



Caratterizzazione della risoluzione spaziale di un sistema di imaging a raggi X

Antoniazzi Mario, Lemma Giovanni, Poli Viviana

15 Aprile 2024

Indice

1	Introduzione Teorica e Obiettivo dell'Esperienza	2
2	Setup Sperimentale	2
3	Analisi Dati	5
3.1	MTF: costruzione a partire dalle immagini della mira di Funk	5
3.2	MTF: derivazione a partire da misure di LSF ed ESF	8
4	Conclusioni	12
5	Appendice	13
5.1	Differenze fra CTF e MTF	13
5.2	Tabelle	15

1 Introduzione Teorica e Obiettivo dell'Esperienza

L'esperimento si propone di determinare la risoluzione spaziale di un sistema di imaging a raggi X, costituito da un tubo radiogeno e da un detector a scintillazione con tecnologia CCD. La risoluzione spaziale di un sistema di imaging è determinata dalla *Modulation Transfer Function* (*MTF*), definita come il rapporto tra la modulazione in output (M_{out}) e quella in input (M_{in}) al variare della frequenza spaziale. In una dimensione:

$$\begin{cases} M_{out} = \frac{|S[h_{max}]| - |S[h_{min}]|}{|S[h_{max}]| + |S[h_{min}]|} \\ M_{in} = \frac{|h_{max}| - |h_{min}|}{|h_{max}| + |h_{min}|} \end{cases} \quad (1)$$

con $h(x) = a + b \cos(2\pi\nu x)$ e dove $S[h(x; \nu)]$ rappresenta l'azione del sistema di imaging su un impulso di frequenza ν .

Nel corso dell'esperimento, la *MTF* è stata ricavata in tre modi diversi: acquisendo immagini al variare della frequenza spaziale in input, oppure a partire dalla *Edge Spread Function* (*ESF*) o dalla *Line Spread Function* (*LSF*), che rappresentano la risposta del sistema ad un input rispettivamente nella forma:

$$step(x) = \int_{-\infty}^x \delta(x') dx' = \int_{-\infty}^x line(x') dx' \quad (2)$$

$$line(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) dy = \frac{d}{dx} step(x) \quad (3)$$

Nell'ipotesi di *Point Spread Function* (*PSF*) reale e pari, la *MTF* corrisponde allo spettro di Fourier della *PSF*, ovvero al modulo della trasformata.

2 Setup Sperimentale

Durante lo svolgimento dell'esperienza sono stati utilizzati i materiali e gli strumenti di seguito elencati:

- tubo a raggi X Rigaku CN4037A1 con anodo in Molibdeno (indicato con A in Figura 5);
- mira di Funk: spessore di Piombo di 50 μm con numero variabile di coppie di linee per millimetro tra 0.05 lp/mm e 10 lp/mm (riportata in Figura 1, si vedano le tabelle in Appendice per l'elenco completo delle frequenze);
- slit camera Nuclear Associates Model 07-624-1: fenditura di dimensioni 10 μm x 2 mm (riportata in Figura 2 ed indicata con A in Figura 6);
- sostegni per il posizionamento della mira di Funk e della fenditura (indicati con E in Figura 5 e con B in Figura 6);
- sensore HAMAMATSU S10811 Front-Illuminated FFT-CCD For X-Ray Imaging: progettato per imaging in ambito dentistico, è dotato di un'area sensibile di (1700 x 1200) pixel aventi lato pari a 20 μm . La risoluzione spaziale dichiarata è di 20 lp/mm nelle condizioni ottimali di funzionamento del sensore¹ (indicato con D in Figura 5);
- alimentatore (indicato con C in Figura 5);

¹S10811 Datasheet (PDF) - Hamamatsu Corporation dal sito web HAMAMATSU: www.alldatasheet.com

- signal processing unit HAMAMATSU C9266-03/-04: utilizzato come ADC e collegamento con il computer (rappresentato in Figura 3 ed indicato con B in Figura 5);
- Modulo ORTEC 871 (counter timer): costituisce parte del sistema per azionare lo shutter esterno (indicato con A in Figura 4);
- Computer con software ImageJ, utilizzato per processing ed analisi delle immagini acquisite, e software HAMAMATSU C9266 DCamAPL, usato per gestire l'acquisizione delle immagini con il detector (indicato con B in Figura 4).

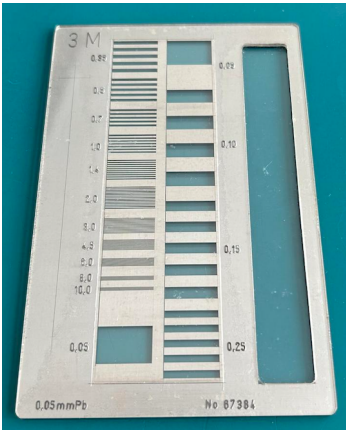


Figura 1: Mira di Funk



Figura 2: Slit Camera



Figura 3: CCD signal processing module

Innanzitutto, il detector è stato posizionato in modo da essere centrato rispetto al fascio e sono stati scelti come parametri di tensione e corrente del tubo a raggi X i valori di 27.5 kV e 20 mA . Prima di acquisire le immagini della mira di Funk e della fenditura, sono state acquisite un'immagine di *dark current* ed una di *flat field* per la successiva normalizzazione delle immagini. Tramite l'apposito software di controllo, il tempo di acquisizione del detector è stato impostato a 5000 ms , ed è stata selezionata la massima regione sensibile a disposizione (costituita da tutti i pixel del sensore).

Le immagini a differenti frequenze spaziali in input sono state acquisite traslando in orizzontale, di volta in volta, la mira di Funk; grazie al sistema per azionare lo shutter esterno, ogni immagine è stata acquisita esponendo per 1 s il detector ai raggi X.

Prima di acquisire le immagini della fenditura, questa è stata posizionata su un apposito supporto, e ruotata in modo da giacere su un piano parallelo a quello del detector. L'allineamento è stato ultimato aggiungendo una serie di rialzi di carta sotto un lato del supporto, e monitorando costantemente la situazione attraverso il software *ImageJ*. Nell'immagine della fenditura utilizzata per le successive analisi, il massimo valore di livello di grigio si mantiene sulla stessa colonna in maniera costante.

Per ottenere l'*ESF*, è stata acquisita l'immagine della porzione di mira di Funk con 0.05 lp/mm . Come illustrato in Figura 5 e Figura 6, la mira di Funk e la fenditura sono state posizionate il più vicino possibile al detector durante le acquisizioni, così da minimizzare gli effetti di penombra.

Per tutta la durata della misura, il setup è posto all'interno di una camera chiusa da pannelli di protezione in vetro piombato (indicata con C in Figura 4).

