

# Verifica sperimentale della trasmissione simultanea di due segnali televisivi DVB-T alla stessa frequenza tramite modi OAM con diversa vorticosità

Andrea Cagliero<sup>1</sup>, Rossella Gaffoglio<sup>1</sup>, Assunta De Vita<sup>2</sup>, Bruno Sacco<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Università di Torino - Dipartimento di Fisica  
<sup>2</sup>Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

## 1. INTRODUZIONE

Come già citato nei numeri precedenti di questa rivista [1][2], negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse per la radiazione elettromagnetica che trasporta momento angolare orbitale (**Orbital Angular Momentum, OAM**), con applicazioni rilevanti nelle nanotecnologie [3], in astronomia [4][5][6][7], nella fisica quantistica [8][9][10], in ottica [11][12] e, più di recente, anche nelle comunicazioni radio in spazio libero [13][14]. Come ben noto in letteratura, esistono diverse possibilità per generare fasci OAM alle varie frequenze [15][16][17][18]; tra queste, una delle più adatte per le trasmissioni radio consiste nell'uso di schiere (arrays) di antenne, alimentate attraverso un'opportuna tecnica di sintesi [13][19].

In questo articolo vengono presentati i risultati di un esperimento di trasmissione simultanea di due segnali DVB-T codificati come modi OAM  $\ell=1$  e  $\ell=-1$ , realizzata mediante l'utilizzo di schiere circolari uniformi di antenne nella banda TV VHF (174÷230 MHz). L'esperimento è stato supportato da uno studio numerico preliminare (non riportato nel presente articolo per brevità, ma ampiamente descritto in [20]) e da una sessione sperimentale di misura delle prestazioni della tratta a radiofrequenza, che ha portato ad una stima dell'isolamento ottenibile tra i due modi OAM e alla verifica dell'OAM-link pattern [2][22]. La distanza in gioco, sebbene limitata, è di circa tre volte superiore alla soglia di campo lontano.

*Come noto, un primo esperimento sul campo, effettuato sotto la guida del professor Tamburini a Venezia nel 2011, ha dimostrato la possibilità di trasmettere e ricevere simultaneamente due segnali radio incoerenti codificati in due diversi stati OAM alla stessa frequenza.*

*Partendo da ciò e alla luce degli studi, riportati nel numero precedente di questa rivista, nei quali la regola per la valutazione del link budget nel caso di fasci OAM è stata opportunamente rivisitata tenendo conto della struttura peculiare di tali fronti d'onda, in questo nuovo articolo viene riportato uno studio sperimentale che descrive la trasmissione simultanea di due segnali DVB-T codificati come modi OAM  $\ell=1$  e  $\ell=-1$ , usando un singolo array di antenne circolari uniformi sia in trasmissione che in ricezione, nella banda TV VHF e nella regione di far field.*

*Dalle analisi sperimentali, supportate anche da una validazione dal punto di vista numerico, emerge che l'eventuale utilizzo dell'OAM per moltiplicare la capacità di un tipico canale VHF/UHF per il servizio televisivo terrestre è possibile, seppur con limitazioni dovute al fatto che sono richiesti un buon isolamento tra i diversi modi OAM ed un perfetto allineamento tra le antenne trasmettenti e riceventi affinché le onde OAM siano ricevute correttamente. L'aspetto più limitante riguarda, però, l'attenuazione che tali onde subiscono con la distanza, attenuazione che risulta molto più elevata di quella relativa all'onda EM convenzionale. Tutti fattori che, in definitiva, limitano la piena applicabilità di questa soluzione in ambito broadcast.*

Lo scopo principale dell'esperimento è consistito nella verifica pratica della possibilità di riutilizzare più volte il canale tramite l'impiego dell'OAM, evidenziando sia gli aspetti innovativi sia quelli critici di tale tecnologia. Altri obiettivi sono stati:

1. la validazione del concetto di *OAM-link pattern* per il calcolo del link budget nel caso OAM;
2. la verifica della validità dell'algoritmo di sintesi dei dispositivi di trasmissione e ricezione del fascio (*mode sorters*), appositamente progettati per l'esperimento [23];
3. la verifica della funzionalità della trasmissione con array dotati di un numero minimo di radiatori (quattro antenne ciascuno).

L'esperimento rappresenta, al meglio delle nostre conoscenze, il primo caso di trasmissione/ ricezione multipla simultanea di segnali OAM DVB-T mediante l'impiego della stessa singola schiera di radiatori sia in trasmissione che in ricezione.

## 2. PROGETTO DELL'ESPERIMENTO

La scelta di utilizzare array di antenne è dettata dal fatto che essi sono adatti ad implementare una trasmissione multimodo, in generale non ottenibile con la maggior parte delle tipologie di antenne OAM comunemente note. Infatti, un singolo array alimentato mediante una speciale rete di *beamforming (mode sorter)* può supportare la trasmissione simultanea di diversi modi OAM indipendenti, a

differenza di altre antenne quali i riflettori parabolici twistati [18], le spiral plates [15][21] e altri.

Come anticipato, uno degli scopi dell'esperimento consisteva nella possibilità di validare le funzionalità dei *mode sorters*, dispositivi elettronici progettati e brevettati durante la fase preliminare [23]. Tali dispositivi, nel prototipo realizzato, sono costituiti da componenti RF reperiti in commercio che coprono l'intervallo di frequenza 100÷250 MHz: per questo motivo si è scelto di effettuare i test nella banda televisiva VHF (banda III). Per semplicità tecnica e al fine di verificare l'applicabilità dell'OAM utilizzando un numero minimo di antenne si è deciso di adottare un array di soli quattro elementi. Inoltre, sebbene tale schiera sia in grado di supportare i modi  $\ell=-1,0,1$ , l'analisi è stata limitata alle sole configurazioni  $\ell=\pm 1$ .

