

Sistemi super-risolventi: Pupille Toraldo*

PUTO Project Relazione Finale di Progetto**

Daniela Mugnai⁽¹⁾, Luca Olmi⁽²⁾, Pietro Bolli⁽²⁾, Dario Panella⁽²⁾, Renzo Nesti⁽²⁾,
Luca Cresci⁽²⁾, Lorenzo Stefani⁽¹⁾, Andrea Donati⁽¹⁾, Francesco D'Agostino⁽³⁾,
Massimo Migliozzi⁽³⁾, Cristiano Riminesi⁽⁵⁾, Giampaolo Pisano⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Istituto Fisica Applicata "Nello Carrara" del CNR, Firenze, Italy

⁽²⁾ Istituto nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Firenze, Italy

⁽³⁾ Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Salerno, Fisciano (SA), Italy

⁽⁴⁾ School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom

⁽⁵⁾ Istituto per la conservazione e valorizzazione dei beni culturali del CNR, Firenze, Italy

* Progetto parzialmente finanziato dalla *Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze*

** <http://www.ifac.cnr.it/PUTO>

1 - Introduzione storica

Più di mezzo secolo fa, nel 1952, Giuliano Toraldo di Francia presentò un lavoro teorico in cui dimostrava che con l'utilizzo di speciali tipi di pupille composte era possibile aumentare il potere risolutivo di uno strumento ottico [1].

Un'affermazione di questo tipo suscitò un enorme impatto nella comunità scientifica perché implicava il superamento del limite diffrattivo che, come noto, è legato alle dimensioni D del diametro della pupilla dalla relazione $1.22\lambda/D$, dove λ è la lunghezza d'onda. La conseguenza pratica di una limitazione di questo genere era che, con uno strumento ottico, non è possibile vedere due punti la cui distanza è inferiore a $1.22\lambda/D$.

Nel corso degli anni si sono susseguite molte speculazioni per capire se (e come) fosse possibile o meno scendere al di sotto di questo limite diffrattivo. Un avanzamento nella conoscenza fu ottenuto con lo sviluppo delle tecniche a microonde in una ricerca relativa ad antenne altamente direttive [2], la cui formulazione matematica è la stessa di quella che descrive una pupilla in uno strumento ottico. Probabilmente, e paradossalmente, questo miglioramento è legato a una certa ignoranza dei "microondisti" in relazioni ai principi dell'ottica ondulatoria. Infatti, come sottolineato da Toraldo: "microwave researchers were not very much concerned, or perhaps even acquainted, with the old and well-established theorems of wave optics, according to which no material improvement of the uniform pupil should have been possible. As a result, an entirely new theory has been set up, which contains many revolutionary implications".

Dalla metà del 1900 a ora molti sforzi sono stati dedicati a tale argomento che è interessante non solo da un punto di vista pratico, ma anche per le sue implicazioni teoriche [3]. Con il progresso della tecnologia è stato possibile effettuare esperimenti che hanno dimostrato la correttezza delle predizioni di Toraldo sia nel campo della microscopia [4,5], sia nella regione spettrale delle microonde [6-8].

2- Breve descrizione del modello teorico

Consideriamo una corona circolare, cioè una pupilla¹ oscurata nella parte centrale, e denotiamo con θ l'angolo di osservazione misurato rispetto alla perpendicolare all'asse della corona stessa; siano rispettivamente D_1 e D_2 i diametri interni e esterni della corona. L'ampiezza diffratta $A(\theta)$ nel campo lontano (FF) è data da [1]

$$A(\theta) = \frac{A_0}{2\lambda \sin \theta} \left[D_2 J_1 \left(\pi \frac{D_2}{\lambda} \sin \theta \right) - D_1 J_1 \left(\pi \frac{D_1}{\lambda} \sin \theta \right) \right] \quad (1)$$

dove A_0 è l'ampiezza del campo incidente che illumina la corona, λ la lunghezza d'onda e J_1 la funzione di Bessel del primo ordine di primo tipo.

Possiamo adesso ampliare il concetto precedente a una corona costituita da un numero n di anelli, caratterizzata cioè da un numero $n + 1$ di circonferenze con diametri $\alpha_0 D, \alpha_1 D \dots \alpha_n D$, dove $\alpha_0 \dots \alpha_n$ sono valori in ordine crescente, con $\alpha_0 = 0$ e $\alpha_n = 1$. Se poniamo $x = \pi(D/\lambda) \sin \theta$, l'ampiezza totale della pupilla composta è

$$A(x) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\gamma_{i+1}}{x} [\alpha_{i+1} J_1(\alpha_{i+1} x) - \alpha_i J_1(\alpha_i x)] \quad (2)$$

dove

$$\gamma_{i+1} = \frac{\pi D^2}{2\lambda^2} A_{i+1} \quad (3)$$

è una costante proporzionale all'ampiezza A_{i+1} del campo che illumina ciascuna corona.

Sulla base dell'Eq. (2) è dunque possibile imporre delle condizioni sulla posizione degli zeri nella figura di diffrazione e determinare gli n coefficienti $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ tali da avere i valori delle fasi e delle ampiezze che danno proprio quella determinata figura di diffrazione.

Senza entrare nei dettagli analitici mostriamo in Fig. 1 il risultato finale per una pupilla semplice (curva blu tratteggiata) e una pupilla composta da tre corone (curva rossa), ottenuto avendo imposto:

$$A(x = 0) = 1,$$

$$A(x = 2) = 0 \text{ (spostamento del primo zero della funzione di Bessel da } x = 3.8 \text{ a } x = 2)$$

$$A(x = 3.8) = 0.$$

¹ Si definisce "pupilla" un foro circolare posto su un piano infinitamente esteso impermeabile alla radiazione.

Per un migliore confronto, le due curve sono state normalizzate: come si può vedere la pupilla composta mostra un evidente restringimento nella larghezza del lobo centrale, unitamente a un innalzamento dei lobi laterali esterni.

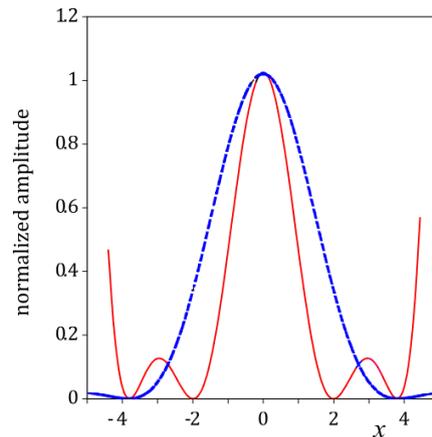


Fig. 1 - Ampiezza normalizzata per una pupilla semplice (curva blu tratteggiata) e la stessa pupilla composta, costituita da due anelli circolari più una piccola pupilla centrale (curva rossa). I diametri delle circonferenze sono di 9, 6 e 3 cm; le curve sono state calcolate per una frequenza di 10 GHz ($\lambda = 3$ cm).

3 - Prime evidenze sperimentali per frequenze a microonde

Negli anni che vanno dal 2003 al 2007 sono state effettuate le prime misure sperimentali nella regione delle microonde [6-8], per verificare la correttezza del modello Toraldo: tutte le misure hanno confermato le predizioni di Toraldo. In questo paragrafo riportiamo solo una di dette misure.

Come accennato brevemente nel paragrafo precedente, il modello Toraldo richiede determinati rapporti di fase e ampiezza tra le varie corone che compongono la pupilla e, mentre il rapporto dell'ampiezza è di secondaria importanza, risulta invece fondamentale la scelta delle fasi. Per un sistema costituito da due anelli circolari più una piccola pupilla centrale, che qui di seguito chiameremo, per semplicità, sistema a tre corone (mostrato in Fig. 2b), è possibile dimostrare che per ottenere un effetto super risolvete la corona centrale (corona 2 nella Fig. 2) deve introdurre un'inversione di fase rispetto alle altre. Per ottenere questo effetto è stato utilizzato il setup sperimentale mostrato in Fig. 2a: la pupilla è costituita da un anello esterno di aria, uno intermedio di paraffina e la parte centrale nuovamente di aria.

Lo spessore della corona di paraffina è circa 3.4 cm che corrisponde a circa una lunghezza d'onda per la frequenza utilizzata di 9 GHz. Poiché l'indice di rifrazione della paraffina è uguale a 1.49, questo significa che il cammino ottico nella paraffina è di circa 1.5λ , mentre nelle corone esterne di aria è di λ . In questo modo otteniamo l'inversione di fase richiesta dal modello teorico.

