

Nota di chi pubblica. Questo testo è stato prodotto da un secondo sistema (Codex) che ha ricevuto solo il paper, le conferenze, l'intervista e i dati, con il divieto di leggere l'analisi principale. È riprodotto tale e quale, compresi gli accenti mancanti e le scelte lessicali, con una sola modifica: i percorsi dei file sul disco locale sono stati sostituiti da riferimenti alle cartelle del repository (`/code/`, `/replica/`, `/data/`, `/umbra/`, `/mosul/`). Le 21 figure citate nel testo sono in appendice, nell'ordine dei loro nomi.

Replica indipendente della tomografia SAR Doppler di Biondi e Malanga

Lavoro svolto in la cartella `replica/` del repository, con Python `python`. Non ho aperto nessuno dei file esclusi (la cartella `code/` del repository, `RISULTATI.md`, la cartella `out/`, `shorts/dossier/sar_giza_replica.md`, `shorts/out/sarcheck`). Ho letto solo il materiale degli autori e i dati grezzi. Codice: `sarcodex.py` (sotto-aperture, tracking sub-pixel, inversione), `pipeline.py`, `tomo2.py`, `cphd_micro.py`, script numerati in `work/`. Figure in `fig/`.

1. Il metodo, ricostruito dagli autori

1.1 La catena descritta

Dal paper ritirato (Remote Sensing 2022, 14, 5231), sezioni 3, 3.1, 3.2 e 4, e dalle conferenze di Spoleto (27/7/2026) e "La città nascosta, atto finale":

1. **Una sola immagine SLC** (nessun secondo passaggio, nessuna interferometria ripetuta).
2. **Trasformata di Fourier 2D** dell'immagine focalizzata, che ha supporto rettangolare (eq. 3).
3. **Strategia di Figura 7**: il filtro adattato usa una banda azimutale pari a $B_{CD} - B_{DL}$, con $B_{DL} = B_{CD}/2$. La banda non processata viene divisa in N_D passi. A ogni passo la coppia master/slave viene traslata rigidamente lungo l'asse Doppler. Si ottengono due matrici di sotto-aperture (eq. 4 e 5).
4. **Pixel tracking sub-pixel** fra master e slave a ogni passo. Gli spostamenti stimati $\{a, b\}$ (azimut e range) sono, per gli autori, la vibrazione istantanea del bersaglio (eq. 20).
5. **Vettore multi-frequenza** $Y = [Y(1) \dots Y(k)]$ (eq. 21), un campione per sotto-apertura.
6. **Inversione tomografica** $h(z) = A(Kz, z)^+ Y$ (eq. 23-24), dove la matrice di steering A e, parole del paper, "the best approximation of a matrix operator performing the DFT of Y ", con $Kz = 4\pi B_{\text{perp}} / (\lambda r_i \sin(\theta))$.
7. **Scala di profondità** asserita: un pixel = 1 m. Risoluzione tomografica dichiarata $dT = \lambda R / (2A) = 0,92 \text{ m}$, con λ lunghezza d'onda **acustica** (0,24 m), $R = 650 \text{ km}$ (distanza satellite) e $A = 84 \text{ km}$ (apertura orbitale).

A Spoleto Biondi lo riassume senza mediazioni: "l'inversione tomografica e un algoritmo, praticamente una trasformata di Fourier".

1.2 Parametri che gli autori dichiarano

parametro	valore dichiarato
sensore (paper)	COSMO-SkyMed 2a gen., 9,6 GHz, chirp 400 MHz
banda Doppler	22 kHz

PRF	2,0 kHz
durata acquisizione	15 s
velocità piattaforma	7 km/s, quota 650 km
banda lasciata fuori	$BDL = BCD/2$
velocità onde sismiche	6000 m/s
frequenza di indagine	12.500 Hz
lunghezza d'onda acustica	0,24 m
apertura tomografica	42 km (poi 84 km nel calcolo)
risoluzione in profondità	0,92 m, poi "1 m per pixel"
profondità raggiunta (conferenze)	1,2 km sotto Chefren, "2 km" da Rogan

1.3 Parametri che gli autori NON dichiarano e che ho dovuto scegliere io

- il numero N_D di sotto-aperture e il numero N_C di traslazioni;
- la larghezza effettiva delle sotto-bande e lo sfalsamento master/slave;
- la finestratura spettrale (rettangolare o pesata);
- la dimensione della finestra di correlazione e il fattore di sovracampionamento;
- se la correlazione sia coerente (complessa) o incoerente (sul modulo);
- **come si converte un indice di bin in metri di profondità**, cioè la calibrazione della scala, e dove sta lo zero;
- il numero di bin n_z e l'eventuale zero-padding;
- quali pixel formano la linea tomografica;
- come si combinano azimuth e range nel numero complesso γ .

Ho provato entrambe le varianti dove la descrizione è ambigua, tenendo sempre quella più favorevole al metodo.

1.4 Incongruenze interne al testo degli autori (prima ancora dei dati)

1. **Aritmetica della lunghezza d'onda:** $\lambda = v/f = 6000/12500 = 0,48$ m. Il paper scrive 0,24 m dividendo per 25.000. La risoluzione dichiarata è quindi sbagliata di un fattore 2 anche accettando tutto il resto.
2. **L'apertura:** il testo dice "circa 42.000 m" e poi mette 84.000 al denominatore.
3. **La formula** $\Delta T = \lambda R / (2A)$ e la risoluzione di apertura per un'onda che viaggia dal bersaglio all'apertura. Qui λ è acustica (l'onda sta nel terreno) mentre R è la distanza del satellite e A è l'orbita. L'onda acustica non percorre 650 km di vuoto. La formula mescola due mondi fisici diversi.
4. **$K_z = 4\pi B_{\text{perp}} / (\lambda r \sin(\theta))$** e la formula della tomografia SAR multi-passaggio, che richiede baseline **ortogonali** alla linea di vista, cioè passaggi separati nello spazio. Qui le baseline sono lungo la traccia orbitale di un singolo passaggio. Una baseline lungo-traccia non produce sensibilità alla quota, produce sensibilità alla velocità (interferometria along-track). Questo è il punto in cui la catena si stacca dalla fisica, ed è misurabile (paragrafo 3).
5. **Contraddizione dentro il paper:** al paragrafo 5.17 il Big Void è descritto come rilevato (Tag 19, Figure 55b e 56b); al paragrafo 6.1 si legge "No trace of the presence of a structure identified as a big void ... was in our hands detected by SAR".
6. **Tempi di calcolo:** il paper dichiara circa 6 giorni di calcolo per un tomogramma su un PC i7. La catena come descritta, implementata da me, produce una linea tomografica di 100 punti in circa 10 secondi. O la descrizione è incompleta, o il software fa qualcosa che non è scritto.

2. Dati e verifica dell'implementazione

Capella Space, SLC spotlight, algoritmo PFA su piano a terra: `slc_1004.tif`, 4/10/2024, 118.909 x 12.480 complex_int16; passo 0,0421 m in azimut (righe) e 0,4006 m in ground range (colonne); banda Doppler processata 130.281 Hz; apertura 32,869 s; incidenza 38,58 gradi; slant range 757,4 km; velocità 7263,6 m/s; quota 601 km; λ 3,1228 cm. Occupazione della banda azimutale misurata: 83% (fig. 03b). Seconda scena `slc_0916.tif`, 16/9/2024, geometria diversa.

