

Sotto Giza con i dati aperti

Replica indipendente del metodo di tomografia SAR Doppler di Biondi e Malanga

Pietro Canini, settembre 2026. Rapporto tecnico completo. Dati: Capella Space e Umbra Open Data (licenza CC BY 4.0). Codice: github.com/pietro3d/giza-sar-check (cartelle `code/` per l'analisi principale e `replica/` per la replica indipendente). Pagina divulgativa: accadradinuovo.com/Lab/giza_sar_verifica.html

Il documento è in tre parti. **Parte A:** i file usati, con indirizzo di scarico e impronta SHA-256. **Parte B:** i calcoli, uno per uno, con formula e numeri. **Parte C:** il diario delle misure nell'ordine in cui sono state fatte (sezioni 1-36), comprese le correzioni fatte in corso d'opera, lasciate nel testo perché fanno parte del lavoro: sul granito, sui dati Umbra, e il rifacimento completo dal modulo (parte sesta), che è la versione dichiarata dagli autori e quella su cui poggiano tutte le figure pubblicate. Gli script sono citati con il loro numero (es. "script 80" = `code/80_modulo_completo.py`).

Parte A. I file usati

Tutti i file sono nei bucket pubblici di Capella Space e Umbra (licenza CC BY 4.0), scaricabili senza account, ad esempio con `wget -c URL`. Per verificare di avere lo stesso file: `sha256sum nomefile` deve dare l'impronta indicata.

File
Capella, scena 4/10/2024, SLC https://capella-open-data.s3.amazonaws.com/data/2024/10/4/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20241004001939_20241004002012/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20241004001939_20241004002012.tif
Capella, scena 4/10/2024, metadati https://capella-open-data.s3.amazonaws.com/data/2024/10/4/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20241004001939_20241004002012/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20241004001939_20241004002012_extended.json
Capella, scena 16/9/2024, SLC https://capella-open-data.s3.amazonaws.com/data/2024/9/16/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20240916215711_20240916215743/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20240916215711_20240916215743.tif
Capella, scena 16/9/2024, metadati https://capella-open-data.s3.amazonaws.com/data/2024/9/16/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20240916215711_20240916215743/CAPELLA_C13_SP_SLC_HH_20240916215711_20240916215743_extended.json
Umbra, Cheope 7/2/2023, immagine (SICD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Pyramids%20of%20Giza/7e7cd796-3842-4923-8b48-4c0950ece945/2023-02-07-07-58-27_UMBRA-05/2023-02-07-07-58-27_UMBR
Umbra, Cheope 7/2/2023, dato grezzo (CPHD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Pyramids%20of%20Giza/7e7cd796-3842-4923-8b48-4c0950ece945/2023-02-07-07-58-27_UMBRA-05/2023-02-07-07-58-27_UMBR
Umbra, Cheope 8/2/2023, dato grezzo (CPHD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Pyramids%20of%20Giza/44da7805-2129-410add8-2403bf671f40/2023-02-08-07-54-55_UMBRA-04/2023-02-08-07-54-55_UMBRA-04_CPHD.cphd
Umbra, Chefren 8/3/2023, immagine (SICD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Pyramids%20of%20Giza/5aa49658-ecf9-450afee-281f43fb076e/2023-03-08-07-57-53_UMBRA-04/2023-03-08-07-57-53_UMBRA-04_SICD.nitf
Umbra, diga di Mosul 8/8/2023, immagine (SICD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Mosul%20Dam.%20Iraq/3504718f-16f9-44dfa04f-212074ce0918/2023-08-08-18-30-59_UMBRA-05/2023-08-08-18-30-59_UMBRA-05_SICD.nitf
Umbra, diga di Mosul 8/8/2023, dato grezzo (CPHD) https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/sar-data/tasks/ad%20hoc/Mosul%20Dam.%20Iraq/3504718f-16f9-44dfa04f-212074ce0918/2023-08-08-18-30-59_UMBRA-05/2023-08-08-18-30-59_UMBRA-05_CPHD.cphd

Catalogo Capella: <https://capella-open-data.s3.amazonaws.com/stac/catalog.json> (2.286 scene SLC; solo queste due contengono la piana di Giza). Catalogo Umbra: <https://umbra-open-data-catalog.s3.amazonaws.com/> (cartelle sar-data/tasks/ad hoc/Pyramids of Giza e Mosul Dam, Iraq).

Parte B. I calcoli, uno per uno

1. Controllo di geolocalizzazione (ribaltamento dell'apice)

Un punto alto h sopra la base arriva al radar più vicino di $h \cdot \cos(\theta)$. Con $h = 138,7$ m (altezza attuale di Cheope) e $\theta = 38,58^\circ$: $138,7 \cdot \cos(38,58^\circ) = 108,4$ m di slant range. Con celle di 0,2498 m fanno 434 celle. Misurato con gli RPC del file: 432 celle. Torna.

2. Campionamento: quante istantanee indipendenti, quale frequenza massima

Banda Doppler processata $B_D \approx 0,8 \cdot V / \delta_{az} = 0,8 \cdot 7264 / 0.0450 = 129$ kHz. Durata $T = 32,869$ s.

Perché una sotto-apertura sia ancora un'immagine serve $B_{sub} \cdot T_{sub} \geq 1$, cioè $(B_D/N) \cdot (T/N) \geq 1$, da cui $N_{max} = \sqrt{B_D \cdot T} = \sqrt{129023 \cdot 32,869} = 2059$.

Frequenza massima osservabile (Nyquist sulla sotto-apertura): $f_{max} = N/(2T)$. Con $N = 24$: 0,37 Hz.

Con $N = 2059$: 31,3 Hz, e la risoluzione azimutale diventa $\delta_{az} \cdot N = 92,7$ m (la piramide, 230 m, e' larga 2,5 pixel).

Per Nyquist a 12.500 Hz servirebbe $N = 2 \cdot 12.500 \cdot T = 821.725$ sotto-aperture, ciascuna con 37,0 km di risoluzione. Tetto assoluto anche senza immagine: $PRF/2 = 5.097$ Hz. 12.500 Hz sta 2,45 volte sopra.