I risultati ottenuti sono mostrati in Fig. 3 per una pupilla semplice (a) e per la stessa pupilla composta da tre corone (b).

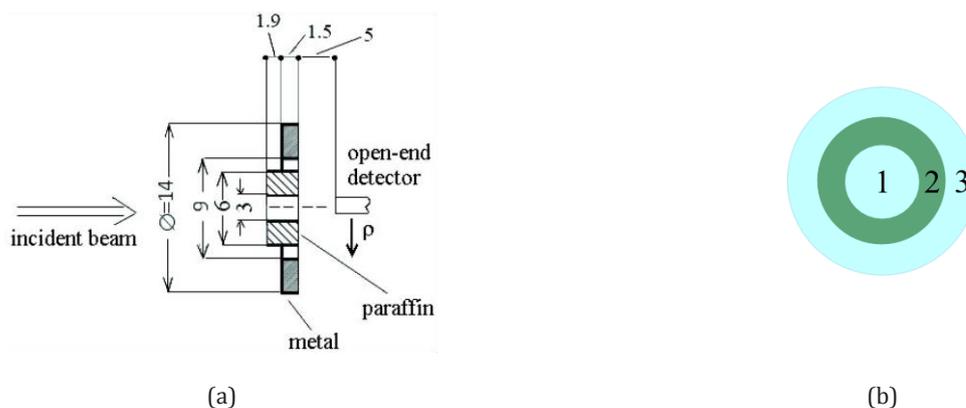


Fig. 2 - (a) Schema del setup sperimentale usato per le prime misure (2003) su pupille Toraldo per frequenze a microonde (10 GHz). (b) Dettaglio della pupilla utilizzata: la corona centrale (di colore verde) è costituita da paraffina mentre la corona esterna e la pupilla centrale sono trasparenti (aria).

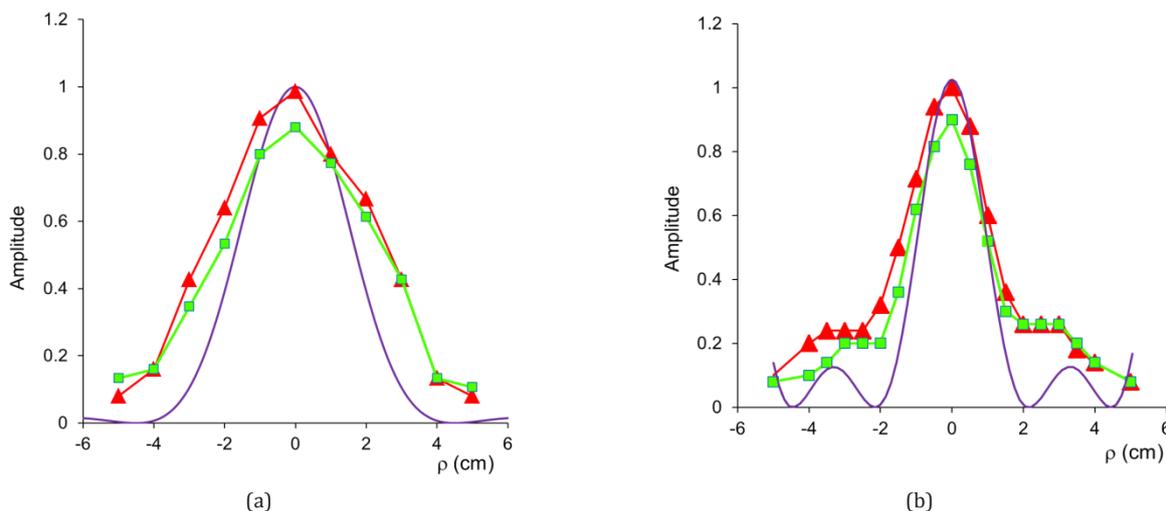


Fig. 3 - Ampiezza in funzione dello spostamento trasversale ρ (si veda Fig. 2) per una pupilla semplice (a), e per la stessa pupilla composta (b). La curva blu rappresenta il modello teorico; i dati sperimentali si riferiscono a due frequenze leggermente diverse: $\nu = 9.3$ GHz (triangoli rossi), $\nu = 9.27$ GHz (quadrati verdi).

Come si può vedere le misure confermano il modello Toraldo mostrando un evidente restringimento nella zona centrale, con un aumento quindi del potere risolutivo. La discrepanza tra il modello teorico e le misure sperimentali può essere dovuta al fatto che il modello teorico è stato valutato per il campo lontano mentre le misure sono di campo vicino ma, al di là di questa discrepanza, è interessante notare che l'effetto super-risolvente, previsto teoricamente per il campo lontano, è già manifestamente presente anche nel campo vicino, rendendo il modello teorico molto più generale di quanto ci si potesse aspettare.

4 - Il Progetto

Il Progetto di Ricerca "Sistemi super-risolventi: Pupille Toraldo (PUTO)" nasce principalmente dalla collaborazione fra l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" (IFAC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), e l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (OAA) appartenente all'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)², ma ha poi coinvolto anche altre istituzioni a motivo del vasto campo di indagine e di applicazioni che questa tematica comporta.

Il progetto ha come obiettivo principale l'analisi sperimentale del funzionamento delle pupille Toraldo, al fine di ottenere un dispositivo super-risolvente utilizzabile su un'antenna radio astronomica, e si è svolto sostanzialmente in 3 fasi:

- fase 1: analisi numerica dei parametri principali (costante dielettrica dei materiali e dimensioni) per ottenere effetti super risolventi;
- fase 2: preparazione di un dispositivo a pupilla composta e primi test di laboratorio in camera anecoica;
- fase 3: misure del campo diffratto in campo vicino su varie configurazioni. Progettazione e realizzazione di un prototipo da utilizzare su radiotelescopi.

Fase 1

In questa fase, sono state di fondamentale importanza le simulazioni del campo elettromagnetico diffratto utilizzando il software commerciale FEKO² unitamente all'elaborazione di un modello teorico per la valutazione del campo diffratto nell'ambito dell'ottica di Fresnel (campo vicino). Al fine di ottenere la migliore configurazione possibile, (cioè il miglior rapporto super-risoluzione/perdita di intensità) sono state considerate tre diverse configurazioni, cioè pupille composte con 2, 3, o 4 corone circolari (più, naturalmente, la piccola pupilla centrale) denotate rispettivamente come TP3, TP4, TP5, come mostrato in Fig. 4.

Al fine di ottenere super-risoluzione, il modello di Toraldo richiede, come *condizione necessaria e sufficiente*, che tra una corona e quella adiacente ci sia uno sfasamento di π e quindi le simulazioni sono state eseguite imponendo questa condizione. In pratica, rifacendosi alle prime misure sperimentali sulle pupille Toraldo (TP) nell'intervallo delle microonde [6], questa condizione può essere ottenuta se le corone che richiedono lo sfasa-

² Il software FEKO[®] è uno strumento di simulazione elettromagnetica tra i più sofisticati nel mercato, e trova un vasto campo di applicazioni nelle industrie delle telecomunicazioni, dello spazio e della difesa.

mento sono costituite da un dielettrico, il cui indice di rifrazione sia circa 1.5. Se lo spessore di tali corone è pari alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata, la *differenza di cammino ottico* tra la radiazione che si propaga in aria e quella che si propaga attraverso il dielettrico è di una lunghezza d'onda, producendo così uno sfasamento di π .³

Per una frequenza di 20 GHz, le prime simulazioni hanno riguardato prevalentemente la TP3 e sono state effettuate sia per l'implementazione del piano su cui "appoggiare" la pupilla, sia per lo studio del campo incidente (Fig. 5). È stato evidenziato che il modo più efficiente di definire un'apertura circolare su un piano infinito consiste nell'utilizzare un substrato planare (PMS) che elimina gli effetti di diffrazione che si originano utilizzando un substrato circolare di dimensioni finite (Fig. 6). È stato anche verificato che usando una diversa eccitazione, come per esempio quella fornita da un'antenna a tromba rettangolare, la distribuzione di ampiezza risultante (Fig. 7) fornisce risultati abbastanza simili a quelli ottenuti con un'onda piana.

