

Sviluppo di circolatori in guida d'onda per phased-array radar in Banda X

Andreina Armogida¹, Matteo Biggi², Luciano Ricci³

¹RTW Ride The Wave, Pisa, ²Officine Pasquali, Firenze, ³Oerlikon Contraves, Roma

Abstract— Viene descritto il progetto di un circolatore a ferrite per applicazione in un sistema radar in banda X. I requisiti meccanici ed elettrici del circolatore sono legati alla particolarità del sistema di applicazione, che prevede un'antenna phased-array costituita da più righe alimentate separatamente. E' dunque necessario impiegare uno stack di circolatori schermati magneticamente, ognuno dei quali viene collegato ad una riga dell'antenna. Il circolatore, realizzato in guida d'onda ribassata con tre standard d'interfaccia differenti sulle porte, presenta basse perdite di inserzione e un tracking di fase rispetto ad un riferimento comune. Il corretto funzionamento del dispositivo deve essere garantito su tutta la banda operativa di frequenze anche in condizioni ambientali estreme, di temperatura, vibrazione e shock meccanico.

Vengono presentate le fasi dello sviluppo del circolatore, a partire dalla definizione delle specifiche, alla progettazione elettromagnetica, alla progettazione meccanica, alla realizzazione del dispositivo, ai test di collaudo RF, fino alle prove di qualifica ambientale.

Index Terms— circolatori, dispositivi in guida d'onda, dispositivi a ferrite, duplexer.

I. INTRODUZIONE

IL circolatore a ferrite è un dispositivo largamente utilizzato come separatore dei segnali in sistemi ricetrasmittitori a microonde, ed in particolare per applicazioni radar di tipo monostatico. Il circolatore funziona da duplexer, permettendo al ricevitore e al trasmettitore di usufruire di un'unica antenna, pur operando nella stessa banda di frequenza. Il principio di funzionamento del circolatore è ben noto da oltre 50 anni [1] e si basa sulle proprietà ferromagnetiche di un elemento (o una coppia di elementi) di ferrite che viene posto al centro di una giunzione a Y simmetrica e polarizzato mediante un campo magnetico di tipo statico. Il dispositivo è dimensionato in modo tale che alla frequenza operativa i due modi risonanti generati all'interno della ferrite si sommano sulla porta accoppiata e si cancellano sulla porta isolata, cosicché il segnale fluisca tra le porte adiacenti in un verso, ma non in verso contrario.

Andreina Armogida fa parte di RTW Ride The Wave S.r.l., Via. A. Bassi 5, 56121 Pisa (Tel. e Fax: 050-9656752; e-mail: aarmogida@rtw.it).

Matteo Biggi, fa parte di Officine Pasquali S.r.l., Via Palazzo dei Diavoli 124/B, 50142 Firenze (e-mail: m.biggi@officinepasquali.it).

Luciano Ricci fa parte di Oerlikon Contraves S.p.A., Via Affile 102, 00131 Roma (e-mail: l.ricci@oci.it).

Il circolatore a ferrite descritto nel presente lavoro presenta caratteristiche peculiari, sia per il layout che per i requisiti elettrici, da cui ne è derivata la necessità dello sviluppo di un dispositivo custom, non altrimenti reperibile sul mercato. Il circolatore è stato ideato per essere impiegato in una configurazione stacked di più elementi posti a distanza ravvicinata, in cui ciascun circolatore collega i moduli trasmettente e ricevente di un radar monostatico in banda X alla riga di un'antenna di tipo phased-array, realizzata in guida d'onda fessurata. Il circolatore deve essere dunque schermato magneticamente per evitare qualsiasi interferenza tra circolatori adiacenti nelle condizioni operative. I diversi circolatori dello stack devono presentare un'equità di ampiezza e di fase in modo tale da non introdurre errori sui segnali in ingresso alle righe del phased-array, che andrebbero a scapito di una corretta calibrazione del sistema. Deve essere poi garantito un tracking in temperatura sia dell'ampiezza che della fase. Inoltre, poiché il sistema radar trasmette a potenza medio-bassa, inferiore al KW e, presentando le guide d'onda fessurate una direttività non spinta (essendo direttive soltanto su un piano), è necessario limitare le perdite per garantire la portata del sistema. Dunque i circolatori devono presentare un basso livello di perdite di inserzione in tutta la banda operativa e al variare della temperatura.