3. Amplificazione R/V: perche' un micro-movimento si vede

Una velocita' radiale v_r sposta il centroide Doppler di $2v_r/\lambda$ e quindi la posizione azimutale di $\Delta x = v_r R/V$. Per una vibrazione $A \cdot \sin(2\pi f t)$, $v_{r,max} = 2\pi f A$, spostamento picco-picco $\Delta x_{pp} = 2 \cdot (2\pi f A) \cdot (R/V)$. Qui $R/V = 754,21$ km / 7.263,6 m/s = 103,8 s. Con $A = 1$ mm e $f = 0,2$ Hz: $\Delta x_{pp} = 2 \cdot (2\pi \cdot 0,2 \cdot 0,001) \cdot 103,8 = 261$ mm.

4. Attenuazione dell'onda elastica nella roccia

$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10}(e) \cdot \pi \cdot f \cdot L / (Q \cdot v) = 8,6859 \cdot \pi \cdot f \cdot L / (Q \cdot v)$, con L percorso andata + ritorno.

calcare massivo ($v = 4000$ m/s, $Q = 100$, $L = 1.400$ m): 10 Hz $\rightarrow$ 1,0 dB; 100 Hz $\rightarrow$ 9,6 dB; 1.000 Hz $\rightarrow$ 95,5 dB; 12.500 Hz $\rightarrow$ 1.193,8 dB.

granito integro, caso più favorevole ($v = 6000$ m/s, $Q = 1000$, $L = 1.400$ m): 10 Hz $\rightarrow$ 0,1 dB; 100 Hz $\rightarrow$ 0,6 dB; 1.000 Hz $\rightarrow$ 6,4 dB; 12.500 Hz $\rightarrow$ 79,6 dB.

Mezza lunghezza d'onda (limite di risoluzione): $\lambda/2 = v/(2f)$. A 10 Hz e 4.000 m/s: 200 m. A 12.500 Hz: 0,16 m. Dove torna non risolve, dove risolverebbe non torna.

5. Bilancio delle ampiezze

Rumore sismico ambientale, modello alto di Peterson (NHNM) nella banda 5-15 Hz: PSD di spostamento $\approx 5,1 \cdot 10^{-17}$ m²/Hz. RMS = $\sqrt{\text{PSD} \cdot \Delta f} = \sqrt{(5,1 \cdot 10^{-17} \cdot 10)} = 23$ nm.

Precisione della coregistrazione sub-pixel (formula standard): $\sigma = \sqrt{(3/(2N)) \cdot (1/\pi) \cdot \sqrt{((1-\gamma^2)/(2\gamma^2))}}$ celle. Con $\gamma = 0,95$ e $N = 100$ look: $\sigma = 0,0091$ celle = 0,41 mm in azimut.

Divario: $0,41$ mm / 23 nm = 17.826 volte = 85 dB.

Misurato sui dati veri (script 18): dispersione dello shift azimutale sui bersagli piu' coerenti 60,6 mm con 64 sotto-aperture, 81 mm con 32.

6. La formula della profondità del paper, con i loro numeri e con altri

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (6000/12500) \cdot 650.000 / 84.000 = 3,71$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 648 m [loro: granito]

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (4000/12500) \cdot 650.000 / 84.000 = 2,48$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 432 m [calcare]

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (2500/12500) \cdot 650.000 / 84.000 = 1,55$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 270 m [calcare fratturato]

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (1500/12500) \cdot 650.000 / 84.000 = 0,93$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 162 m [acqua]

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (400/12500) \cdot 650.000 / 84.000 = 0,25$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 43 m [sabbia]

$\delta_z = (v/f) \cdot R / (2A) = (4000/30) \cdot 650.000 / 84.000 = 1.031,75$ m per bin → il 'fondo dei pozzi' (648 m con i loro numeri) diventa 180000 m [calcare, $f = 30$ Hz]

7. Il contrasto e il test del rimescolamento (dal modulo, come descrivono loro)

Gli autori dichiarano che le mappe sono "la rappresentazione del modulo". Per ogni pixel il vettore Y è la serie delle 31 sotto-aperture; si inverte |Y| meno la sua media (senza togliere la media la componente costante domina tutto con una banda a $z = 0$). Contrasto = massimo / mediana del profilo medio lungo z. Rimescolamento: permutazione casuale dell'ordine delle sotto-aperture prima dell'inversione, 10 estrazioni. Criterio dichiarato prima: contrasto vero $\geq 3 \times$ contrasto mescolato.

Capella, Cheope 4/10: vero 1,529, mescolato 1,192 $\pm$ 0,039, rapporto 1,283. Cheope 16/9: rapporto 1,314. Deserto: vero 1,331, mescolato 1,232, rapporto 1,080. Umbra, Cheope: rapporto 1,240; Umbra deserto 1,025. Mosul: corpo diga 1,020, terreno 1,012, collina naturale a est 1,259. Scena sintetica di solo rumore radar: 1,000. In nessun caso si arriva a 3, e la collina naturale dà lo stesso rapporto della piramide.

Posizione delle colonne, vero contro mescolato: correlazione 0,86 (Cheope), 0,93 (deserto): le colonne restano al loro posto perché vengono dalla luminosità dell'immagine, correlazione fra energia del tomogramma e luminosità radar 0,89 su Cheope, 0,91 sulla seconda scena.

Profili in profondità: Cheope/deserto 0,939 (Capella), 0,915 (Umbra); corpo diga/terreno a Mosul 0,9994. Camere note contro muratura piena: differenza/dispersione = 0,99 (serve nettamente > 1). Segno di Kz invertito: profilo identico, correlazione 1,000, perché con un ingresso reale la trasformata è simmetrica per costruzione, cioè l'asse non può distinguere sopra da sotto.

Controllo con la fase (la versione fatta per prima): rapporto 1,008 su Cheope, 0,996 sul deserto. Stessa conclusione, disegno diverso (macchie invece di colonne).

8. Il blu: correlazione fra tomogramma e luminosità

Tomogramma dal modulo: energia $E(x,y) = \sum_z |h(z;x,y)|$. Correlazione di Pearson fra $\log_{10}(E+1)$ e $\log_{10}(\text{ampiezza radar}+1)$ sugli stessi pixel (812×400): +0,925. Stesso calcolo con il tomogramma dalla fase: -0,071.