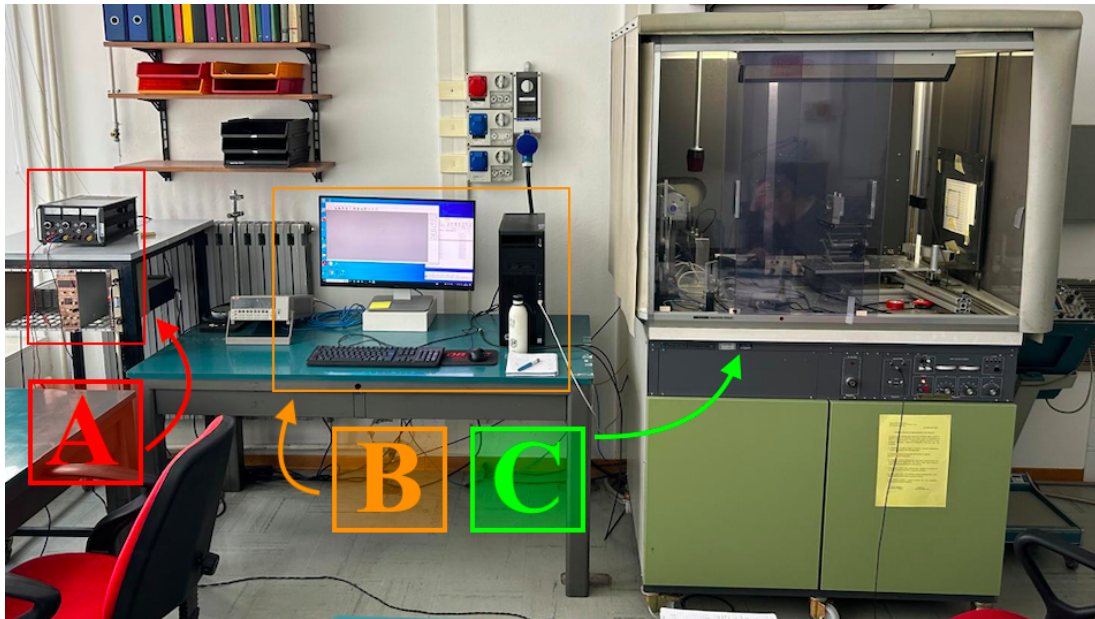


Figura 4: Setup Sperimentale: sistema per azionare lo shutter esterno ed alimentatore (A); computer con software ImageJ e software HAMAMATSU C9266 DCamAPL (B); camera con pannelli di protezione in vetro piombato (C).

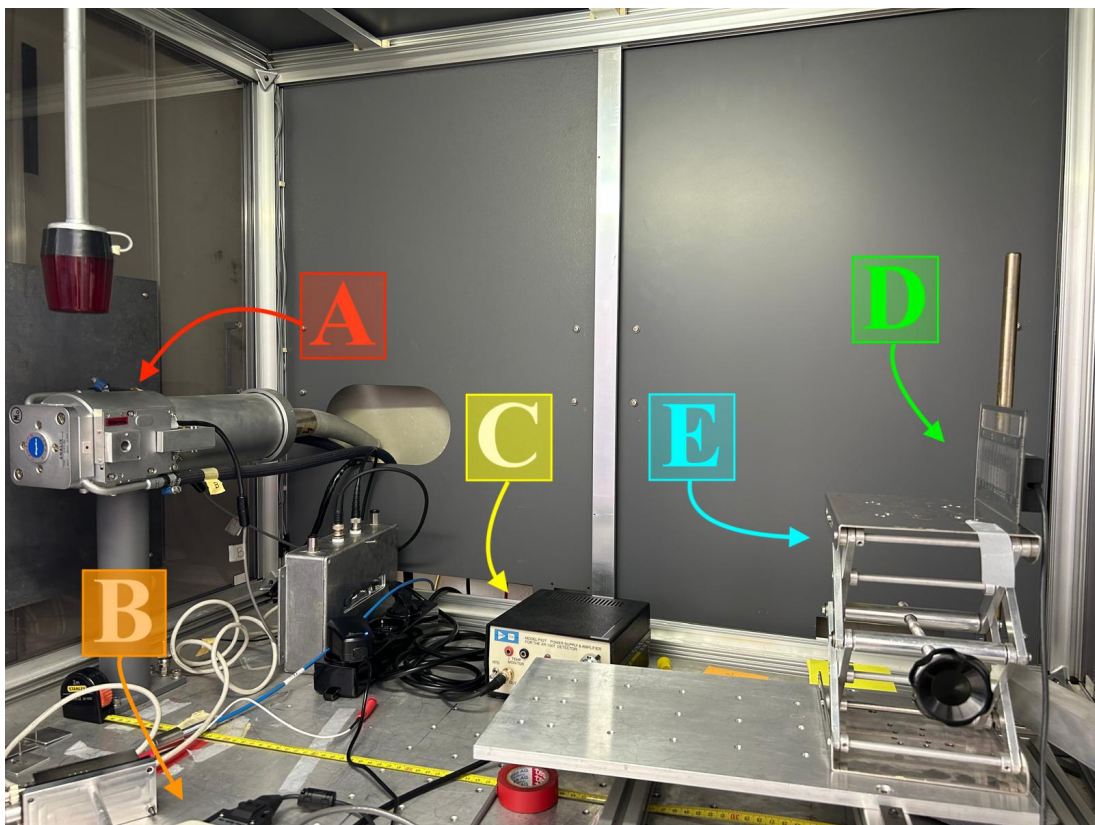


Figura 5: Posizionamento degli strumenti all'interno della camera piombata: tubo a raggi X (A); CCD signal processing module (B); alimentatore (C); sensore del detector (D); sostegni per posizionamento (E).

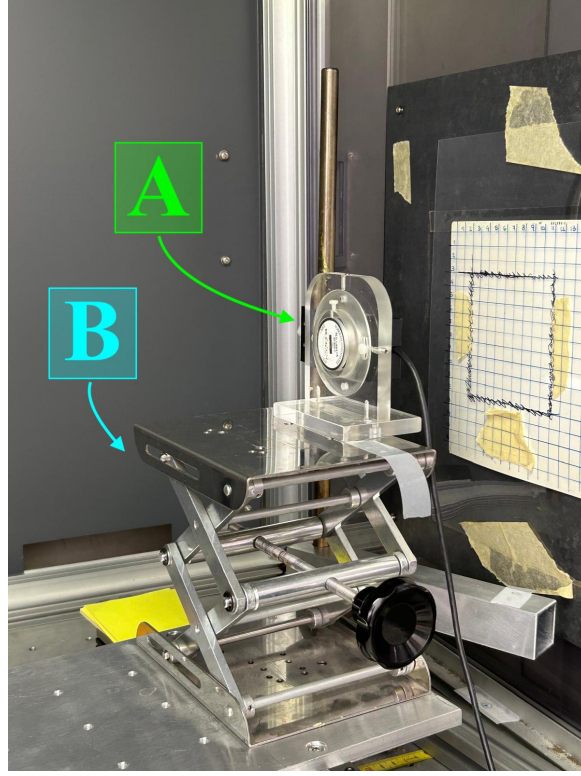


Figura 6: Posizionamento degli strumenti nella camera piombata: Slit Camera (A); sostegni per il posizionamento (B).

3 Analisi Dati

Per tenere in conto del contributo della corrente di buio del detector e di altre eventuali disomogeneità, tutte le immagini sono state normalizzate nel seguente modo:

$$I_N = \frac{I - I_d}{I_f - I_d} \quad (4)$$

dove I_d ed I_f sono, rispettivamente, l'immagine di *dark current* e l'immagine di *flat field* introdotte nel capitolo precedente. D'ora in avanti, se non diversamente specificato, si farà riferimento alle sole immagini normalizzate.

In aggiunta, tutta l'analisi è stata svolta in una sola dimensione, nell'ipotesi che la risoluzione spaziale in direzione X non fosse significativamente diversa da quella in direzione Y (in riferimento cartesiano in Figura 7). Questa ipotesi è stata testata qualitativamente, confrontando un profilo orizzontale e un profilo verticale per due immagini della mira di Funk alla frequenza di 0.05 lp/mm , acquisite ruotando di 90° lo strumento.