Le simulazioni sono state numerose, prendendo in considerazione vari tipi di configurazioni e con vari valore dei parametri, e si sono svolte durante tutto il progetto (non soltanto nella fase 1). Qui di seguito ne riportiamo alcune tra le più significative sia per la TP3 (Fig. 5-7) che per la TP4 (Fig. 8)

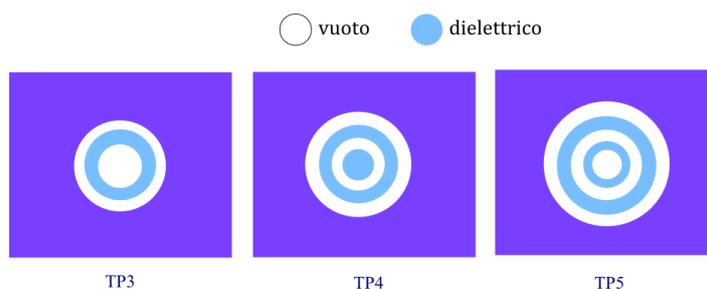


Fig. 4 - Schema delle tre configurazioni analizzate sia teoricamente che sperimentalmente. Lo schermo viola rappresenta un piano infinitamente esteso impermeabile alla radiazione considerata, le zone interne sono le corone circolari attraverso cui viene trasmessa la radiazione: le corone bianche sono "vuote", quelle colorate sono costituite da un materiale diverso dall'aria, tale da produrre uno sfasamento di π rispetto alle altre.

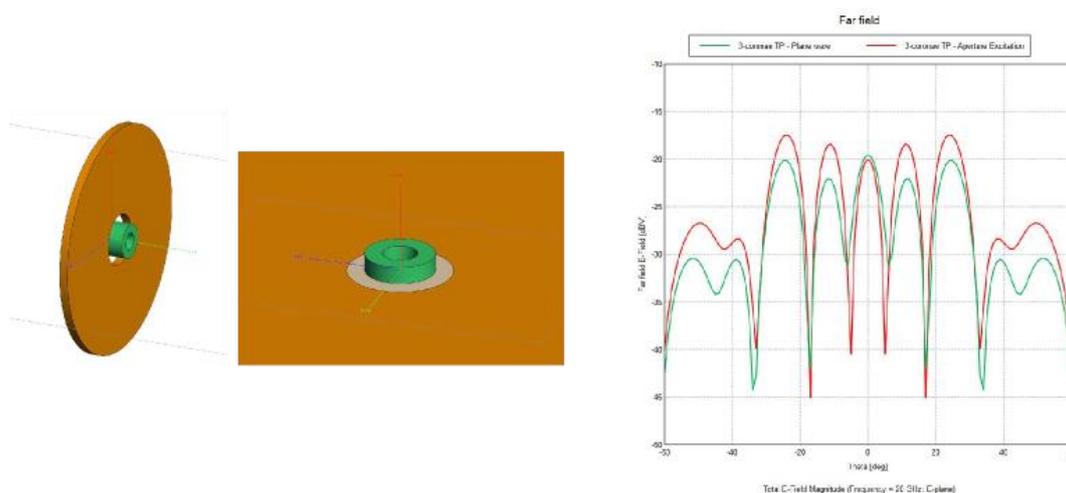


Fig. 5 - Schema del modello utilizzato per le simulazioni FEKO. A sinistra: modello iniziale utilizzato per simulare la TP3 a 20 GHz. Il cilindro verde, forato nella parte centrale, rappresenta il dielettrico (con indice di rifrazione $n = 1.5$) impiegato per attuare l'inversione di fase. I raggi delle circonferenze che delimitano le tre corone sono 1.5, 3 e 4.5 cm. Al centro: modello per la TP3 utilizzando l'opzione di substrato planare che simula uno schermo opaco infinito. A destra: valutazione del campo lontano per il modello TP3 con onda piana incidente (curva verde), e con illuminamento generato da un'antenna a tromba (curva rossa).

³ Il modello Toraldo richiede anche una differenziazione nelle ampiezze delle corone, ma questa condizione, contrariamente a quanto avviene nell'intervallo del visibile, nell'intervallo delle microonde non può essere attuata se non con tecniche molto complesse.

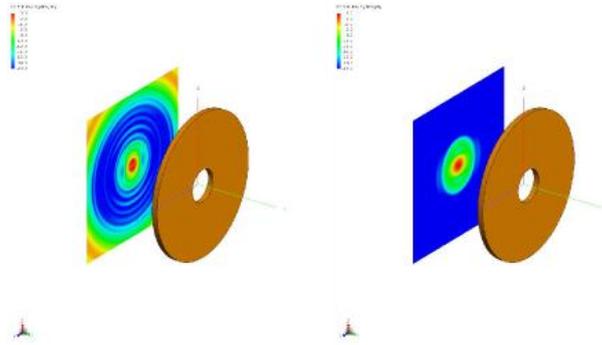


Fig. 6 - A sinistra : distribuzione del campo vicino a 20 GHz per la TP3 utilizzando un'onda piana incidente (incidente dalla destra); come si può vedere sono visibili più anelli di diffrazione. La pupilla aperta e lo schermo circolare hanno un diametro di 9 cm e 40 cm, rispettivamente, mentre la distanza tra lo schermo e il piano in cui è stato calcolato il campo vicino è di 20 cm. A destra: come a sinistra, per un campo incidente generato da un'antenna a tromba. Come si può vedere gli effetti di diffrazione del bordo sono scomparsi. Il colore della scala (da -20 dBV / m, blu, a 0 dBV / m, rosso) è lo stesso per entrambe le situazioni.

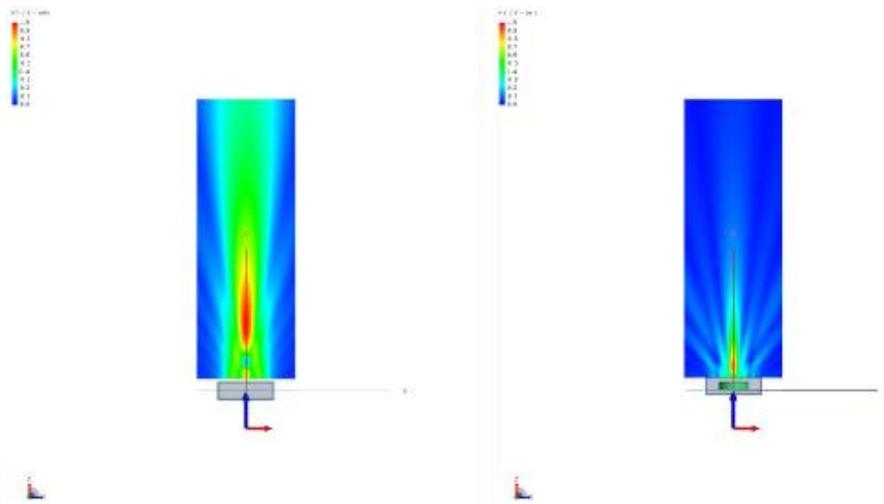


Fig. 7 - Distribuzione del campo vicino, a 20 GHz, per la pupilla aperta (a sinistra) e per la TP3 (a destra). I colori sono gli stessi per ambedue le figure (il rosso corrisponde a 1 V/m). Lo schermo opaco infinito si trova sul piano xy , cioè perpendicolare al piano della figura.

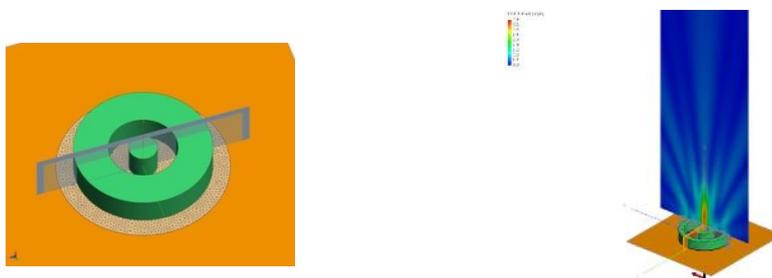


Fig. 8 - Simulazione FEKO del campo vicino per la TP4 a 20 GHz. Gli anelli verdi rappresentano il materiale dielettrico

La verifica sperimentale (si veda la successiva Fase 3) dei risultati numerici relativi all'effetto di super risoluzione delle TP è stata effettuata tramite una scansione piano-rettangolare in *campo vicino* (NF). Essa ha consentito prima il confronto in NF dei dati ottenuti dalla simulazione con quelli direttamente misurati, e, successivamente, tramite una trasformazione da campo vicino a *campo lontano* (FF), il confronto in FF.