Umbra, SICD spotlight slant: `sicd_0207.nitf` (Cheope, 7/2/2023, 1,271 s, risoluzione azimut 0,916 m), `sicd_0308.nitf` (Chefren, 8/3/2023, 5,041 s, 0,234 m), `sicd_mosul.nitf` (8/8/2023, 4,060 s). CPHD: `cphd_0207.cphd` 6966 x 7775, PRF 5482,8 Hz; `cphd_mosul.cphd` 19467 x 21599, PRF 4806,5 Hz.

Sono gli stessi dati che il Khafre Project dichiara di aver usato (comunicato del 16/3/2025: "publicly available SAR data, provided as open-source by Capella Space e Umbra").

Verifica del correlatore. Il tracker sub-pixel (DFT sovracampionata alla Guizar-Sicairos) è stato validato su spostamenti noti applicati a dati reali: errore 0,01-0,02 pixel su shift di 0,1, 0,5 e 2,3 pixel (`work/dbg4.py`). Il codice misura quello che dice di misurare.

Geometria verificata: l'apice di Cheope cade a 432 colonne dal centro base, cioè 173 m, che è esattamente $h/\tan(38,58 \text{ gradi})$ per $h = 138 \text{ m}$. Il modello RPC e il layover tornano (fig. 00b).

3. Il punto decisivo: quanta informazione di quota c'è in un singolo passaggio

Prima di guardare i tomogrammi ho misurato quello che la geometria può dare, usando l'orbita vera presa dai vettori di stato Capella, senza approssimazioni di onda piana (`work/exp6b_kz.py`, `work/exp7_deltakz.py`).

Per un bersaglio a quota h sopra il piano di riferimento cerco, sotto-apertura per sotto-apertura, il punto a terra la cui storia di distanza approssima meglio quella del bersaglio. Quello è il pixel dove il bersaglio compare in quella sotto-apertura.

quota sopra il basamento	escursione apparente su tutta l'apertura	residuo di sfocamento
+20 m	0,107 m in range, 0,075 m in azimut	0,012 mm
+80 m	0,426 / 0,300 m	0,048 mm
+138 m (apice)	0,734 / 0,517 m	0,083 mm
-80 m (sotto terra)	0,535 / 0,377 m	0,060 mm
-880 m	5,449 / 3,856 m	0,613 mm

Cioè **5,35 mm di spostamento apparente per ogni metro di quota, su tutta l'apertura di 32,9 s**. Il residuo dopo aver adattato un punto a terra è di 0,083 mm per 138 m di quota: significa che un bersaglio alto quanto la piramide viene focalizzato **esattamente** alla sua posizione di layover, e che la sua quota è indistinguibile da uno spostamento a terra. Questa è la degenerazione range/quota del singolo passaggio, e i numeri la confermano.

Tradotta in numero d'onda di elevazione:

- variazione di k_z disponibile su tutta l'apertura: **1,09e-3 rad/m**;
- risoluzione in elevazione corrispondente $2\pi/dk_z$: **5,7 km**;
- fase differenziale su tutta l'apertura per 100 m di quota: **0,12 rad**;
- baseline lungo-traccia totale: 238,7 km, variazione dell'angolo di vista: 18 gradi, tutta in azimut.

Se invece si prende la proiezione della traccia orbitale sul piano di elevazione e la si tratta come una

baseline ortogonale, come fa la formula $K_z = 4 \cdot \pi \cdot B_{\text{perp}} / (\lambda \cdot r \cdot \sin(\theta))$ del paper, si ottiene $B_{\text{perp}} = 1104$ m e una risoluzione apparente di 6,7 m. **La formula del paper sovrastima la sensibilit  alla quota di un fattore circa 860.** E anche cos  non si arriva a 1 m.

Verifica sperimentale (`work/exp4_height.py`, fig. 05). Ho misurato gli spostamenti fra le sotto-aperture estreme (13 gradi di diversita angolare, il massimo disponibile) su punti della faccia Ovest di Cheope a quote note da 0 a 130 m. Dove la coerenza   buona (quota ≥ 40 m, intensita ≥ 33 dB) gli spostamenti stanno sotto 0,5 m e **non mostrano nessuna dipendenza dalla quota**. Dove la coerenza   bassa (piede della piramide, ombra) la correlazione salta su picchi casuali e da spostamenti di 5-8 m.

Verifica sul pendio (`work/exp13_ramp.py`, fig. 07). Lungo la linea di massima pendenza della faccia Ovest, dove la quota varia da 30 a 131 m, ho adattato la rampa di spostamento cumulato e l'ho confrontata con la previsione geometrica di 5,35 mm/m. Correlazione misurata **-0,45** (segno sbagliato), dispersione residua 478 mm, cio  **89 m di incertezza di quota per pixel**. Anche l'unico segnale geometrico realmente presente non   recuperabile.

4. Applicazione della catena alla Grande Piramide

4.1 Quello che il radar vede davvero della piramide

Lungo una linea orizzontale che attraversa Cheope alla riga dell'apice (fig. 01, 04): l'intensita   25-27 dB sul bordo di layover (colonne 7170-7285, circa 46 m) e 12 dB su tutto il resto (colonne 7300-7940, circa 256 m). Lungo quella linea **circa l'85% dell'estensione della piramide e ombra radar**, dove non c'  segnale.

Coerenza misurata della correlazione fra sotto-aperture: - faccia illuminata: 0,61 (intensita 41 dB); - linea intera compresa l'ombra: 0,11; - sabbia piatta lontana dai monumenti: 0,10; - lago di Mosul (acqua): 0,20. Sotto 0,2 la correlazione non aggancia niente e restituisce picchi di speckle casuali.

4.2 Pavimento di rumore della stima di spostamento

Fra sotto-aperture adiacenti con 50% di sovrapposizione (`work/exp11_noisefloor.py`, `work/exp12_main.py`):

sito	coerenza	intensita	sigma azimut	sigma range
faccia Ovest di Cheope	0,61	41 dB	72 mm	98 mm
edificato del Cairo	0,43		68 mm	51 mm
centrale di Mosul (Umbra)	0,88		126 mm	6,9 mm
Cheope, dato Umbra 1,27 s	0,51		1955 mm	245 mm
Chefren, dato Umbra 5,04 s	0,42		719 mm	159 mm
sabbia piatta, ombra radar	0,10	31 dB	6-9 m (fallimento)	4-5 m (fallimento)

Il caso migliore in assoluto, su tutta questa campagna,   **7 mm** sul tetto della centrale idroelettrica di Mosul, il bersaglio pi  brillante e pi  coerente che abbia trovato.

4.3 I tomogrammi

Con la configurazione pi  favorevole (32 sotto-aperture, 50% di sovrapposizione, tracking incoerente, spostamento cumulato, DFT con zero-padding a 128 bin, 1 m per bin come dichiarano gli autori), i tomogrammi di Cheope sono figure 06, 08, 18.

Tutti hanno la stessa struttura: una banda brillante attorno a "profondita zero" (che   la componente continua e la rampa della serie), e rumore ovunque altrove. Nessuna struttura riconoscibile.

5. I controlli

5.1 I controlli che ho progettato io

C1. Ripetibilità fra due acquisizioni indipendenti. Se le strutture sono nel terreno, devono uscire uguali da due passaggi diversi sugli stessi punti a terra. Capella 4/10/2024 contro 16/9/2024, stessi punti della faccia Ovest, stessa catena (`work/exp15_repeat.py`, fig. 09):

- correlazione fra i due tomogrammi: **0,146**
- correlazione fra le due serie di spostamento: **-0,060**
- correlazione fra i profili medi in profondità: 0,9975

Le mappe non si ripetono. Si ripete solo il profilo medio, che è la firma dello strumento e del rumore, non del terreno.

