-Band	1 – 2 GHz
S-Band	2 – 4 GHz
C-Band	4 – 8 GHz
X-Band	8 – 12 GHz
Ku-Band	12 – 18 GHz
K-Band	18 – 27 GHz
Ka-Band	27 – 40 GHz
W-Band	40 – 100+ GHz

} **Missile Seekers**

*From IEEE Standard 521-2002

AMWC, 왜 필요한가?

- ❖ 전자전에서, 적이 발사한 레이더 신호를 탐지 및 분석하기 위해서는 광대역 (40GHz) 신호를 표본화 해야 함
- ❖ 고전적인 방법인 Shannon-Nyquist 표본화는 지나치게 높은 (80GHz)의 ADC 표본화 속도를 요구함
- ❖ MWC는 ADC의 표본화 속도에 대한 부담을 줄이는 대신, 고성능 PRBS 신호 발생기를 도입하여 효율적인 표본화를 가능하게 함
- ❖ 그러나 40GHz라는 최대 대역폭을 수용 할 수 있는 상용 PRBS 신호 발생기는 없음
- ❖ AMWC는 aliasing을 활용한다는 독창적인 아이디어로, 40GHz의 초 광대역 레이더 신호의 효율적인 표본화를 가능하게 함

Questions & Answers



Home page at <https://infonet.gist.ac.kr/>

References

- ❖ [Landau67] H. J. Landau, “Necessary density conditions for sampling and interpolation of certain entire functions,” *Acta Math.*, vol. 117, no. 1, pp. 37–52, 1967.
- ❖ [Eldar09] M. Mishali and Y. C. Eldar, “Blind Multiband Signal Reconstruction: Compressed Sensing for Analog Signals,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 3, pp. 993–1009, Mar. 2009.
- ❖ [Donoho06] D. L. Donoho, “Compressed sensing,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, Apr. 2006.
- ❖ [Eldar10] M. Mishali and Y. C. Eldar, “From Theory to Practice: Sub-Nyquist Sampling of Sparse Wideband Analog Signals,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 4, no. 2, pp. 375–391, Apr. 2010.
- ❖ [Lee18] Jehyuk Jang, Sanghun Im, and Heung-No Lee, “Intentional Aliasing Method to Improving Modulated Wideband Converters,” *IEEE Trans. Signal Process.*, accepted, Apr. 2018.