3.1 MTF: costruzione a partire dalle immagini della mira di Funk

Per calcolare la modulazione in funzione di ciascuna delle frequenze spaziali disponibili, sono state selezionate 5 Regioni di Interesse (*ROI*) per ogni immagine (si veda Figura 7) attraverso il software *ImageJ*. Mediante lo stesso software, per ciascuna regione è stato acquisito un profilo orizzontale, che rappresenta i livelli di grigio in funzione della coordinata X , facendo una media sulla coordinata Y (si veda Figura 8).

La modulazione è stata ottenuta a partire dall'equazione (1) e considerando la media fra cinque massimi e la media fra cinque minimi.

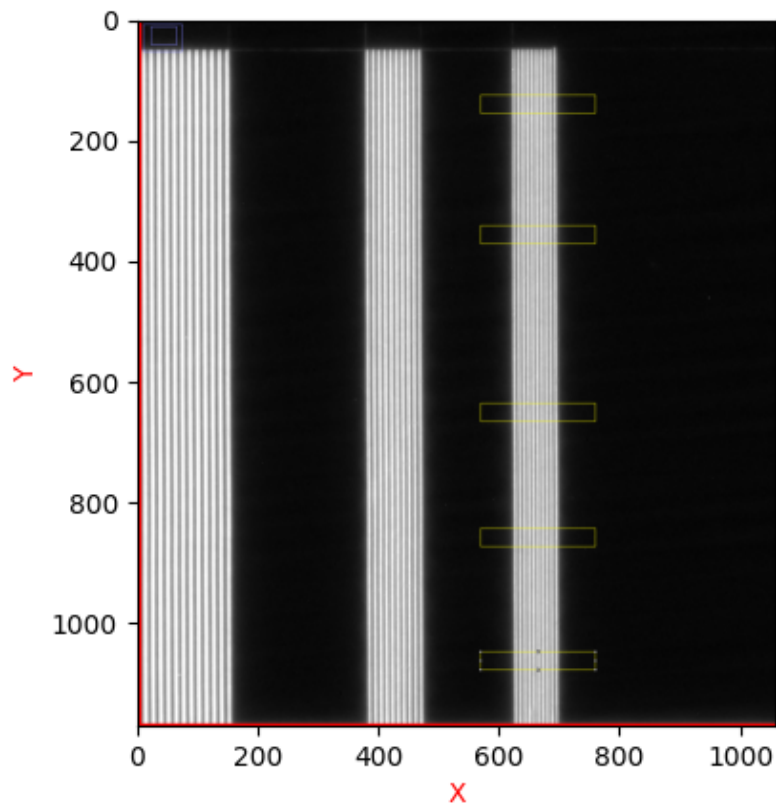


Figura 7: *ROI* selezionate sull'immagine a 10 lp/mm , il sistema di riferimento cartesiano adottato è riportato sovrapposto all'immagine.

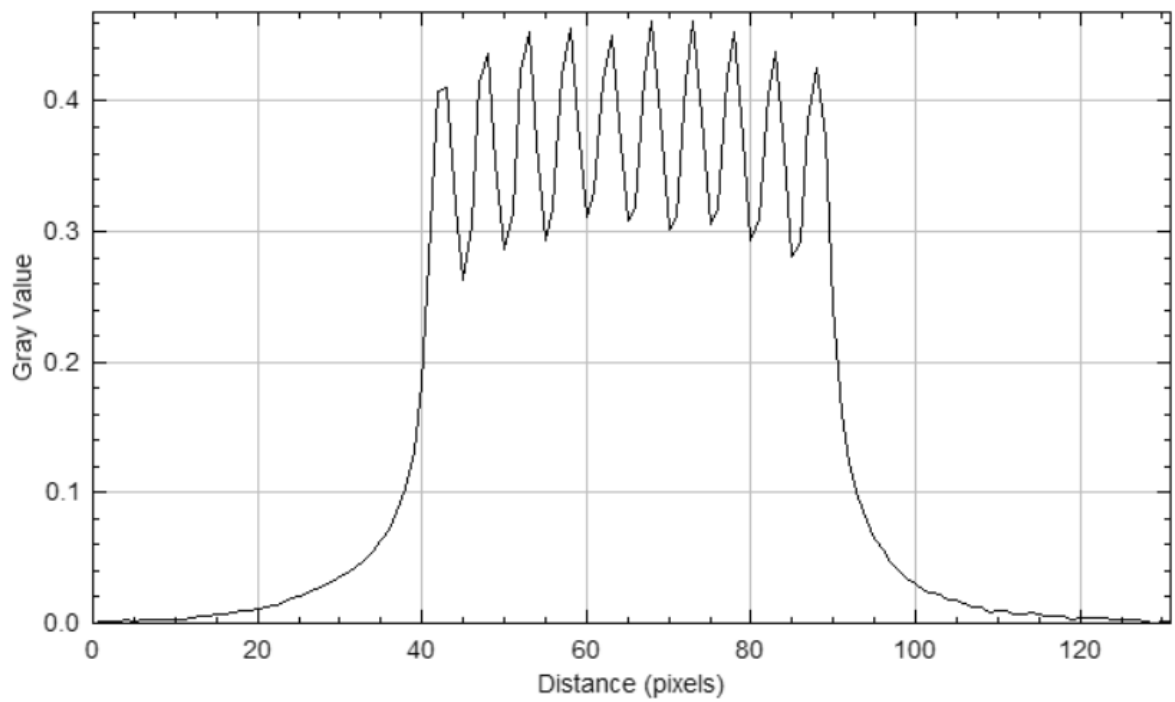


Figura 8: Profilo orizzontale acquisito con il software *ImageJ* ad una frequenza di 10 lp/mm .

La MTF ricostruita in questo modo è riportata in Figura 9.

La modulazione ha un andamento strettamente decrescente con la frequenza spaziale, variando da un massimo di 0.984 ± 0.002 alla frequenza di 0.05 lp/mm , fino ad un minimo di 0.194 ± 0.008 in corrispondenza della frequenza pari a 10 lp/mm .

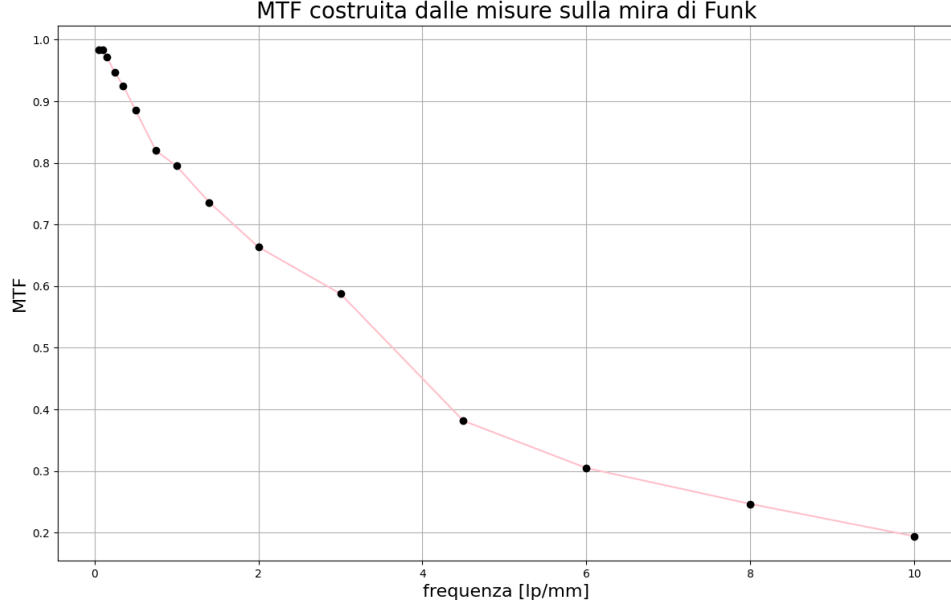


Figura 9: Modulazione in output in funzione della frequenza spaziale in direzione orizzontale.

