

POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Informatica

Dipartimento di Elettronica e Informazione



**Progetto Stilo: studio e realizzazione prototipale di un
sistema di filtraggio digitale per la comunicazione
vocale pilota - navigatore**

Relatore: Prof. Sergio Savaresi

Correlatori: Ing. Enrico Silani

Ing. Fabio Corti

Tesi di Laurea di:

Massimiliano Carrara, matricola 667110

Giorgio Davide Gasparini, matricola 667048

Anno Accademico 2004-2005

Alle nostre famiglie

Sommario

Uno degli aspetti critici dello svolgimento di una gara di rally è la comunicazione tra il navigatore e il pilota che, guidando ad alta velocità su un percorso che non conosce, si affida completamente alle informazioni date in tempo reale dal collega. Quindi, in questo contesto, è molto pericoloso non capire o dover ripetere un'indicazione stradale: purtroppo la comunicazione tra il pilota e il navigatore è resa difficoltosa dal forte rumore presente nell'abitacolo della vettura.

Scopo di questa tesi è la realizzazione di un sistema di filtraggio digitale in grado di ridurre il rumore della macchina nelle comunicazioni pilota - navigatore.

Nella fase preliminare del progetto è stato realizzato l'apparato sperimentale utilizzando una centralina per lo sviluppo prototipale, quindi sono state fatte analisi sulla digitalizzazione del segnale e sul ritardo temporale massimo introducibile dal sistema.

Nella seconda fase ci si è concentrati sull'analisi spettrale della voce e del rumore, in modo da trovare la forma e la frequenza di taglio del filtro ottimali osservando la distribuzione dell'energia dei segnali nelle differenti bande di frequenza. Come strumento di supporto all'analisi oggettiva dei segnali sono state effettuate numerose prove di ascolto del sistema sperimentale con e senza filtraggio abilitato, utilizzando campioni di rumore preregistrati.

Infine è stata realizzata l'implementazione del filtro digitale sulla evalua-

tion board definitiva, in previsione di una prova sperimentale dell'apparato su una vettura da corsa.

Ringraziamenti

Al termine di questo impegnativo percorso durato cinque anni desideriamo ringraziare tutti i nostri amici compagni di viaggio, che ci hanno aiutato e sostenuto.

Ringraziamo il Professor Sergio Savaresi che, con la sua grande passione e chiarezza, ci ha saputo trasmettere una parte delle sue conoscenze.

Ringraziamo in particolar modo anche Enrico Silani per averci supportato per questi mesi, in particolare per la sua pazienza e la disponibilità nei momenti di maggiore difficoltà.

Un ringraziamento anche a Ludovico Fassitelli, Dario Boldrini e Fabio Corti della Stilo per i preziosi consigli e le consulenze ricevute durante la costruzione degli impianti e le prove sperimentali.

Ringraziamenti di Massimiliano

Un ringraziamento particolare alla mia famiglia: è grazie al loro aiuto, materiale e spirituale, che sono arrivato a questo importante traguardo.

Grazie a Serena che mi è sempre stata accanto: il sostegno reciproco in questi anni di studi è stato fondamentale.

Ringrazio Giorgio: la realizzazione di questa lunga opera ci è costata fatica, ma insieme i problemi apparivano sempre più facili da affrontare.

Infine mi piacerebbe ringraziare di tutti gli amici "universitari" e non, ma evito per paura di dimenticarne qualcuno; comunque penso che chi mi conosce

sa benissimo che non mi dimenticherò mai di loro.

Ringraziamenti di Giorgio

Ringrazio la mia famiglia per avermi sostenuto e nutrito durante tutti questi anni di studio.

Ringrazio la mia ragazza Lavinia che mi ha sempre sopportato nonostante la mia passione esagerata per tutto ciò che può essere montato, smontato e/o riparato.

Ringrazio il mio amico e compagno di tesi Massimiliano, senza il quale questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Infine ringrazio tutti i miei amici, in particolare Orag e Idderf, con cui si può parlare per ore di informatica senza accorgersi dello scorrimento del tempo.

Indice

Sommario

Ringraziamenti	iii
1 Introduzione	1
1.1 Inquadramento generale	1
1.2 Breve descrizione del lavoro	2
1.3 Risultati ottenuti	7
1.4 Struttura della tesi	8
2 Stato dell'arte	10
2.1 Un sistema di comunicazione analogico: Stilo WRC03	11
2.1.1 Introduzione al sistema analogico Stilo	11
2.1.2 Caratteristiche del sistema Stilo	12
2.1.3 Setup della prova sperimentale	12
2.1.4 Analisi Spettrale del sistema Stilo	13
2.1.5 Conclusioni sull'analisi del sistema Stilo	15
2.2 Cancellazione digitale del rumore: Sistema ST	16
2.2.1 Introduzione al sistema e funzionalità	16
2.2.2 Specifiche tecniche del sistema dai datasheet	18
2.2.3 Setup della prova sperimentale	20
2.2.4 Analisi spettrale del sistema ST	21

2.2.5	Algoritmo di rilevazione del rumore e del parlato	26
2.2.6	Conclusioni sull'analisi del sistema ST	28
2.3	Caratteristiche di un sistema di comunicazione con cancel- lazione del rumore ideale	30
3	Impostazione del problema di ricerca	32
3.1	Realizzazione dell'apparato sperimentale prototipale	33
3.1.1	Descrizione dei componenti	34
3.2	Analisi del campionamento del segnale vocale	40
3.2.1	Frequenza di campionamento	40
3.2.2	Risoluzione in bit	42
3.2.3	Ritardo temporale massimo del sistema	45
3.3	Analisi spettrale della voce umana e del rumore rally	46
4	Progetto logico della soluzione del problema	48
4.1	Teoria del Campionamento	48
4.1.1	Aliasing	49
4.2	Filtraggio digitale	51
4.2.1	Ordine dei filtri	51
4.3	Algoritmo di AGC	53
4.3.1	Prove sperimentali	55
5	Architettura del sistema	60
5.1	L'architettura a moduli del sistema	60
5.2	Il filtro per la cancellazione del rumore	62
5.2.1	Scelta del tipo di filtro	63
5.2.2	Architettura del modulo di filtraggio	64
5.2.3	L'utilizzo di uno shape particolare	65
5.2.4	Analisi in frequenza del filtro	68
5.3	Logica di attivazione del filtro	71

5.4	Equalizzatore	74
5.4.1	Architettura del modulo	75
5.4.2	Prova sperimentale: equalizzatore dinamico	77
5.4.3	Analisi in frequenza dell'equalizzatore	79
6	Realizzazioni sperimentali e valutazioni	84
6.1	Definizione di criteri di giudizio	84
6.2	Prova in laboratorio con centralina cRIO	85
6.3	Realizzazione prototipo su DSP commerciale	90
6.3.1	Caratteristiche hardware del sistema	90
6.3.2	Funzionalità software del sistema	92
6.3.3	Prove di laboratorio effettuate	96
6.3.4	Prova su strada	97
7	Direzioni future di ricerca e conclusioni	98
7.1	Sviluppi futuri	99
7.2	Miglioramenti al sistema di filtraggio passivo	100
7.2.1	Logica di attivazione	101
7.2.2	Equalizzatore	102
7.3	Cancellazione attiva del rumore	103
	Bibliografia	105
A	Documentazione del progetto	107
A.1	Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 2.2	107
A.1.1	Generazione spettri del sistema	107
A.1.2	Analisi del tempo di attivazione	110
A.1.3	Analisi della tensione massima	112
A.1.4	Analisi dei bit	115
A.1.5	Logica di attivazione	115
A.2	Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 4.3	119

A.3	Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 5	120
A.3.1	Studio forme dei FIR	120
A.3.2	Analisi Equalizzatore	122
B	Documentazione della programmazione	127
B.1	Sorgenti visuali ottenuti con LabView	127

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Inquadramento generale

Uno degli aspetti critici nello svolgimento di una gara di rally è la comunicazione tra il navigatore e il pilota. Durante una gara il pilota guida ad alta velocità su un percorso che non conosce e si affida completamente alle informazioni date in tempo reale dal collega: in questo contesto è molto difficile, se non addirittura pericoloso, ripetere un'indicazione stradale non capita.

La comunicazione tra il pilota e il navigatore è resa difficoltosa dal forte rumore presente nell'abitacolo della vettura. Tale rumore è principalmente causato alle basse frequenze dal rotolamento e alle alte frequenze dagli organi della trasmissione. Per migliorare la comunicazione tra pilota e navigatore è quindi necessario migliorare il rapporto tra il segnale (nel nostro caso la voce umana) e il rumore nell'abitacolo.

Lo scopo principale di questa tesi è la realizzazione di un sistema di filtraggio digitale in grado di ridurre il rumore della macchina dalle comunicazioni pilota - navigatore, degradando la voce umana il meno possibile. Come verrà mostrato successivamente, in questo contesto non esiste una netta separazione in frequenza tra segnale voce e rumore, pertanto non esiste

una frequenza di taglio ottima, ma va cercato un trade-off tra filtraggio del rumore e qualità percepita della voce.