Le principali problematiche in fase di progettazione, hanno riguardato la scelta di una ferrite tale da poter soddisfare i requisiti elettrici del circolatore al variare della temperatura. Una progettazione accurata, in cui si tiene conto delle tolleranze dei parametri elettrici e meccanici e delle loro variazioni legate alle possibili condizioni di temperatura operativa, ed un perfetto controllo dei processi coinvolti nella realizzazione meccanica, sono, di fatto, fondamentali per garantire la qualità, l'affidabilità e la stabilità delle prestazioni del circolatore, anche in condizioni ambientali estreme, e per assicurare l'intercambiabilità tra unità diverse, requisito indispensabile per l'applicazione.

II. DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE

Facendo riferimento allo schema di funzionamento descritto in Fig. 1, il layout del circolatore presenta le seguenti interfacce elettriche:

- Porta 1 (output, collegata alla Rx): connettore SMA;
- Porta 2 (input/output, collegata all'antenna): guida d'onda WR90 ribassata;

- Porta 3 (input, collegata alla Tx): connettore TNC.

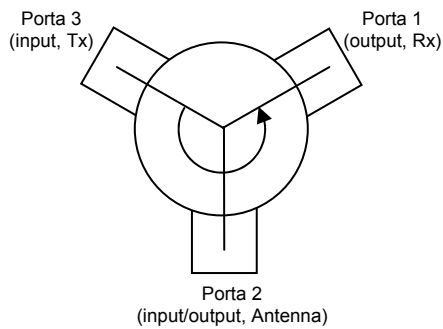


Fig. 1. Schema di funzionamento del circolatore.

Il segnale proveniente dal trasmettitore, Tx, viene iniettato sulla Porta 3 d'ingresso, attraversa il circolatore e alimenta l'antenna per mezzo della Porta 2, che funziona in questo caso come porta d'uscita. Parallelamente, il segnale ricevuto dall'antenna entra nel circolatore dalla Porta 2 (in questo caso porta d'ingresso) ed esce dalla Porta 1 che è collegata al ricevitore, Rx. Un buon isolamento tra la Porta 3 e la Porta 1 è necessario per poter garantire la protezione del ricevitore da picchi di potenza provenienti dal trasmettitore.

In base al principio di funzionamento sopra descritto, le specifiche elettriche del circolatore sono di seguito elencate:

- Banda percentuale: 5.3 % in banda X
- VSWR $\leq 1.2:1$ (RL ≤ -20.08 dB), sulle tre porte
- Isolamento Tx/Rx: $|S_{13}| < -20$ dB
- Insertion Loss sui percorsi Tx e Rx: $|S_{23}|, |S_{12}| = 0.3$ dB ± 0.1 dB
- Tracking di fase tra i dispositivi: $\pm 5^\circ$ max.

Per avere un tracking di fase uniforme si fa riferimento ad un dispositivo "golden reference", che verrà utilizzato come riferimento per la taratura di fase di tutte le unità prodotte.

Le specifiche devono essere soddisfatte su tutta la banda operativa nel range di temperatura da -46°C a $+85^\circ\text{C}$. Il circolatore è realizzato in alluminio per minimizzarne il peso, e deve soddisfare dei vincoli di ingombro imposti dal layout del sistema in cui è inserito.

III. PROGETTAZIONE DEL CIRCOLATORE

Il circolatore realizzato è del tipo "below resonance" [2], in cui la ferrite è magnetizzata al di sotto della risonanza. La ferrite ha un ruolo determinante nel funzionamento del circolatore, dunque il primo passo è stata quella di scegliere una ferrite ad hoc per l'applicazione. È stato utilizzato un garnet di tipo YIG, individuato tra i vari disponibili da catalogo, e scelto tenendo conto dell'effetto dei parametri caratteristici della ferrite sui parametri elettrici del circolatore [3], ed in particolare considerando che:

- la larghezza di banda è legata al parametro $4\pi M_s$

(Saturation magnetization), che va scelto in base alla frequenza operativa;

- le basse perdite sono determinate da un basso valore dei parametri ΔH_{eff} (Effective line width) e ΔH (Ferromagnetic resonance line width);

- la stabilità in temperatura è legata al coefficiente $\alpha = \Delta M_s / (M_s \Delta T)$, definito dalla variazione del parametro di magnetizzazione M_s su certo range di temperatura ΔT , solitamente da -20°C a 60°C .