La trasformazione NF-FF con scansione piano rettangolare è senza dubbio la più semplice ed efficace dal punto di vista analitico e computazionale. Poiché per tale tipo di scansione il campo lontano dell'antenna può essere ricostruito solo in un cono con un angolo al vertice inferiore a 180° , tale tecnica può essere convenientemente impiegata per antenne altamente direttive e quindi anche per le TP. Dai dati acquisiti sul piano di misura, espandendo il campo in onde piane e tenendo conto degli effetti del probe di misura, si calcola il campo di FF dell'antenna (Fig. 9) [9].

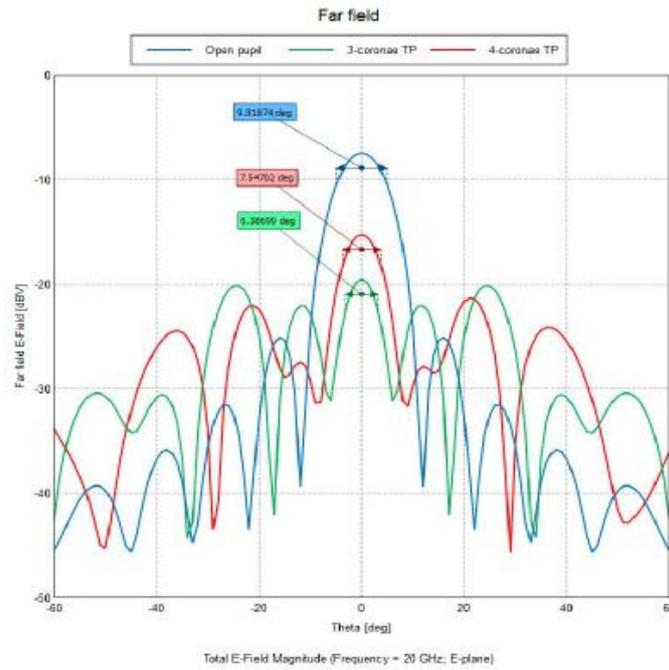


Fig. 9 - Valutazione dell'ampiezza del campo lontano (a 20 GHz), nel caso della pupilla aperta (linea blu), della TP3 (linea verde), e della TP4 (linea rossa). Come si può vedere le pupille composte presentano un lobo centrale più stretto rispetto a quello della pupilla aperta, ma anche una diminuzione del picco del lobo principale e un innalzamento dei lobi laterali. Al fine della super-risoluzione, la configurazione TP3 sembra essere la migliore.

Unitamente alle simulazioni elettromagnetiche è stato elaborato un modello teorico per la valutazione del campo diffratto nell'ambito dell'ottica di Fresnel, cioè per campo vicino.

In Fig. 10 e Fig. 11, si riportano i grafici del modello teorico per la TP3 e TP4 e, per un migliore confronto, si riportano anche i dati valutati con FEKO.

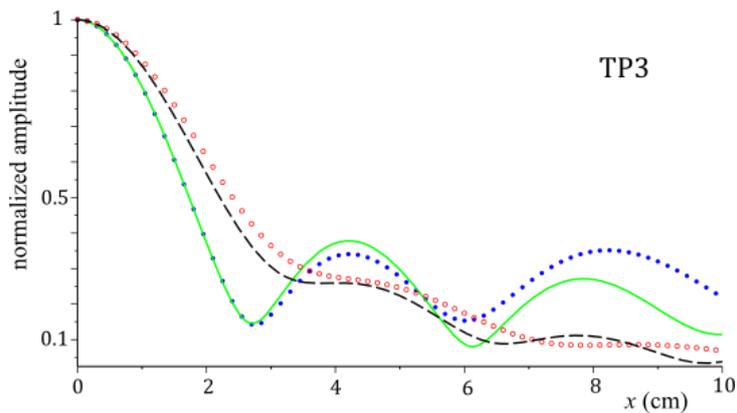


Fig. 10 - Ampiezza normalizzata del campo diffratto da una pupilla composta da due corone concentriche + la pupilla centrale (TP3) in funzione della spostamento trasversale x . La curva nera tratteggiata e quella punteggiata rossa si riferiscono alla pupilla aperta valutate con il modello teorico e con FEKO rispettivamente; la curva verde e quella punteggiata blu sono l'ampiezza della TP3 valutata, rispettivamente, con il modello teorico e con FEKO. Come si può vedere il modello teorico è in ottimo accordo con FEKO nella zona centrale, mentre presenta una certa discrepanza nella zona esterna (di nessun interesse ai fini della super-risoluzione). Sia il modello teorico che la simulazione elettromagnetica confermano la super risoluzione rispetto alla pupilla aperta. I valori dei parametri sono: frequenza = 20 GHz, diametri delle circonferenze della pupilla = 9, 6, 3 cm, distanza tra la pupilla e il ricevitore = 18 cm.

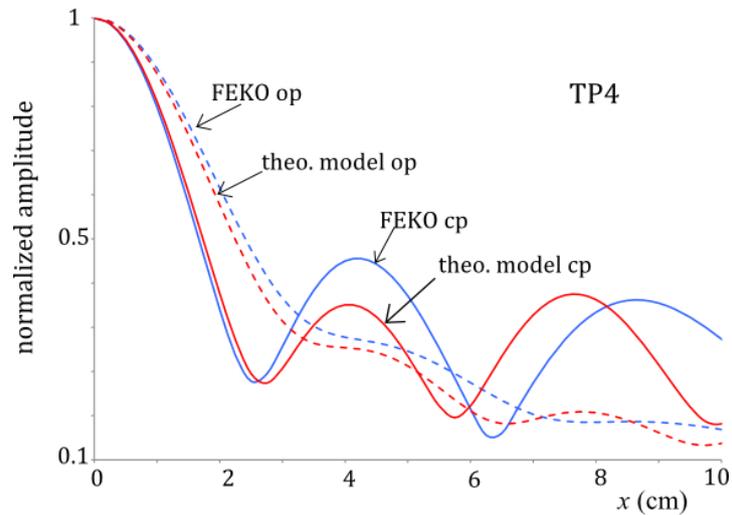


Fig. 11 - Ampiezza normalizzata del campo diffratto da una pupilla composta TP4 (indicata in figura come cp, curve a tratto continuo) e dalla corrispondente pupilla aperta (indicata in figura come op curve tratteggiate). Le curve blu si riferiscono ai dati ricavati con FEKO, mentre quelle rosse rappresentano il modello teorico. Anche in questo caso è evidente la super-risoluzione e c'è un buonissimo accordo tra FEKO e il modello teorico nella parte iniziale (quella di interesse). La frequenza è di 20 GHz, i diametri della pupilla sono 1.5, 3, 6, 9 cm e la distanza tra pupilla e ricevitore è di 18 cm.

I risultati della simulazione FEKO e quelli del modello teorico sono stati confrontati anche nel caso di campo lontano: in Fig. 12 è mostrato il risultato di tale confronto nel caso della TP5.

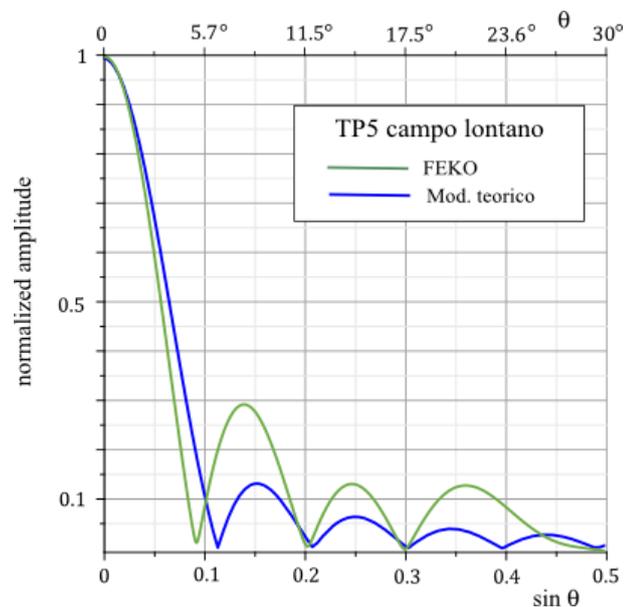


Fig. 12- Valutazione dell'ampiezza (normalizzata al suo valore massimo) per la TP5, nel caso di campo lontano (ottica di Fraunhofer), in funzione dell'angolo di diffrazione θ : la curva verde rappresenta la simulazione con FEKO mentre quella blu è il risultato del modello teorico. Anche in questo caso nella zona del lobo centrale, cioè quella di interesse, c'è un ottimo accordo tra le due valutazioni.