In questa applicazione è necessario che il sistema di comunicazione utilizzato sia affidabile e robusto, pertanto si è scelto di trasmettere il segnale audio tramite filo (e non via radio o bluetooth) per evitare qualsiasi malfunzionamento dovuto ad interferenze con altre apparecchiature montate a bordo della vettura da corsa.

Va sottolineato che l'intero progetto è stato svolto in collaborazione con la Stilo s.r.l.[9], che è l'azienda leader nel settore degli impianti di comunicazione da gara. Stilo ha fornito il supporto tecnico, i materiali per gli apparati sperimentali e l'esperienza dei suoi responsabili e tecnici per rendere possibile lo svolgimento di questa ricerca.

1.2 Breve descrizione del lavoro

Nella fase preliminare del progetto sono stati analizzati due sistemi di comunicazione esistenti:

- Il sistema analogico commerciale Stilo WRC03
- Il sistema digitale sperimentale ST CK-ENA.1

L'analisi dei sistemi di comunicazione è stata approfondita e svolta sia dal punto di vista oggettivo che soggettivo. Per la particolare natura di questo problema l'efficienza del sistema non può essere valutata solo quantitativamente, osservando gli spettri di uscita dei sistemi e misurando delle grandezze come il rapporto tra il segnale e il rumore, ma va anche analizzata qualitativamente: effettuando una prova di ascolto la resa del segnale voce (tonalità, intellegibilità) dopo il filtraggio non deve risultare compromessa.

L'analisi dei sistemi esistenti è stata effettuata in diverse fasi:

- Introducendo dei segnali il cui spettro è noto (come del rumore bianco) e osservando l'uscita dei sistemi è stato possibile individuarne i parametri temporali critici per il funzionamento, come il tempo di attivazione del filtraggio e il ritardo sulla linea di comunicazione.
- Attraverso l'analisi spettrale della trasformata dell'uscita è stato possibile osservare il comportamento in frequenza del sistema: in quali intervalli il segnale viene filtrato e in quali viene amplificato, per incrementare il rapporto tra il segnale voce e il rumore presente nell'abitacolo.
- Lo studio delle caratteristiche dei due prodotti (in particolare di quello digitale sperimentale) ha permesso di individuare le particolari funzioni per il trattamento del segnale di cui sono dotati, come l'attivazione del filtro attraverso la rilevazione di una soglia di rumore e l'algoritmo di Automatic Gain Control (AGC) per amplificare il segnale in uscita.
- Le basi teoriche necessarie per la futura implementazione della funzione di attivazione del filtro e per l'amplificazione del segnale (AGC) sono state reperite attraverso la ricerca tra gli articoli scientifici pubblicati dall'IEEE.
- Insieme all'analisi oggettiva sono state effettuate numerose prove di ascolto dei due sistemi, in modo da comprenderne dal punto di vista qualitativo i pregi e i limiti, affinando le nostre capacità di ascolto e i criteri soggettivi di valutazione dell'efficienza del sistema. In questa ottica sono risultati fondamentali gli incontri coi responsabili della Stilo, che hanno una notevole esperienza in questo campo: grazie al confronto e allo scambio di opinioni le caratteristiche del problema sono state comprese a fondo ed è stato possibile orientare la ricerca nella direzione desiderata.

I limiti dei sistemi esistenti sono stati individuati nella capacità di riduzione del rumore e nella difficoltà di modifica per il sistema Stilo, nel ritardo di elaborazione del segnale eccessivo per il sistema ST.

I pregi dei due sistemi sono rispettivamente l'elevata qualità della voce, il ritardo temporale assente e la semplicità di utilizzo del sistema Stilo, l'elevata riduzione del rumore e la capacità di adattarsi alle condizioni di rumore ambientale per il sistema ST.

L'analisi dei sistemi esistenti coi loro punti di forza e limiti ha permesso di individuare un insieme di requisiti che un sistema di comunicazione pilota navigatore deve possedere:

- Ridotto ritardo temporale di elaborazione, per non dare sgradevoli sensazioni di eco agli utilizzatori.
- Elevata riduzione del rumore accompagnata da un adeguato volume della voce, per incrementare il rapporto segnale/rumore.
- Attivazione del filtro in funzione del rumore ambientale, in modo da non degradare la qualità della voce quando non necessario.
- Struttura software flessibile, per permettere modifiche dei parametri di funzionamento semplici e veloci.

Parallelamente allo studio dei sistemi esistenti è stata eseguita l'analisi degli spettri della voce umana e del rumore di una vettura da rally per verificare che ci fosse una separazione in frequenza almeno parziale, per confermare la possibilità di utilizzo di un filtro solo passivo; questi dati in seguito sono serviti per individuare la frequenza di taglio del filtro digitale implementato.

Successivamente è stato realizzato un sistema di comunicazione digitale nuovo utilizzando un apparato sperimentale basato sulla centralina per lo sviluppo prototipale cRIO 9101.

Questo sistema ha avuto il vantaggio di essere velocemente e facilmente realizzabile, essendo composto di parti disponibili già pronte quali due centraline WRC03 e il cRIO 9101, e ha permesso di implementare e provare sperimentalmente i filtri e gli algoritmi realizzati. Tutte le prove sperimentali sono state eseguite in laboratorio utilizzando dei campioni di rumore preregistrati, il codice del sistema di comunicazione è stato implementato in Labview ed è stato eseguito sulla centralina cRIO 9101.

Attraverso diversi esperimenti di analisi dei segnali e prove di ascolto sono stati scelti i parametri minimi di campionamento del segnale (frequenza e risoluzione in bit) e fissato il ritardo temporale massimo di elaborazione del sistema.

Sono stati realizzati alcuni prototipi per provare diversi tipi di filtro digitale statico, differenti per frequenze di taglio e guadagni. Alla fine di questa fase è stato ottenuto un filtro dotato di un alto guadagno nelle frequenze della voce con in uscita un notevole rapporto segnale/rumore.

Le prove sperimentali effettuate coi tecnici della Stilo prevedevano inizialmente l'ascolto della sola voce, senza rumore, e poi l'inserimento del disturbo: in questo modo un filtro molto estremo non veniva apprezzato in quanto la qualità della voce in un ambiente silenzioso era deludente, anche se la riduzione del rumore, quando presente, era molto elevata. Grazie a questa serie di prove si è potuto così confermare che il solo filtraggio statico del rumore non era accettabile come soluzione finale: qualsiasi operazione effettuata sul segnale doveva riuscire a migliorare il rapporto segnale/rumore senza intaccare la qualità percepita del segnale vocale in maniera significativa.

Per superare i limiti imposti dal filtraggio effettuato solo staticamente è stata ideata e provata una logica di attivazione del filtro a due stadi. Tale algoritmo agisce in modo da non introdurre la distorsione della voce causata dal filtraggio quando il rumore ambientale è ridotto; viceversa la riduzione della qualità della voce in presenza di un forte rumore non è percepibile,

viene invece apprezzata l'elevata cancellazione dei disturbi dovuta all'azione del filtro. La rilevazione del rumore viene fatta attraverso l'analisi della varianza e dell'energia del segnale, infatti il rumore ha un'elevata energia e una bassissima varianza, al contrario della voce umana che è caratterizzata da continue pause.

Poichè la percezione della voce è soggettiva, e ogni individuo preferisce una tonalità differente, è stata data la possibilità di personalizzare il timbro della voce filtrata attraverso un equalizzatore a 4 bande.

L'implementazione dell'equalizzatore ha richiesto uno studio preliminare sulla sua struttura, che è stata basata su una serie di filtri passabanda in parallelo, e diversi esperimenti e per trovare il numero e la distribuzione delle bande di frequenza. Attraverso l'equalizzatore è possibile modificare i guadagni di ogni banda e personalizzare la messa a punto del sistema, privilegiando la qualità della voce o una particolare tonalità, oppure incrementando ulteriormente la riduzione del rumore.

I risultati ottenuti con l'apparato sperimentale prototipale sono stati incoraggianti, seppur limitati dalle caratteristiche hardware dei componenti utilizzati, che non permettevano l'implementazione di tutte le componenti in un unico prototipo. Per questo motivo è stato deciso di implementare il sistema di comunicazione su una evaluation board commerciale Analog Devices, modello Eval-Ad1940EB.

In questo modo oltre all'integrazione di tutte le componenti software ideate, implementate nell'ambiente di sviluppo Sigmastudio, è stato possibile effettuare una valutazione sperimentale migliore, grazie all'elevata qualità del segnale audio garantita dall'hardware utilizzato.

