

SAR - SAR 시뮬레이션 RCS 활용

아, 이제 의도가 아주 정확히 보였어요 👍

핵심은 이거죠:

“내가 만드는 SAR 시뮬레이션에서 nf, na를 지금보다 훨씬 작게 잡아도 물리적으로(나이퀴스트) 문제가 없을까?

그리고 앞으로 플랫폼 속도 v까지 고려해서 설계하고 싶다.”

결론부터 말하면 **지금 코드의 nf, na는 ‘과하게 보수적’**이고,

임무장비 속도 v와 실제 해상도/장면 요구를 기준으로 하면 훨씬 줄일 수 있습니다.

아래에서 정확히 어디를 잘못/과하게 알고 있었는지 → 어떻게 줄여야 하는지 → v를 어떻게 넣어야 하는지 순서로 정리할게요.

1 가장 중요한 오해 정리 (여기서 계산량이 폭증함)

✖️ 지금 코드의 핵심 문제

python

```
r = sqrt(x_span^2 + y_span^2)
df = c / (2r)
nf = bandwidth / df
```

이 식은 **“장면 전체를 한 번에 range IFFT 창 안에 넣겠다”**는 조건입니다.

👉 이건 Nyquist 조건이 아닙니다.

👉 이건 “unambiguous range window” 조건입니다.

즉,

- ✖️ “해상도를 위해 꼭 필요”
- ✖️ “물리적으로 반드시 만족해야 함”

이 아니라

- ✓ “range gating을 전혀 안 쓸 때만 필요한 조건”

입니다.

2 Range 방향 Nyquist의 진짜 의미 (nf를 줄일 수 있는 이유)

✓ Range 해상도 Nyquist 조건

Range 해상도는 bandwidth B로만 결정됩니다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

→ nf와 직접적인 관계 없음

즉:

- nf를 줄여도
 - B만 유지하면 range 해상도는 그대로
-

✓ 주파수 샘플링 Nyquist의 진짜 조건

주파수 축 샘플링은 사실 이렇게만 되면 됩니다:

$$df \leq \frac{1}{T_{\text{scene}}}$$

여기서 T_{scene} 은 관심 거리 구간의 왕복 지연 시간

👉 만약 range gating을 쓴다면

관심 거리 폭 R_{gate} 에 대해서만

$$df \leq \frac{c}{2R_{\text{gate}}}$$

이면 충분합니다.

🔥 핵심

- r = 전체 장면 반경 ✗
- r = range gate 반경 ✓

그래서 nf가 과하게 커졌던 겁니다.

3 Azimuth 방향 (na, PRF) — 여기서 v가 등장함

이제 당신이 정확히 짚은 부분입니다.

✓ Azimuth Nyquist 조건 (도플러)

SAR azimuth 방향은 도플러 주파수 대역폭을 샘플링하는 문제입니다.

도플러 대역폭 (stripmap, broadside 근사)

$$B_D \approx \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)$$

Nyquist 조건

$$PRF \geq 2B_D$$

또는 보수적으로 자주 쓰는 식:

$$PRF \geq \frac{2v}{L}$$

(L = 안테나 유효 길이)

✓ na는 PRF × 관측 시간

$$na = PRF \cdot T_{\text{aperture}}$$

그리고

$$T_{\text{aperture}} = \frac{R\Theta}{v}$$

결국:

$$na \approx \frac{2R\Theta}{\lambda}$$

👉 na는 v에 직접 비례하지 않습니다

(v는 PRF와 관측 시간에 동시에 들어가서 상쇄됨)

4 그럼 nf, na를 어떻게 “줄이는 게 맞는 설계”인가?

✓ 올바른 설계 순서 (Industry-style)

(1) 먼저 “내가 원하는 것”을 정함

- Range resolution: ΔR
- Azimuth resolution: Δaz
- Scene size: (R_gate, Θ)

(2) Bandwidth → B 결정

text

$$\Delta R = c / (2B)$$

- ✓ B는 줄이면 해상도 나빠짐
- ✗ nf랑 직접 연결하지 말 것

(3) Range gate 폭 → df 결정

text

$$df \leq c / (2 * R_{gate})$$

$$nf = B / df$$

- ✓ R_{gate} = 실제 관심 거리 폭 (예: ±500 m)
- ✗ 전체 장면 반경 쓰지 말 것

👉 여기서 nf가 10배~100배 줄어듦

(4) 플랫폼 속도 v → PRF 결정

text

$$PRF \geq 2v / L \text{ (또는 도플러 대역 기준)}$$

(5) Azimuth aperture → na 결정

text

$$na = PRF * T_{aperture}$$

$$T_{aperture} = R * \Theta / v$$

👉 v는 이미 여기에 자연스럽게 반영됨

5 “작은 nf, na로도 Nyquist를 만족할 수 있나?” → 명확한 답

✓ YES, 충분히 가능

단 조건은:

항목	조건
Range	bandwidth B 유지
Range 샘플	$df \leq c/(2 \cdot R_{gate})$
Azimuth	PRF $\geq 2v/L$
Aperture	해상도 요구에 맞는 Θ

지금 코드처럼

- 전체 장면 반경 r
- range gate 없음
- PRF 개념 없이 na만 늘림

→ 계산량이 기하급수적으로 커질 수밖에 없음

6 실무적으로 추천하는 “현실적인 숫자 예시”

예:

- 관심 거리: $\pm 500 \text{ m} \rightarrow R_{gate} = 500$
- $B = 300 \text{ MHz} \rightarrow \Delta R \approx 0.5 \text{ m}$
- $df \leq c/(2 \cdot 500) \approx 300 \text{ kHz}$
- $nf \approx 300e6 / 300e3 \approx 1000 \rightarrow 256\sim512$ 로 다운

Azimuth:

- $v = 150 \text{ m/s}$
- $L = 1 \text{ m}$
- $PRF \geq 300 \text{ Hz}$
- $\Theta = 20^\circ$
- $na \approx$ 수백 개면 충분

👉 지금 코드 대비 10~50배 계산량 감소 가능

7 | 요약 (진짜 핵심)

- X $nf \propto$ 장면 크기는 Nyquist 조건이 아님
 - X 지금 nf 폭증은 range gate 미사용 + 보수적 설계
 - ✓ Nyquist는 range gate 폭 + 도플러 대역폭으로 결정
 - ✓ v는 PRF 설계에만 직접적으로 들어감
 - ✓ nf, na는 임무 요구 해상도 기준으로 과감히 줄일 수 있음
-

다음 단계로 원하면:

1. nf, na를 자동으로 “최소 Nyquist 만족”으로 계산해주는 함수
2. v, L, ΔR, Δaz 넣으면 recommended (nf, na, PRF, Θ) 뽑아주는 설계 도구
3. 지금 SARSim 클래스에 바로 꽂을 수 있는 lightweight mode

이 중 하나 바로 만들어줄게요.