9. Gravimetria: cosa vedrebbe un gravimetro

Camera cubica vuota di lato 80 m a 648 m: massa mancante $M = 80^3 \cdot 2.500 \text{ kg/m}^3 = 1.28e+09$ kg. Anomalia in superficie $g = G \cdot M / r^2 = 6,674e-11 \cdot 1.28e+09 / 688^2 = 1.8e-07 \text{ m/s}^2 = 18$ microgal. Un gravimetro moderno risolve 1-5 microgal.

10. Potenza del radar al suolo

$S = P \cdot \text{duty} \cdot G / (4\pi R^2) = 5000 \cdot 0.1 \cdot 10^{(45/10)} / (4\pi \cdot 650.000^2) = 3,0 \text{ } \mu\text{W/m}^2$. Il Sole: circa 1.000 W/m^2 , cioè $3e+08$ volte tanto.

$S = P \cdot \text{duty} \cdot G / (4\pi R^2) = 1000 \cdot 0.05 \cdot 10^{(40/10)} / (4\pi \cdot 650.000^2) = 0,1 \text{ } \mu\text{W}/\text{m}^2$. Il Sole: circa $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$, cioè $1\text{e}+10$ volte tanto.

Parte C. Il diario delle misure

Replica indipendente del metodo Biondi-Malanga sui dati aperti Capella

Lavoro del 3/9/2026. Dati: Capella Open Data, scena spotlight del 4/10/2024 su Giza, CC BY 4.0, 3,6 GB, scaricabile in anonimo. Codice: github.com/pietro3d/giza-sar-check.

1. Il dato

Banda X a 9,6 GHz (lunghezza d'onda 3,12 cm), spotlight, 12.480 x 118.909 pixel complessi, passo 4,2 cm in azimut e 40 cm in range, incidenza 38,6 gradi. **Apertura sintetica 32,5 secondi**, contro i 15 secondi delle immagini COSMO-SkyMed del paper. Scena di 5 x 5 km centrata a 570 m dalla Grande Piramide: contiene Cheope, Chefren, Micerino, la Sfinge e il Pozzo di Osiride, tutti localizzati al pixel con i coefficienti RPC del file. Controllo di geolocalizzazione superato: l'apice di Cheope cade 173 m verso il radar rispetto alla base, che è il ribaltamento atteso per 138 m di quota a 38,6 gradi di incidenza.

2. Cosa è stato implementato

Le tre fasi del metodo, riscritte da zero: - divisione dello spettro azimutale in sotto-aperture Doppler sovrapposte (05_pipeline.py); - stima del micro-movimento pixel per pixel, sia per fase interferometrica sia per coregistrazione sub-pixel dell'ampiezza, che è il metodo del paper (08_pixeltracking.py); - proiezione sull'asse chiamato profondità (05_pipeline.py, funzione tomogramma). Più i banchi di prova: iniezione di vibrazioni note (10, 11, 12, 13), verifica dell'amplificazione R/V (14), ricerca dell'area di controllo (16), confronto (17), curva di precisione (18), sensibilità ai parametri (19).

3. Il punto che regge, ed è il cuore del metodo

Una vibrazione radiale non viene misurata direttamente: si trasforma in uno spostamento apparente del bersaglio lungo la direzione di volo, amplificato dal rapporto R/V fra distanza e velocità del satellite. Per questa orbita **R/V = 93 secondi con i valori nominali (700 km, 7,5 km/s); con i metadati veri della scena, 754 km e 7.264 m/s, vale 103,8 secondi**. Verificato numericamente: lo spostamento apparente picco-picco vale $2 \cdot (2 \pi f A) \cdot R/V$. È il pezzo di fisica su cui poggia tutto, ed è corretto.

4. I 12.500 Hz sono impossibili, e per due ragioni indipendenti

Campionamento. Con 32,5 s di ripresa, il numero di istantanee indipendenti fissa la frequenza massima osservabile. Misurato: N sub-aperture campionamento Nyquist risoluzione azimutale 24 0,74 Hz 0,37 Hz 1,1 m 96 2,95 Hz 1,48 Hz 4,3 m 384 11,8 Hz 5,9 Hz 17,3 m Anche spingendo oltre il ragionevole si resta sotto 6 Hz. Dichiarati 12.500. Tre ordini di grandezza, e il limite dipende solo dalla durata della ripresa.

Propagazione. Con attenuazione intrinseca $\alpha = \pi f / (Q v)$, su percorso stratificato realistico (20 m di sabbia, 40 m di calcare fratturato, 640 m di calcare massivo; sotto Giza non c'è granito, il granito è solo dentro il monumento), andata e ritorno: 10 Hz -> 4,6 dB · 30 Hz -> 13,9 dB · 100 Hz -> 46 dB · 1 kHz -> 462 dB · 12,5 kHz -> 5776 dB I soli 20 m di sabbia, a 12,5 kHz, valgono 1365 dB.

La forbice. Dove l'onda torna non risolve, dove risolverebbe non torna: 10 Hz: 1 dB di perdita, ma mezza lunghezza d'onda = 200 m 100 Hz: 10 dB, mezza lunghezza d'onda = 20 m 2 kHz: 191 dB, mezza lunghezza d'onda = 1 m 12,5 kHz: 1194 dB, mezza lunghezza d'onda = 16 cm È questa la forma corretta dell'obiezione, più forte di ciascuna metà presa da sola.

5. Il deficit di ampiezza, che chiude la questione a monte

- Rumore sismico ambientale, modello alto di Peterson, banda 5-15 Hz: **RMS circa 23 nanometri**.
- Precisione della coregistrazione sub-pixel **misurata sui dati veri**, sui bersagli più coerenti del corpo di Cheope: 61 mm con 64 sotto-aperture, 81 mm con 32. Stima teorica ottimista sulla scena piena, con coerenza 0,95 e 100 look: 0,41 mm.
- Il divario fra ciò che c'è e ciò che si può misurare è di **circa 88 dB**, un fattore intorno a 25.000, prima ancora di far propagare qualcosa in profondità.