La linea rosa rappresenta la spezzata che collega ogni punto al successivo:

consente di visualizzare l'andamento, ma non ha valore di fit.

Quando non visibili, le barre di errore sono più piccole della dimensione dei marker.

Dal legame tra PSF e MTF intodotto in Sezione 1, la larghezza a mezza altezza ($FWHM$) della MTF può essere interpretata come una misura della risoluzione spaziale del sistema di imaging. In questo caso, assumendo che alla frequenza di 0 lp/mm la distribuzione valga 1:

$$FWHM = (3.64 \pm 0.43) \text{ lp/mm} \quad (5)$$

dove l'incertezza statistica è stata calcolata a partire dalla semidifferenza della distanza fra i punti usati per l'interpolazione.

3.2 MTF: derivazione a partire da misure di LSF ed ESF

Sull'immagine della fenditura è stata selezionata una *ROI* di larghezza 71 pixel e altezza tale da ricoprire l'intera fenditura, esclusi gli estremi; tale *ROI* è stata centrata, in orizzontale, sul pixel con il livello di grigio maggiore (Figura 10).

Sull'immagine della mira di Funk a 0.05 lp/mm è stata invece selezionata una *ROI* di larghezza pari a 256 pixel (Figura 11).

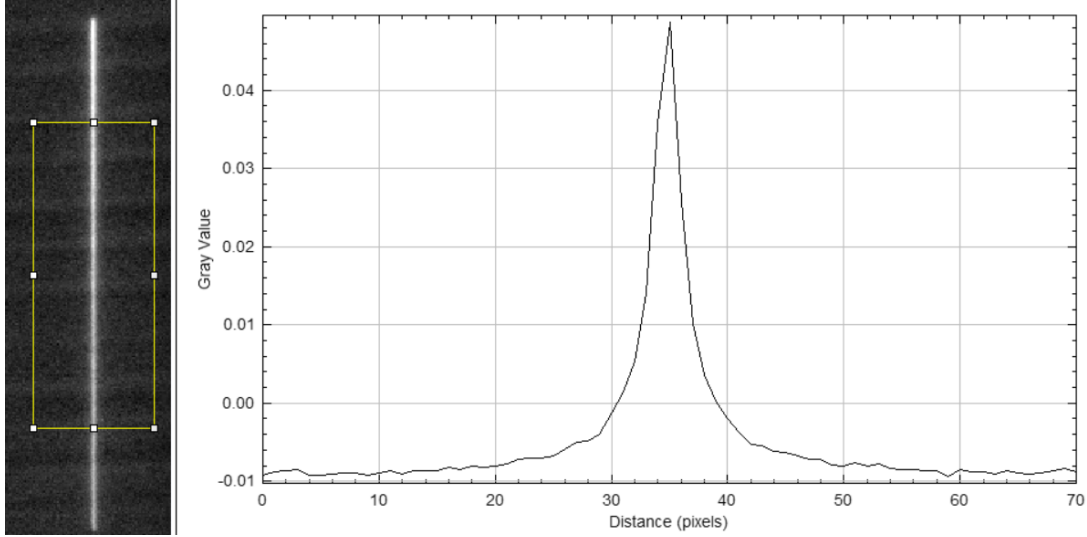


Figura 10: Regione di interesse selezionata per la misura di *LSF* (a sinistra) e corrispondente profilo orizzontale (a destra).

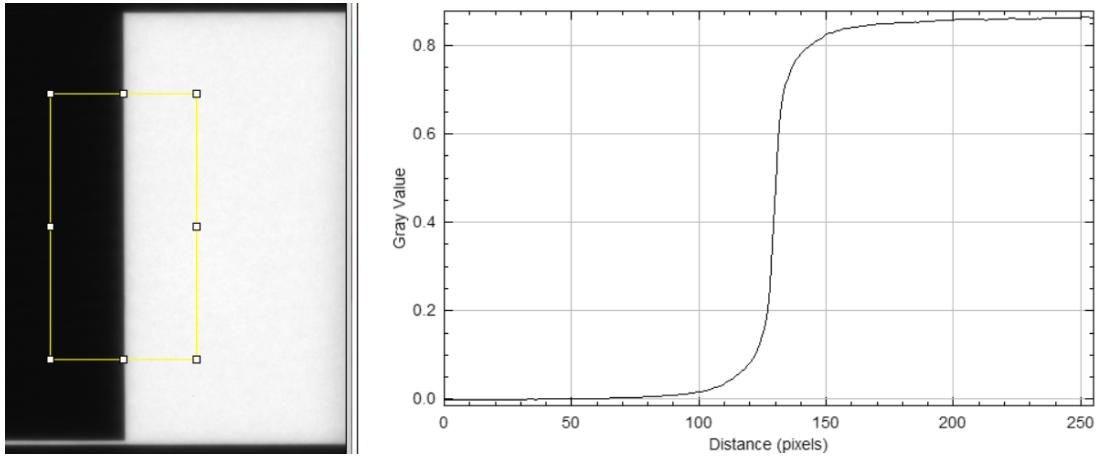


Figura 11: Regione di interesse selezionata per la misura di *ESF* (a sinistra) e corrispondente profilo orizzontale (a destra).

Utilizzando il tool *Data Analysis* di *Microsoft Excel*, la trasformata di Fourier discreta dei dati è stata calcolata sui valori di livello di grigio della *LSF*. Nel caso in cui la regione contenesse meno di 256 pixel in direzione orizzontale, è stato eseguito uno *zero padding* al minimo livello di grigio; in questo modo, la frequenza di campionamento risulta sempre la stessa, pari a:

$$\nu_c = \frac{\nu_{Nyq}}{\#dati/2} \text{ mm}^{-1} = \frac{1}{2 l_{pixel}} \cdot \frac{1}{\#dati/2} \text{ mm}^{-1} \approx 0.195 \text{ mm}^{-1} \quad (6)$$

con ovvio significato dei simboli.

La MTF è stata costruita dividendo il modulo di ciascun valore complesso per il modulo del valore corrispondente alla frequenza ν_c . La MTF derivata dalla misura di LSF è riportata in Figura 12 e vale:

$$FWHM = (3.60 \pm 0.06) \text{ mm}^{-1} \quad (7)$$

dove l'incertezza statistica è stata calcolata a partire dalla semidifferenza della distanza fra i punti usati per l'interpolazione.