C2. Scena sintetica senza sottosuolo. Speckle gaussiano bianco, limitato in banda come un SLC vero, nessun terreno, nessuna struttura, nessuna vibrazione (`work/exp23_synth.py`, fig. 18):

- correlazione del profilo medio in profondità con quello di Cheope: **0,9977**
- comportamento sotto i controlli identico a quello del dato vero.

Il tomogramma della piramide è visivamente indistinguibile da quello di una scena che per costruzione non ha nessun sottosuolo.

C3. Vincolo informativo profondità/risoluzione. Il numero di campioni indipendenti in profondità è uguale al numero di sotto-aperture N_D . Ogni sotto-apertura dura T/N_D e quindi ha risoluzione azimutale $\lambda R^* N_D / (2 * v * T)$. Per la scena Capella questo vale **risoluzione orizzontale [m] = 0,0495 x estensione in profondità [m]** (a 1 m per bin):

estensione in profondità	risoluzione orizzontale ottenibile
20 m	0,99 m
64 m	3,2 m
200 m	9,9 m
1200 m	59,5 m

Un tomogramma profondo 1,2 km con dettaglio metrico in orizzontale, come quelli mostrati per Chefren, viola questo vincolo di un fattore 60.

C4. Coerenza contro intensità. La qualità della stima segue solo la brillantezza del pixel, non la presenza o assenza di cavità sotto di esso (paragrafo 5.2, punto e).

5.2 I controlli richiesti

(a) Stessa catena su sabbia piatta lontano dai monumenti (deserto a 1,1 km a sud-ovest, `work/exp8_controls.py`, `exp12`, fig. 06 e 08). Il tomogramma della sabbia ha la stessa struttura, lo stesso contrasto e la stessa dinamica di quello della piramide. Correlazione del profilo medio in profondità piramide/sabbia: **0,9955**.

(b) Permutazione casuale dell'ordine delle sotto-aperture prima dell'inversione. L'ordine delle sotto-aperture e l'asse temporale e angolare del dato. Distruggerlo deve distruggere qualunque ricostruzione vera. Correlazione fra tomogramma nominale e tomogramma permutato:

caso	correlazione
Cheope faccia Ovest, Capella	0,897
Cheope pendio, Capella	0,822
sabbia, Capella	0,807

Chefren, Umbra 8/3/2023	0,959
Mosul, Umbra	0,812
scena sintetica	0,838
Cheope, Umbra 7/2/2023 (apertura 1,27 s)	0,007

L'immagine sopravvive quasi intatta alla distruzione dell'ordine. Quindi non contiene ordinamento.

L'unica eccezione è l'acquisizione Umbra corta su Cheope, dove la permutazione cambia tutto: lì però la serie di spostamento ha un pavimento di rumore di 2 m ed è dominata da una rampa casuale, quindi il cambiamento e il cambiamento di una realizzazione di rumore, non la perdita di una struttura.

(c) Inversione con il segno di κ_z invertito. Invertire il segno del numero d'onda di elevazione deve ribaltare sopra e sotto. Correlazione con il nominale: **0,988-0,997** in tutti i casi (Cheope 0,995, sabbia 0,997, Chefren 0,996, Mosul 0,996). Il tomogramma è quasi simmetrico rispetto allo zero, cioè la serie y è quasi reale e l'asse di profondità non ha direzione.

(d) Inversione col solo modulo dei campioni. Buttando via il segno e la fase degli spostamenti stimati, correlazione con il nominale: **0,962-0,997**. Nessuna informazione sta nella fase.

(e) Pixel sopra Camera del Re e Grande Galleria contro pixel sopra muratura piena. Faccia Ovest a quota 80 m, 21 punti nella fascia $|dN| \leq 25$ m (che contiene in verticale Camera del Re, Grande Galleria, Camera della Regina, Big Void) contro 26 punti a $|dN| \geq 40$ m, dove sotto c'è solo muratura. Stessa quota, stessa geometria, stessa brillantezza attesa.

fascia di profondità	camere	muratura piena	rapporto
0-20 m sotto la superficie	26,21	68,42	0,383
20-45 m	5,86	13,75	0,426
45-64 m	3,71	8,70	0,427

Il rapporto è **costante con la profondità**. È una differenza di guadagno complessivo fra i due gruppi di pixel (coerenza leggermente diversa), non una risposta localizzata in profondità. Se il metodo vedesse le camere, il rapporto dovrebbe cambiare fra le fasce, e in particolare a 43 m, dove sta la Camera del Re. Non cambia.

6. Diga di Mosul: turbine e galleria

È il caso più favorevole possibile, perché le turbine ruotano davvero e producono vibrazione meccanica vera, e perché il tetto della centrale e il bersaglio più coerente di tutta la campagna.

Con l'immagine Umbra dell'8/8/2023 (apertura 4,06 s), 32 sotto-aperture danno una cadenza di 0,127 s, quindi **Nyquist 3,94 Hz**, che copre la frequenza di rotazione tipica di una Francis di quella taglia (circa 2-2,5 Hz), con risoluzione in frequenza 0,25 Hz (`work/exp18_mosul.py`, fig. 15).

sito	intensità	coerenza	passo range	passo azimut
centrale Mosul 1	-30,4 dB	0,882	6,9 mm	126 mm
pompaggio Mosul 3	-24,8 dB	0,891	30,8 mm	925 mm
cresta diga	-32,9 dB	0,102	8,0 m	20,5 m
terreno aperto	-40,1 dB	0,188	1,4 m	5,1 m
lago	-39,7 dB	0,197	0,48 m	0,83 m

Lo spettro della serie di spostamento sulla centrale è **piatto e senza righe**, dominato dalla componente a bassissima frequenza. Non c'è nessun picco alla frequenza di rotazione, nessuna riga armonica, niente che distingua la sala macchine dal terreno circostante se non un rumore più basso dovuto alla maggiore brillantezza.

Il tomogramma lungo una linea che attraversa la diga passando per la centrale (fig. 16) si comporta

esattamente come quello della piramide: correlazione nominale/permutato 0,812, nominale/segno invertito 0,996, nominale/solo modulo 0,987. Nessuna galleria.

Nota di scala: con 32 sotto-aperture e 1 m per bin la finestra di profondita e di 32 m (64 m con zero-padding). La galleria che gli autori dicono di vedere sta a 300-400 m. Per arrivarci servirebbero almeno 400 sotto-aperture, e per il vincolo C3 la risoluzione orizzontale scenderebbe a circa 20 m sulla scena Umbra.

7. Dato grezzo (CPHD): massima frequenza di vibrazione osservabile

7.1 Il limite duro

Il Nyquist della storia di fase grezza e PRF/2: **2741 Hz** per il CPHD Umbra su Giza (PRF 5482,8 Hz, 1,262 s utili, 6920 impulsi validi), 2403 Hz per Mosul.

Ma quel limite non e utilizzabile, perche **impulso per impulso il radar non separa una singola cella a terra**. L'ho verificato direttamente (`work/exp16_cphd.py`, `work/dbg`): il filtro adattato per impulso su una posizione a terra restituisce lo stesso modulo, circa 1,3e4, per l'apice di Cheope, la faccia Ovest, il deserto piatto, la Sfinge e il Cairo, mentre fuori dalla scena illuminata scende a 21. Cioe il singolo impulso vede tutta la striscia azimutale a quella distanza sommata in speckle. La risoluzione azimutale nasce solo dall'integrazione dell'apertura.