Gli array trasmettente e ricevente sono identici (figura 1): ciascuno dei due è stato costruito mediante quattro antenne commerciali Yagi-Uda a quattro elementi *Fracarro BLV4F*, che forniscono un guadagno di 7 dBi. Al fine di mantenere i cavi di alimentazione ortogonali agli elementi delle Yagi, le antenne sono state disposte orizzontalmente: la polarizzazione utilizzata è dunque quella orizzontale. Gli array, che sono sostenuti da una struttura costituita da tubi in materiale plastico (PVC), sono circolari, nel senso che i quattro elementi Yagi-Uda sono disposti lungo una circonferenza di diametro  $D=3.1$  m, da cui risulta una distanza di campo lontano pari a  $2D^2/\lambda \sim 13$  m alla frequenza di 205 MHz.

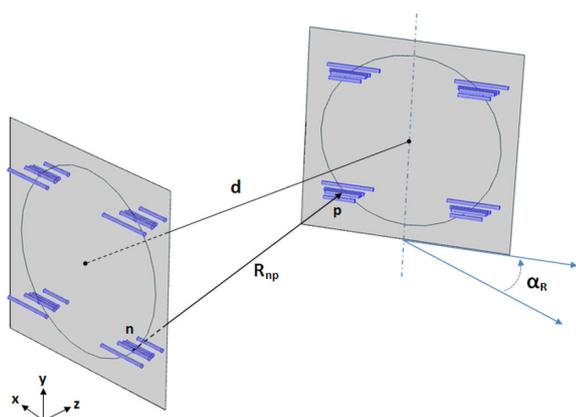


Fig. 1 – Illustrazione schematica del link (sinistra) e immagine di una delle due UCA utilizzate nell'esperimento (destra)



Fig. 2 – Due diverse vedute del sito dell'esperimento (Torino, Italia, 45° 01' 48.4" N, 7° 39' 15.7" E, riprodotta da Google Earth, ©2015 Google)

Come mostrato in figura 2, i due sistemi sono stati collocati sulle due ali del tetto della vecchia sede del Centro Ricerche RAI di Torino. La scelta di tale posizione per l'esperimento è essenzialmente motivata da due fattori: l'altezza e la forma dell'edificio, che insieme garantiscono riflessioni trascurabili da parte del terreno sottostante, e l'intenzione di dimostrare una trasmissione in *far field* (una distanza di collegamento di 40 m corrisponde a poco più di tre volte la soglia  $2D^2/\lambda$  per il caso considerato).

### 3. ANALISI PRELIMINARI

Seguendo l'approccio descritto in [22], è possibile valutare il *link budget* per una coppia di schiere circolari uniformi poste una di fronte all'altra e costituite da dipoli a mezz'onda. Nel caso di un array circolare uniforme (**Uniform Circular Array, UCA**) composto da  $N$  elementi, i coefficienti di sintesi per la generazione di un fascio **OAM** con indice  $\ell$  vengono semplicemente definiti imponendo che la differenza di fase tra ogni coppia di elementi successivi sia  $\delta\varphi=2\pi\ell/N$  [13]. La relazione che determina quanti modi **OAM** tale array è in grado di supportare è  $-N/2 < \ell < N/2$ .

Allo scopo di conformare la nostra analisi all'esperimento, consideriamo due **UCA** identiche e composte da quattro antenne, disposte su un cerchio con raggio  $R=1.5$  m e separate da una distanza  $d=40$  m, come mostrato in figura 1.

L'utilizzo di antenne Yagi-Uda come elementi della schiera rende il diagramma di radiazione degli array più direttivo rispetto al caso in cui si impieghino semplici dipoli a mezz'onda, focalizzando maggiormente la radiazione emessa lungo la direzione di propagazione in trasmissione e incrementando la capacità dell'array ricevente di intercettare il fascio incidente lungo la stessa direzione.

La figura 3, ottenuta con MATLAB applicando la formula dell'*OAM link budget* [22] al caso della coppia di array di antenne Yagi-Uda considerata, riporta l'andamento del rapporto tra la potenza ricevuta e quella trasmessa in funzione dell'angolo  $\alpha_R$  relativo alla rotazione dell'array ricevente intorno all'asse  $y$  passante lungo il suo centro.

Grazie all'ortogonalità dei modi **OAM**, avendo il fascio trasmesso un indice azimutale  $\ell_T=1$ , solo un *rifasamento* con indice  $\ell_R=\ell_T=1$  massimizza il segnale ricevuto per  $\alpha_R=0$ , mentre una configurazione distruttiva è ottenuta laddove  $\ell_R \neq \ell_T$ .

Per completezza, la figura 4 descrive il comportamento di  $P_{out}/P_{in}$  per  $\alpha_R=0$  al variare della distanza del collegamento tra gli array. Come si può osservare, la curva corrispondente alla corretta ricezione del modo **OAM** incidente (ossia la linea verde continua) segue il ben noto comportamento asintotico  $d^{-2\ell_T-2}$ .

Nel caso degli array di radiatori isotropici, il *link*

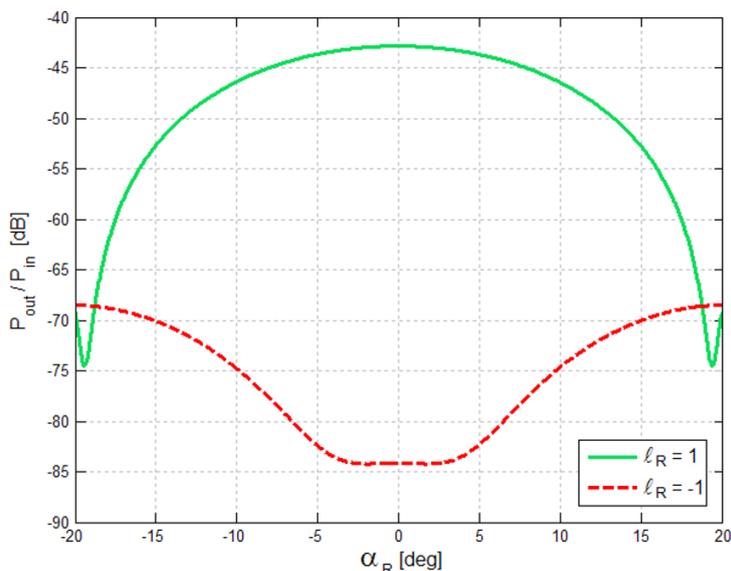


Fig. 3 – Potenza totale ricevuta normalizzata alla potenza totale irradiata in funzione dell'angolo di rotazione  $\alpha_R$  dell'array ricevente. Gli array considerati sono UCAs composti da antenne Yagi-Uda e separati da una distanza  $d=40m$ . Il fascio OAM trasmesso con indice azimutale  $\ell_T=1$  alla frequenza 205 MHz è ricevuto secondo due diverse configurazioni di rifasamento