Dopo aver realizzato l'implementazione del filtro digitale statico, dell'equalizzatore e del controllo volume sulla evaluation board definitiva l'impianto di comunicazione pilota navigatore è stato messo a punto in vista di una sessione di prove private su una vettura da rally, che verrà svolta presumi-

bilmente nelle settimane successive alla redazione di questa tesi.

Poichè il software realizzato per la evaluation board viene eseguito solo sul DSP della stessa sarà possibile utilizzarlo in un prodotto commerciale, che verrà probabilmente messo sul mercato da Stilo il prossimo anno.

1.3 Risultati ottenuti

Il sistema di comunicazione realizzato rappresenta uno strumento flessibile, facile da modificare e da estendere. Le caratteristiche proprie di un sistema di comunicazione digitale permettono di intervenire sui parametri di funzionamento agendo semplicemente sulla parte software nel DSP, senza più doversi preoccupare dell'architettura hardware: la possibilità di personalizzare il prodotto a costo ridotto permetterà di creare sistemi ad hoc per i clienti più importanti.

Il sistema, nella sua architettura definitiva, è stato concepito in modo da poter essere inserito all'interno di un prodotto qualsiasi della stessa famiglia di processori: questo amplia le possibilità di riutilizzo della particolare implementazione software realizzata, senza il pericolo della dipendenza da uno specifico modello di hardware.

Gli studi teorici eseguiti sulla centralina analogica WRC03 e sugli spettri della voce umana e del rumore "rally" rappresentano un bagaglio di conoscenze interessante che si va ad aggiungere a quello posseduto dai collaboratori della Stilo, che servirà anche per future realizzazioni.

L'implementazione finale del sistema su DSP e la forma spettrale finale del sistema completo (filtro ed equalizzatore), possono essere verificati e visualizzati in tempo reale durante la modifica dei parametri in SigmaStudio. Questo interessante strumento di supporto è stato realizzato sfruttando le funzionalità grafiche dell'ambiente di sviluppo, già inserite nel firmware del DSP per le prime prove sperimentali in laboratorio.

Il filtro digitale implementato aumenta il rapporto tra il segnale e il rumore, senza degradare la voce in maniera significativa.

La logica di attivazione del filtro permette di rilevare la presenza di un determinato livello di rumore e di conseguenza attivare il filtraggio, senza penalizzare la resa del sistema in condizioni normali.

Grazie a questo meccanismo è stato possibile diminuire ulteriormente la frequenza di taglio rispetto alle prime prove sperimentali ed aumentare il guadagno del filtro nella banda della voce, poichè la distorsione introdotta nel segnale in questo modo non è rilevabile in presenza di rumore.

L'equalizzatore divide in diverse bande di frequenza il segnale già filtrato e permette all'utente finale di riequilibrarne i guadagni in base al suo gusto personale, in modo da ottenere una voce più naturale e intellegibile.

1.4 Struttura della tesi

Nel capitolo 2 si mostra lo stato dell'arte: vengono descritti due sistemi di comunicazione, il sistema analogico Stilo e il sistema digitale ST, analizzandoli attraverso i relativi spettri di uscita. Inoltre sono comparati i pregi e i limiti dei due sistemi, come il ridotto filtraggio del rumore e l'eccessivo ritardo temporale introdotto, che possono essere superati con un sistema innovativo.

Nel capitolo 3 si illustra la realizzazione dell'apparato sperimentale utilizzato, costituito da due centraline analogiche Stilo della fase di preanalisi con interposta una centralina digitale cRIO. Vengono mostrati i risultati delle prove di campionamento del segnale e di ritardo temporale massimo del sistema, e la verifica della parziale separazione in frequenza tra rumore "macchina" e voce umana, condizione necessaria per poter ottenere un buon risultato con un filtraggio solo passivo.

Nel capitolo 4 vengono descritti più in dettaglio alcuni elementi base che andranno a costituire il cuore della soluzione proposta ed implementata, come

il tipo di filtraggio digitale utilizzato, il concetto di logica di attivazione del filtro in base al rumore ambientale rilevato e l'AGC (automatic gain control) per il miglioramento del rapporto segnale/rumore.

Nel capitolo 5 viene descritta l'architettura del sistema digitale realizzato nelle sue componenti: il segnale in ingresso viene digitalizzato, filtrato, equalizzato, portato a un'ampiezza definita con l'algoritmo di AGC e poi riconvertito in analogico.

Nel capitolo 6 si mostrano le prove di laboratorio eseguite e l'evoluzione della valutazione dell'efficienza del sistema: in questa applicazione non contano solo i criteri oggettivi di misura (come l'analisi spettrale) ma esiste una forte componente personale nella valutazione della qualità e dell'intelligibilità della voce. Per questo motivo sono state fatte anche valutazioni soggettive, che sono state affinate ed orientate correttamente solo dopo alcuni incontri e prove sperimentali di ascolto con la collaborazione dei responsabili e dei tecnici della Stilo. La seconda Parte del capitolo 6 mostra l'implementazione finale su una evaluation board commerciale del sistema di comunicazione, realizzata in base ai risultati della ricerca effettuata sul primo sistema sperimentale prototipale.

Nelle conclusioni si riassumono le ricerche e gli esperimenti eseguiti, le prestazioni e la flessibilità del sistema di filtraggio digitale realizzato. Inoltre vengono illustrati possibili sviluppi futuri del sistema di filtraggio passivo, il quale costituisce una buona base per l'introduzione di un sistema di cancellazione attiva del rumore.

Nell'appendice A si riporta la documentazione del progetto: gli spettri dei sistemi analizzati e gli script Matlab utilizzati per le analisi effettuate.

Nell'appendice B è contenuto il codice visuale scritto per creare i filtri digitali e l'equalizzatore.

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo verrà presentato lo stato dell'arte attraverso lo studio di due sistemi di comunicazione pilota navigatore: uno analogico commerciale (Stilo) e un altro digitale sperimentale (ST). Viene mostrato il comportamento in frequenza dei due sistemi: è stata effettuata una serie di prove sperimentali con diverse condizioni di rumorosità ed è stata eseguita l'analisi spettrale. Inoltre ognuno dei due sistemi verrà descritto nei suoi componenti principali, nelle particolari funzioni di elaborazione audio implementate (come filtri, algoritmi di rilevazione del rumore) e nei principi di funzionamento (analogico o digitale). Infine verranno elencati i pregi e i limiti dei sistemi descritti, per giungere ad un insieme di requisiti che un nuovo impianto di comunicazione pilota navigatore dovrà soddisfare.

2.1 Un sistema di comunicazione analogico: Stilo WRC03

2.1.1 Introduzione al sistema analogico Stilo

Il sistema di comunicazione analogico Stilo¹ si compone di una centralina (denominata Interfono WRC03) e due paia di cuffie (WRC3203). La centralina, alimentata a 9v tramite una pila, dispone di regolazione dei volumi separata tra pilota e navigatore e di accensione comandata dall'inserimento dello spinotto del navigatore. Le cuffie utilizzate sono state insonorizzate in modo



Figura 2.1: Centralina WRC03

da abbattere il rumore (32 dB), e dispongono di un microfono orientabile a cancellazione.

Il sistema analogico è stato progettato sviluppato e messo a punto appositamente.

¹*Sistema Stilo*, oppure *centralina Stilo*, è una convenzione di comodo per riferirci al kit auto, prodotto e commercializzato dalla Stilo s.r.l., identificato dalla sigla WRC03.

mente per l'utilizzo in gara all'interno di una vettura: alcune scelte progettuali, che potrebbero apparire inusuali (come l'alimentazione a pila) o datate (come l'utilizzo dei fili per trasmettere il segnale audio) sono state fatte per garantire semplicità di installazione, utilizzo e la massima affidabilità. Stilo è l'azienda leader del settore ed è fornitrice del campione mondiale di rally 2005 e di numerosi altri piloti di team ufficiali e privati: questo dà una idea della qualità e dell'apprezzamento dei suoi prodotti da parte degli addetti ai lavori.

2.1.2 Caratteristiche del sistema Stilo

L'interfono WRC03 è completamente analogico: in fase di progettazione il filtraggio del segnale audio è stato realizzato sostituendo i componenti elettronici (resistenze e condensatori) del circuito ad ogni tentativo, questo impedisce di fare modifiche rapide "ad hoc" per ogni cliente e pone seri vincoli anche nei tipi di filtro utilizzabili. Da ricerche bibliografiche effettuate risulta che lo spettro della voce umana sia compreso tra le frequenze di 500Hz e 1,5/2kHz (la voce femminile ha più componenti acute): un sistema di comunicazione ideale dovrebbe amplificare le frequenze della voce e ridurre a zero le altre componenti spettrali, che contengono il rumore.

La modulazione del segnale del WRC03 è stata cercata dai tecnici della Stilo attraverso numerosi affinamenti e anni di prove pratiche di ascolto, infatti la resa della voce nel silenzio è ottima. Tuttavia in condizioni rumorose la resa non è ideale, poichè la messa a punto di un sistema analogico attraverso il semplice ascolto è molto difficile da ottimizzare.