Da qui il **compromesso vero** fra risoluzione e frequenza campionabile (scena Capella, `work/exp21_budget.py`):

risoluzione azimut	durata sotto-apertura	frequenza massima campionabile
0,05 m	32,56 s	0,015 Hz
0,5 m	3,26 s	0,154 Hz
1 m	1,63 s	0,307 Hz
5 m	0,326 s	1,54 Hz
50 m	0,033 s	15,4 Hz
65 km	25 microsecondi	20.000 Hz

A 1 m di risoluzione la massima frequenza di vibrazione osservabile e 0,31 Hz. Per arrivare a 20 kHz la risoluzione azimutale diventa 65 km. La banda Doppler di 130 kHz (o i 22 kHz del paper) non e un canale audio indipendente: l'asse Doppler e in corrispondenza biunivoca con il tempo lento, non e un secondo asse di frequenza.

7.2 Le sidebande micro-Doppler

L'altra strada teorica e leggere le righe laterali micro-Doppler di un bersaglio isolato. Una vibrazione a f Hz produce echi spostati in azimut di **1,628 m per Hz** (scena Capella):

frequenza di vibrazione	posizione dell'eco
1 Hz	1,6 m dal bersaglio
100 Hz	163 m
1 kHz	1,63 km
12,5 kHz	20,4 km, fuori dalla scena di 5 km
20 kHz	32,6 km, fuori dalla scena

Sopra circa 1,5 kHz l'eco di vibrazione cade fuori dall'immagine collezionata. E comunque il livello della sidebanda scala con l'indice di modulazione $4 \cdot \pi \cdot A / \lambda$:

ampiezza del moto	sidebanda sotto la portante
-------------------	-----------------------------

1 mm	-13,9 dB
1 micron	-73,9 dB
1 nm	-133,9 dB
1 pm	-193,9 dB

7.3 Celle della piramide contro celle vuote

Compressione in distanza del CPHD Umbra su Giza e spettro temporale impulso per impulso delle celle (work/exp17_cphd_cells.py, fig. 13):

cella	dR dal SRP	intensita	picco spettrale / medio	frequenza del picco
apice Cheope	-97,5 m	4,9 dB	15,0 dB	-573 Hz
base Cheope	+13,0 m	6,6 dB	23,6 dB	+193 Hz
Chefren	-190,4 m	7,4 dB	21,5 dB	-703 Hz
deserto Ovest	-354,4 m	5,4 dB	16,0 dB	-736 Hz
deserto lontano	-598,3 m	5,7 dB	18,2 dB	+34 Hz

I picchi cadono a frequenze diverse e casuali in ogni cella: e lo spettro Doppler del clutter a quella distanza, non una riga di vibrazione. Le celle sulla piramide e quelle sul deserto vuoto sono statisticamente indistinguibili.

8. Bilancio quantitativo: moto atteso contro sensibilita

Moto ambientale atteso (modello di rumore sismico alto di Peterson, sito rumoroso, con estrapolazione f^{-2} sopra 10 Hz, work/exp21_budget.py, fig. 17):

frequenza	ampiezza di spostamento
0,1 Hz	25 micron
1 Hz	0,67 micron
10 Hz	6,7 nm
100 Hz	6,7e-11 m
1 kHz	6,7e-13 m
12,5 kHz	4,3e-15 m

Sensibilita del SAR, limite di fase con coerenza e numero di look:

coerenza	1 look	100 look	1000 look
0,98	0,36 mm	0,036 mm	0,011 mm
0,88	0,95 mm	0,095 mm	0,030 mm
0,60	2,34 mm	0,234 mm	0,074 mm

Il pavimento **misurato** con il tracking di offset, che e il metodo descritto dagli autori, e molto peggiore: 7 mm nel caso migliore (Mosul), 78-98 mm sulla faccia di Cheope, metri in ombra.

Il divario, prendendo il limite teorico piu generoso (0,011 mm):

frequenza	moto atteso	sensibilita	divario
1 Hz	6,7e-7 m	1,1e-5 m	16x
10 Hz	6,7e-9 m	1,1e-5 m	1600x
100 Hz	6,7e-11 m	1,1e-5 m	1,6e5
12,5 kHz	4,3e-15 m	1,1e-5 m	2,6e9

Col pavimento realmente misurato sulla piramide (78 mm) i divari vanno moltiplicati per altri 7000.

Il fotone che diventa fonone. La densità di potenza del radar al suolo, con guadagno pieno 49,58 dB e 1 kW, e $1,26 \times 10^{-5}$ W/m². Se **tutta** venisse convertita in un'onda acustica coerente a 12,5 kHz nella roccia (impedenza $1,56 \times 10^7$ rayl), l'ampiezza sarebbe $1,6 \times 10^{-11}$ m, sette ordini di grandezza sotto la soglia di rivelazione. Con qualunque frazione di conversione realistica il numero peggiora ancora.

Risoluzione contro profondità, per un'onda elastica. La risoluzione non può essere migliore di mezza lunghezza d'onda, e l'attenuazione anelastica limita il percorso a $L = Q \cdot v / (\pi \cdot f)$:

frequenza	risoluzione ottenibile	L con Q=50	L con Q=200
1 Hz	3000 m	95 km	382 km
10 Hz	300 m	9,5 km	38 km
100 Hz	30 m	955 m	3,8 km
1 kHz	3 m	95 m	382 m
3 kHz	1 m	32 m	127 m
12,5 kHz	0,24 m	7,6 m	30,6 m

Per avere 1 m di risoluzione serve almeno 3 kHz, e a 3 kHz l'onda muore entro 32-127 m. **Un tomogramma a 1 m di risoluzione profondo 1,2 km è fisicamente impossibile a prescindere dal sensore.** I 12.500 Hz dichiarati nel paper danno una lunghezza di attenuazione di 8-31 m: quelle onde non arrivano dai chilometri di profondità che il metodo dichiara di sondare.

9. Che cosa NON ho potuto verificare

1. **Non ho i dati COSMO-SkyMed** usati nel paper del 2022. Ho usato Capella e Umbra, che sono i dati che gli autori stessi dichiarano di aver usato per Chefren e per la piana. L'apertura CSG dichiarata (15 s) è metà di quella Capella, quindi le conclusioni sarebbero peggiori, non migliori, ma non l'ho misurato.
2. **Non ho il software degli autori** (brevettato, riscritto in C++ e CUDA, non pubblico). Ho implementato la catena come è descritta nel paper e nelle conferenze. Se il software fa qualcosa che non è scritto, quel qualcosa non è replicabile e non è verificabile da nessuno.
3. **Non ho potuto ricostruire la calibrazione della scala di profondità**, perché non è pubblicata. Ho usato quella dichiarata (1 pixel = 1 m). Se esiste un'altra calibrazione, i controlli (b), (c) e (d) restano validi lo stesso, perché non dipendono dalla scala.
4. **Non ho fatto una riformazione completa per back-projection del CPHD** in sequenze di immagini a sotto-apertura con inseguimento di scatteratori isolati. Ho fatto il filtro adattato per impulso e i profili in distanza. Un'analisi micro-Doppler più raffinata su bersagli puntiformi isolati è possibile e non l'ho esaurita.
5. **Non ho verificato la parte interferometrica** del paper (le otto facce delle piramidi), che usa coppie CSG a passaggio ripetuto che non ho.
6. **Non ho verità a terra** sull'interno della piramide. Il test (e) confronta pixel sopra volumi noti contro pixel sopra muratura, ma la geometria interna è presa dalla letteratura.
7. **Il modello di rumore sismico** sopra 10 Hz è un'extrapolazione, non una misura fatta a Giza. Una campagna con geofoni sul posto potrebbe cambiare quei numeri, ma non di nove ordini di grandezza.