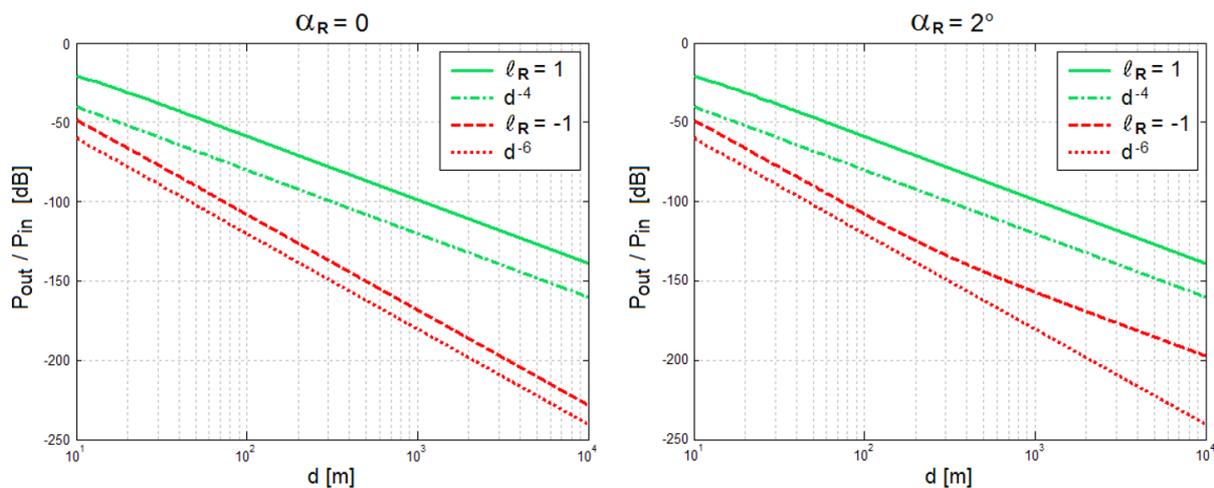


Fig. 4 – Potenza totale ricevuta normalizzata alla potenza totale irradiata in funzione della distanza del collegamento  $d$

*budget* relativo alla configurazione distruttiva  $\ell_R = -\ell_T$  cadrebbe a zero per  $\alpha_R = 0$ , dove l'ortogonalità dei modi OAM raggiunge il suo massimo. A causa della direttività degli elementi dell'array considerato, nel caso delle schiere di Yagi Uda l'ortogonalità non è ottimale e il *link budget* per la configurazione ricevente  $\ell_R = -\ell_T$  approssima quello degli array composti da elementi isotropici solo per grandi distanze, come si può vedere in figura 4 (linea rossa tratteggiata).

Poiché l'intensità del lobo principale dei fasci OAM segue il comportamento standard  $d^{-2}$ , la possibilità di massimizzare la potenza intercettata mediante trasmissioni inclinate sembrerebbe offrire una soluzione al problema del decadimento quadratico con la distanza. Tuttavia, questo approccio fuori asse non consente una discriminazione dei segnali basata sull'ortogonalità azimutale dei modi OAM, che invece rappresenta il punto chiave della tecnica sperimentale qui presentata.

## 4. GENERAZIONE ED ESTRAZIONE DEI MODI OAM: I MODE SORTERS

Nei comuni array di antenne, il circuito che provvede a fornire le varie alimentazioni ai singoli elementi dell'array viene solitamente progettato per ottenere diagrammi d'antenna su specifica.

Una tipica schiera planare (non OAM) che trasmette in direzione perpendicolare al piano (*broadside*) non richiede fasature differenti tra elementi che si trovano equidistanti dal centro.

Al contrario, per applicazioni OAM, il circuito di alimentazione della schiera deve assolvere in primo luogo a un compito di *fasatura azimutale* di tali elementi. Nel caso più semplice, quello delle UCA, i coefficienti richiesti sono di pura fase, la fasatura è esclusivamente azimutale e totalizza  $\ell$  rotazioni di fase elettrica in un giro completo dell'angolo azimutale; così facendo il fronte d'onda OAM viene sintetizzato direttamente alla sorgente. Analogamente vale in ricezione, per il teorema di reciprocità.

In ottica esistono dispositivi, noti come *mode sorters*, che permettono di separare diverse componenti OAM da un fascio composito. Analogamente, con funzionalità inversa, può essere impiegato per raggruppare diversi modi OAM su un unico fascio.

Il dispositivo che è stato utilizzato per l'esperimento (figura 5) permette, proprio come un *mode sorter*, di estrarre le due componenti OAM  $\ell = \pm 1$  dal fascio incidente sulla schiera ricevente. In modo analogo, quando collegato alle quattro antenne dell'array trasmittente, lo stesso dispositivo permette di confezionare un fascio costituito dalla sovrapposizione

di questi due contributi OAM. Il dispositivo utilizza componenti RF a larga banda ed è stato progettato secondo un algoritmo di sintesi ottimizzato [23]. Naturalmente, a causa della limitata tolleranza dei componenti RF, un certo crosstalk può essere presente tra i modi OAM generati, con conseguente riduzione dell'isolamento tra i canali che veicolano i segnali.