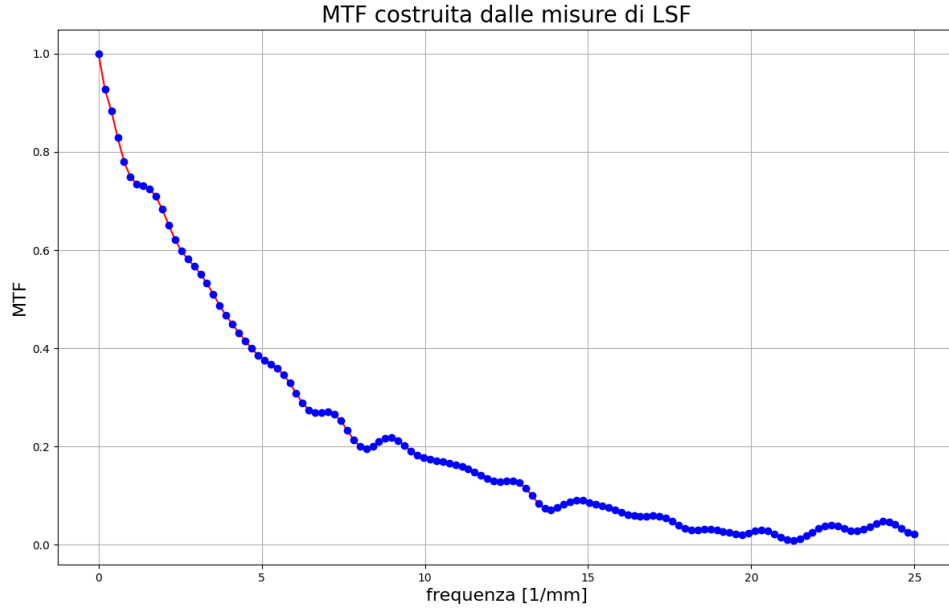


Figura 12: MTF derivata dalla misura di LSF .

La linea rossa rappresenta la spezzata che collega ogni punto al successivo: consente di visualizzare più chiaramente l'andamento, ma non ha valore di fit.

La LSF è stata calcolata a partire dalla ESF approssimando la derivata con il rapporto incrementale; per ricavare la MTF ad essa associata è stato seguito lo stesso procedimento, descritto sopra, usato per derivare la MTF dalla LSF . La MTF ottenuta a partire dalla ESF è riportata in Figura 13. In questo caso:

$$FWHM = (2.18 \pm 0.06) \text{ mm}^{-1} \quad (8)$$

dove l'incertezza statistica è stata calcolata a partire dalla semidifferenza della distanza fra i punti usati per l'interpolazione.

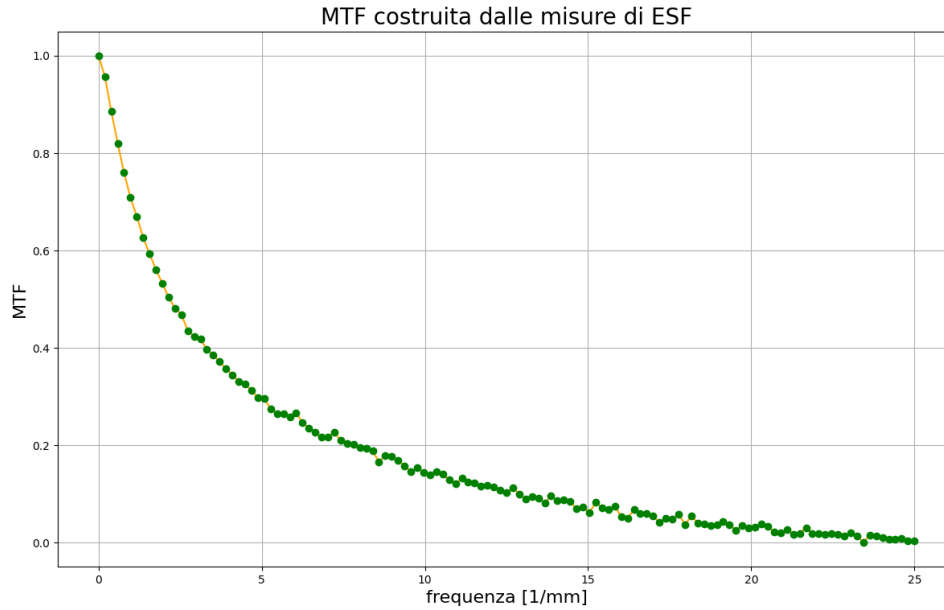


Figura 13: MTF derivata dalla misura di ESF .
La linea arancione rappresenta la spezzata che collega ogni punto al successivo: consente di visualizzare più chiaramente l'andamento, ma non ha valore di fit.

In Figura 14 sono presentate le LSF ottenute a partire dall'acquisizione di un'immagine della fenditura (punti blu) e a partire dalla ESF (punti verdi). Le distribuzioni riportate sono state normalizzate, al fine di permettere un più immediato confronto tra le stesse.

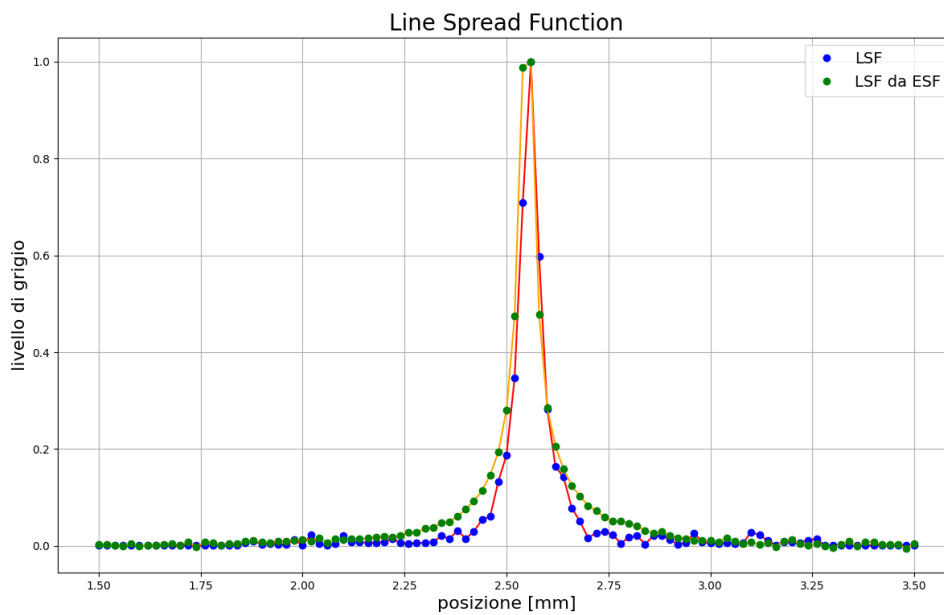


Figura 14: Confronto tra le $Line\ Spread\ Function$ (normalizzate).
La linea rossa e quella arancione rappresentano la spezzata che collega ogni punto al successivo: consentono di visualizzare più chiaramente l'andamento, ma non hanno valore di fit.