Corollario che spiega tutto il resto: il metodo funziona dove le vibrazioni sono grandi. Navi, ponti sotto traffico, turbine di una centrale, una diga in carico: ampiezze da millimetri a centimetri, sopra la soglia. Una piramide ferma mossa dal solo rumore di fondo: nanometri, sotto la soglia di un fattore ventimila. In conferenza Biondi lo dice senza accorgersene, le turbine si vedono bene perché sono macchine rotative.

6. Il controllo negativo

Cercata nella scena l'area più omogenea e vuota (sabbia piatta, coefficiente di variazione 0,54 contro 1,00 di Cheope, nessun riflettore dominante) e passata la stessa identica catena. Cheope : energia per pixel cv 0,2389 | dispersione del picco lungo z 42,4 su 256 sabbia : energia per pixel cv 0,2320 | dispersione del picco lungo z 41,7 su 256 Sono statisticamente indistinguibili. Con questa implementazione il tomogramma non separa una piramide con dentro camere e gallerie da sei chilometri di deserto piatto. Limite dichiarato: l'asse di profondità è ricostruito, non è quello esatto del paper, che non pubblica i parametri. Vale come indizio pesante, non come prova.

7. La profondità non è misurata, è scelta

Formula del paper: risoluzione in profondità = $(v/f) * R / (2A)$, con R 650 km e A 84 km. Né v né f vengono dal dato. Tenendo fissa la misura e cambiando solo il materiale assunto, il fondo dei pozzi che loro danno a 648 m si sposta così: granito ideale 6000 m/s -> 648 m calcare massivo 4000 -> 432 m calcare fratturato 2500 -> 270 m acqua di falda 1500 -> 162 m sabbia asciutta 400 -> 43 m E cambiando solo la frequenza assunta, a parità di materiale, si va da 432 m a 180 km. È la stessa cosa che dice la replica indipendente di Jashua Luna: lo stesso vettore di osservazione diventa 3 km di vulcano o 30 m di muratura a seconda del rapporto v/f scelto.

8. Conclusione onesta

Il primo stadio del metodo, la misura delle micro-vibrazioni da sotto-aperture Doppler, è reale e ha una fisica corretta alle spalle. Il secondo, l'assegnazione di una profondità, non è una misura: è il prodotto di due parametri scelti dall'operatore, e la frequenza dichiarata per farlo funzionare non è osservabile con quei dati né propagabile in quella roccia. Il ritiro della rivista resta motivato male e arrivato con quattro anni di ritardo, e l'argomento di Biondi sul paper gemello del Vesuvio, ancora al suo posto con lo stesso metodo, resta valido. Ma la parte del lavoro che riguarda Giza, sui numeri, non sta in piedi.

Parte seconda: i null test appaiati e le tre soglie

9. I tre null test sugli stessi pixel (il controllo negativo che conta)

Il confronto con un altro sito è debole, perché cambia tutto (luminosità, geometria, rapporto segnale rumore). Il controllo giusto è appaiato, sugli stessi identici pixel, rompendo solo la fisica. Criterio dichiarato prima di guardare i risultati: il tomogramma vero deve battere di almeno 3 volte quello mescolato.

1. tomogramma vero	contrasto 1,0671
2. ordine delle sotto-aperture mescolato rapporto vero/mescolato = 1,008	contrasto 1,0581 +- 0,0037 (10 prove) criterio NON superato
3. segno di Kz invertito (una profondità vera deve specchiarsi: non si specchia)	profilo identico, correlazione 1,0000
4. fase buttata, solo modulo	contrasto 4,4619, cioè PIÙ ALTO del vero
5. rumore bianco al posto dei dati	contrasto 1,0015

Il punto 2 è il più duro. Mescolando a caso l'ordine delle sotto-aperture si distrugge la geometria lasciando identiche tutte le altre statistiche, e il risultato non cambia. La replica indipendente di Jashua Luna misura 1,04 sullo stesso test, io misuro 1,008. Il punto 4 dice che il poco contrasto presente non viene dall'interferometria ma dalla luminosità dell'immagine.

10. Controllo positivo: la catena funziona, ma da un millimetro in su

Iniettando una vibrazione nota in un bersaglio forte, la catena restituisce l'ampiezza giusta entro il 15 per cento per ampiezze da 1 mm in su. Sotto, il rumore di stima (circa 42 mm sul picco con 64 sotto-aperture) se la mangia. Un risultato negativo senza questo controllo non si distingue da un errore di programmazione.

11. Le tre soglie annidate che escludono i 12.500 Hz

Calcolate sui metadati della scena Capella, che è migliore della loro (32,9 s di apertura contro 15, banda Doppler 129 kHz contro 22-24, risoluzione azimutale 4,5 cm).

soglia 1, imaging: il numero massimo di sotto-aperture ancora focalizzabili è $N = \text{radice}(\text{banda Doppler} \times \text{durata}) = 2.059$, che dà una frequenza massima osservabile di 31,3 Hz. A quel punto ogni sotto-apertura ha 93 m di risoluzione e la Grande Piramide è larga 2,5 pixel.

soglia 2, cosa servirebbe: per arrivare a 12.500 Hz servono 821.725 sotto-aperture, ciascuna con 37 km di risoluzione azimutale. L'immagine sarebbe un pixel.

soglia 3, tetto assoluto: anche rinunciando del tutto all'immagine e lavorando impulso per impulso, il campionamento massimo è la PRF, cioè 10.193 Hz, Nyquist 5.097. I 12.500 Hz stanno 2,45 volte sopra anche questo. Con la PRF dichiarata nel loro paper (2,0 kHz) stanno 12,5 volte sopra.

Risoluzione in frequenza del micro-movimento: $1/\text{durata} = 0,0304$ Hz, non migliorabile con nessuna elaborazione.

12. Il difetto strutturale dell'inversione

Nella tomografia SAR vera l'asse di elevazione si risolve con baseline trasversali fra passaggi diversi. Il paper usa una sola immagine e prende come baseline le posizioni lungo l'orbita (Fig. 8d), dove la sensibilità alla quota è praticamente nulla. L'equazione 24 è una trasformata di Fourier lungo l'indice di sotto-apertura, e gli autori lo scrivono: la matrice di steering "rappresenta la migliore approssimazione di un operatore che esegue la DFT di Y". Confronto quantitativo con lo stato dell'arte: Zhu e Bamler 2010, 25 scene TerraSAR-X con 269,5 m di apertura di baseline, risolvono 40,5 m in elevazione; su Roma, 29 immagini COSMO-SkyMed con 1.469 m, risolvono 7,89 m. Il paper rivendica 0,92 m da UNA immagine,

usando come baseline la direzione in cui la sensibilità è zero.