## 5. TEST PRELIMINARI

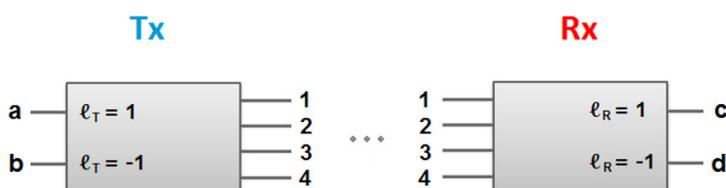
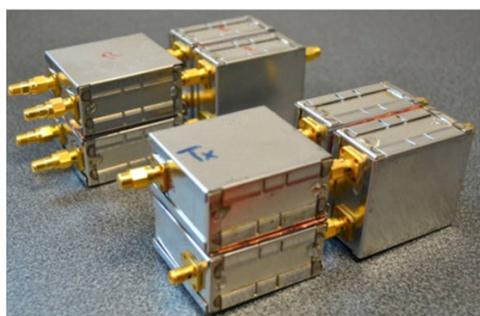
### 5.1 CARATTERIZZAZIONE DEI MODE SORTERS

I due *mode sorters* sono stati testati singolarmente in laboratorio. Il massimo sbilanciamento in ampiezza tra le quattro porte dell'antenna è stato misurato intorno a 0.2 dB e il massimo errore di fase stimato rispetto ai valori nominali (multipli interi di  $90^\circ$ ) tra le quattro porte dell'antenna è risultato pari a  $2.8^\circ$  (ossia, 5% del vettore errore).

Essendo un dispositivo a banda larga analogico, operante alle alte frequenze e senza capacità di tuning, le prestazioni ottenute sono state considerate accettabili per gli scopi del nostro esperimento.

Al fine di definire un limite superiore all'isolamento tra i canali OAM ottenibile da questa coppia di *mode sorters*, sono state valutate le prestazioni della connessione a cascata dei due dispositivi. Il segnale in ingresso alla porta *a* del *mode sorter* in trasmissione risulta sostanzialmente convogliato alla porta *c* del *mode sorter* in ricezione. Analogamente, il segnale alla porta *b* risulta in ampia parte convogliato alla porta *d*.

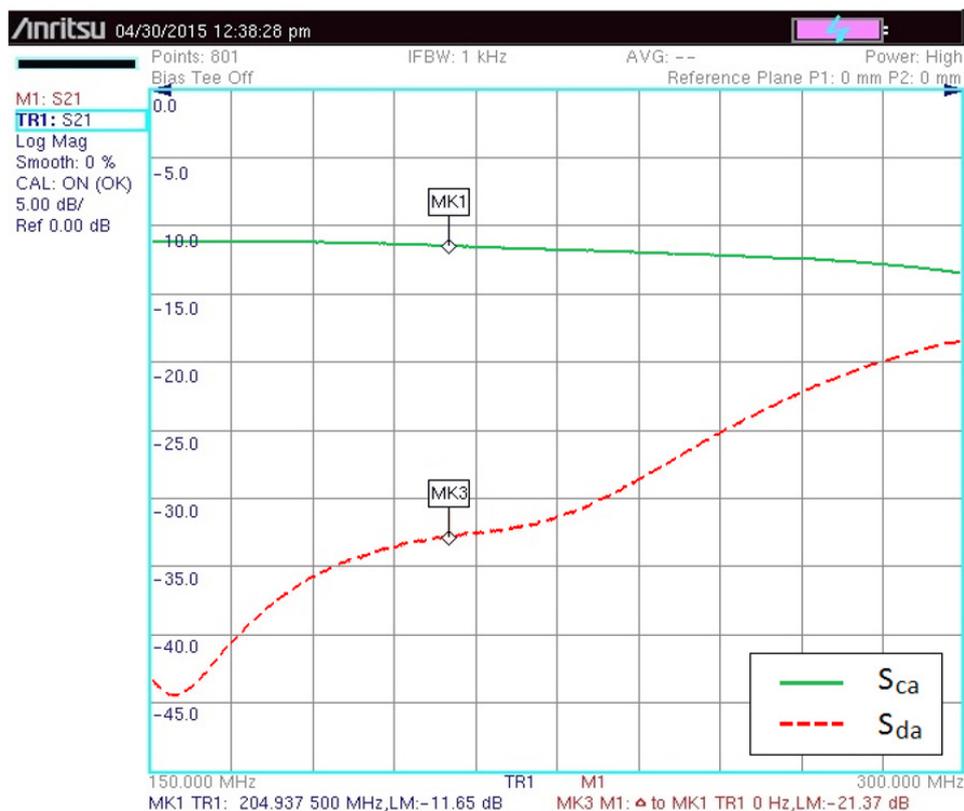
Fig. 5 – Immagine (sinistra) e schema (destra) dei *mode sorters* impiegati nell'esperimento



Per le misure è stato utilizzato un *Vector Network Analyzer (VNA) Anritsu MS2026C*; in figura 6 è mostrato, in funzione della frequenza, il parametro di trasmissione  $S_{21}$ , che definisce, in un dispositivo a due porte, la potenza trasferita dalla porta 1 alla porta 2. La curva verde continua corrisponde al parametro di trasmissione dalla porta a alla porta c al variare della frequenza, mentre quella rossa tratteggiata si riferisce al transito dalla porta a alla porta d. L'isolamento del canale è definito come il rapporto tra la potenza relativa al percorso principa-

le e quella relativa al percorso indesiderato, ovvero, in unità logaritmiche, la differenza tra le due curve. In particolare, alla frequenza utilizzata, l'isolamento è la differenza tra i valori indicati dai markers **MK1** e **MK3** in figura. Come si può osservare, dunque, alla frequenza di interesse l'isolamento del canale è pari a 21.4 dB. Nelle trasmissioni in spazio libero, naturalmente, questo isolamento sarà alterato da altri fattori quali sbilanciamenti dei cavi, imperfezioni sulle antenne e riflessioni da ostacoli nelle vicinanze.

Fig. 6 – Prestazioni dei mode sorters in cascata: andamento del parametro di trasmissione  $S_{21}$  rispetto alla frequenza



## 5.2 MISURE PRELIMINARI SUL COLLEGAMENTO

Una sessione di misure sul tetto dell'edificio ha permesso infine di valutare quale livello di degrado introducano gli aspetti poc'anzi citati. In quest'occasione è stato inoltre possibile validare sperimentalmente il concetto di *OAM-link Pattern*, sia per il calcolo del link budget per il caso **OAM**,

sia per valutare il diagramma d'antenna ottenibile nel caso **OAM**.