10. Verdetto

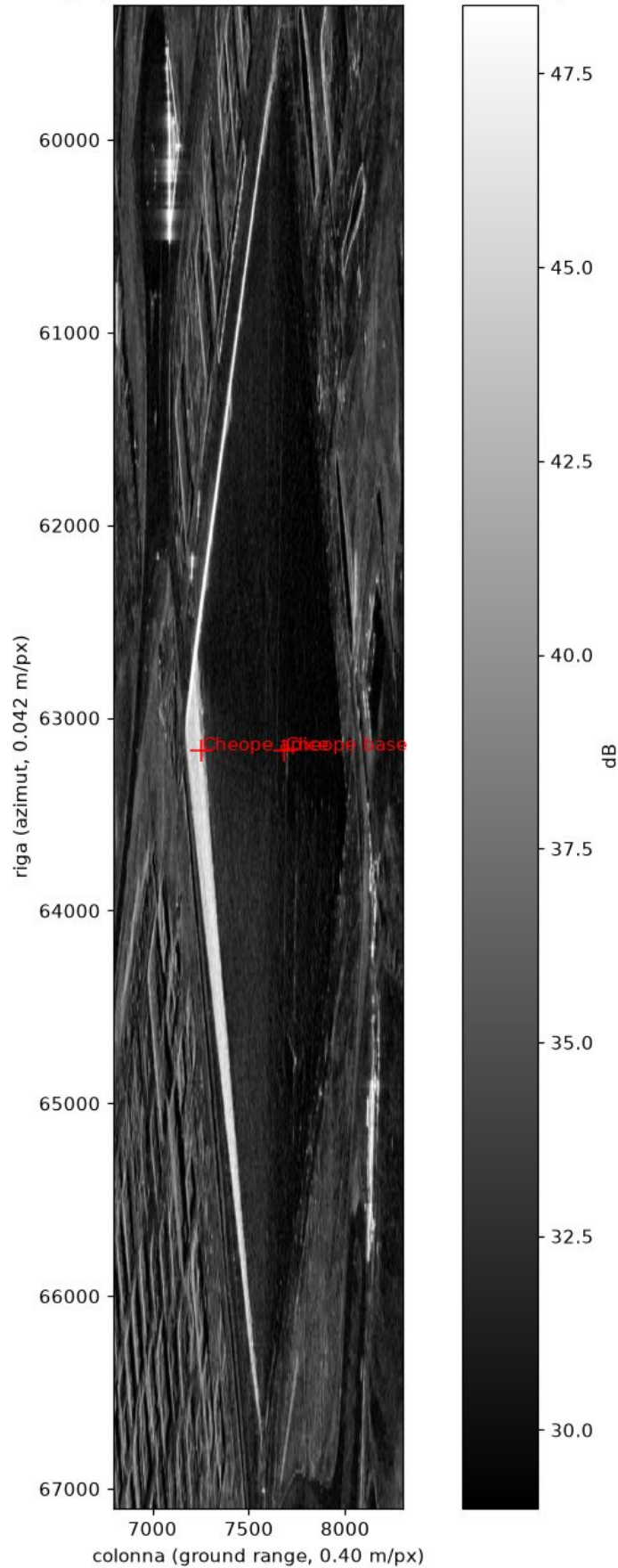
Il metodo non produce informazione sul sottosuolo di Giza. La geometria di un singolo passaggio da 5,7 km di risoluzione in elevazione, non 1 m, e la sensibilità misurata degli spostamenti (78

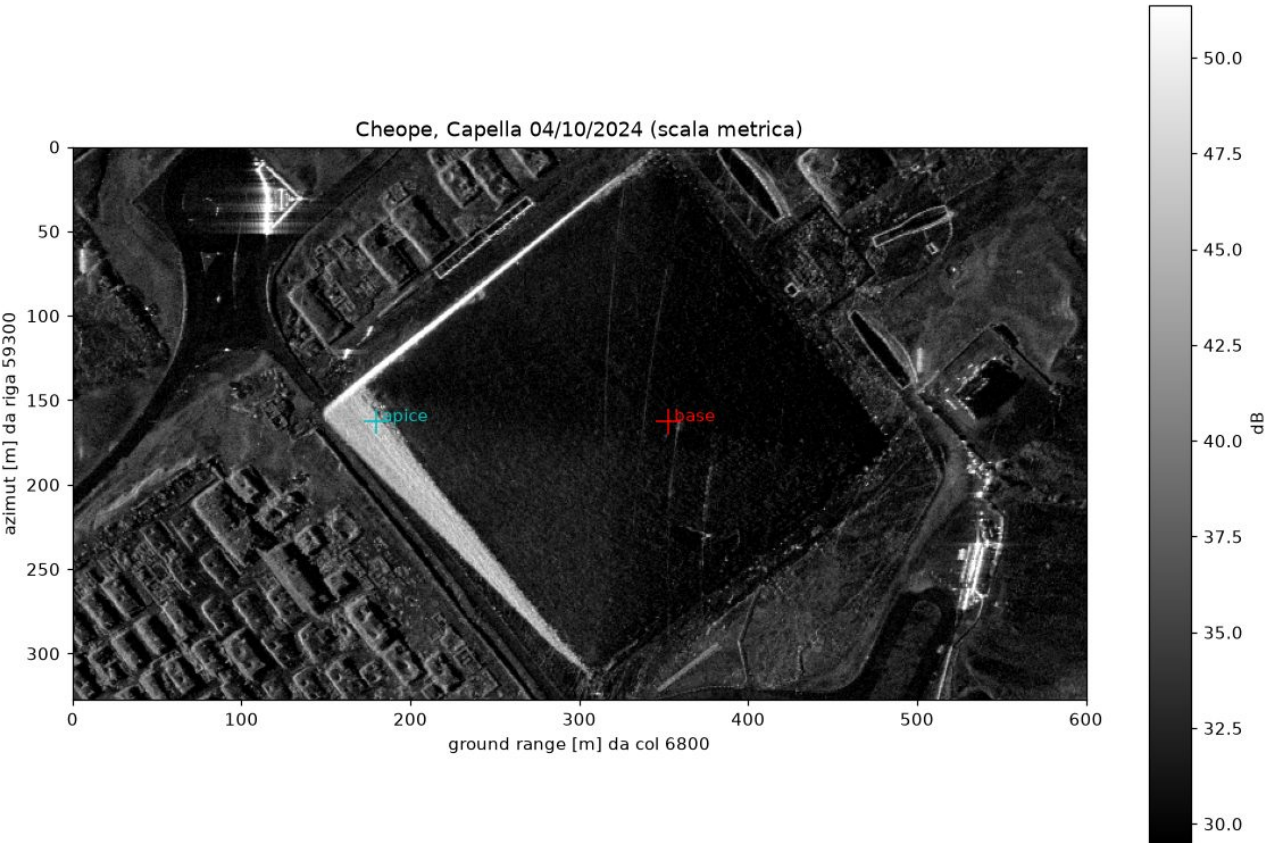
mm sulla faccia di Cheope, 7 mm nel caso migliore di Mosul) sta da quattro a dieci ordini di grandezza sopra il moto ambientale alle frequenze che servirebbero.