13. Il layover, che va mappato prima di interpretare qualunque tomogramma

Incidenza 38,58 gradi, pendenza delle facce 51,84: layover completo. L'apice arriva 114,6 m di slant range più vicino della base, cioè oltre 430 celle ripiegate sul terreno antistante (misurato con gli RPC del file: 432). Tutta l'altezza si comprime in una banda che contiene anche il piano davanti. È la spiegazione più economica della banda diagonale calda che attraversa la loro Fig. 24b.

14. Onestà verso gli autori, da dichiarare sempre

La mia scena è Capella, la loro è COSMO-SkyMed staring spotlight: sensore e geometria diversi. Il mio esito negativo dimostra qualcosa sul METODO, non sui loro dati specifici. E lo 0,99 di correlazione che Luna ottiene sul primo stadio non è un punto a favore del metodo: dice solo che la coregistrazione misura degli spostamenti, cosa che nessuno contesta. Tutta la disputa è a valle.

15. Il test di ripetibilità fra due scene diverse

Scaricata anche la scena del 16/9/2024 (incidenza 44,9 gradi contro 38,6, altra data, altra geometria) e ripetuta la catena sugli stessi bersagli. La correlazione fra i profili tomografici delle due scene è alta, e a prima vista sembra la conferma che le strutture sono reali e stabili. Non lo è, e il controllo lo dimostra:

Cheope	dati veri	+0,9626	con l'ordine delle sotto-aperture mescolato	+0,9250
deserto	dati veri	+0,9799	con l'ordine mescolato	+0,9142
deserto2	dati veri	+0,5205	con l'ordine mescolato	+0,6588

La ripetibilità è alta anche sul deserto (più che su Cheope) e sopravvive quasi intatta mescolando l'ordine delle sotto-aperture, cioè dopo aver distrutto la geometria. Non è ripetibilità di strutture: è la firma della catena di elaborazione. Su un terzo punto il dato mescolato correla più del dato vero.

Questo è importante perché la ripetibilità su più satelliti e più orbite è l'argomento che Biondi porta in conferenza come prova di solidità. Con i dati aperti, quel test lo supera anche la sabbia.

16. La soglia vera, e perché mediare non salva il metodo

La replica indipendente di Luna misura tre grandezze che vanno tenute separate. Il rumore dello stimatore di spostamento su bersaglio fermo è minuscolo, fra 0,004 e 0,03 celle. Ma la soglia per TRACCIARE una vibrazione è 0,5 celle: sotto 0,25 celle il moto è irrecuperabile. La differenza fra i due numeri è spiegata dal rapporto di trasferimento in ampiezza, che vale 0,37 a 0,5 Hz, 0,26 a 1 Hz, 0,06 a 2 Hz e 0,001 a 4 Hz: il primo stadio recupera la FORMA della vibrazione con correlazione 0,99, ma ne misura l'ampiezza attenuata da 4 a 1000 volte.

Soglie corrispondenti, per pixel singolo: 0,004 celle (bersaglio fermo, 50 dB) 14 micron 0,03 celle (bersaglio fermo, 20 dB) 107 micron 0,05 celle (stima teorica corrente) 178 micron 0,5 celle (floor empirico misurato) 1780 micron Il mio controllo positivo sui dati veri dà una soglia intorno al millimetro, cioè cade esattamente sul floor empirico. Due misure indipendenti, stesso numero.

Mediando su un'area più grande la precisione per pixel peggiora e il numero di campioni indipendenti cala, e i due effetti si compensano: la soglia dipende solo dal lato dell'area mediata, mai dal numero di sotto-aperture. In metri: lato 10 m -> 2469 nm (stima teorica) / 24,7 micron (floor empirico) lato 30 m -> 823 nm / 8,2 micron lato 100 m -> 247 nm / 2,5 micron lato 230 m -> 107 nm / 1,1 micron Contro un moto ambientale di 23 nanometri. Per arrivarci servirebbe un'area di 1.073 m di lato con la stima

teorica, di 10.733 m con il floor misurato: da 4,7 a 47 volte il lato della Grande Piramide.

La formulazione che chiude il capitolo: anche con l'ipotesi di tracciamento più favorevole esistente e con la mediazione spinta al massimo, la vibrazione ambientale della Grande Piramide sarebbe rivelabile solo trattando la piramide intera come un unico pixel. Non è una tomografia, è un accelerometro con risoluzione spaziale di 230 metri. Con il floor empirico, neanche quello. La Camera del Re misura 10,5 per 5,2 metri, cioè sta sotto la dimensione minima dell'area da mediare.

17. Il dilemma strutturale delle sotto-aperture

Due sotto-aperture azimutali NON sovrapposte, su bersaglio distribuito, hanno coerenza nulla per costruzione: non condividono banda, quindi non condividono la realizzazione di speckle. sotto-aperture sovrapposte -> correlate, quindi non indipendenti nel tempo sotto-aperture non sovrapposte -> indipendenti nel tempo, ma decorrelate Non esiste una scelta di banda che dia entrambe le cose, e nessun affinamento del codice rimuove il vincolo. Verifica sperimentale sul mio dato: il rumore equivalente di fase misurato per classe di brillantezza del bersaglio scala con pendenza -0,14 per decade di rapporto segnale rumore, contro il -0,50 atteso se fosse rumore termico e lo 0,00 atteso se fosse decorrelazione angolare. È quasi tutta decorrelazione: non si migliora scegliendo bersagli più luminosi.

18. Due cose da dichiarare, per correttezza

Il paper non dice quale stimatore usa: il blocco 5 della sua Fig. 9 è un "vibration metric algorithm" mai definito, e i riferimenti citati rimandano a coregistrazione coerente, non a tracking di ampiezza. Io ho implementato entrambe le strade e le riporto separatamente. E lo 0,99 di correlazione che Luna ottiene sul primo stadio non è un punto a favore del metodo: dice solo che la coregistrazione misura degli spostamenti. Tutta la disputa è a valle.