2.1.3 Setup della prova sperimentale

Il setup con cui sono state effettuate le analisi sul sistema Stilo è descritto qui di seguito.

In ingresso al sistema Stilo è stato collegato il microfono WRC3203, ed all'uscita è stato connesso il sistema di acquisizione dei dati, costituito dalla centralina cRIO. L'uscita del sistema Stilo è nel range dei $\pm 4V$, mentre la centralina cRIO può acquisire $\pm 10V$, questo ha permesso di tenere il volume in uscita al livello desiderato, senza il pericolo di arrivare a saturazione (L'informazione sul range di tensione dell'uscita del WRC03 è stata data dai tecnici Stilo, tuttavia è stata verificata con un esperimento, descritto al paragrafo 3.1.1). I dati binari acquisiti sono stati salvati in Labview e poi convertiti in dati numerici in formato testuale. Gli spettri analizzati qui di seguito sono stati calcolati tramite FFT con uno script Matlab².

2.1.4 Analisi Spettrale del sistema Stilo

In questa sezione viene presentata l'analisi dettagliata del comportamento in frequenza del sistema Stilo. É stata effettuata una serie di prove sperimentali con diverse condizioni di rumorosità ed è stata eseguita l'analisi spettrale. L'analisi spettrale su questo sistema non era mai stata effettuata, i risultati ottenuti costituiscono delle informazioni aggiuntive per gli stessi responsabili e tecnici Stilo.

Analisi con rumore bianco

Nella prima prova effettuata il WRC03 è stato analizzato dando in ingresso un rumore bianco (WN). Lo spettro di uscita del sistema mostra un andamento caratterizzato da due picchi a 2,5kHz e a 3,5kHz: questo strano risultato può essere stato causato dalla messa a punto del sistema Stilo in fase di progettazione ed amplificata dalla presenza dei diffusori audio, utilizzate per

²Tutte le seguenti figure sono state generate elaborando i dati salvati nelle prove sperimentali. Il codice generatore di tutte queste figure è visibile nell'appendice A

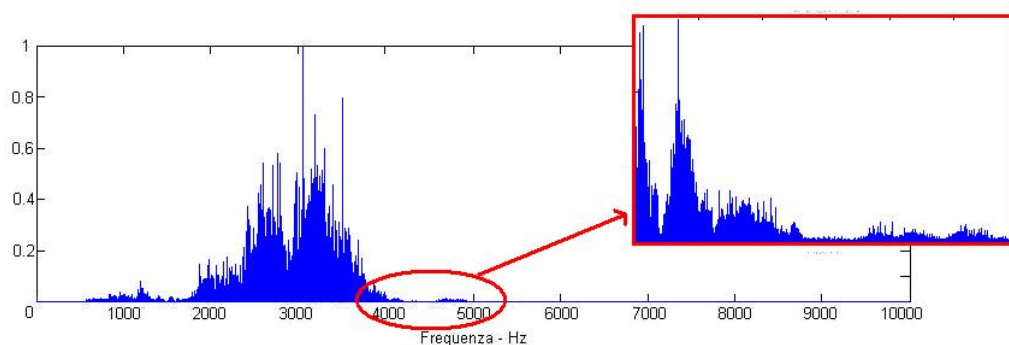


Figura 2.2: Spettro del sistema Stilo con rumore bianco in ingresso

riprodurre i segnali in ingresso al microfono³. Lo spettro del segnale è piatto fino a 400Hz per eliminare eventuali disturbi elettrici in bassa frequenza, ha un taglio notevole oltre i 4,5kHz, dove sicuramente non c'è più componente vocale, ma fino a circa 7kHz sono presenti delle componenti residue.

La centralina WRC03 verrà utilizzata nel sistema sperimentale digitale come stadio di potenza per l'amplificazione del segnale del microfono in ingresso al cRIO, ma la presenza delle componenti residue a 7kHz impone una frequenza di campionamento più alta per rispettare il teorema di Shannon (si veda il capitolo 4.1): questo costringerà a fissare la frequenza di campionamento ad almeno 18kHz per evitare il fenomeno dell'aliasing, o ad inserire un filtro antialiasing tra il WRC03 e il cRIO.

Analisi con rumore rally

Si riporta ora l'analisi fatta utilizzando il rumore rally in ingresso. Dai diagrammi appare evidente la forma caratteristica dello spettro già vista in precedenza con il rumore bianco. Un punto negativo dello spettro della cen-

³L'utilizzo di questa configurazione con le casse e la centralina Stilo come stadio di amplificazione del segnale del microfono in ingresso per tutti gli esperimenti effettuati (anche per il sistema ST) causa la presenza di questi picchi in tutti i diagrammi spettrali.

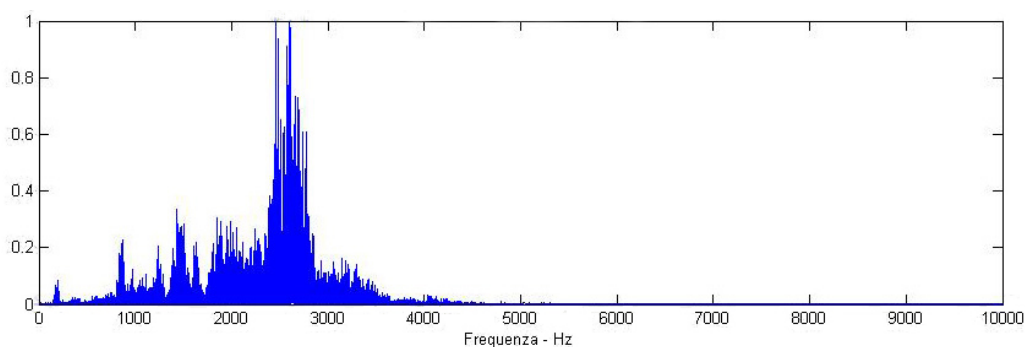


Figura 2.3: Spettro del sistema Stilo con rumore rally in ingresso

tralina è l'elevata amplificazione delle frequenze comprese tra i 2 e i 3kHz rispetto a quelle della voce (tra i 500 e 2kHz): l'effetto di riduzione del rumore del sistema analogico è dovuta solo alle cuffie insonorizzate e alla cancellazione del microfono, che è fatta in modo puramente meccanico dalla membrana dello stesso. I tecnici Stilo hanno spiegato che questa configurazione ha prestazioni buone nella riduzione dei disturbi con le vetture da rally meno potenti (con motore aspirato e trazione su un solo asse), ma la resa peggiora notevolmente sulle vetture più potenti, come le WRC, che sono molto rumorose a causa dei motori turbocompressi e della trazione integrale.

2.1.5 Conclusioni sull'analisi del sistema Stilo

Il sistema Stilo analizzato presenta una serie di pregi:

- Facilità di utilizzo e semplicità del sistema
- Buona resa della voce in ambiente silenzioso
- Discreta attenuazione del rumore
- Affidabilità a tutta prova

La natura completamente stand-alone del sistema lo rende facilmente inseribile in un qualsiasi abitacolo di una vettura da gara già esistente. Infatti

l'utilizzo di un sistema di alimentazione a pila e la trasmissione del segnale a filo lo rendono completamente isolato dall'impianto elettrico della vettura stessa e lo tengono al riparo da interferenze esterne.

In un ambiente non rumoroso la resa della voce è naturale e calda, e questo facilita la sua intellegibilità anche in condizioni di rumore.

Un sistema così semplice costituito solo da pochi componenti hardware si presta molto bene ad essere utilizzato in un ambiente difficile (ad esempio a causa delle vibrazioni e del calore) quale l'abitacolo di una vettura da rally.

Gli aspetti migliorabili del sistema Stilo sono una conseguenza della sua semplicità:

- Utilizzo di un sistema analogico che non permette un controllo fine della messa a punto del sistema.
- Amplificazione di alte frequenze che sono fuori dallo spettro della voce, questo riduce il filtraggio del rumore del sistema e ne peggiora la resa.
- Utilizzo di parametri di funzionamento alternativi a quelli di fabbrica abbastanza difficile, ogni modifica richiede di agire sull'hardware dell'apparato.

2.2 Cancellazione digitale del rumore: Sistema ST

2.2.1 Introduzione al sistema e funzionalità

In una logica che prevede, in un futuro, l'abbandono del tradizionale sistema analogico per adottarne uno digitale, la Stilo ha provato un kit di co-

municazioni commerciale, *sistema ST*,⁴ che tra le varie funzionalità offerte presenta anche la cancellazione del rumore.

Tuttavia, nonostante la presenza del filtraggio, il sistema ST è inutilizzabile per gli scopi prefissati della Stilo, poichè presenta un ritardo temporale in cuffia inaccettabile.