Per misurare i parametri di trasmissione RF è stato utilizzato un *Vector Network Analyzer (VNA) Hewlett-Packard HP8753B*, che, per quanto non recentissimo,

	$P_r/P_t$ (dB) ( $\ell = 0$ )	$P_r/P_t$ (dB) ( $\ell = 1$ )
Approccio teorico	-24.54	-42.85
Equazione di Friis	-24.40	–
Simulazione COMSOL	-24.69	-42.96
Esperimento	-25.5	-43

Tab. 1 – Link budget  $P_r/P_t$  valutato tramite quattro diversi approcci per la coppia di UCA considerata. Le configurazioni riceventi sono  $\ell_R = \ell_T = \{0, 1\}$

dispone degli accessi RF diretti a valle della sezione *S-parameter Test Set*. Ciò ha permesso di misurare simultaneamente i segnali  $\ell_R=1$  e  $\ell_R=-1$ .

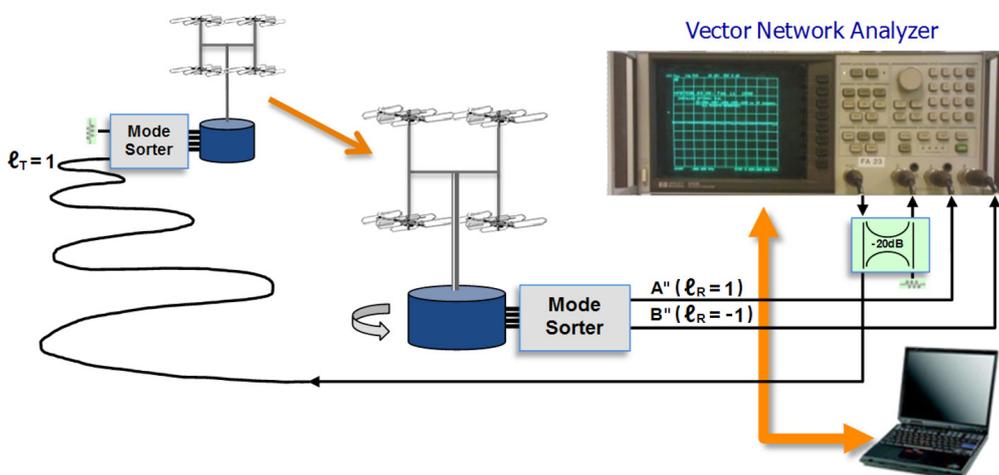
Dall'uscita del **VNA** parte il segnale sorgente, che è stato indirizzato al sito trasmittente mediante un cavo coassiale a basse perdite lungo 100 m, per alimentare una delle due porte del *mode sorter* in trasmissione. In ricezione, i segnali risultanti dalle porte **c** ( $\ell_R=1$ ) e **d** ( $\ell_R=-1$ ) del *mode sorter* sono stati connessi alle porte d'ingresso del **VNA**, mentre l'ingresso **R** è stato alimentato con il segnale di riferimento trasmesso dagli accoppiatori direzionali. Il diagramma a blocchi del setup è mostrato in figura 7.

Una calibrazione preliminare è stata effettuata connettendo direttamente le quattro uscite del *mode sorter* in trasmissione con gli ingressi del *mode sorter* in ricezione, compreso il cavo da 100m; i risultati, incluse le perdite del cavo, sono stati memorizzati su un file per calibrazione offline. La **UCA** trasmittente è stata posta su un cavalletto, mentre quella

ricevente è stata montata su un supporto rotante professionale con goniometro a 360°. Purtroppo la disposizione meccanica ha permesso di esplorare soltanto  $\pm 2^\circ$  in elevazione. In ogni sessione, prima della scansione angolare, la direzione dell'asse del fascio è stata opportunamente ottimizzata sia in azimut che in elevazione. In tutti i test eseguiti con il **VNA** è stato preso in esame l'intero intervallo di frequenze 150÷300 MHz, che comprende la banda TV VHF. I dati misurati sono stati acquisiti su un PC connesso al **VNA**.

Dai dati raccolti è stato quindi possibile valutare, al variare dell'angolazione dell'antenna, il parametro di trasmissione  $S_{21}$  per il modo desiderato e l'isolamento tra i due canali. In condizioni di puntamento ottimale, il rapporto  $P_r/P_t$  tra potenza ricevuta e potenza trasmessa risulta pari a -43 dB, mentre l'isolamento tra i modi è pari a circa 15 dB. La tabella 1 riporta la stima del rapporto  $P_r/P_t$  valutato con i diversi approcci considerati nella nostra analisi, mostrando un buon accordo tra risultati teorici, numerici e sperimentali.

Fig. 7 – Diagramma a blocchi del setup sperimentale per la trasmissione del modo  $\ell_T=1$