Parte terza: la replica sui dati che loro dichiarano di aver usato

19. Quali dati dichiarano

Il comunicato ufficiale del Khafre Project (conferenza del 16 marzo 2025) dice testualmente che la ricerca è stata condotta con dati SAR "publicly available ... provided as open-source by Capella Space and Umbra", e parla di "dozens of tomographic images obtained from different angles, using Capella Space and Umbra radars". Nell'intervista ad American Alchemy del dicembre 2025 Biondi porta il conto a quattro operatori, aggiungendo ICEYE e COSMO-SkyMed. Il paper del 2022 usava invece 12 immagini COSMO-SkyMed fornite dall'ASI.

Verifica dei cataloghi aperti: Capella : 2 scene su Giza, 16/9 e 4/10/2024. Sono quelle che ho usato. Umbra : 4 acquisizioni su Giza, 7-8-10 febbraio e 8 marzo 2023, nella cartella "ad hoc/Pyramids of Giza". Due puntate su Cheope, due su Chefren. Comprendono il dato GREZZO (CPHD) per due di esse. ICEYE : nessuna scena su Giza negli archivi consultabili. COSMO-SkyMed: nessun dato aperto, fornitura ASI su richiesta. Quindi i dati aperti su Giza esistono per due dei quattro operatori, e li ho scaricati tutti.

20. Parametri veri delle scene Umbra

07/02/2023	UMBRA-05	incidenza 36,75 gradi	apertura 1,27 s	PRF 5.483 Hz
08/02/2023	UMBRA-04	incidenza 29,45 gradi	apertura 1,18 s	
10/02/2023	UMBRA-04	incidenza 34,75 gradi	apertura 4,99 s	(azimut opposto)

Le aperture Umbra durano da 1,2 a 5 secondi, contro i 32,9 della scena Capella. La risoluzione in frequenza del micro-movimento passa da 0,03 Hz a 0,79 Hz, cioè su quei dati due vibrazioni che differiscano di meno di otto decimi di hertz non si distinguono.

21. I null test rifatti sui dati Umbra

Stessa catena, stesso criterio dichiarato prima (il vero deve battere di 3 volte il mescolato): Cheope : contrasto vero 1,3916 | mescolato 1,3982 | rapporto 0,995 deserto : contrasto vero 1,1300 | mescolato 1,1278 | rapporto 1,002 sign-flip: profilo identico, non si specchia correlazione fra profilo di Cheope e profilo del deserto: +0,9821 Ricerca esaustiva della configurazione migliore, 24 combinazioni di numero di sotto-aperture, sovrapposizione e multilook: il rapporto massimo trovato è 1,158, e in dieci combinazioni su ventiquattro il dato mescolato batte il dato vero. Il criterio richiede 3.

22. Il test più favorevole possibile: micro-Doppler sul dato grezzo

Il CPHD contiene la storia di fase impulso per impulso: niente sotto-aperture, nessuna perdita, frequenza massima osservabile pari a metà della PRF, cioè 2.741 Hz. Se una vibrazione esiste, a qualunque frequenza fino a lì, deve comparire. Spettro del micro-movimento su celle di range con bersaglio fortissimo, medio, debole e praticamente vuoto (energia 740 volte più bassa): banda bersagli fortissimi celle quasi vuote rapporto 10-50 Hz 7088 3849 1,84 50-200 Hz 147 158 0,93 200-500 Hz 13,8 16,2 0,85 500-1000 Hz 3,0 3,1 0,97 oltre 1000 Hz 0,78 0,78 1,00 Le quattro curve sono sovrapposte. Il picco a bassa frequenza c'è identico anche dove non c'è nessun bersaglio: è fase della piattaforma, oscillatore locale o residuo di compensazione del moto, non vibrazione della piramide. Sopra il kilohertz non c'è niente in nessun caso, il segnale sta sotto la mediana del rumore.

23. Conclusione finale

Il quadro è coerente a quattro livelli indipendenti: sul dato grezzo Umbra, nessuna vibrazione distinguibile dal fondo comune a nessuna frequenza fino a 2.741 Hz; sull'immagine Umbra, i null test appaiati falliscono in tutte le 24 configurazioni; sull'immagine Capella, stessi null test, stesso esito; sui conti teorici, un deficit di circa 88 dB fra il moto ambientale e la soglia dello strumento. Il primo stadio del metodo, la misura di micro-movimenti da sotto-aperture Doppler, resta valido dove le vibrazioni sono grandi: navi, ponti, macchine rotanti. La sua applicazione alla Grande Piramide, con i dati che gli autori stessi dichiarano di aver usato, non produce alcun segnale distinguibile dal rumore.

Parte quarta: le 'proof of concept della conferenza (Gran Sasso, Mosul, Gottardo)

24. Disponibilità dei dati

Scorse tutte le 2.286 scene del catalogo aperto Capella per coordinate e le 750 cartelle del catalogo Umbra. Gran Sasso: nessun dato aperto. San Gottardo: nessuno. Diga di Mosul: UNA scena Umbra (UMBRA-05, 8/8/2023, spotlight, 4,06 s di apertura, 0,21 x 0,29 m, PRF 4.807 Hz), con anche il dato grezzo (CPHD, 3,4 GB). Scaricata e analizzata. Sul Gran Sasso e sul Gottardo, quindi, non è possibile verificare nulla, né a me né a nessun altro, finché gli autori non pubblicano i dati.

25. Mosul, primo stadio: dove si muove la scena

Test cieco con il metodo di coregistrazione del paper su 2.132 blocchi di 96 pixel: il codice non sa dove sta la centrale. Dei 15 blocchi coerenti con più movimento, 5 cadono entro 56-116 m dalla centrale di pompaggio Mosul 3 e 5 entro 120-600 m dalla centrale principale Mosul 1 (posizioni prese da OpenStreetMap dopo il calcolo). È un indizio a favore del primo stadio: le macchine rotanti sembrano lasciare traccia. Ma la mediana del movimento nei 250 m attorno alle centrali (0,67 px) non è più alta che nel resto della scena (0,78 px): sono solo i picchi.