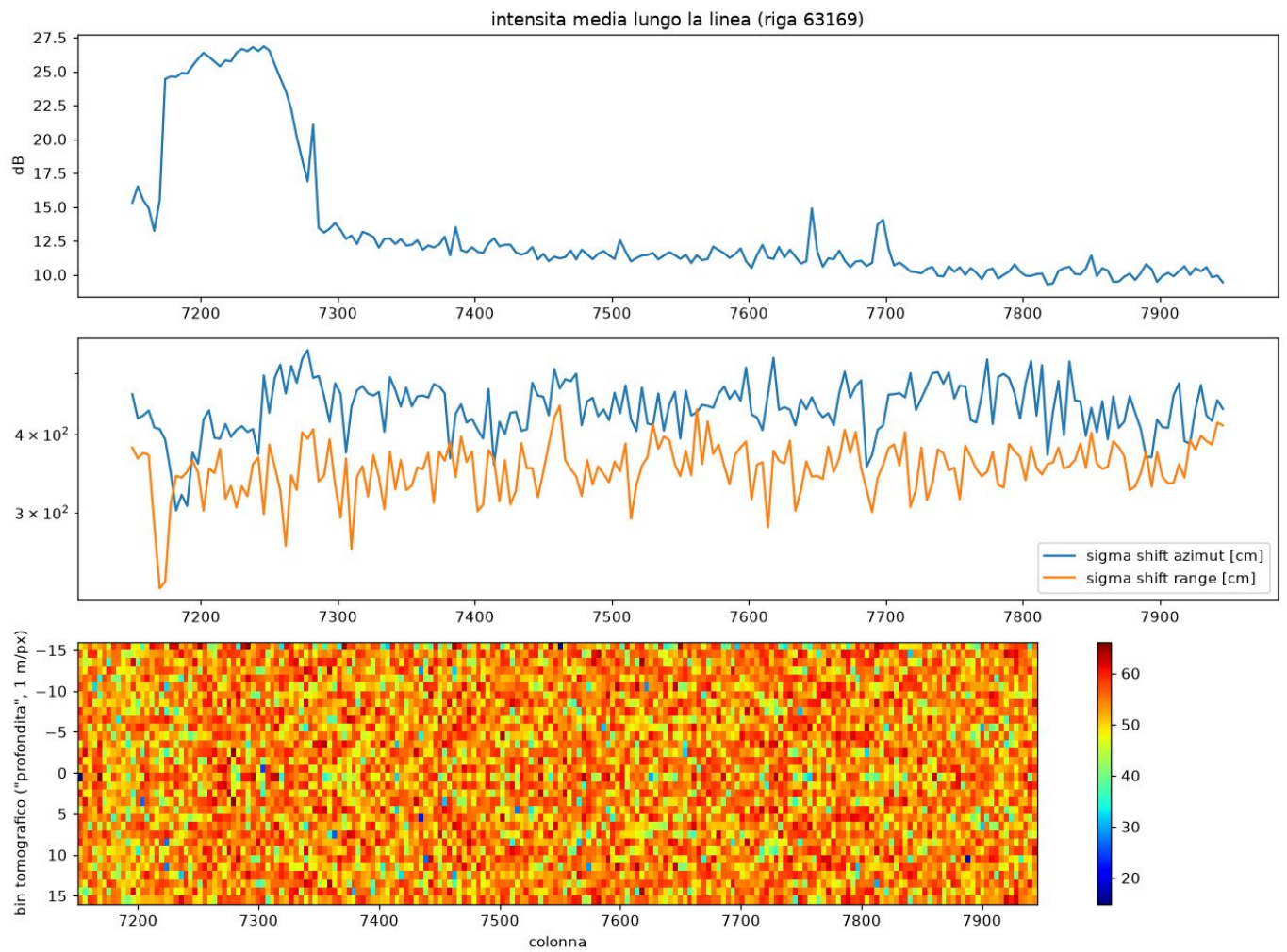
Quello che esce dall'inversione e firma del calcolo: il tomogramma della piramide ha lo stesso profilo in profondità della sabbia piatta (0,9955) e di una scena sintetica di solo speckle senza alcun sottosuolo (0,9977), sopravvive alla permutazione dell'ordine delle sotto-aperture (0,81-0,96), all'inversione del segno di Kz (0,99) e alla cancellazione della fase (0,96-0,99), e non si ripete fra due acquisizioni indipendenti sugli stessi punti (0,15).

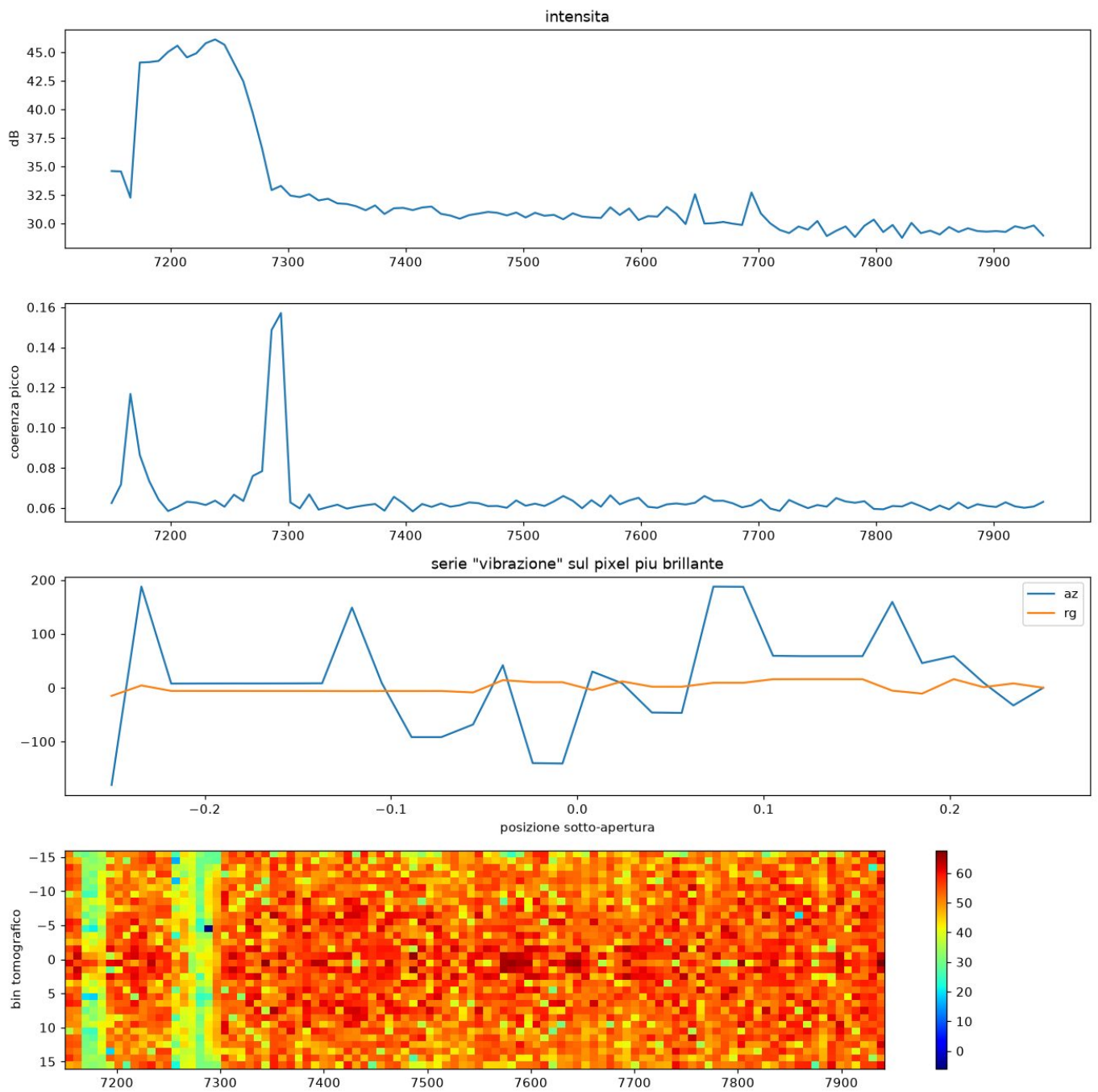
Grado di certezza: alto. Il risultato non dipende da scelte di parametri, perché i controlli (b), (c) e (d) sono interni al dato e la degenerazione quota/distanza del singolo passaggio è un fatto geometrico, non un'opinione. Resta il margine descritto al paragrafo 9: se il software degli autori fa qualcosa che non è nel paper, quel qualcosa non è stato né descritto né verificabile.