Infatti il kit era stato progettato per la cancellazione del rumore durante una conversazione telefonica in viva voce (come ad esempio il GSM per l'auto). In tale applicazione il ritardo di elaborazione del segnale non era un fattore critico e l'apparato non è stato ottimizzato considerando questo aspetto come un obiettivo, in quanto nelle comunicazioni telefoniche non c'è il ritorno della voce del parlante nell'auricolare.

Il sistema ST riesce ad essere particolarmente performante nella riduzione del rumore poichè utilizza un elevato tempo di elaborazione, che gli permette di agire in maniera ottima nella maggior parte dei casi: il ritardo viene inserito per permettere il post-processing del segnale. Infatti questo sistema mantiene in un buffer il segnale in ingresso e, attraverso l'analisi di questi dati, decide se la soglia di rumorosità è stata superata o no. Nel caso negativo invia il segnale in uscita (nella cuffia) senza alcuna operazione. In caso di rumore, invece, il buffer dà la possibilità di effettuare la cancellazione migliore. In questo modo la qualità della voce percepita è sempre apprezzabile ed il ritardo, in una normale comunicazione telefonica, non è percepibile.

Stilo, invece, vuole utilizzare il sistema ST per filtrare i segnali provenienti dal microfono e, oltre all'uscita sulla cuffia dell'ascoltatore, deve anche fornire un ritorno nella cuffia del parlante (inutile in campo telefonico, ma necessario per l'applicazione specifica, in quanto su una macchina da rally la rumorosità è molto elevata ed è impossibile sentire la propria voce mentre si parla).

⁴*Sistema ST* è una convenzione di comodo per riferirci al kit auto, prodotto e commercializzato dalla ST-MicroElettronics [10], "*Hand free car-kit board*" identificato dalla sigla *CK-ENA.1*.

Con questa configurazione però si sente un notevole ritardo nel ritorno in cuffia che rende impossibile la comunicazione.

Questo ritardo è percepito come un fattore particolarmente critico, ed è il motivo che ha impedito a Stilo di commercializzare il sistema ST opportunamente modificato.

Un elevato tempo di elaborazione può far pensare che non sia possibile effettuare una cancellazione del rumore nei tempi richiesti dall'applicazione, nemmeno con un apparato differente. Per questo, nella primissima parte del lavoro, è stata creata una semplice applicazione (configurazione digitale a filo diretto), per dimostrare che è possibile campionare un segnale e poi riconvertirlo in analogico senza ritardi percepibili: questa analisi è visibile al capitolo 3.2.3.

Il sistema ST, a causa dell'applicazione per cui è stato ottimizzato, è inutilizzabile in una vettura da rally, tuttavia presenta molte caratteristiche innovative: è stata effettuata un'attenta analisi del sistema al fine di comprenderne il funzionamento e per capire se sia possibile ottenere le medesime prestazioni per quanto riguarda la cancellazione del rumore, senza avere un ritardo percepibile nel ritorno in cuffia.

Prima di procedere con l'analisi del sistema ST dobbiamo chiarire i seguenti argomenti:

- Le specifiche tecniche del sistema e le sue varie funzionalità
- Il setup sperimentale con il quale sono state effettuate le prove

2.2.2 Specifiche tecniche del sistema dai datasheet

Il sistema ST *CK-ENA.1* è stato progettato per essere l'unità principale dei kit di interfono per auto. E' costituito da una board contenente del software che gira su un DSP di ST Microelectronics. La board inoltre, oltre ai convertitori A/D e D/A, comprende un circuito di amplificazione di potenza

del segnale. I segnali sono campionati ad una frequenza di 8Khz.

L'hardware del sistema è così composto:

- la CPU è costituita da un DSP a 24bit che opera ad una frequenza di 50MIP
- una memoria di programma RAM da 16K words
- una memoria dati RAM da 16K words
- uno stadio pre-amplificatore sull'ingresso del microfono
- uno stadio di amplificazione sull'uscita massima di 20W

La parte software invece implementa le seguenti funzionalità:

- Soppressione del rumore stazionario di fondo[3]
- Cancellazione dell'effetto eco
- Cancellazione dell'effetto eco elettrico
- AGC - Automatic Gain Control ⁵

Tra queste quelle di particolare importanza per la nostra applicazione sono la prima e l'ultima.

Infatti con l'identificazione e la successiva cancellazione del rumore stazionario si riesce ad ottenere una forte cancellazione dei disturbi. Questo comporta anche una perdita di intensità del segnale. Tutti i metodi di cancellazione del rumore passivi (filtraggio) hanno l'inconveniente di abbassare l'intensità del segnale in uscita, questo difetto si può eliminare grazie all'utilizzo di un AGC sull'uscita del sistema.

⁵Per una spiegazione completa del funzionamento dell'algoritmo di AGC vedi capitolo 4.3

Nel nostro caso, sempre grazie all'AGC, si ha un ulteriore effetto percepito positivamente dall'utente. Infatti il sistema ST riporta il segnale in uscita nel range dei $\pm 12V$, ne segue che il volume percepito in cuffia é particolarmente elevato (molto più elevato del sistema analogico WRC03 che lavora nel range di $\pm 4V$) e ciò dà l'impressione di una marcata cancellazione del rumore.

2.2.3 Setup della prova sperimentale

Il setup con cui sono state effettuate le analisi sul sistema ST è descritto qui di seguito.

In ingresso al sistema ST è stato collegato un microfono ed all'uscita è stato connesso il sistema di acquisizione dei dati, costituito dalla centralina cRIO. L'uscita del sistema ST è nel range dei $\pm 12V$, mentre la centralina cRIO può acquisire $\pm 10V$, questo ha imposto di tenere il volume in uscita a due terzi per non arrivare a saturazione. Sul lato degli ingressi da fornire al sistema ST c'è un problema simile: in ingresso opera in un range di $\pm 12V$, tuttavia l'uscita del microfono è nell'ordine dei $\pm 100mV$; per questo si è deciso di interporre tra l'ingresso ST e il microfono una centralina Stilo come stadio amplificante di potenza, così che il segnale sia in un range di $\pm 4V$.

Questa configurazione è sicuramente la più semplice da realizzare, ma possiede un inconveniente: il segnale rilevato presenta necessariamente la distorsione introdotta dalla centralina Stilo.

Infatti, come visto nel capitolo 2.1, il sistema Stilo ha uno shape in frequenza caratteristico, segue che il segnale in ingresso al sistema ST presenta delle amplificazioni a determinate frequenze. Di questo fatto si deve tenere conto nella fase di analisi.

2.2.4 Analisi spettrale del sistema ST

In questa sezione viene presentata l'analisi dettagliata del comportamento in frequenza del sistema ST. È stata effettuata una serie di prove sperimentali con diverse condizioni di rumorosità ed eseguita l'analisi spettrale⁶. Osservando comportamento del sistema a differenti frequenze è possibile aumentare il livello di comprensione degli algoritmi di cancellazione del sistema.

L'analisi del sistema ST è di tipo "*black-box*", poichè non sono disponibili specifiche dettagliate del sistema, ma solo il datasheet pubblicato su internet. Il sistema è stato sollecitato con una serie di ingressi, la cui caratteristica spettrale è nota (rumore bianco o registrazioni di rally⁷), e sono state salvate le uscite. In base ai risultati di questi esperimenti sono state tratte le conclusioni qui di seguito.

Analisi con rumore bianco

La prima prova effettuata è stata quella di sollecitare il sistema con del parlato disturbato da un *rumore bianco* (*WN*).

Lo spettro di questo caso è visibile in Figura 2.4. Da questa immagine si vede chiaramente che, rispetto al sistema Stilo⁸, il sistema ST effettua un

⁶Tutte le seguenti figure sono state generate, come sempre, attraverso script Matlab utilizzando i dati salvati nelle prove sperimentali. Il codice generatore di tutte queste figure è visibile nell'appendice A

⁷In questo, come in tutte le altre registrazioni il "rumore rally" è stato prodotto partendo da file wav forniti dalla Stilo ed utilizzando un normale impianto stereo. Al fine di simulare al meglio l'abitacolo di un veicolo il microfono di registrazione era tenuto particolarmente vicino alla sorgente sonora.