Per completezza, in Figura 15 sono rappresentate in un unico grafico le tre curve di MTF :

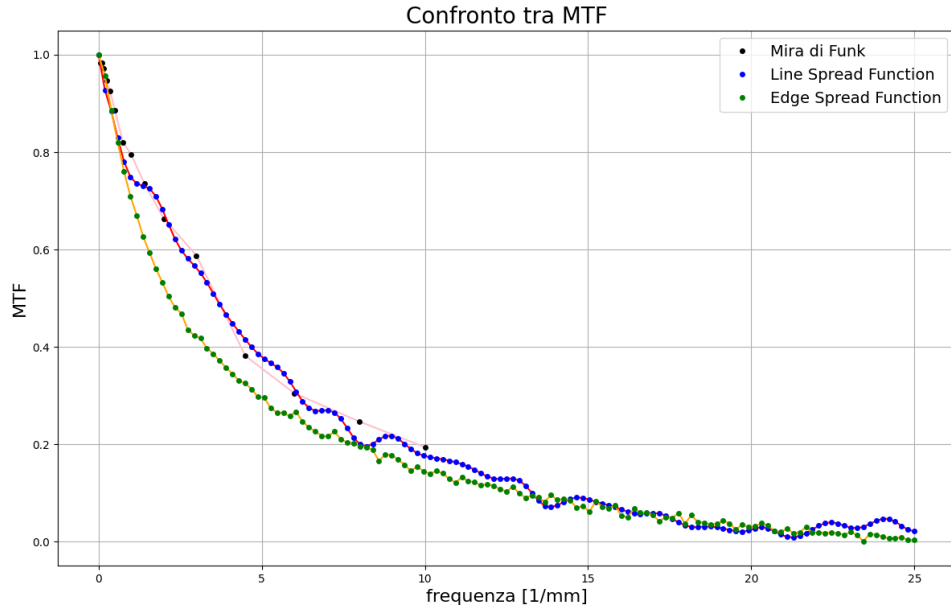


Figura 15: Confronto tra le MTF ottenute a partire da mira di Funk, LSF e ESF .

La linea rossa, quella arancione e quella rosa rappresentano la spezzata che collega ogni punto al successivo: consentono di visualizzare più chiaramente l'andamento, ma non hanno valore di fit.

Dalla Figura 15 è possibile osservare un discostamento della distribuzione derivante dalla ESF rispetto a quelle derivanti dalla mira di Funk e dalla LSF .

Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che è stato realizzato solo in fase di analisi dati che la singola immagine di *dark current* acquisita non era sufficiente, dal momento che la corrente di buio evolve nel tempo. Non potendo più acquisire delle nuove misure, per la normalizzazione delle immagini della mira di Funk e della fenditura è stata dunque realizzata una stima del *dark* dall'immagine stessa, calcolando il valore medio su una regione dove il fascio era completamente oscurato dal piombo. Il fatto di aver normalizzato le immagini sottraendo un valore costante anziché una vera e propria immagine di *dark current* può avere avuto delle influenze sia qualitative che quantitative sulla forma delle MTF ottenute, com'è evidente osservando le distribuzioni.

4 Conclusioni

La risoluzione spaziale del sistema di imaging a raggi X è stata determinata in tre modi differenti: acquisendo immagini al variare della frequenza spaziale in input oppure a partire dalla *ESF* o dalla *LSF*. Nella seguente tabella sono riportati i risultati ottenuti per le *FWHM* delle *MTF*. Per l'acquisizione di immagini della fenditura e dell'*edge*, è riportata anche una stima di larghezza a mezza altezza della *PSF*, ottenuta come *FWHM* della *LSF*:

Risoluzione nel dominio delle frequenze e nel dominio spaziale		
mira di Funk:	$FWHM_{MTF} = (3.64 \pm 0.43) \text{ lp/mm}$	
<i>Line Spread Function</i> :	$FWHM_{MTF} = (3.60 \pm 0.06) \text{ mm}^{-1}$	$FWHM_{PSF} = (0.058 \pm 0.008) \text{ mm}$
<i>Edge Spread Function</i> :	$FWHM_{MTF} = (2.18 \pm 0.06) \text{ mm}^{-1}$	$FWHM_{PSF} = (0.059 \pm 0.008) \text{ mm}$

È doveroso sottolineare che la risoluzione è stata misurata in una sola direzione, senza testare quantitativamente che la *PSF* del sistema fosse simmetrica. Uno spunto per ulteriori misure potrebbe essere quello di verificare questa ipotesi di simmetria, ripetendo le misure con differenti orientazioni della fenditura e della mira di Funk.

Nel caso in cui si voglia ripetere l'esperimento, sarebbe inoltre opportuno acquisire un'immagine di *dark current* ed una di *flat field* per ogni immagine, avendo osservato che la corrente di buio evolve nel tempo.

Si puntualizza infine che, avendo acquisito le immagini con le fenditure a contatto con il sensore, ci si aspetta che il contributo dominante alla risoluzione spaziale del sistema di imaging sia dato dalla *PSF* del detector. Un confronto fra le specifiche del detector ed i risultati delle misure è riportato nel Paragrafo 5.1 dell'Appendice.

5 Appendice

5.1 Differenze fra CTF e MTF

Nelle analisi precedenti non era stata fatta alcuna differenza fra la risposta del sistema di imaging ad un input ad onda quadra (come quello ottenuto dalle misure sulla mira di Funk) piuttosto che ad un input sinusoidale (come quella derivato dalla LSF e dalla ESF).

La misura della modulazione di un segnale di input ad onda quadra in funzione della frequenza spaziale prende il nome di *Contrast Transfer Function* (*CTF*) e può essere ricavata a partire dalla *MTF* tramite la formula di Coltman:

$$CTF(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[MTF(\nu) - \frac{MTF(3\nu)}{3} + \frac{MTF(5\nu)}{5} - \frac{MTF(7\nu)}{7} + \dots \right] \quad (9)$$

In Figura 16 è riportato il confronto fra la *CTF* misurata, e quelle ottenute dalla *LSF* e dalla *ESF* utilizzando lo sviluppo di Coltman fino al termine $\sim MTF(7\nu)$.

Dal confronto con la figura riportata nella Sezione 4, si può osservare come le correzioni dello sviluppo di Coltman non influenzino in maniera significativa la risoluzione spaziale del sistema.

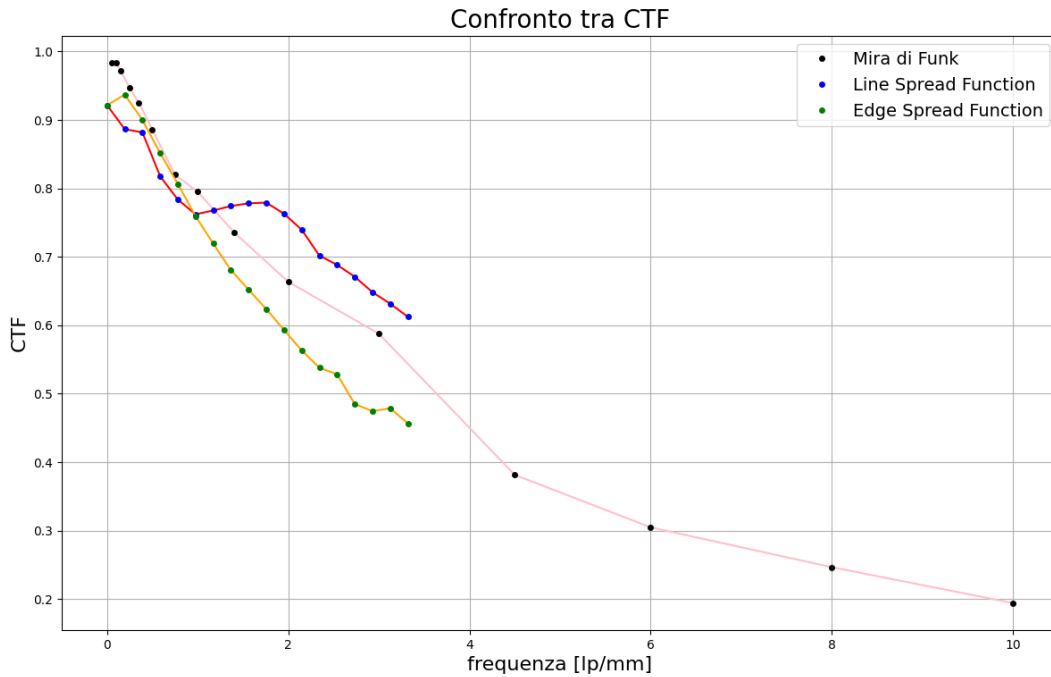


Figura 16: Confronto tra le *CTF* ottenute a partire da mira di Funk, *LSF* e *ESF*. La linea rossa, arancione e rosa rappresentano la spezzata che collega ogni punto al successivo: consentono di visualizzare più chiaramente l'andamento, ma non hanno valore di fit.