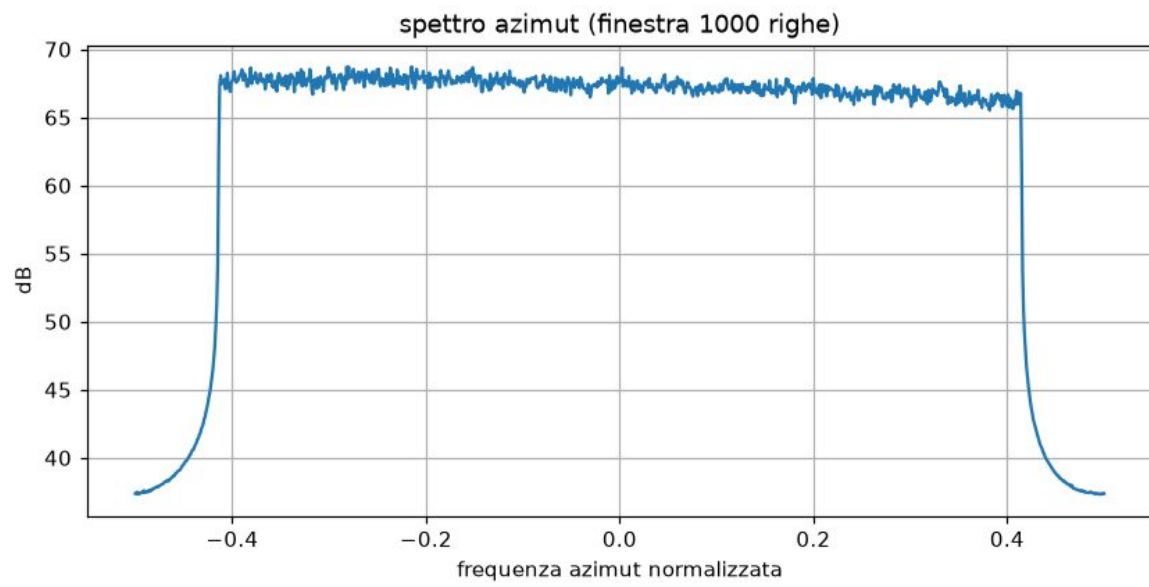
Capella 04/10/2024 - Grande Piramide (multilook 20x2)