Una volta individuata la ferrite, la progettazione elettromagnetica del circolatore è stata eseguita utilizzando CST Studio Suite 2006. In una prima fase è stato dimensionato un circolatore interamente in guida d'onda ribassata, che costituisce il "core" del circolatore finale, in cui, in una seconda fase, sono stati inseriti i connettori SMA e TNC come da specifica tecnica. Il circolatore, il cui modello è fornito in Fig. 2a, è costituito da una giunzione a Y simmetrica al centro della quale sono inserite due pastiglie cilindriche di ferrite, attaccate sulle pareti superiore e inferiore della guida d'onda. L'adattamento di impedenza è stato ottenuto esclusivamente mediante gradini. Il circolatore è stato progettato in modo tale da avere prestazioni ottime nella banda operativa a temperatura ambiente nominale, $T=25^\circ\text{C}$, e tenendo conto dell'effettiva realizzabilità del dispositivo, introducendo, ad esempio, già in partenza i raggi di lavorazione meccanica.

Una volta determinato il campo magnetico necessario per il corretto funzionamento della ferrite, è stato dimensionato il circuito magnetico, secondo la struttura illustrata in Fig. 2b. Il circuito è costituito da due magneti permanenti, anch'essi con caratteristiche stabili in temperatura e da un circuito di richiusura in ferro dolce che realizza la schermatura magnetica. Per il dimensionamento del circuito magnetico è stato utilizzato il tool di analisi magnetostatica di CST Studio Suite.

Sul circolatore è stata poi eseguita un'analisi di sensibilità, per verificare la robustezza del progetto sia alle variazioni della temperatura operativa che alle tolleranze di fabbricazione.

Nello studio in temperatura si è tenuto conto delle dilatazioni termiche delle pareti di alluminio della guida e delle variazioni in temperatura dei parametri caratteristici dei magneti e della ferrite. Sono stati dunque verificati gli effetti delle suddette variazioni sui parametri elettrici del circolatore alle due temperature limite di funzionamento, -46°C e 85°C .

Sono state poi esaminate le variazioni dei parametri elettrici del circolatore rispetto alle tolleranze elettriche della ferrite e alle tolleranze di costruzione meccanica, in modo tale da identificare due "worst case" nella condizione nominale di temperatura 25°C .

I due tipi di analisi sono stati poi combinati per determinare i "worst case" alle temperature limite 85°C e -46°C .

Il corretto funzionamento del circolatore è stato verificato anche nel caso di offset delle ferriti rispetto alla posizione centrale nominale, sulla base delle tolleranze di assemblaggio.

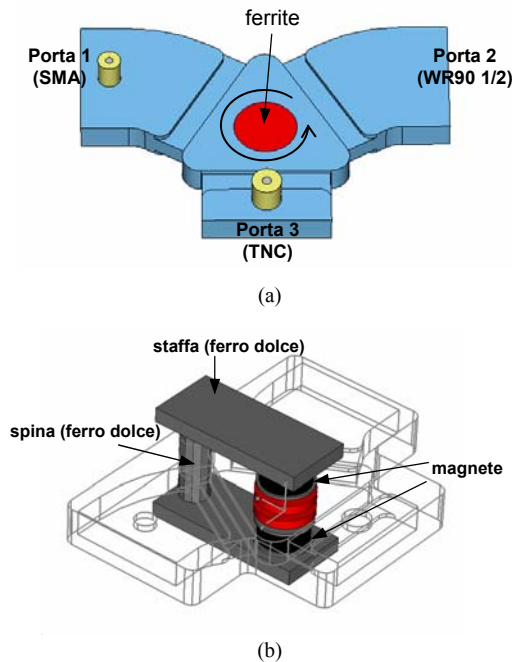


Fig. 2. Modello dell'interno del circolatore (a), e del circuito magnetico (b), per l'analisi elettromagnetica e magnetostatica.

Infine, è stata analizzata l'entità degli accoppiamenti magnetici tra circolatori adiacenti posti in stack, esaminando le prestazioni del circolatore centrale nel caso di tre circolatori posti alla distanza di effettiva operazione. Ne è risultato che il circuito di richiusura magnetica ha capacità schermanti tali da garantire il corretto funzionamento del circolatore nella sua condizione operativa. La stessa prova è stata eseguita in fase di collaudo RF, mediante un set-up appositamente predisposto. Le misure hanno confermato quanto previsto dalle simulazioni.