Nel manuale del detector² è dichiarata una risoluzione spaziale di 20 lp/mm : dal grafico di CTF nello stesso manuale, riportato in Figura 17, si deduce che tale valore è riferito alla frequenza a cui la CTF vale un decimo del suo massimo.

Per un confronto con i risultati dell'esperimento, per la CTF derivante dall'acquisizione di immagini della mira di Funk si ha: $L_{10\%} = (13.60 \pm 0.58) lp/mm$. Tale valore è stato estrapolato prolungando la distribuzione della CTF , approssimandola con la retta passante per i punti relativi alle frequenze di 8 e 10 lp/mm ; anche in questo caso, l'incertezza statistica è stata calcolata a partire dalla semidifferenza della distanza fra i punti usati per l'interpolazione. Risulta evidente la non compatibilità con il valore dichiarato per il detector; la ragione è, probabilmente, da attribuire alle differenti condizioni di irraggiamento del sensore: per indagare di più questo aspetto, si propone di realizzare più set di misure in differenti condizioni di tensione del tubo a raggi X.

Resolution (S10811-11)

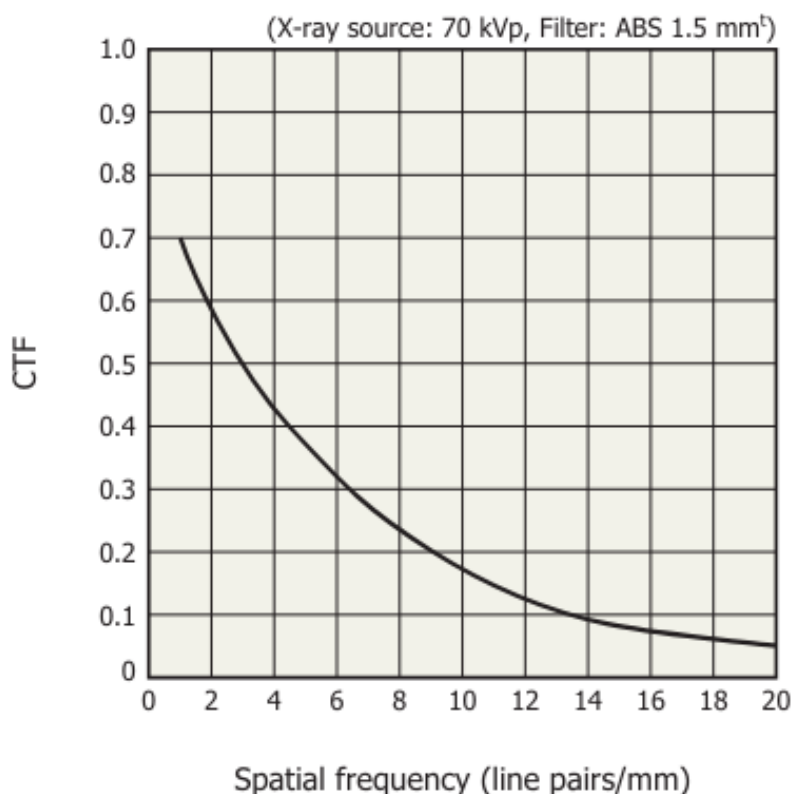


Figura 17: CTF riportata nel manuale del detector

²S10811 Datasheet (PDF) - Hamamatsu Corporation dal sito web HAMAMATSU: www.alldatasheet.com

5.2 Tabelle

Per ciascun valore di frequenza spaziale, di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi alla media dei valori di massimi e minimi del profilo verticale di ciascuna delle cinque *ROI* con i rispettivi errori, intesi come deviazione standard sulla media. Inoltre, viene riportato il valore calcolato per la *MTF* e la relativa incertezza statistica, ottenuta propagando gli errori nell'ipotesi di assenza di correlazioni.

<i>MTF</i> da misure sulla mira di Funk						
Frequenza (<i>lp/mm</i>)	min	σ_{min}	max	σ_{max}	MTF	σ_{MTF}
0.05	0.007	0.001	0.850	0.001	0.984	0.002
0.10	0.007	0.001	0.852	0.001	0.984	0.002
0.15	0.012	0.002	0.852	0.001	0.972	0.005
0.25	0.023	0.001	0.836	0.001	0.946	0.002
0.35	0.032	0.001	0.827	0.001	0.925	0.002
0.50	0.049	0.001	0.809	0.002	0.886	0.002
0.75	0.078	0.001	0.788	0.001	0.820	0.002
1.00	0.089	0.001	0.780	0.001	0.795	0.002
1.40	0.114	0.002	0.750	0.002	0.736	0.004
2.00	0.144	0.001	0.712	0.001	0.664	0.002
3.00	0.177	0.003	0.682	0.002	0.588	0.005
4.50	0.261	0.004	0.583	0.004	0.382	0.007
6.00	0.292	0.001	0.547	0.002	0.305	0.003
8.00	0.304	0.004	0.503	0.003	0.247	0.007
10.00	0.313	0.005	0.464	0.003	0.194	0.008

Tabella 1: Valori medi per massimi e minimi e *MTF* calcolata.

Di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi alla misura di LSF , ottenuti dall'acquisizione di un'immagine della fenditura. I valori di posizione corrispondenti sono valutati a partire dall'inizio della ROI su cui è stato calcolato il profilo, moltiplicando l'indice per le dimensioni lineari di un pixel (0.02 mm).

LSF					
pos (mm)	LSF	pos (mm)	LSF	pos (mm)	LSF
1.86	0.0003	2.34	0.0012	2.82	0.0012
1.88	0.0006	2.36	0.0009	2.84	0.0002
1.90	0.0002	2.38	0.0018	2.86	0.0012
1.92	0.0003	2.40	0.0009	2.88	0.0012
1.94	0.0002	2.42	0.0017	2.90	0.0008
1.96	0.0002	2.44	0.0032	2.92	0.0002
1.98	0.0008	2.46	0.0036	2.94	0.0004
2.00	0.0001	2.48	0.0078	2.96	0.0015
2.02	0.0013	2.50	0.0110	2.98	0.0005
2.04	0.0002	2.52	0.0204	3.00	0.0003
2.06	0.0001	2.54	0.0417	3.02	0.0003
2.08	0.0002	2.56	0.0587	3.04	0.0004
2.10	0.0012	2.58	0.0351	3.06	0.0003
2.12	0.0005	2.60	0.0166	3.08	0.0003
2.14	0.0005	2.62	0.0097	3.10	0.0017
2.16	0.0004	2.64	0.0083	3.12	0.0013
2.18	0.0004	2.66	0.0046	3.14	0.0007
2.20	0.0005	2.68	0.0030	3.16	0.0001
2.22	0.0009	2.70	0.0010	3.18	0.0005
2.24	0.0003	2.72	0.0015	3.20	0.0004
2.26	0.0002	2.74	0.0017	3.22	0.0004
2.28	0.0003	2.76	0.0014	3.24	0.0007
2.30	0.0004	2.78	0.0003	3.26	0.0009
2.32	0.0004	2.80	0.0010		

Tabella 2: Valore di LSF in funzione della posizione in orizzontale (mm) all'interno della ROI .