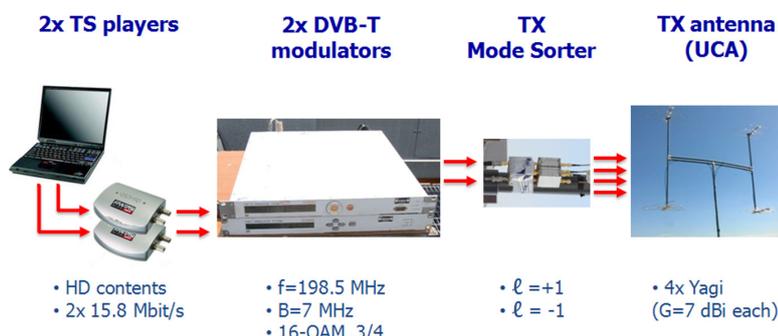


Fig. 8 – Setup della postazione trasmittente

## 6. TRASMISSIONE SPERIMENTALE SIMULTANEA DI DUE SEGNALI DVB-T

### 6.1 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DELL'ESPERIMENTO

Com'è ben noto, il fattore cruciale nelle prestazioni di un collegamento RF è il rapporto  $C/(N+I)$ , dove  $C$  è la potenza di segnale ricevuto,  $N$  la potenza di rumore del ricevitore, mentre  $I$  è un qualsiasi disturbo incoerente nella banda del segnale. Nel nostro caso, naturalmente, l'interferenza proveniente da ciascun altro modo OAM può essere considerata incoerente, poiché i due flussi dati modulanti sono statisticamente indipendenti, ed è sostanzialmente gaussiana nel caso di segnale OFDM e uniforme nello stesso segmento spettrale. Pertanto, è possibile assimilare  $I$  a rumore gaussiano bianco. Nel caso di un collegamento breve,  $N$  è di diversi ordini di grandezza inferiore a  $I$ , quindi  $C/(N+I) \sim C/I$ . Quest'ultimo, nel nostro caso, è l'isolamento ottenibile tra i due canali OAM, qui di seguito assimilato al rapporto segnale rumore (SNR). Avendo dunque a disposizione un  $C/I=15$  dB, si è trattato di individuare quale tipo di modulazione fosse adeguata per il collegamento in questione. Lo standard DVB-T (ETSI EN 300 744,

v1.5.1 (2004-06)) permette all'operatore di rete di adattare lo schema di modulazione e il code rate all'SNR disponibile. In tabella 2 sono riportate alcune configurazioni, con i code rate e l'SNR richiesto per ricezione *quasi error free* (QEF), ossia con meno di un errore visibile a video all'ora, corrispondente ad un tasso di errore sul bit di  $10^{-11}$ .

In realtà tali prestazioni dichiarate sul documento ETSI sono simulate: un'ulteriore perdita di implementazione (approssimativamente di 1 dB) si riscontra nei ricevitori TV commerciali. Al fine di riservare un po' di margine al valore atteso di 15 dB, è stata adottata la modulazione 16-QAM con code rate 3/4. Questa configurazione ha permesso di trasmettere due flussi video/audio di 15.8 Mbit/s. In figura 8 è riportata la struttura del sistema trasmittente dell'esperimento con l'annotazione dei principali parametri.

I due diversi flussi TV con programmi video/audio in alta-definizione (HD), precedentemente immagazzinati su un PC, sono stati riprodotti simultaneamente mediante due adattatori di interfaccia con uscita DVB-ASI (*Asynchronous Serial Interface*).

Tab. 2 – Bit rate e SNR richiesti per una ricezione QEF (*quasi error free*)

Modulation	Code rate	SNR	Bitrate (Mbit/s) @ $\Delta/TU = 1/32$ , 7 MHz VHF mode	Bitrate (Mbit/s) @ $\Delta/TU = 1/32$ , 8 MHz UHF mode
QPSK	7/8	7.7	9.237	10.56
16-QAM	1/2	8.8	10.556	12.06
16-QAM	2/3	11.1	14.075	16.09
16-QAM	3/4	12.5	15.834	18.10
16-QAM	5/6	13.5	17.594	20.11
16-QAM	7/8	13.9	18.473	21.11
64-QAM	1/2	14.4	15.834	18.10

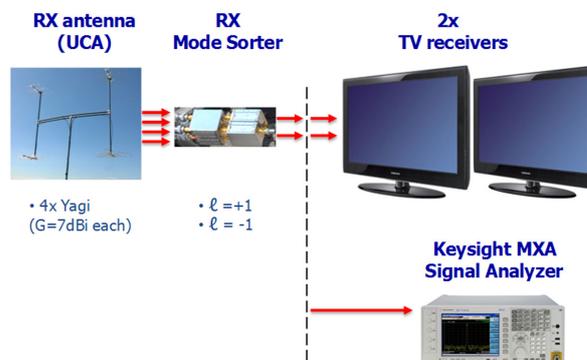


Fig. 9 – Setup della postazione ricevente

I flussi ASI sono stati quindi inviati a due modulatori DVB-T PT5780, entrambi operanti su 198.5 MHz, in modalità con larghezza di banda di 7 MHz. La potenza RF utilizzata in uscita a ciascun modulatore è stata impostata a 1 mW.

La struttura della postazione ricevente è mostrata in figura 9. I segnali ricevuti dal sistema antenna sono stati separati nelle componenti OAM  $\ell=1$  e  $\ell=-1$  dal mode sorter ricevente, a sua volta collegato a due ricevitori DVB-T commerciali identici. Entrambi i ricevitori TV sono stati sintonizzati sul canale 198.5 MHz. Dopo l'esperimento di ricezione, ciascun ricevitore TV è stato disconnesso e il segnale è stato inviato ad un analizzatore di segnale Keysight MXA N9020A con opzione di analisi DVB-T/T2 per una valutazione oggettiva della qualità del segnale OFDM ricevuto.

## 6.2 RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

Assumendo un corretto puntamento tra le schiere considerate, entrambi i ricevitori TV hanno dimostrato di ricevere simultaneamente e in modo corretto i due programmi TV (figura 10). Occorre sottolineare che l'esperimento è stato condotto in una giornata molto ventilata e la limitata rigidità meccanica del palo in PVC dell'antenna non ha aiutato a garantire un puntamento costante e ottimale.

Come noto, in presenza di rumore e/o interferenza, un sistema di trasmissione digitale TV non presenta errori sullo schermo fino a quando l'SNR non si avvicina ad una soglia critica. Quindi, il margine nella qualità del segnale ricevuto non può essere stimato dall'immagine sullo schermo, ma deve es-