IV. FABBRICAZIONE, COLLAUDI E QUALIFICHE

A. Realizzazione meccanica

Il processo di progettazione meccanica e fabbricazione che ha portato alla realizzazione del prodotto finale, è passato attraverso due fasi di prototipazione, in accordo con le fasi della progettazione elettromagnetica. Il primo prototipo è stato dunque un circolatore interamente in guida d'onda. L'interno del dispositivo è stato sviluppato tramite software CAD di progettazione meccanica, a partire dal modello elettromagnetico fornito dal simulatore. Il prototipo è stato realizzato assemblando due semigusci in alluminio ed il circuito di richiusura magnetica in ferro dolce. Il percorso interno del circolatore è stato realizzato per fresatura su macchina a controllo numerico di ognuno dei semigusci.

L'incollaggio delle ferriti, che devono sopportare le prove di vibrazione, viene realizzato mediante una colla speciale e secondo un'apposita procedura d'incollaggio.

Una volta verificata la robustezza del progetto elettromagnetico e meccanico mediante test RF sul circolatore in guida d'onda, è stato sviluppato il progetto meccanico del circolatore con i connettori SMA e TNC come da specifica. Anche in questo caso il circolatore è stato realizzato accoppiando due semigusci in alluminio e inserendo il circuito di richiusura magnetica in ferro dolce già utilizzato per il primo prototipo. Anche il secondo prototipo è stato sottoposto ai test RF e messo a punto. Sulla base dei risultati ottenuti, si è passati dunque alla realizzazione di una prima serie di quattro circolatori, che sono stati sottoposti ai collaudi RF ed alle prove di qualifica previste.

B. Collaudi RF

Tutti i test RF sono stati eseguiti al banco a microonde mediante analizzatore di reti vettoriale (VNA). La presenza di tre interfacce diverse sulle porte ha reso necessario definire una procedura di collaudo che prevede due diversi tipi di calibrazione, da effettuare in base alle porte ed ai parametri sotto test. È stato realizzato un kit di calibrazione in guida d'onda WR90 1/2, utilizzato per calibrare il VNA nella misura del VSWR sulla Porta 2. Una calibrazione standard in coassiale 3.5 mm viene invece utilizzata nelle misure di VSWR della Porta 1 (connettore SMA) e della Porta 3 (connettore TNC). In quest'ultimo caso è stata inserita sulla porta una transizione SMA-TNC, i cui parametri S sono stati sottratti dalla misura mediante la tecnica di de-embedding [4]. Una calibrazione standard in coassiale 3.5 mm viene effettuata anche per le misure di isolamento e perdite di inserzione. Le perdite delle transizioni SMA-WR90 1/2 e SMA-TNC vengono misurate accoppiando due transizioni identiche e acquisendo la misura del parametro S_{12} . Tali perdite vengono poi opportunamente sottratte dai valori acquisiti nelle misure di S_{12} tra le coppie di porte del circolatore. A titolo di esempio, nella misura di isolamento, eseguita tra la Porta 3 in TNC e la Porta 1 in SMA, è stata sottratta la perdita della transizione SMA-TNC; nella misura della perdita di inserzione tra la Porta 3 in TNC e la Porta 2 in WR90 1/2 sono state invece sottratte le perdite di entrambe le transizioni.

I risultati dei collaudi RF sui quattro circolatori hanno confermato la validità del progetto elettromagnetico e meccanico, con una evidente corrispondenza delle misure alle simulazioni.

Nella Tabella 1 viene fornito il report di collaudo RF a temperatura ambiente di uno dei quattro circolatori (S/N 201). Nella colonna a più destra è riportato il valore "peggiore" misurato nella banda operativa per ciascun parametro. Tale valore va confrontato con il corrispondente dato di specifica riportato nelle colonne 2 e 3. Si può notare come tutti i parametri misurati soddisfino le specifiche con un buon margine.

TABELLA 1
RISULTATI DI COLLAUDO RF DEL CIRCOLATORE S/N 201

PROVA	Valore MIN.	Valore MAX.	Unità di misura	Valore misurato
Insertion Loss P3-P2		0.4	dB	0.29
Insertion loss P2-P1		0.4	dB	0.19
VSWR P3		1.2:1	-	1.15
VSWR P1		1.2:1	-	1.16
VSWR P2		1.2:1	-	1.06
Isolamento P3- P1	20		dB	31.28

Per la verifica del tracking di fase, sono state acquisite in successione sui quattro circolatori le fasi sui percorsi Tx (Porta 3-Porta 2) e Rx (Porta 2-Porta 1), dopo aver effettuato una calibrazione della fase sulla prima acquisizione. Tale calibrazione annulla la misura di fase del circolatore preso come riferimento (il S/N 203), e associa alle acquisizioni successive sugli altri tre dispositivi, la misura della differenza di fase rispetto al circolatore di riferimento. Il risultato ottenuto per il percorso Tx è riportato nel grafico in Fig. 3. Lo scostamento massimo tra le curve è inferiore a 6° in tutta la banda operativa, che corrisponde ad una differenza di fase inferiore a $\pm 3^\circ$ rispetto ad un "golden reference" ideale opportunamente scelto sul valore di fase 3° . Analogamente si è proceduto sul percorso Rx, e anche in questo caso la specifica di fase è stata soddisfatta.