⁸Si riportano in questa analisi anche le immagini del sistema Stilo per poter fare un confronto più agevole con la soluzione in esame. I dati e le immagini sono gli identici a quelli visti nella sezione precedente al capitolo 2.1.4 e vengono qui riportati solo per ragioni di comodo

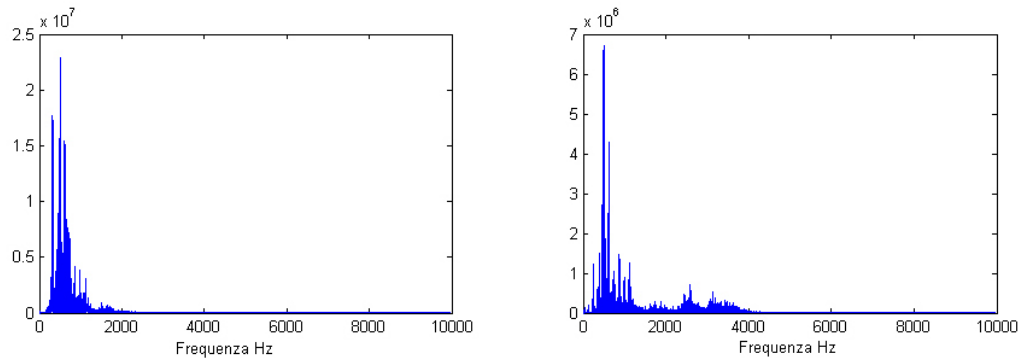


Figura 2.4: Spettri di voce con WN di disturbo. ST a sinistra, Stilo a destra

taglio molto marcato delle alte frequenze: praticamente si eliminano tutte le componenti dai circa 2.2KHz in su.

Da questa figura si può dedurre che il sistema effettua un *filtraggio passa banda* nella banda di frequenza compresa tra i 400Hz ed i 2Khz, che è la banda di frequenza della voce umana ⁹.

Infatti, come si può notare nella Figura 2.5, particolare ingrandito dello spettro intorno ai 2KHz, si ha una drastica e repentina diminuzione dello spettro nell'intorno dei 2.2KHz circa.

Questo effetto è indicatore di un filtraggio molto netto: da ciò si deduce che il sistema ST implementa al suo interno un filtro di ordine molto elevato (il problema dell'ordine del filtro, e del peso che questo ha nelle prestazioni, è discusso nel capitolo 4.2.1) : così si minimizzano le distorsioni nel campo di frequenza di interesse e si massimizza la cancellazione delle frequenze non desiderate.

⁹Si è parlato di filtraggio passa-banda in quanto le bassissime frequenze non sono state rilevate. Questo tuttavia potrebbe non essere opera del sistema ST ma bensì del sistema Stilo che si utilizzava come amplificatore di potenza. Infatti è noto che la centralina Stilo effettua un taglio delle basse frequenze sotto i 400Hz circa. Per questo è probabile che il sistema ST implementi semplicemente un bassa-basso.

In questo modo si riesce a mantenere una discreta qualità della voce eliminando una grossa parte del rumore.

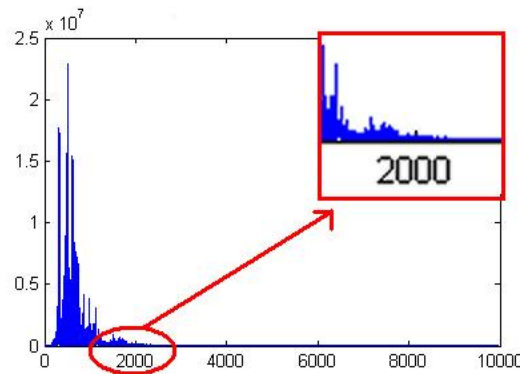


Figura 2.5: Spettro del sistema ST con particolare nella banda del taglio

Oltre un elevato ordine del filtro la Figura 2.4 mostra un'altra caratteristica importante del sistema ST: lo spettro presenta un guadagno di almeno 10 rispetto al sistema Stilo, ciò implica che il filtro non è un semplice passa-banda unitario, ma effettua anche un'amplificazione nella banda di frequenza della voce.

Questa amplificazione è fondamentale: così facendo il rapporto segnale/rumore è notevolmente migliorato, il guadagno viene applicato al segnale filtrato e quindi si va ad amplificare solo la parte di segnale, mentre le frequenze considerate rumore vengono attenuate.

In sostegno delle considerazioni fatte fin'ora è possibile analizzare l'andamento nel tempo dei segnali di cui abbiamo appena visto la rappresentazione in frequenza.

La Figura 2.6 rappresenta l'andamento, espresso in volt, del segnale registrato. Qui si vede come nel sistema STILO tra i picchi più alti, che corrispondono alle parole, vi sia una grossa quantità di segnale residuo. Invece nel sistema ST il rumore rimasto è molto piccolo in ampiezza e dunque è percepito come un suono più basso.

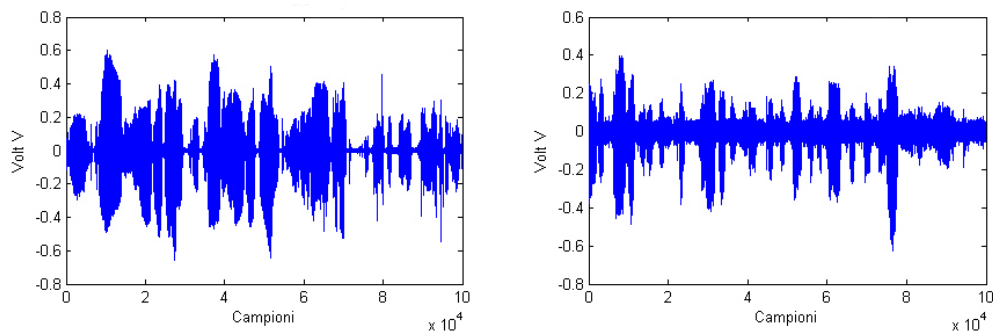


Figura 2.6: Andamento del segnale di voce con WN di disturbo. ST a sinistra, Stilo a destra

Analisi col rumore rally

Si riporta ora anche un'analisi fatta con il rumore rally come disturbo: le considerazioni tratte sono identiche alle precedenti.

Infatti per il sistema di cancellazione non c'è differenza tra rumore rally o WN: appena viene rilevata la presenza di rumore si attiva la cancellazione.

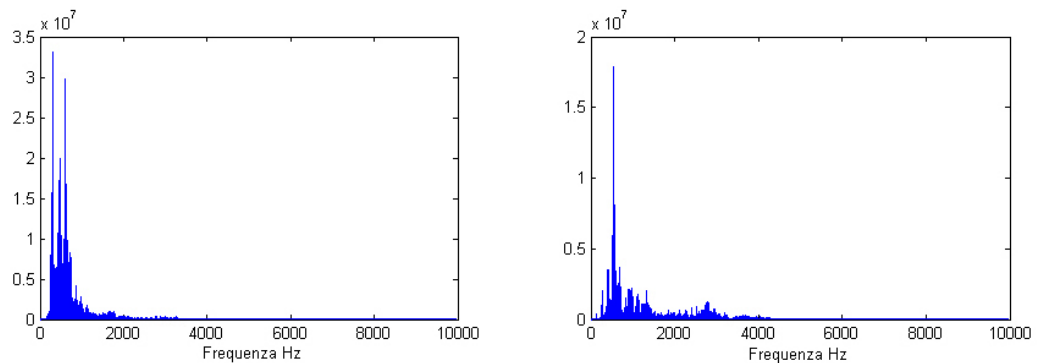


Figura 2.7: Andamento del segnale di voce con rally di disturbo. ST a sinistra, Stilo a destra

Dalla Figura 2.7 si vede che gli spettri sono molto simili ai precedenti. Si

noti come, anche in questo caso, solo la banda di frequenza della voce viene amplificata.

Analisi del processo di attivazione

Come analisi finale si riporta una particolare registrazione dei dati con rumore rally, che è molto significativa.

Tutte le analisi precedenti sono state fatte con il *sistema di cancellazione del rumore già attivo*, invece in questa prova inizialmente la cancellazione del rumore é spenta, e si attiva solo in un momento successivo. Collegando un secondo paio di cuffie al posto della centralina di acquisizione, è possibile percepire il momento in cui il filtro viene attivato. Indossando le cuffie si sente chiaramente che, in un solo istante, la rumorosità di fondo viene fortemente attenuata, mentre la voce rimane quasi inalterata. Il tempo di attivazione del filtro è nell'ordine del secondo: per i primi istanti si sente il sistema senza cancellazione e poi si percepisce un netto calo dei disturbi.

Partendo dallo spunto fornito da questa prova di natura soggettiva sono stati salvati i dati, così da poterne trarre delle conclusioni formali.

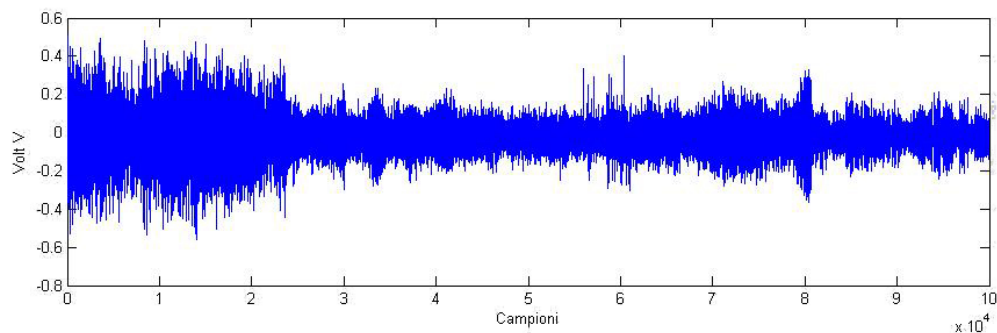


Figura 2.8: Andamento nel dominio del tempo del segnale

La prova sperimentale è stata articolata in questo modo: a differenza del caso precedente, in cui la registrazione dei dati avveniva alcuni istanti dopo

che il sistema di filtraggio si era attivato, ora la registrazione dei dati avviene nel momento stesso dell'accensione del rumore.