26. Mosul, dato grezzo: cercare la vibrazione delle turbine

Micro-Doppler con filtro adattato sul punto della centrale (compensazione esatta della storia di fase, qualunque vibrazione compare come coppia simmetrica di bande laterali), a 4.807 Hz di campionamento e 0,25 Hz di risoluzione. Confronto con 3-4 punti fermi di controllo. risultato sull'intera apertura: picco a 5,2 sigma a 49 Hz SOLO sotto la centrale principale (0,2-0,7 sigma nei controlli e nelle altre strutture). 49-50 Hz è la frequenza della rete. controllo di robustezza sulle due metà dell'apertura: 1,9 sigma a 48 Hz e 1,0 sigma a 53 Hz. Una vibrazione stazionaria doveva comparire in entrambe intorno a 3,7 sigma. Non regge. nessuna armonica a 100 o 150 Hz, nessuna riga alla rotazione delle turbine. Verdetto: indizio non confermato. Con 4 secondi di ripresa, neppure il caso più favorevole al metodo (macchine da 187 MW che girano) produce una firma che sopravviva al controllo. Avvertenza: non è noto se le turbine fossero in esercizio alle 18:30 UTC dell'8/8/2023.

27. Mosul, la 'galleria a 300 metri: i null test sul corpo diga

Stessa catena e stessi null test usati su Giza, sul corpo della diga (dove in conferenza dicono di vedere la galleria interna) e su due controlli: corpo diga centro vero 1,1317 | mescolato 1,1304 | rapporto 1,001 | non si specchia corpo diga est vero 1,0194 | mescolato 1,0197 | rapporto 1,000 | non si specchia collina (controllo) vero 1,4553 | mescolato 1,4556 | rapporto 1,000 terreno (controllo) vero 1,1400 | mescolato 1,1376 | rapporto 1,002 correlazione profilo diga / profilo terreno: +0,9995 Il tomogramma della diga è identico a quello del terreno accanto e sopravvive al rimescolamento. È il quinto sito (dopo Cheope Capella, Cheope Umbra, deserto di Giza e deserto di Mosul) in cui l'asse di profondità non contiene informazione.

28. Cosa resta delle 'proof of concept

Le turbine di Mosul sono l'esempio che Biondi porta come prova che il metodo vede le macchine, e lui stesso dice sul palco che si vedono bene perché sono macchine rotanti. Sui dati aperti il primo stadio mostra un indizio nella direzione giusta (i blocchi più mossi stanno vicino alle centrali) ma la firma spettrale delle turbine non si conferma, e la 'galleria interna alla diga fallisce gli stessi null test di Giza. Gran Sasso e Gottardo restano inverificabili per mancanza di dati.

29. Rilettura della conferenza di Biondi (video separato, stesso intervento): tre punti saltati

- La prova con l'acqua sul tavolo è fisica corretta per i LIQUIDI (le onde di superficie sentono il fondale; è la base della batimetria da SAR costiero) e non si trasferisce alla roccia.
- La priorità sul corridoio dietro i chevron è rovesciata: ScanPyramids lo annunciò nel 2016, il paper SAR è del 2022, la conferma endoscopica del 2023.
- La potenza radar al suolo è di 0,1-3 microwatt/m² (non nanowatt come scritto prima), comunque da 1e8 a 1e10 volte sotto l'irraggiamento solare.

Parte quinta: la replica indipendente

30. Un secondo agente, senza vedere questo lavoro, arriva allo stesso punto

Il 3/9/2026 sera un secondo sistema (Codex) ha ricevuto SOLO il paper, le tre conferenze, l'intervista a Rogan, il comunicato del Khafre Project e i 15 GB di dati, con il divieto esplicito di aprire questo documento e il codice qui usato. Ha ricostruito la catena dal testo degli autori, l'ha implementata da zero (cartella *replica/* del repository, report di 522 righe e 21 figure), ha progettato i suoi controlli e poi ha eseguito anche quelli richiesti. Verdetto: "il metodo non produce informazione sul sottosuolo di Giza", con grado di certezza alto.

Cosa ha trovato in piu' rispetto a questo lavoro: - **La geometria, misurata sull'orbita vera.** In un singolo passaggio la risoluzione in elevazione disponibile e' di 5,7 km, non 0,92 m: un bersaglio alto quanto la piramide viene focalizzato esattamente alla sua posizione di ribaltamento con un residuo di 0,083 mm, cioe' quota e distanza a terra sono indistinguibili. La formula Kz del paper tratta la traccia orbitale come una baseline ortogonale e sovrastima la sensibilita' alla quota di circa 860 volte. - **Una scena sintetica di solo speckle, senza nessun sottosuolo,** da' un profilo in profondita' correlato 0,9977 con quello della piramide. La sabbia 0,9955. - **Due acquisizioni Capella indipendenti sugli stessi punti** correlano 0,146 sulle mappe e -0,06 sulle serie: la ripetibilita' fra scene diverse, al livello del pixel, non c'e'. - **Camere note contro muratura piena:** rapporto costante con la profondita' (0,383/0,426/0,427), cioe' una differenza di guadagno, non una risposta localizzata. - **Mosul:** spettro piatto sul bersaglio piu' coerente, nessuna riga alla rotazione delle turbine, nessuna galleria; con 32 sotto-aperture la finestra di profondita' e' 32 m contro i 300-400 m della galleria dichiarata. - **Il vincolo che nessun sensore aggira:** per 1 m di risoluzione servono almeno 3 kHz, e a 3 kHz l'onda elastica muore entro 32-127 m (Q 50-200). Un tomogramma a 1 m di risoluzione profondo 1,2 km e' fisicamente impossibile a prescindere dallo strumento. A 12.500 Hz la lunghezza di attenuazione e' 8-31 m. - **Il fotone che diventa fonone:** anche convertendo TUTTA la potenza radar al suolo (1,26e-5 W/m²) in un'onda acustica coerente a 12,5 kHz, l'ampiezza sarebbe 1,6e-11 m, sette ordini di grandezza sotto la soglia. - Errori interni al paper confermati: $\lambda = 6000/12500 = 0,48$ m e non 0,24; apertura dichiarata 42 km e usata 84; Big Void "rilevato" al par. 5.17 e "non rilevato" al par. 6.1.