Fig. 10 – Immagine dei due canali TV ricevuti simultaneamente

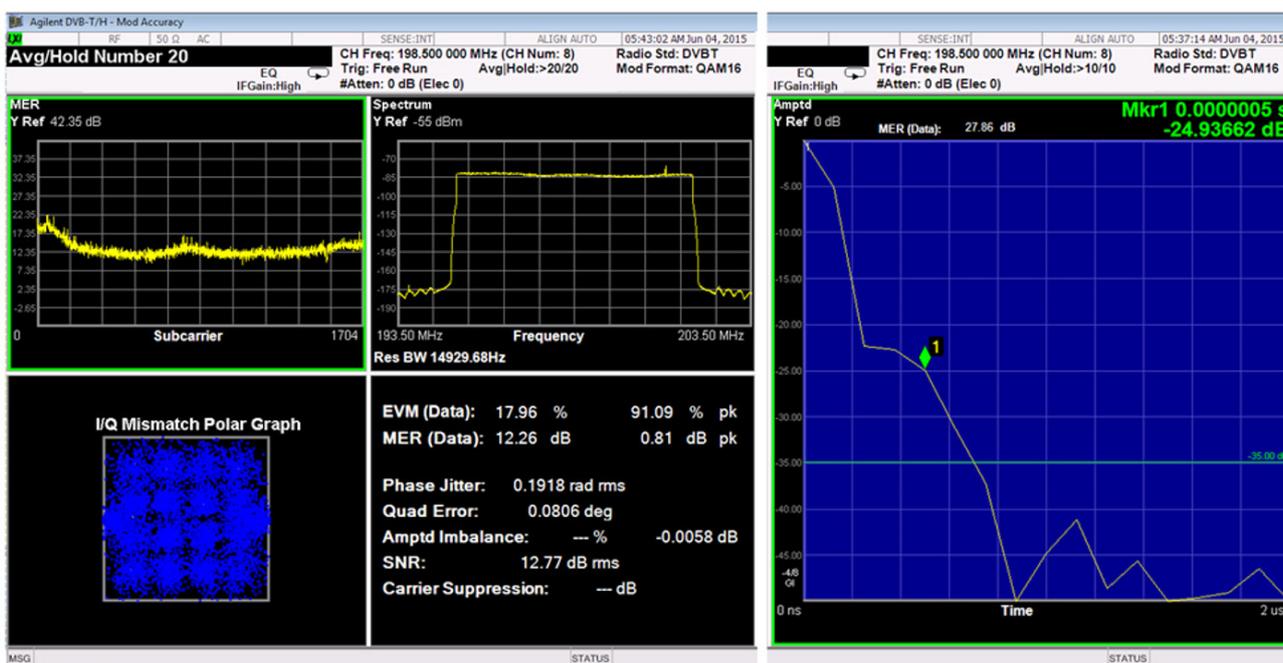
essere valutato solo tramite apposite apparecchiature. L'analizzatore di segnale *MXA* con opzione DVB-T/T2 è in grado di misurare diversi parametri di qualità del segnale ricevuto. In particolare, questo strumento può stimare l'*SNR* e il *MER (Modulation Error Ratio)*, che è il rapporto tra la potenza *root mean square* del vettore di riferimento e la potenza del vettore errore, definito in decibel come:  $MER=10*\log_{10}(P_{signal}/P_{error})$ .

In figura 11 è mostrata la risposta all'impulso del canale misurato (*CIR*) per il canale OAM  $\ell=1$ . Il picco principale, Time = 0, Amptd = 0 dB, è relativo al percorso di propagazione diretto; a circa 300 ns altre componenti sono visibili ad un livello di circa -22 dB. Questo indica che alcuni percorsi di propagazione con un ritardo di circa 300 ns erano presenti, 22 dB sotto il livello del segnale principale (per  $\ell=1$ ) e dà un'idea dell'ambiente riflettente attorno al sito

scelto per l'esperimento: 300 ns di ritardo temporale indicano una differenza della distanza di propagazione di 100 m.

Durante la nostra osservazione con l'analizzatore *MXA*, l'isolamento tra i canali *OAM* fluttuava da circa 11.2 dB (cattivo puntamento) a 15 dB (buon puntamento) a causa del vento. L'ultimo valore è in linea con l'isolamento trovato durante i test preliminari. In corrispondenza di episodi forti di vento alcuni errori potevano comparire sullo schermo. In questo caso, il problema si risolveva passando alla modulazione *16-QAM*, code rate *2/3*. Tuttavia, è importante sottolineare come un dispositivo con capacità di cancellazione di interferenza adattativa sarebbe in grado di ridurre l'inaccuratezza dovuta ad un puntamento non perfetto e alla presenza del vento, migliorando l'isolamento tra i canali.

Fig. 11 – Sinistra: schermata dell'Analizzatore di segnale, in un momento in cui l'*SNR* misurato è 12.77 dB. Destra: risposta all'impulso del canale (*CIR*) per il canale relativo al modo OAM  $\ell=1$ .



## 7. CONCLUSIONI

In questo articolo è stata presentata un'analisi sperimentale riguardante la trasmissione simultanea di fasci **OAM** tra schiere circolari di antenne. La realizzazione di tale esperimento ha dimostrato la possibilità:

1. di implementare una comunicazione **OAM** multimodo alla stessa frequenza e nella regione di *far-field* usando un singolo array di antenne sia in trasmissione che in ricezione;
2. di effettuare una trasmissione affidabile utilizzando un numero minimale di antenne in entrambe le schiere.

I test effettuati hanno permesso inoltre di:

3. validare sperimentalmente il concetto di *OAM-link pattern*, ottenendo dati di misura che sostanzialmente coincidono con i risultati analitici;
4. testare le funzionalità dei *mode sorters* da noi progettati per il multiplexing/demultiplexing di fasci **OAM** tramite schiere circolari uniformi di antenne, mostrando un soddisfacente isolamento tra i modi e una buona operatività in banda larga.

Dalla seppur limitata sperimentazione effettuata si possono trarre alcune importanti conclusioni riguardanti l'eventuale utilizzo dell'**OAM** per moltiplicare la capacità di un tipico canale VHF/UHF per il servizio televisivo terrestre.

E' dunque possibile riutilizzare il canale a radiofrequenza?

Entro certi limiti, sì: l'esperimento ha permesso di moltiplicare per due la capacità, e, se si fosse leggermente complicata la struttura dei *mode sorters*, si sarebbe potuto facilmente trasmettere simultaneamente,

con le stesse antenne, anche il modo base  $\ell=0$ , moltiplicando la capacità per tre.

Si noti che questo riutilizzo della frequenza con tecnica **OAM** non ha fatto uso della separazione delle polarizzazioni, da cui si potrebbe ottenere un ulteriore raddoppio della capacità.