Fase 2

Sulla base di quanto evidenziato dalle simulazioni FEKO, la prima pupilla composta costruita è stata la TP3 (Fig. 13). Il dielettrico utilizzato è stato il polietilene, il cui indice di rifrazione è di circa 1.5. La corona centrale è spessa 1.5 cm, cioè pari alla lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di 20 GHz.

Con questo tipo di configurazione, la differenza di cammino ottico tra la radiazione che si propaga in aria e quella che si propaga attraverso il dielettrico è pari a una lunghezza d'onda, introducendo quindi uno sfasamento di π , come richiesto dal modello di Toraldo. I diametri, partendo dalla corona esterna, sono di 9, 6 e 3 cm.

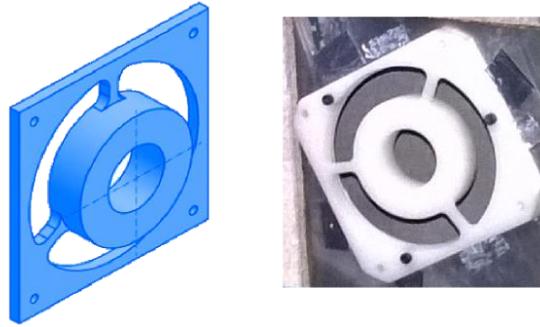


Fig. 13 - A sinistra: schema della TP3; a destra: TP3 costruita utilizzando come dielettrico il polietilene (indice di rifrazione ≈ 1.5). Durante le misure sperimentali la pupilla è stata montata su un piano metallico nel quale è stato praticato un foro circolare con diametro uguale a quello della corona più esterna, in modo da riprodurre la configurazione di Fig. 4.

Anche la pupilla composta TP4 è stata costruita sulla base delle stesse caratteristiche, cioè una serie di corone concentriche di polietilene di spessore pari a 1.5 cm. La TP4 testata è stata costruita aggiungendo alla TP3 un'ulteriore corona esterna di polietilene, come mostrato in Fig. 14 (a sinistra). Partendo dall'esterno i diametri della TP4 sono: 9, 7.2, 3.1, 1.5 cm.

La pupilla composta TP5 (Fig. 15) è stata costruita aggiungendo un'ulteriore corona vuota alla TP4 ed è stata dimensionata in modo da potersi adattare al collimatore-prototipo progettato per essere utilizzato sul radiotelescopio da 32m che si trova a Medicina, Bologna (si veda la successiva Fase 3).

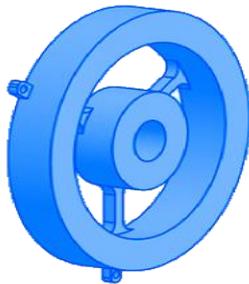


Fig. 14 - Sinistra: schema della TP4. Destra: TP4 costruita con una serie di corone circolari di polietilene. Sulla sinistra della figura si può vedere la guida d'onda utilizzata in laboratorio per campionare il campo vicino.



Fig. 15 - Foto delle TP5 inserita all'interno del collimatore costruito per adattarsi al radiotelescopio da 32 m che si trova a Medicina (BO), gestito dall'Istituto di Radioastronomia dell'INAF.

Alla costruzione delle pupille Toraldo sono seguite le misure di laboratorio secondo lo schema riportato in Fig. 16. In Fig. 17 è mostrato il setup sperimentale all'interno della camera anecoica.

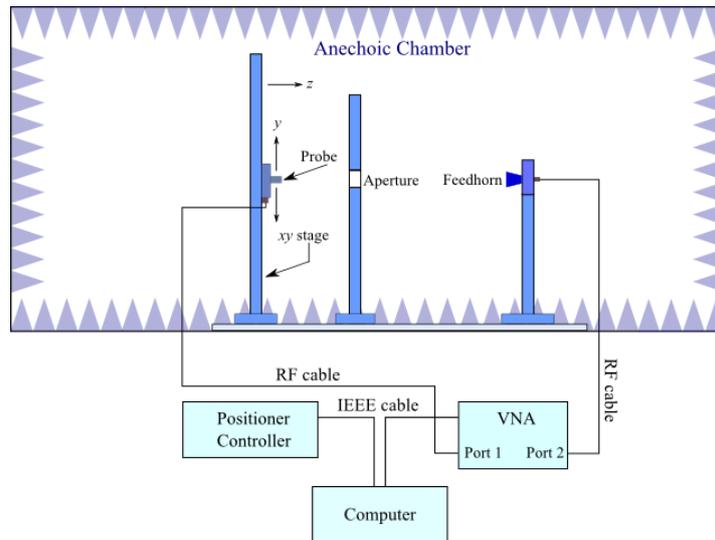


Fig. 16 - Schema del setup sperimentale utilizzato per testare le pupille Toraldo. La scansione è stata effettuata muovendo il ricevitore sul piano xy tramite un plotter verticale motorizzato. Tutti i componenti sono montati su supporti verticali che possono essere spostati lungo z .



Fig. 17 - Camera anecoica: setup sperimentale per i test di laboratorio con $\nu = 20$ GHz. L'emettitore (antenna a tromba rettangolare) è visibile a sinistra, circondata da coni assorbenti. A destra si può vedere lo schermo con il foro circolare su cui è inserita la TP.

Fase 3

Le misure sperimentali hanno avuto due obiettivi principali:

- 1- rilevare e quantificare l'effetto di super-risoluzione,
- 2- valutare e possibilmente ridurre alcuni degli effetti che possono mascherare e/o alterare l'effetto di super-risoluzione.

Tutte le misure sono state effettuate in NF e, in seguito, i risultati sono stati trasformati da NF a FF.

La scelta di misurare il campo vicino è dovuta al fatto che le tecniche di scansione nel FF richiedono apparecchiature meccaniche e a microonde più complesse e costose di quelle disponibili, inoltre è stato verificato che il sistema di misura disponibile non aveva abbastanza sensibilità da poter effettuare misure di diffrazione nel FF.

Le prime misure sperimentali [10] hanno riguardato la TP3 e la TP4 (Fig. 18-20), mentre la TP5 è stata testata quando già inserita nel prototipo del collimatore (si veda il paragrafo successivo).

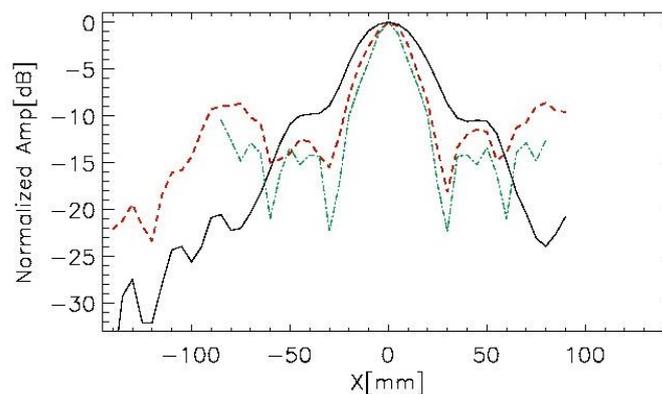


Fig. 18 - Misure di ampiezza (normalizzate al valore del massimo) per la TP3 alla frequenza di 20 GHz (linea rossa tratteggiata) insieme alle misure di ampiezza per la corrispondente pupilla semplice (linea nera continua). Per completezza è riportato anche il grafico della simulazione FEKO per la TP3 (linea tratteggiata verde) che, come si può vedere, è in ottimo accordo con le misure sperimentali, specialmente nella zona del lobo centrale, quella di interesse. Come si può vedere la pupilla composta presenta una figura di diffrazione più stretta rispetto alla corrispondente pupilla semplice, confermando l'effetto super-risolvete delle pupille Toraldo. Per testare l'intensità dei lobi laterali le misure si sono estese fino a oltre 100 mm dalla parte delle x negative. Nelle presenti misure la distanza tra l'emettitore e lo schermo era di 1.9 m, mentre la distanza tra lo schermo e il ricevitore era di 18 cm.