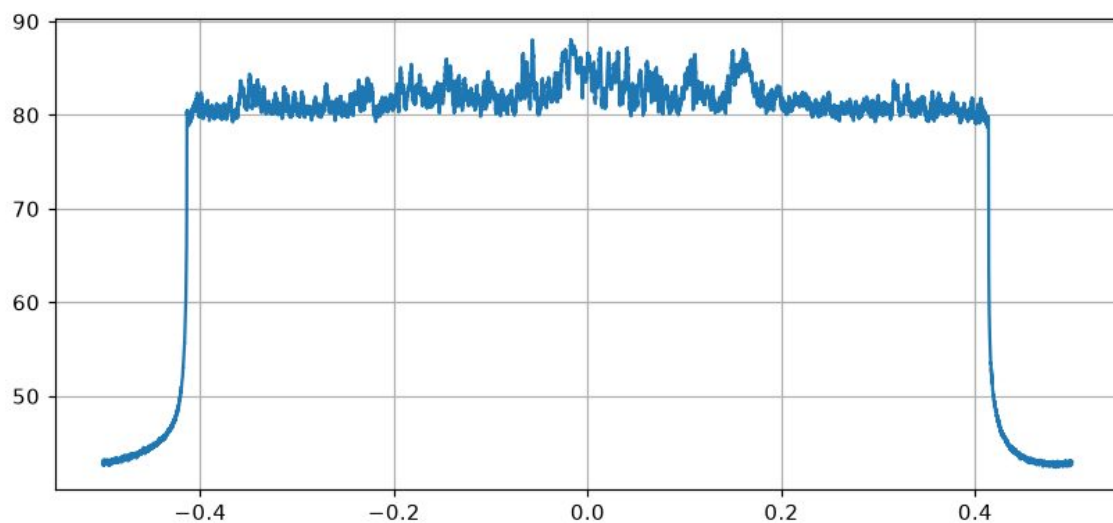


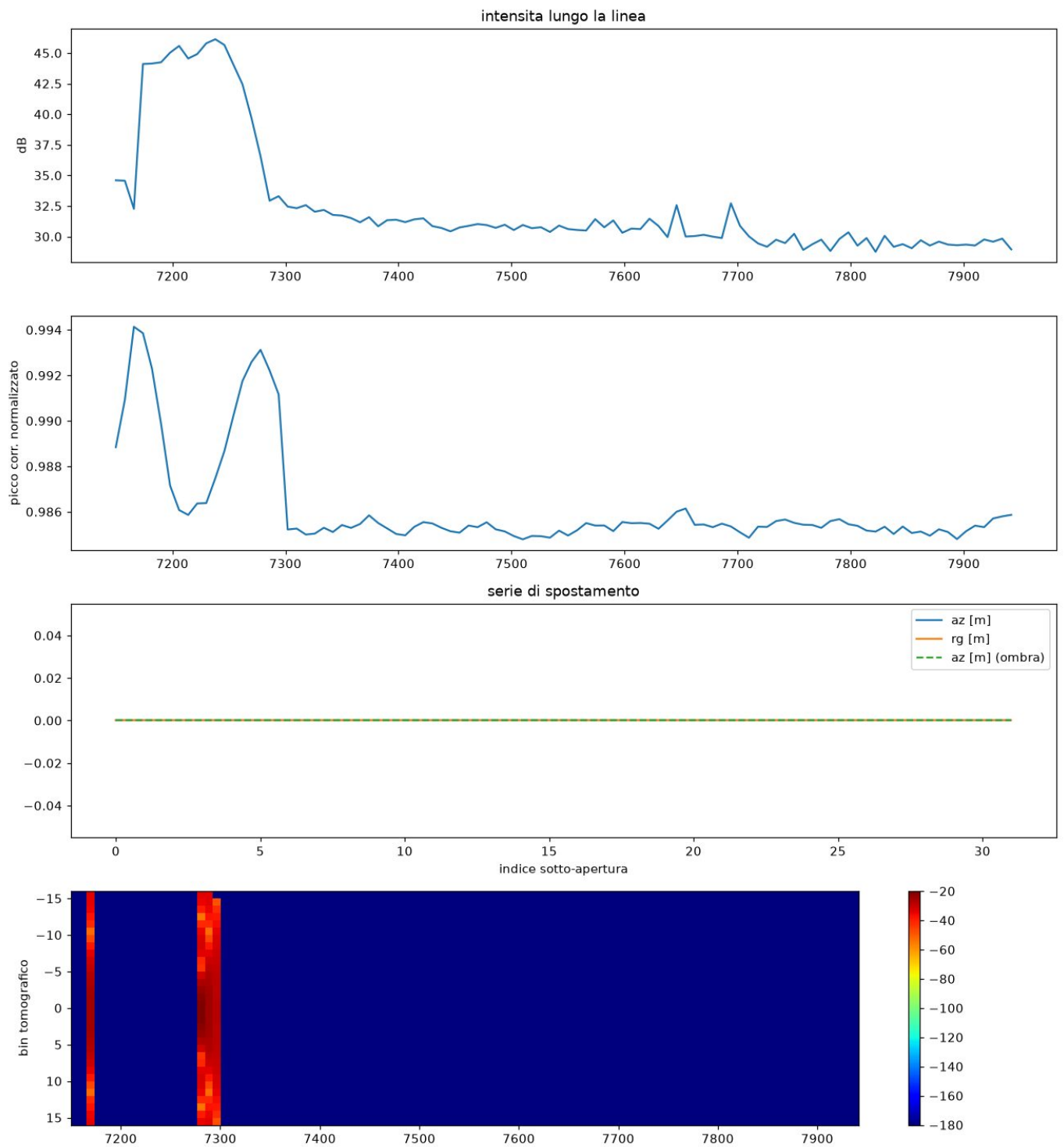




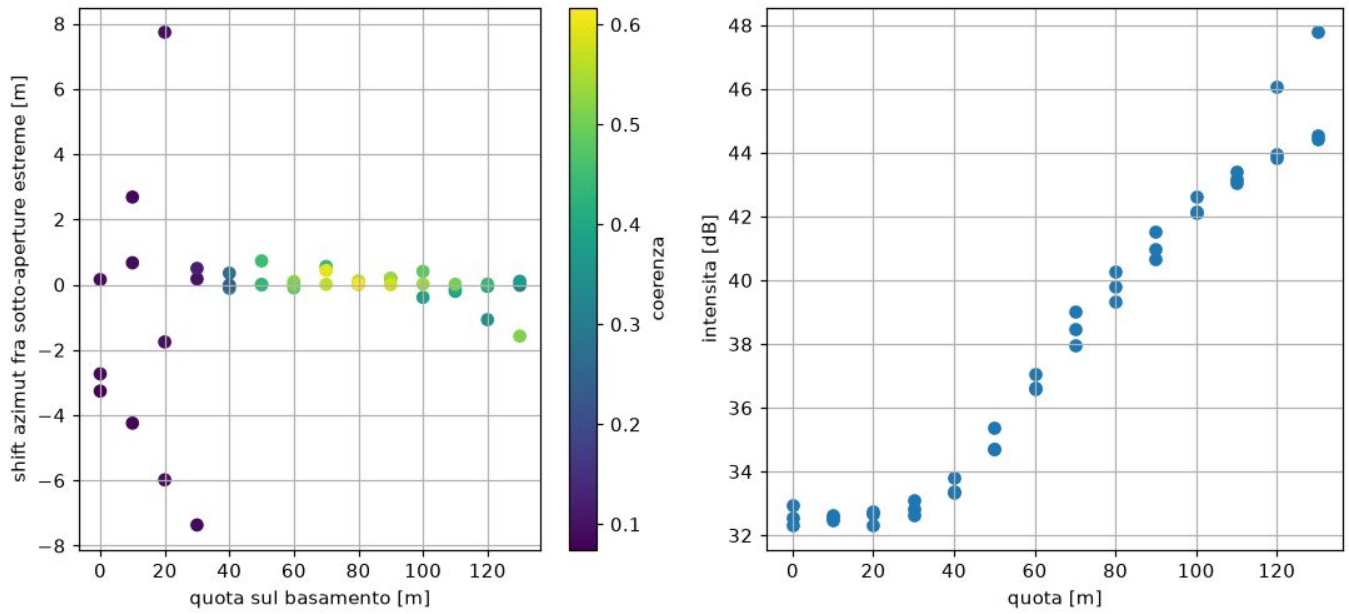


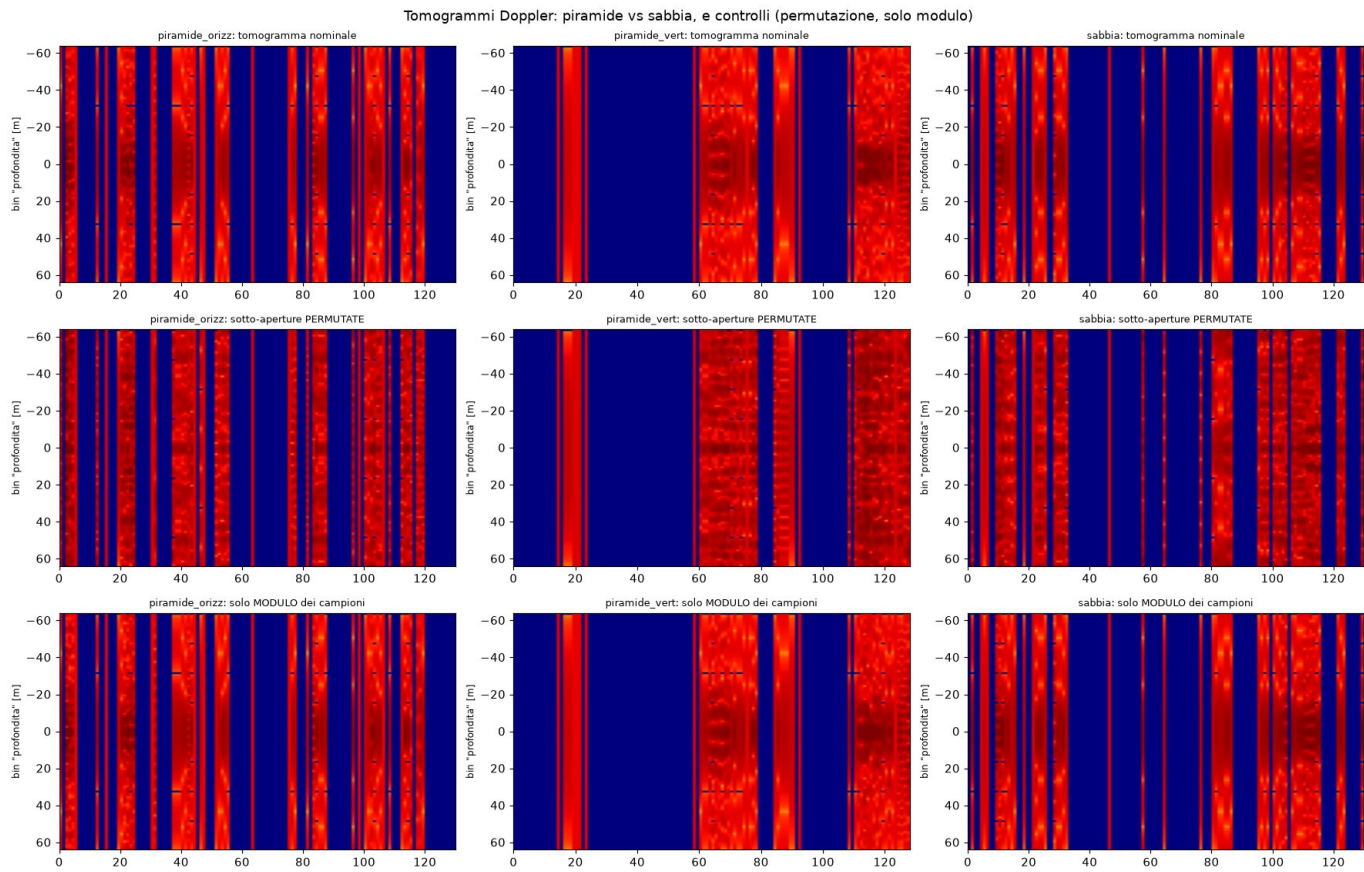






Sensibilit  alla quota degli shift fra sotto-aperture (faccia Ovest, Cheope)





Il segnale geometrico di quota c'e', ma e' al livello del rumore