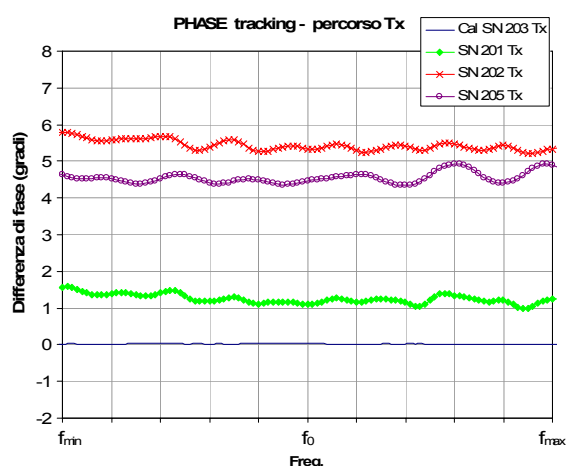


Fig. 3. Risultato della misura della differenza di fase sul percorso Tx dei quattro circolatori. La calibrazione è stata eseguita sul S/N 203.

C. Qualifiche ambientali

Il circolatore S/N 201 è stato sottoposto alle qualifiche in temperatura, vibrazione e shock meccanico.

Mediante un ciclo termico in camera climatica, il circolatore è stato portato in successione dalla temperatura di 25° alle due temperature limite di 85°C e -46°C . I

parametri elettrici del circolatore sono stati misurati a 25° (prima del ciclo termico), a 85° , a -46° e, infine, nuovamente a 25° (dopo il ciclo termico), per verificare la robustezza del dispositivo alle variazioni di temperatura. I test RF sono stati eseguiti sul range di frequenza da 8 a 10 GHz. I parametri elettrici, pur variando con la temperatura e degradandosi, rimangono in specifica sulla banda operativa. La robustezza del dispositivo è legata al fatto che, a temperatura ambiente il circolatore ha prestazioni molto buone nella banda operativa, con un buon margine rispetto alle specifiche e, inoltre, soddisfa le specifiche su una banda molto più estesa di quella richiesta (15% contro 5.3%).

La stessa procedura è stata ripetuta per le qualifiche in vibrazione e shock meccanico. In entrambi i casi, il circolatore, fissato alla tavola vibrante mediante un'apposita interfaccia meccanica, è stato sottoposto a sollecitazioni sui tre assi principali, secondo le modalità previste dalle norme MIL di riferimento. I test RF sono stati eseguiti dopo ogni prova di vibrazione/shock, per verificare la robustezza meccanica del circolatore.

Il circolatore ha infine superato tutte le prove di qualifica ambientale previste.

V. CONCLUSIONI

Sono state descritte le fasi di sviluppo di un circolatore custom in banda X, per applicazione in un sistema radar. Il dispositivo funziona correttamente su tutta la banda operativa anche in condizioni estreme di temperatura, e, a temperatura ambiente presenta una banda tre volte maggiore di quella richiesta. Partendo dai risultati ottenuti, gli sviluppi futuri prevedono la realizzazione di un nuovo dispositivo con specifiche analoghe e che funzioni correttamente, anche in condizioni estreme di temperatura, su una banda di frequenze molto più estesa.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Ing. Giorgio Giunta e l'Ing. Vittorio Dainelli di Oerlikon Contraves, responsabili dello sviluppo tecnico del progetto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. E. Fay and R. L. Comstock, "Operation of the ferrite junction circulator," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 13, pp. 15–27, January 1965.
- [2] *Circulators and isolators unique passive devices*, Application Note AN98035, Philips Semiconductors, Eindhoven, The Netherlands, 1998, pp. 13-14.
- [3] D. M. Pozar, *Microwave Engineering - 2nd Ed*, John Wiley & Sons, 1998, pp. 498–511.
- [4] *Agilent De-embedding and Embedding S-parameters networks using a Vector Network Analyzer*, Application Note 1364-1, Agilent Technologies, 2004.