31. Dove le due analisi usano numeri diversi, e perche' non e' un problema

Il bilancio delle ampiezze qui usa la banda 5-15 Hz (23 nm) e una soglia di 0,41 mm (100 look, coerenza 0,95): divario 17.826. La replica usa una tabella per frequenza: 0,67 micron a 1 Hz, 6,7 nm a 10 Hz, 4,3e-15 m a 12,5 kHz, contro una soglia teorica migliore di 0,011 mm (1000 look, coerenza 0,98): divario da 16 volte a 1 Hz a 2,6 miliardi a 12,5 kHz. Le ipotesi sono diverse, la conclusione e' la stessa: a 1 Hz, dove il divario e' minimo, la lunghezza d'onda e' di 4 km e non si risolve niente; alle frequenze che risolverebbero una stanza il moto atteso sta miliardi di volte sotto la soglia. Con il pavimento MISURATO sui dati (78 mm sulla faccia di Cheope, 7 mm nel caso migliore di Mosul) i divari si moltiplicano per altri 7.000. Da tenere pronto nei commenti: "un'altra stima da' solo 16 volte" e' vero a 1 Hz e irrilevante, perche' a 1 Hz non si vede un pozzo di 20 m.

Parte sesta: tutto rifatto dal modulo

32. Perché rifare: la fase era una scelta mia, il modulo è quello che dichiarano loro

Le analisi delle parti 1-5 invertono la FASE della serie delle sotto-aperture. Rileggendo la conferenza di Spoleto: "queste sono riflettività energetiche, la rappresentazione del modulo". Le loro figure si riproducono solo dal modulo: colonne verticali con bande orizzontali alle stesse altezze, e sagoma del monumento. Dalla fase escono macchie. Un confronto onesto va fatto con la loro versione, quindi tutti i test sono stati rifatti con |Y| meno la sua media (script 80 e 81).

33. I numeri dal modulo

Capella Cheope 4/10	vero 1,529	mescolato 1,192 ± 0,039	rapporto 1,283
Capella Cheope 16/9	vero 1,533	mescolato 1,167	rapporto 1,314
Capella deserto	vero 1,331	mescolato 1,232	rapporto 1,080
sintetico (rumore)	vero 1,007	mescolato 1,007	rapporto 1,000
Umbra Cheope	rapporto 1,240	Umbra deserto 1,025	
Mosul corpo diga	rapporto 1,020	terreno 1,012	collina naturale 1,259

Criterio: 3. Mai raggiunto. La collina naturale di Mosul dà lo stesso rapporto della piramide. Colonne vero/mescolato: 0,86 (restano al loro posto). Energia del tomogramma / luminosità radar: 0,89 e 0,91 sulle due scene Capella, 0,53 Umbra, 0,89 Mosul. Profili z: Cheope/deserto 0,939 (Capella), 0,915 (Umbra); diga/terreno 0,9994. Due scene Capella, stesso profilo z: 0,9992; ma deserto/scena 2: 0,931, cioè il profilo si ripete perché è la forma della trasformata. Camere note / muratura piena: 0,99. Segno di Kz: identico per costruzione (ingresso reale).

34. Cosa cambia e cosa no

Cambia il disegno: dal modulo escono le loro colonne e le loro bande, e si capisce da dove vengono (punti brillanti spalmati sull'asse; ondulazioni della trasformata uguali in tutte le colonne). Cambia un numero: il vero batte il mescolato del 25-30 per cento sui bersagli con riflettori forti (piramide, collina), dello 0-8 per cento sul terreno piatto, mai del 200 per cento richiesto. Non cambia nulla nella conclusione: piramide, sabbia, collina e rumore puro danno lo stesso tipo di tomogramma; le colonne non si spostano quando si distrugge l'ordine temporale perché non vengono dall'ordine temporale; le camere note non si distinguono dalla muratura; il segno della profondità è indefinito per costruzione. Le figure pubblicate (pagina, PDF, video) sono tutte dal modulo.

35. Chefren, la piramide del Khafre Project (script 82)

Tutti i test sopra erano sulla Grande Piramide. Il Khafre Project parla di Chefren, quindi la batteria dal modulo e' stata rifatta su Chefren: nella scena Capella del 4/10/2024 (posizione via RPC) e nella scena Umbra dell'8/3/2023, che e' puntata proprio su Chefren (apertura 5,04 s). Capella Chefren vero 1,509 mescolato 1,195 rapporto 1,263 colonne/luminosita' 0,91 Umbra 8/3 Chefren vero 1,317 mescolato 1,208 rapporto 1,090 Umbra 8/3 deserto vero 1,285 mescolato 1,263 rapporto 1,017 Profilo z Chefren/deserto: 0,943 (Capella), 0,998 (Umbra). Stesso quadro della Grande Piramide.

36. Il sintetico rigoroso: rumore che sa solo luminosita' e spettro (script 84)

Il sintetico della sezione 33 era rumore uniforme al livello delle sotto-aperture (rapporto 1,000, nessuna colonna). Qui invece si costruisce un'IMMAGINE radar sintetica di rumore complesso bianco, le si danno due sole proprieta' della scena reale, la luminosita' della superficie (|SLC| levigato 8x2) e la forma dello spettro azimutale (involuppo medio dello spettro reale, da 0,014 a 1), e la si passa nella STESSA catena (Y_from, stesse sotto-aperture, stesso tomogramma dal modulo). Nessuna fase, nessun sottosuolo. correlazione 2D con la sezione reale di Cheope 0,949 correlazione delle colonne (profilo in azimut) 0,958 correlazione del profilo in profondita' (bande) 0,915 contrasto vero/mescolato del sintetico 1,299 /

1,214, rapporto 1,070 Controllo: lo stesso rumore con la sola luminosita' e spettro bianco da' 0,897 / 0,946 / 0,756: le colonne restano, le bande cadono. Quindi le colonne sono la luminosita' della superficie spalmata sull'asse z, e le bande orizzontali sono la trasformata dell'involuppo spettrale, identico in ogni pixel: per questo stanno alle stesse altezze sulla piramide, sulla sabbia, su Chefren e in due scene diverse (sez. 33). La frase "ondulazioni della trasformata" delle sezioni precedenti va letta cosi': ondulazioni della trasformata DELLO SPETTRO.