In questo modo si riescono a registrare anche i primi istanti in cui l'algoritmo di rilevazione del rumore (analizzato nel paragrafo 2.2.5) non ha ancora attivato la cancellazione. Nella Figura 2.8 si vede l'andamento temporale di 5s di registrazione, espresso in volt. L'energia del segnale, che può essere vista come l'ampiezza media dei picchi, non è costante durante tutta la registrazione.

Il punto in cui l'ampiezza cala in maniera considerevole è nell'intorno dei $2.5 \cdot 10^4$ campioni: questa diminuzione è dovuta al fatto che, cancellando le alte frequenze, si è eliminata dal segnale tutta l'energia che queste portavano. Conoscendo la frequenza di campionamento, che è di 20KHz, il tempo che intercorre tra un campione ed il successivo è di 50 micro secondi.

A questo punto è semplice calcolare che il "tempo di attivazione"¹⁰ del sistema ST è di circa 1250ms.

2.2.5 Algoritmo di rilevazione del rumore e del parlato

Grazie all'analisi precedente è emerso che nel sistema ST la cancellazione del rumore non è sempre attiva, ma viene attivata dinamicamente a seconda delle condizioni di rumore.

L'idea di attivare la cancellazione del rumore solo quando viene effettivamente rilevata una grossa quantità di rumore è molto brillante: così facendo si riducono al minimo le distorsioni della voce e si migliora la percezione dell'utente nei confronti del sistema di cancellazione.

Infatti, se il sistema fosse sempre attivo, quando si è in un ambiente silenzioso si sentirebbe la propria voce distorta. Questo poichè il sistema di

¹⁰Quello che noi chiamiamo "tempo di attivazione" è il tempo misurato dopo il quale il sistema inizia a cancellare il rumore. Non è detto che questo tempo sia interamente usato dal algoritmo di rilevazione del rumore per i suoi calcoli.

cancellazione, andando ad operare un taglio in frequenza, rischia di distorcere le componenti più alte della voce umana.

Questo problema, invece, non si presenta nel caso di un ambiente disturbato: in questo caso il rumore non rende percepibile la distorsione introdotta sulla voce, inoltre i benefici percepiti in termini di cancellazione rendono questa minima distorsione accettabile.

Attivando il sistema solo nel caso del bisogno, quando cioè il rumore rilevato supera una certa soglia, si ottiene quindi un duplice beneficio:

- a In un ambiente silenzioso il filtraggio non è attivo, dunque non si distorce la voce e l'utente percepisce un'ottima qualità della voce.
- b In un ambiente rumoroso il filtraggio è attivo, la voce viene in parte distorta, ma è poco percepibile a causa del rumore di fondo. La cancellazione del rumore è invece evidente e gradita all'utente.

Partendo da queste premesse si è studiato il funzionamento dell'algoritmo di rilevazione del rumore, al fine di poterne creare uno che rispondesse appieno alle esigenze dell'utilizzo su una vettura da rally.

La rilevazione della presenza di rumore in una segnale voce è basata sul concetto di energia media del segnale [3].

Infatti una qualsiasi discussione è intercalata da una serie di pause tra le parole. Un segnale rumoroso è più continuo e dunque avrà un energia media superiore a quella di un segnale con solo del parlato.

Fatta questa ipotesi, a questo punto è semplice scoprire la presenza del rumore in un segnale: infatti basterà calcolare l'energia del segnale (o di una parte sufficientemente significativa di esso) e confrontarla con un livello di soglia. Se l'energia è inferiore alla soglia sarà principalmente parlato, altrimenti c'è del rumore.

É possibile esprimere l'energia media del segnale in modo più formale

attraverso la seguente formula

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} s^2[n]$$

dove $s[n]$ rappresenta il valore del campione n -esimo ed N è il numero di campioni scelti per il calcolo dell'energia ¹¹.

A questo punto la presenza del rumore può facilmente essere identificata attraverso un semplice confronto con un valore soglia.

$$E \geq k \Rightarrow \text{AttivaFiltraggio}$$

Una prova significativa

Al fine di provare che il sistema ST implementasse effettivamente l'algoritmo discusso in precedenza è stata effettuata questa prova: sollecitare il sistema con suono vocale lungo e continuo (come per esempio una A ripetuta).

In questo caso, come ci si aspettava, il sistema ST effettua il taglio dopo il necessario tempo di attivazione. Infatti un suono simile, anche se "voce", è identificato come rumore poiché la sua energia media è sicuramente molto più elevata del parlato e la sua varianza è ridotta.

Tramite questa prova si è potuto così provare che il sistema ST non effettua funzioni complesse, come ad esempio un'analisi spettrale del sistema per riconoscere la frequenza voce, ma semplicemente si attiva in base ad una soglia di rumore e poi filtra con un filtro passa-banda.

2.2.6 Conclusioni sull'analisi del sistema ST

Il sistema ST analizzato presenta una serie di pregi:

¹¹La formula vista precedentemente non è l'unica con la quale è possibile ottenere un risultato simile. Anche in letteratura si riescono ad ottenere risultati simili con conti che non sono propriamente l'energia del segnale, ma qualcosa che ci "assomiglia".

Per la nostra implementazione dell'algoritmo di rilevazione del rumore si rimanda al capitolo 5.3

- Facilità di inserimento in un sistema già esistente
- Buona resa della voce in ambiente silenzioso
- Ottima cancellazione del rumore con attivazione automatica del filtro

La natura modulare del sistema lo rende facilmente inseribile in un qualsiasi apparato già esistente. Infatti l'utilizzo di un DSP accoppiato con i relativi DAC ed ADC è una soluzione molto versatile ed economica, poichè non utilizza componenti creati specificamente

La qualità della voce in un ambiente silenzioso è accettabile; le prestazioni sono inferiori al sistema della Stilo, ma il peggioramento è rilevabile solo ascoltando molto attentamente.

Questa leggera differenza è dovuta al fatto che sistema Stilo può essere considerato, senza il minimo dubbio, il sistema con la massima qualità voce ottenibile con tecnologia analogica: infatti è frutto di lunghi anni di esperienza e correzioni.

Le prestazioni in termini di cancellazione, come detto, sono davvero notevoli. Dall'analisi effettuata nella sezione 2.2.4 si è scoperto che un simile risultato è ottenuto tramite un semplice filtraggio passa-banda sulle frequenze della voce che utilizza una serie di accortezze per migliorare la qualità del segnale filtrato.

Infatti l'utilizzo di filtri di ordine elevato diminuisce le distorsioni nelle alte frequenze della voce pur cancellando molte frequenze del rumore. Inoltre si è scoperto che non si utilizza un semplice passa-basso unitario: si ottengono prestazioni migliori con un filtro che applica un guadagno elevato nella banda della voce.

Infine l'attivazione automatica del filtro si è rivelata una soluzione molto efficace. Così negli ambienti silenziosi si cancella il meno possibile preservando la qualità della voce, e negli ambienti rumorosi si effettua una fortissima cancellazione.

L'unico, fondamentale problema del sistema ST è il ritardo di elaborazione che lo rende inutilizzabile.

Tuttavia dall'analisi si è scoperto che la natura di questo ritardo non è connessa alla cancellazione (che di per sé può essere fatta quasi in tempo reale) ma è una caratteristica del sistema, dovuta alla sua origine nell'ambito della telefonia. Il ritardo, dell'ordine di grandezza di 100ms, è facilmente eliminabile in un sistema di cancellazione digitale del rumore progettato ad hoc per avere un ritorno in cuffia del parlante.

2.3 Caratteristiche di un sistema di comunicazione con cancellazione del rumore ideale

Dopo aver analizzato lo stato dell'arte si riportano le caratteristiche che deve presentare un sistema di comunicazione con cancellazione del rumore *ideale*:

1. Tempo di elaborazione del segnale non percepibile dall'utente.
Il tempo per il ritorno in cuffia della voce deve essere inferiore al tempo percepibile dall'uomo come fastidioso¹²
2. Cancellazione del rumore mediante l'uso di un filtro passa-banda di ordine elevato: in questo modo si possono tagliare le altre frequenze senza distorcere le frequenze della voce. Inoltre è consigliabile l'uso di un filtro con guadagno elevato al fine di avere un buon segnale in uscita.
3. Attivazione del filtro in funzione del rumore ambientale.
La percezione del rumore viene fatta con algoritmi di rilevazione del parlato, attraverso l'analisi della varianza e dell'energia del segnale.