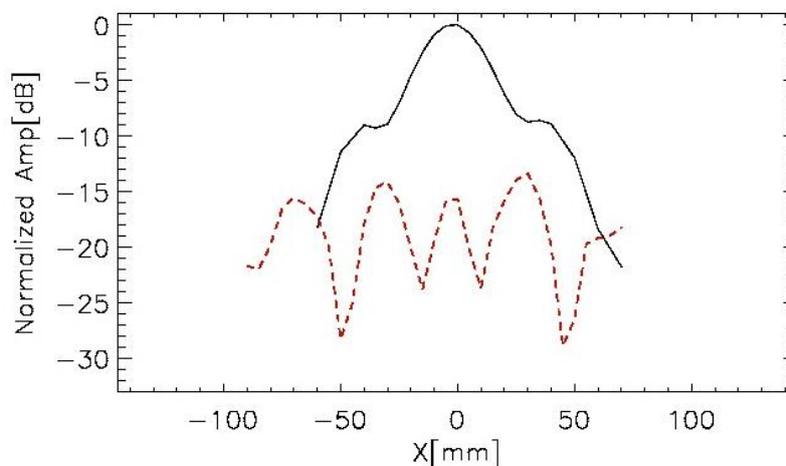


Fig. 19 - Misure di ampiezza (normalizzate al valore del massimo della pupilla semplice) per la TP4 alla frequenza di 20 GHz (linea rossa tratteggiata) insieme alle misure di ampiezza per la corrispondente pupilla semplice (linea nera continua). Anche in questo caso è visibile l'effetto super-risolvete, ma la situazione è più critica rispetto alla TP3 per la presenza dei lobi laterali che risultano intensi quanto il lobo centrale (se non addirittura di più). Nelle presenti misure la distanza tra l'emettitore e lo schermo era di 1.7 m, mentre la distanza tra lo schermo e il ricevitore era di 16 cm.

Unitamente allo svolgimento delle misure sperimentali, è stato anche elaborato un modello teorico [11] in base al quale è stato possibile dimostrare che un filtro di trasmittanza complessa è equivalente a una TP continua, cioè, costituita da anelli concentrici di spessore infinitamente sottile. L'utilizzo di tali filtri può consentire una migliore ottimizzazione delle prestazioni complessive della TP [12].

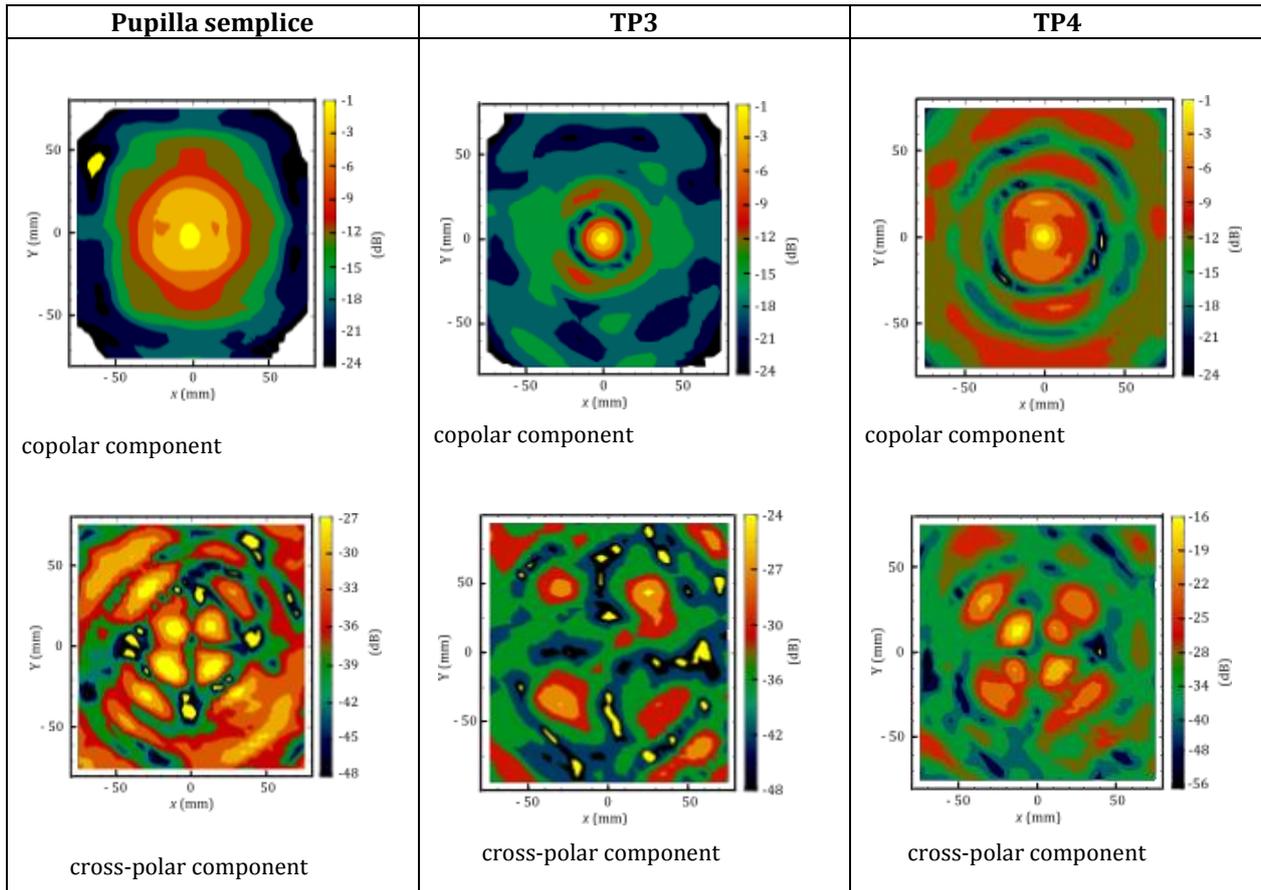
Le simulazioni con FEKO e i risultati sperimentali ottenuti hanno mostrato che le TP costituite da corone concentriche sono facili da fabbricare e con esse si possono ottenere effetti super-risolutivi. Tuttavia, questo semplice dispositivo non consente di raggiungere il miglior compromesso tra super-risoluzione ed efficienza, e soprattutto risulta molto limitato in termini di banda passante.

Si è pertanto cercato un approccio diverso e durante il progetto è stata studiata e analizzata la possibilità di usare metamateriali in alternativa alle pupille Toraldo classiche, cioè quelle costituite da anelli di dielettrico alternati ad anelli di aria.

In particolare è stato considerato il metodo basato sulla tecnologia dei filtri a rete metallica.

Questa tecnologia, già da anni consolidata presso l'Università di Cardiff (partner del progetto), e utilizzata con successo in molti strumenti astronomici per lunghezze d'onda millimetriche e sub-millimetriche, è in grado di manipolare artificialmente l'ampiezza e la fase di un fronte d'onda, e produrre quindi un metamateriale che funzioni come una "pupilla continua" [13] in grado di sostituire la classica pupilla Toraldo ad anelli.

Tab. 1. Mappe di ampiezza nel piano x - y , misurate alla frequenza di 20 GHz. Anche in questo caso si evidenzia l'effetto super risolvete delle TP. Si deve notare che lo spot luminoso in alto a sinistra nella componente copolare della pupilla semplice deve essere considerato un effetto spureo del tutto casuale perché non è mai stato più riscontrato in altre misurazioni.



Molto recentemente è stato anche investigato l'utilizzo delle pupille Toraldo in relazione a materiali vetro-ceramici con particolare riferimento ai risonatori a modi di galleria [14]. Tali risonatori sono in grado di confinare la luce e costituiscono quindi dispositivi fotonici che possono essere usati in studi di ottica non-lineare.

Il problema principale di tali dispositivi è che l'efficienza, pur essendo elevata, continua a essere bassa e i dispositivi non possono essere usati come sorgenti coerenti a banda stretta. Infatti, la luce visibile generata viene raccolta attraverso sistemi ottici, come fibre multimodo oppure sistemi ottici basati su telescopi tradizionali, ed è noto che tali sistemi vengano limitati da effetti diffrattivi cui è soggetto qualunque sistema ottico.

Le pupille Toraldo si sono dimostrate, sia teoricamente che sperimentalmente, un potente mezzo per l'abbassamento del limite diffrattivo ed è stato quindi proposto il loro utilizzo per una raccolta più efficiente della luce generata da tali dispositivi. Si stima che l'efficienza misurata potrà essere incrementata di circa un ordine di grandezza.

L'interesse e la novità in questo settore di applicabilità riserverà certamente ulteriori indagini, ma va oltre lo scopo del presente progetto.