Di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi alla misura di ESF , ottenuti dall'acquisizione di un'immagine della mira di Funk alla minore frequenza spaziale disponibile (0.05 lp/mm). I valori di posizione corrispondenti sono valutati a partire dall'inizio della ROI su cui è stato calcolato il profilo, moltiplicando l'indice per le dimensioni lineari di un pixel (0.02 mm).

<i>ESF</i>									
pos (mm)	<i>ESF</i>	pos (mm)	<i>ESF</i>	pos (mm)	<i>ESF</i>	pos (mm)	<i>ESF</i>	pos (mm)	<i>ESF</i>
0.00	-0.0397	1.04	-0.0367	2.08	-0.0082	3.12	0.8221	4.16	0.8375
0.02	-0.0396	1.06	-0.0369	2.10	-0.0064	3.14	0.8230	4.18	0.8370
0.04	-0.0397	1.08	-0.0369	2.12	-0.0043	3.16	0.8227	4.20	0.8381
0.06	-0.0395	1.10	-0.0368	2.14	-0.0022	3.18	0.8242	4.22	0.8385
0.08	-0.0397	1.12	-0.0365	2.16	0.0001	3.20	0.8259	4.24	0.8382
0.10	-0.0393	1.14	-0.0366	2.18	0.0027	3.22	0.8265	4.26	0.8388
0.12	-0.0393	1.16	-0.0364	2.20	0.0054	3.24	0.8267	4.28	0.8382
0.14	-0.0390	1.18	-0.0364	2.22	0.0080	3.26	0.8273	4.30	0.8379
0.16	-0.0395	1.20	-0.0360	2.24	0.0112	3.28	0.8273	4.32	0.8382
0.18	-0.0392	1.22	-0.0359	2.26	0.0152	3.30	0.8267	4.34	0.8379
0.20	-0.0387	1.24	-0.0361	2.28	0.0192	3.32	0.8272	4.36	0.8388
0.22	-0.0389	1.26	-0.0358	2.30	0.0243	3.34	0.8285	4.38	0.8391
0.24	-0.0390	1.28	-0.0356	2.32	0.0297	3.36	0.8284	4.40	0.8379
0.26	-0.0385	1.30	-0.0351	2.34	0.0365	3.38	0.8295	4.42	0.8372
0.28	-0.0391	1.32	-0.0349	2.36	0.0437	3.40	0.8307	4.44	0.8373
0.30	-0.0389	1.34	-0.0348	2.38	0.0524	3.42	0.8311	4.46	0.8376
0.32	-0.0387	1.36	-0.0342	2.40	0.0633	3.44	0.8315	4.48	0.8380
0.34	-0.0389	1.38	-0.0345	2.42	0.0766	3.46	0.8319	4.50	0.8393
0.36	-0.0387	1.40	-0.0339	2.44	0.0930	3.48	0.8312	4.52	0.8399
0.38	-0.0390	1.42	-0.0336	2.46	0.1140	3.50	0.8319	4.54	0.8393
0.40	-0.0389	1.44	-0.0337	2.48	0.1418	3.52	0.8327	4.56	0.8398
0.42	-0.0388	1.46	-0.0326	2.50	0.1822	3.54	0.8341	4.58	0.8406
0.44	-0.0387	1.48	-0.0333	2.52	0.2505	3.56	0.8341	4.60	0.8396
0.46	-0.0387	1.50	-0.0329	2.54	0.3928	3.58	0.8343	4.62	0.8393
0.48	-0.0387	1.52	-0.0326	2.56	0.5366	3.60	0.8334	4.64	0.8395
0.50	-0.0386	1.54	-0.0324	2.58	0.6054	3.62	0.8338	4.66	0.8382
0.52	-0.0381	1.56	-0.0324	2.60	0.6465	3.64	0.8339	4.68	0.8384
0.54	-0.0385	1.58	-0.0318	2.62	0.6761	3.66	0.8341	4.70	0.8389
0.56	-0.0385	1.60	-0.0317	2.64	0.6989	3.68	0.8348	4.72	0.8393
0.58	-0.0382	1.62	-0.0315	2.66	0.7168	3.70	0.8346	4.74	0.8387
0.60	-0.0382	1.64	-0.0314	2.68	0.7316	3.72	0.8349	4.76	0.8386
0.62	-0.0382	1.66	-0.0310	2.70	0.7436	3.74	0.8346	4.78	0.8382
0.64	-0.0384	1.68	-0.0304	2.72	0.7540	3.76	0.8352	4.80	0.8383
0.66	-0.0382	1.70	-0.0302	2.74	0.7625	3.78	0.8355	4.82	0.8385
0.68	-0.0382	1.72	-0.0292	2.76	0.7698	3.80	0.8361	4.84	0.8381
0.70	-0.0381	1.74	-0.0294	2.78	0.7771	3.82	0.8359	4.86	0.8385
0.72	-0.0381	1.76	-0.0281	2.80	0.7838	3.84	0.8348	4.88	0.8387
0.74	-0.0378	1.78	-0.0435	2.82	0.7897	3.86	0.8355	4.90	0.8385
0.76	-0.0377	1.80	-0.0273	2.84	0.7943	3.88	0.8364	4.92	0.8393
0.78	-0.0376	1.82	-0.0267	2.86	0.7980	3.90	0.8369	4.94	0.8388
0.80	-0.0379	1.84	-0.0260	2.88	0.8023	3.92	0.8363	4.96	0.8384
0.82	-0.0378	1.86	-0.0247	2.90	0.8055	3.94	0.8359	4.98	0.8388
0.84	-0.0376	1.88	-0.0231	2.92	0.8079	3.96	0.8354	5.00	0.8382
0.86	-0.0376	1.90	-0.0221	2.94	0.8101	3.98	0.8362	5.02	0.8383
0.88	-0.0381	1.92	-0.0212	2.96	0.8118	4.00	0.8352	5.04	0.8387
0.90	-0.0377	1.94	-0.0199	2.98	0.8135	4.02	0.8356	5.06	0.8387
0.92	-0.0372	1.96	-0.0185	3.00	0.8151	4.04	0.8349	5.08	0.8393
0.94	-0.0374	1.98	-0.0170	3.02	0.8163	4.06	0.8357	5.10	0.8388
0.96	-0.0374	2.00	-0.0151	3.04	0.8187	4.08	0.8365		
0.98	-0.0369	2.02	-0.0137	3.06	0.8201	4.10	0.8361		
1.00	-0.0370	2.04	-0.0113	3.08	0.8207	4.12	0.8370		
1.02	-0.0370	2.06	-0.0103	3.10	0.8218	4.14	0.8370		

Tabella 3: valore di *ESF* in funzione della posizione in orizzontale (mm) all'interno della *ROI*.