Un aspetto limitante, come si è visto, è l'isolamento tra i diversi modi **OAM**. Nell'esperimento si sono ottenuti 15 dB di isolamento: indubbiamente questo valore potrebbe essere ampiamente migliorato con l'utilizzo di tecniche di *signal processing* adattative simili a quelle adottate nei ponti radio per la cancellazione da polarizzazione incrociata.

Per ricevere correttamente le onde **OAM** è necessario che il vortice incida esattamente sul sistema ricevente, cosa che di solito viene ottenuta allineando le antenne trasmittente e ricevente. Tale esigenza poco si concilia con il caso della diffusione televisiva, in cui da un sito trasmittente si deve tipicamente servire un vasto settore angolare. Anche riuscendo ad ovviare in parte a questa limitazione mediante qualche soluzione tecnica (è prevedibile che con *signal processing* adattativo si riesca ad andare in questa direzione), rimane un aspetto negativo piuttosto grave, già anticipato dai risultati delle analisi teoriche, e confermato ora dall'esperimento: i modi **OAM** subiscono un'attenuazione con la distanza che è molto più elevata di quella dell'onda EM convenzionale. Per i modi  $\ell=\pm 1$  qui utilizzati la potenza ricevuta decade infatti con la quarta potenza della distanza dal trasmettitore.

Sebbene queste soluzioni non sembrano essere facilmente applicabili in ambito broadcast, il loro impiego per trasmissioni a breve raggio, quali wireless LAN, potrebbe comunque rappresentare una valida alternativa alle tecniche convenzionali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Cagliero, R. Gaffoglio, A. De Vita e B. Sacco, [Onde vorticose: una nuova prospettiva per le comunicazioni radio?](#), in "Elettronica e Telecomunicazioni", Anno LXV, Numero 1, Giugno 2016, pp. 5-15.
- [2] A. Cagliero, R. Gaffoglio, A. De Vita e B. Sacco, [Momento Angolare Orbitale: rivisitazione del concetto di Link Budget per un collegamento radio](#), in "Elettronica e Telecomunicazioni", Anno LXV, Numero 1, Giugno 2016, pp. 16-21.
- [3] D. G. Grier, [A revolution in optical manipulation](#), in "Nature", vol. 424, pp. 810-816, 2003.
- [4] M. Harwit, [Photon orbital angular momentum in astrophysics](#), in "The Astrophysical Journal", vol. 597, Novembre 2003, pp. 1266-1270.
- [5] G. Anzolin, F. Tamburini, A. Bianchini, G. Umbrico e C. Barbieri, [Optical vortices with starlight](#), in "Astronomy and Astrophysics", vol. 488, Numero 3, 2008, pp. 1159-1165.
- [6] G. Berkhout e M. Beijersbergen, [Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects](#), in "Physical Review Letters", vol. 101, 100801, 2008.
- [7] N. M. Elias II, [Photon orbital angular momentum in astronomy](#), in "Astronomy & Astrophysics", vol. 492, Numero 3, Dicembre 2008, pp. 883-922.
- [8] G. Molina-Terriz, J. P. Torres e L. Torner, [Management of the Angular Momentum of Light: Preparation of Photons in Multidimensional Vector States of Angular Momentum](#), in "Physical Review Letters", vol. 88, 013601, 2001.
- [9] A. Vaziri, G. Weihs e A. Zeilinger, [Superpositions of the orbital angular momentum for applications in quantum experiments](#), in "Journal of Optics B: Quantum Semiclassical Optics", vol. 4, Numero 2, 2002, pp. S47-S51.
- [10] B. Jack, A. M. Yao, J. Leach, et al., [Entanglement of arbitrary superpositions of modes within two-dimensional orbital angular momentum state spaces](#), in "Physical Review A", vol. 81, 43844, Aprile 2010.
- [11] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett et al., [Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum](#), in "Optics Express", vol. 12, Issue 22, 2004, pp. 5448-5456.
- [12] J. Wang, J.-Y. Yang, I.-M. Fazal et al., [Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing](#), in "Nature Photonics", Numero 6, 2012, pp. 488-496.
- [13] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm et al., [Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain](#), in "Physical Review Letters", vol. 99, Issue 8, 087701, 2007.
- [14] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini e F. Romanato, [Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test](#), in "New Journal of Physics", vol. 14, Issue 3, 2012.
- [15] M. J. Padgett e L. Allen, [Light with a twist in its tail](#), in "Contemporary Physics", vol. 41, Issue 5, 2000, pp. 275-285.
- [16] M. V. Berry, [Optical vortices evolving from helicoidal integer and fractional phase steps](#), in "Journal of Optics A: Pure and Applied Optics", vol. 6, Numero 2, Gennaio 2004, pp. 259-268.
- [17] J. Salo et al., [Holograms for shaping radio-wave fields](#), in "Journal of Optics A: Pure and Applied Optics", vol. 4, Numero 5, Agosto 2002, pp. S161-S167.
- [18] J. R. Trinder, [Parabolic reflector](#), WIPO Patent Application WO/2005/069443, pubblicazione 2005.
- [19] S. M. Mohammadi, L. K. S. Daldorff, J. E. S. Bergman et al., [Orbital angular momentum in radio - A system study](#), in "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", vol. 58, Issue 2, 2010, pp. 565-572.

- [20] R. Gaffoglio, A. Cagliero, A. De Vita e B. Sacco, [\*OAM multiple transmission using uniform circular arrays: Numerical modeling and experimental verification with two digital television signals\*](#), in "Radio Science", vol. 51, Numero 6, Giugno 2016, pp. 645-658.
- [21] F. Tamburini, E. Mari, B. Thidé, C. Barbieri e F. Romanato, [\*Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques\*](#), in "Applied Physics Letters", vol. 99, Numero 20, Novembre 2011.
- [22] A. Cagliero, A. De Vita, R. Gaffoglio e B. Sacco, [\*A New Approach to the Link Budget Concept for an OAM Communication Link\*](#), in "IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters", vol. 15, pp. 568 - 571, 2016.
- [23] B. Sacco e A. De Vita, [\*System for transmission and/or reception of signals having electromagnetic modes with orbital angular momentum, and device and method thereof\*](#), WIPO Patent Application WO/2015/159264, pubblicazione 2015.