5 - Il Prototipo

La fase finale del progetto PUTO è consistita nella progettazione di un prototipo basato sulle TP, progettato in modo che potesse essere montato sul radiotelescopio da 32 metri che si trova a Medicina, utilizzando il ricevitore che si trova sul fuoco dell'antenna Cassegrain [15-17].

Il vantaggio di questa scelta sta nel fatto che il prototipo può essere facilmente montato davanti al ricevitore senza la necessità di cambiare il preesistente assemblaggio meccanico e ottico, salvo piccole modifiche per connettere il prototipo al dewar.

Il prototipo è costituito da un collimatore a due lenti con la TP inserita nella parte centrale e lo schema di misura è mostrato in Fig. 20 dove appare lo spostamento del fuoco Cassegrain. Tale spostamento (Fig. 21) si è reso necessario perché è estremamente complicato spostare il ricevitore per fare spazio al collimatore, mentre è

molto più semplice spostare il fuoco Cassegrain in modo che la nuova posizione focale possa essere utilizzata come immagine di ingresso per il collimatore.

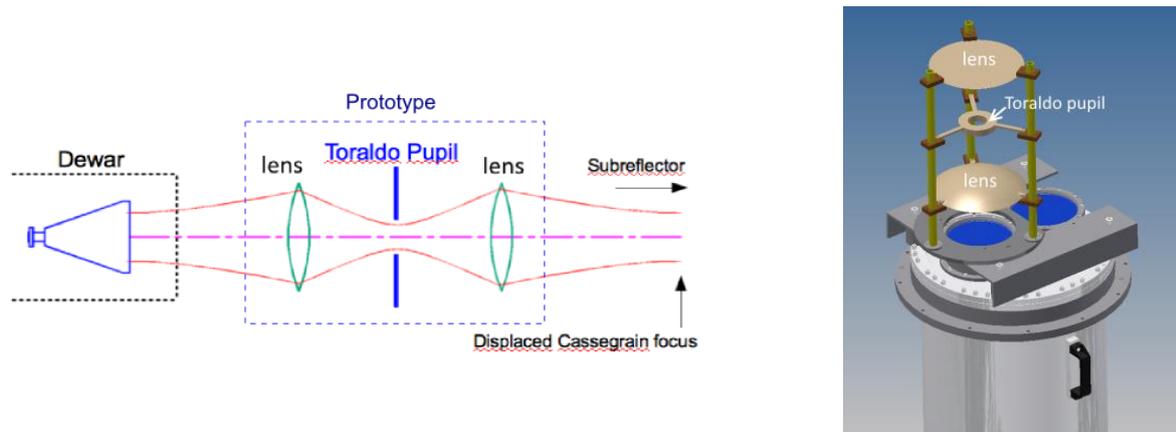


Fig. 20 - (a) Schema di misura. Il collimatore viene collocato dopo il fuoco Cassegrain: la prima lente genera un'immagine del primario che viene poi trasmessa al fuoco successivo della seconda lente. (b) Schema del collimatore da montare sul dewar. La TP è mostrata tra le due lenti senza l'apertura circolare, dello stesso diametro delle lenti, che ne limita l'ampiezza del campo trasmesso.



Fig. 21 - Rappresentazione del montaggio del collimatore sul dewar del radiotelescopio (ricevitore in banda K)

In Fig. 22 è mostrato il progetto del collimatore, mentre in Fig. 23 è mostrata in (a) la sua realizzazione, e in (b) il dettaglio della costruzione delle lenti in polietilene.

Le misure effettuate in camera anecoica, inserendo nel collimatore la TP5, hanno confermato l'effetto super-risolvente, come mostrato in Fig. 24.

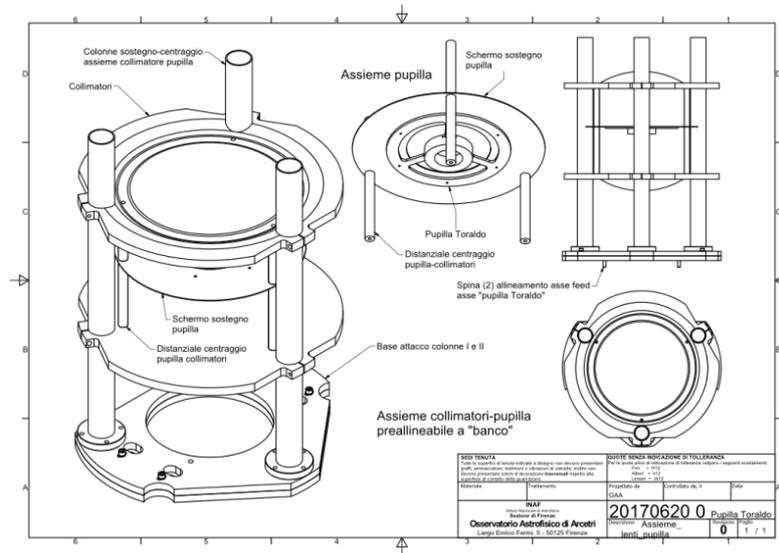


Fig. 22 - Progetto del prototipo costituito da un collimatore a due lenti con la TP nella parte centrale

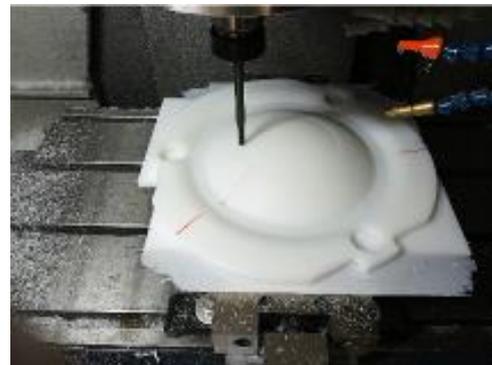
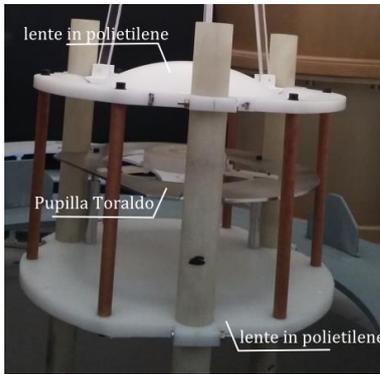


Fig. 23 - (a) Realizzazione del prototipo; (b) dettaglio della costruzione delle lenti in polietilene con l'utilizzo della tecnica di fresatura a controllo numerico (CNC milling machine technique). La costruzione delle lenti è stata effettuata presso l'INAF-OAC di Cagliari.

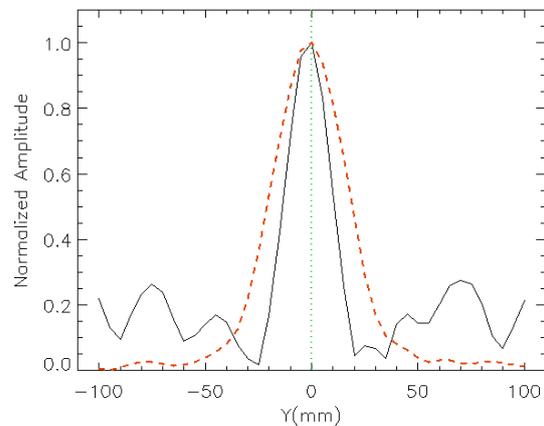
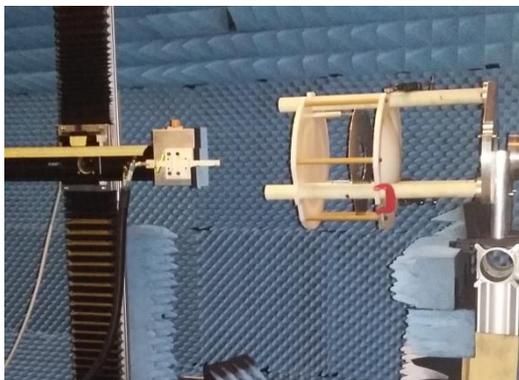


Fig. 24 - (a) Foto del setup sperimentale utilizzato in camera anecoica per le misure con il collimatore-prototipo. All'estrema destra e' possibile osservare un feed corrugato usato come sorgente per simulare il fuoco Cassegrain dell'antenna. A sinistra del collimatore e' possibile osservare la guida d'onda usata per misurare il campo vicino. (b) Risultato della misura: la curva rossa tratteggiata è la misura dell'ampiezza diffratta dalla pupilla semplice mentre la curva nera a tratto continuo è l'ampiezza diffratta dalla pupilla composta TP5, ambedue normalizzate al valore massimo. Il risultato mostra un chiaro effetto super-risolvente dovuto alla presenza della TP5

La prima campagna di misura è stata effettuata nel febbraio 2018 e sono stati eseguiti i primi test per verificare il funzionamento del nuovo sistema di controllo dell'antenna, e soprattutto per effettuare delle prove di inseguimento con l'antenna sia di alcuni pianeti sia di un satellite geostazionario (Eutelsat Ka-Sat 9A) che poi verranno utilizzati come sorgenti puntiformi.

Nella seconda campagna di misura, nel marzo 2018, è stato montato il collimatore (Fig. 25) e sono stati eseguiti i primi test su di esso. Il collimatore è stato montato esternamente sul dewar del ricevitore (banda K), (Fig. 26) e il montaggio è stato eseguito senza dover spostare e/o modificare la struttura di supporto del ricevitore, velocizzando notevolmente tutte le operazioni e riducendo quindi il tempo durante il quale l'antenna è rimasta inutilizzata.

I test avevano lo scopo di:

- 1- misurare l'intensità del segnale e stabilire quale sorgente puntiforme (pianeti/satellite) era possibile utilizzare per i successivi test;
- 2- verificare il corretto allineamento ottico del sistema collimatore-antenna e trovare la diversa posizione di fuoco richiesta dalla nuova configurazione ottica;
- 3 - confrontare le misure del beam d'antenna con e senza la TP applicata al collimatore.

I test si sono rivelati molto complessi a causa delle difficoltà nel puntare correttamente l'antenna verso il satellite geostazionario e nel trovare la corretta posizione focale. Inoltre, ulteriori complicazioni sono dovute all'apparente variabilità del "beacon" del satellite e alla necessità di modificare il software di controllo dell'antenna. Il puntamento verso il satellite si è reso necessario perché l'osservazione dei pianeti è risultata estremamente complicata a causa della debolezza del segnale con la TP montata sul collimatore.

Nonostante queste difficoltà, i test hanno comunque confermato il corretto funzionamento del collimatore in assenza di TP applicata, in quanto il beam d'antenna misurato è risultato praticamente identico a quello nominale, senza alcun collimatore.

I test hanno altresì mostrato che per evidenziare l'effetto di super-risoluzione è necessario modificare opportunamente anche il feed-horn utilizzato all'interno del ricevitore radioastronomico. Nel nostro caso ciò non è evidentemente possibile poiché il ricevitore in banda K dell'antenna di Medicina non può essere sottoposto a modifiche.

A causa di questo problema, insieme alle difficoltà logistiche e tecniche riscontrate durante la campagna di misure a Medicina, si è reso necessario fare ulteriori misure di laboratorio utilizzando un'antenna in una configurazione Cassegrain "ad hoc", in modo da riprodurre le caratteristiche ottiche del radiotelescopio di Medicina e, allo stesso tempo, effettuare misure con un setup controllato e molto più facilmente gestibile.



Fig. 25 - Montaggio del collimatore sull'antenna 32m di Medicina. In basso a destra si può vedere il collimatore.

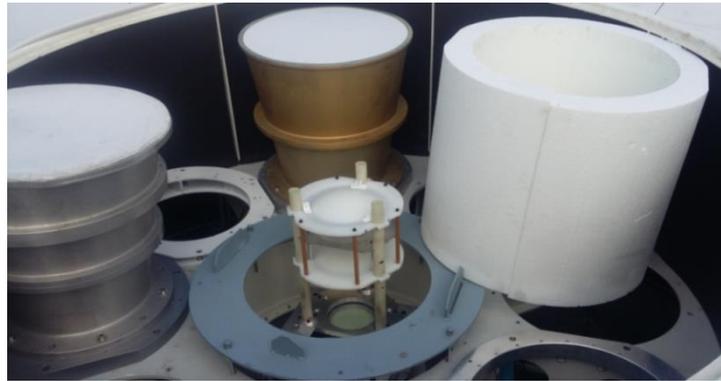


Fig. 26- Dettaglio del collimatore montato sul dewar del ricevitore in banda K.

Bibliografia

- [1] G. Toraldo di Francia, Proceedings of the International Colloquium on Optics and Microwaves, Milan, Italy, June 6-11, 1952, pubblicato in *Il Nuovo Cimento*, (Suppl. 9), p. 426; si veda anche G. Toraldo di Francia, *Atti Fond. Giorgio Ronchi* **7**, 366 (1952).
- [2] S.A. Schelkunoff, *Bell Syst. Tech. J.* **22**, 80 (1943).
- [3] Una sconcertante conseguenza delle predizioni di Toraldo è legata al principio di indeterminazione di Heisenberg poiché un argomento adottato per derivare questo principio è proprio basato sul limitato potere risolvibile degli strumenti ottici con pupille di dimensione finita. Un'interessante discussione su questo argomento si trova nella parte finale di Ref. 1.
- [4] T. Grosjean, D. Courjon, and D. Van Labeke, *J. Microsc.* **210**, 319 (2003).
- [5] J.M. Vigoureux, and D. Courjon, *Appl. Opt.* **31**, 3170 (1992).
- [6] D. Mugnai, A. Ranfagni, R. Ruggeri, "Pupils with super-resolution", *Phys. Lett. A* **311**, 77 (2003).
- [7] A. Ranfagni, D. Mugnai, R. Ruggeri "Beyond the diffraction limit: Super-resolving pupils", *J. Appl. Phys.* **95**, 2217 (2004).
- [8] D. Mugnai, A. Ranfagni, "Further remarks on super-resolving pupils", *J. Appl. Phys.* **102**, 036103 (2007).
- [9] <http://www.ifac.cnr.it/PUTO/contributi/DAgostino.pdf>
- [10] Luca Olmi, Pietro Bolli, Luca Cresci, Francesco D'Agostino, Massimo Migliozi, Daniela Mugnai, Enzo Natale, Renzo Nesti, Dario Panella, Lorenzo Stefani: "Laboratory measurements of super-resolving Toraldo pupils for radio astronomical applications", *Exp. Astron.* **43**, 285-309 (2017).
- [11] Luca Olmi, Pietro Bolli, and Daniela Mugnai: "Design of discrete and continuous super-resolving Toraldo pupils in the microwave range", *Applied Optics.* **57**, 2215-2222 (2018).
- [12] <http://www.ifac.cnr.it/PUTO/contributi/Pisano.pdf>
- [13] G. Pisano, C. Tucker, D. Mugnai, P. Bolli, L. Olmi, F. D'Agostino, M. Migliozi, A. Orfei, A. Navarrini, C. Riminesi: "Metamaterial-based Toraldo pupils for super-resolution at millimeter wavelengths", Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, Austin, Texas, USA, 10 - 15 June 2018.
- [14] D. Farnesi, G. Righini, G. Nunzi Conti, D. Mugnai, S. Soria: "Efficient Frequency Generation in PhoXonic WGM resonators and collection through Toraldo Pupils", Proceedings del 14° International Ceramics Congress, Perugia 4-8 giugno 2018.
- [15] Luca Olmi, Pietro Bolli, Luca Carbonaro, Luca Cresci, Daniela Mugnai, Enzo Natale, Renzo Nesti, Dario Panella, Juri Roda, Giampaolo Zacchiroli: "Design of Super-Resolving Toraldo Pupils for Radio Astronomical Applications", Proceedings of the 32nd URSI General Assembly & Scientific Symposium, Montreal, Canada, 19-26 agosto, 2017
- [16] Luca Olmi, Pietro Bolli, Luca Carbonaro, Luca Cresci, Pasqualini Marongiu, Daniela Mugnai, Enzo Natale, Renzo Nesti, Dario Panella, Juri Roda, Giampaolo Zacchiroli: "Design and Test of a Toraldo Pupil Optical Module for the Medicina Radio Telescope", Proceeding of the 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference (AT-RASC 2018), Gran Canaria, Spain, May 28 - June 1, 2018
- [17] L. Olmi, P. Bolli, L. Carbonaro, L. Cresci, A. Maccaferri, G. Maccaferri, P. Marongiu, D. Mugnai, R. Nesti, A. Orfei, D. Panella, S. Righini: "First tests of a Toraldo Pupil optical module for the 32m Medicina antenna", XXII Riunione Nazionale di Elettromagnetismo - SIEM Academy (XXII RiNEM), Cagliari, 3-8 settembre 2018.