¹²Questa soglia è soggettiva ed è di circa di 30 millisecondi

4. Utilizzo di un AGC ed apposito hardware per avere, in uscita, una potenza tale da garantire un volume apprezzabile.
5. Struttura software flessibile, per garantire facili modifiche o personalizzazioni dei parametri di funzionamento.
6. Struttura hardware flessibile ed economica, per garantire la massima versatilità possibile anche in futuro.

Capitolo 3

Impostazione del problema di ricerca

In questo capitolo verrà illustrata la realizzazione dell'apparato sperimentale prototipale, che costituisce un irrinunciabile strumento di supporto all'analisi spettrale dei segnali nella scelta del tipo di filtraggio da utilizzare.

Successivamente verrà trattato il problema dei parametri di campionamento del segnale (frequenza e risoluzione) e il ritardo temporale massimo introducibile dal sistema sulla linea di comunicazione.

Infine viene mostrata l'analisi spettrale della voce umana e del rumore presente nella macchina da rally, per verificare che ci sia una separazione in frequenza almeno parziale, al fine di poter utilizzare un filtraggio di tipo passivo con buoni risultati.

3.1 Realizzazione dell'apparato sperimentale prototipale

L'apparato sperimentale realizzato utilizza due centraline Stilo WRC03, con interposta una centralina cRIO 9101 per la digitalizzazione e l'elaborazione del segnale audio.

Il sistema sperimentale presentato qui di seguito è prototipale: per velociz-



Figura 3.1: Apparato sperimentale prototipale: sono visibili le due centraline WRC03, il cRIO 9101 e un paio di cuffie

zare al massimo la fase preliminare sono stati scelti componenti fondamentali già disponibili pronti all'uso, come le centraline, e sono stati collegati insieme. Il segnale audio viene trasmesso via cavo, per facilitare la realizzazione del sistema e minimizzare le interferenze con altre apparecchiature presenti in laboratorio.

3.1.1 Descrizione dei componenti

Centralina analogica WRC03

La centralina WRC03 viene utilizzata nel sistema sperimentale digitale sia per permettere l'acquisizione del segnale in ingresso al cRIO 9101, sia come stadio di amplificazione in uscita, verso le cuffie.

Dal lato acquisizione la caratteristica spettrale del WRC03 ha condizionato la scelta della frequenza di campionamento: la presenza di componenti residue di segnale a 7kHz ha imposto una frequenza di campionamento alta per rispettare il teorema di Shannon. Dopo opportune verifiche, presentate in questo stesso capitolo alla sezione 3.2.1, nel sistema sperimentale digitale la frequenza di campionamento è stata fissata a 20kHz per evitare problemi di aliasing.

Analisi tensione massima

Questo esperimento ha l'obiettivo di individuare il range di volt effettivamente utilizzato dal WRC03 acquisendo col cRIO un segnale (voce + rumore di tipo rally) passato attraverso la centralina Stilo a volume massimo, per verificare che sia possibile l'accoppiamento tra i due apparati e le eventuali condizioni da rispettare.

Il campionatore A/D in ingresso al cRIO dispone di un ingresso a $\pm 10V$ e 16bit, corrispondenti a valori numerici massimi di ± 32767 : dal plot numerico nel tempo del segnale si vede che si arriva a valori numerici di circa ± 12000 . I

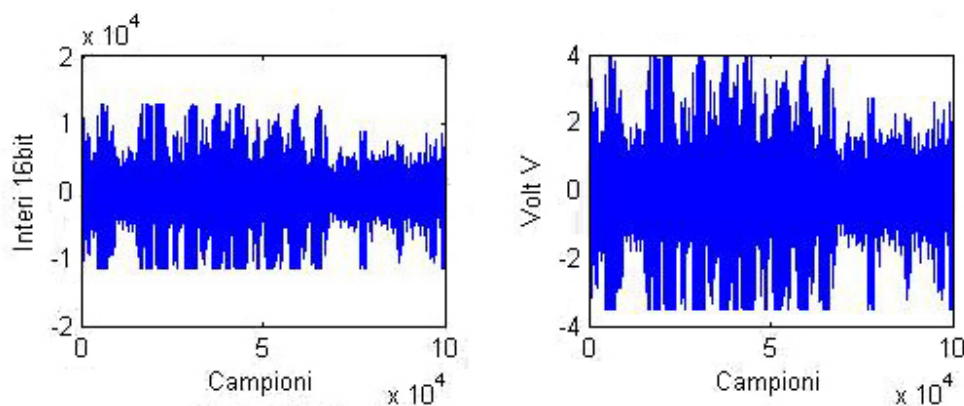


Figura 3.2: Spettro del sistema Stilo in saturazione con voce e rumore rally in ingresso

punti in cui si giunge a saturazione sono quelli in cui l'operatore parlava a voce molto alta nel microfono. Tramite una semplice operazione di proporzione ($32767:10 = 12000:X$) è possibile convertire i valori numerici in valori di tensione.

La centralina Stilo, alimentata da una pila a 9V, è in grado di erogare una tensione compresa tra $\pm 4V$: nella Figura 3.2 si vede che si giunge a saturazione a questi due valori. L'analisi di tensione massima effettuata ha mostrato che è possibile alzare al massimo il volume del segnale in uscita dalla centralina Stilo verso il cRIO, ponendo solo attenzione a non distorcere il segnale.

Dal lato dell'uscita il segnale proveniente dal cRIO è a $\pm 10V$, mentre il WRC03 acquisisce a soli $\pm 100mV$ dal microfono. Per rendere possibile l'accoppiamento è stato realizzato un partitore tramite due resistenze, che simula la presenza del microfono lato navigatore (facendo accendere il WRC03), e abbassa la tensione in uscita dal cRIO verso la centralina Stilo.

L'utilizzo delle centraline Stilo in ingresso e in uscita al cRIO permette di regolare facilmente i volumi di acquisizione e riproduzione tramite potenziometri, e rende possibile il confronto tra il sistema digitale e quello analogi-

co, tramite un commutatore posto tra le cuffie e le centraline stesse. Il confronto diretto tra sistema analogico e digitale è il punto di forza di questa configurazione, essa permette all'ascoltatore di apprezzare facilmente le differenze nella modulazione della voce e nel filtraggio del rumore, semplicemente agendo su un deviatore.

Centralina prototipale cRIO 9101

La centralina National Instruments[11] cRIO 9101 è il componente principale del sistema sperimentale: il segnale audio viene campionato e filtrato al suo interno, per poi essere rimandato sull'output analogico.

La centralina National Instruments cRIO 9101 è composta da due parti principali: una FPGA (hardware riprogrammabile) da 1M gate, ed un sistema embedded di controllo cRIO 9002 costituito da microprocessore, 64 MB di ram e sistema di memorizzazione di massa.

Nel setup sperimentale sono stati utilizzati 2 dei 4 slot di espansione per i moduli di I/O: cRIO 9215 (input analogico) e cRIO 9263 (output analogico). Il cRIO 9101 permette accesso hardware a basso livello a ogni modulo di I/O CompactRIO, per creare schemi di timing, triggering e sincronizzazione.

L'ambiente di sviluppo visuale per il software della centralina cRIO è Labview, composto di un modulo per la programmazione dell'host real time e di uno per l'hardware riprogrammabile FPGA.

L'utilizzo della centralina cRIO 9101 e dell'ambiente di programmazione Labview permette una maggiore flessibilità dal punto di vista della scrittura del software di controllo del segnale e dei filtri, ma durante la sperimentazione è emerso che limita fortemente le prestazioni complessive dell'apparato.

Non è stato possibile trasmettere il segnale campionato a 20kHz dall'hardware riprogrammabile (FPGA) al calcolatore interno (Host) a causa di limitazioni intrinseche nel bus di comunicazione interno al cRIO.

Il transfer rate tra l'FPGA e il calcolatore interno è limitato a circa 70-100

kB/s totali, che divisi per i due sensi della comunicazione danno un totale di 35-50kB/s per ogni verso, il valore massimo dipende anche dal numero di operazioni totali che viene fatto dal controller real time.

In questa applicazione, acquisendo il segnale a 20 kS/s per 2 canali, con una risoluzione di 16bit (2 byte), si arriva ad un transfer rate totale di 80 kB/s, che è nell'intorno del limite del sistema. Per non oltrepassare questo limite si è provato ad abbassare la frequenza di campionamento: trasferendo in un unico cluster il segnale campionato a 10 kHz è stato possibile solo dividere il cluster in entrata e ricomporlo sull'uscita. L'uso di qualsiasi altra modalità di trasferimento o l'inserimento di una qualsiasi operazione matematica nel ciclo di esecuzione dell'host real time causava perdita di pacchetti e conseguente interruzione del segnale audio.

Nonostante le numerose prove effettuate non è quindi stato possibile utilizzare il calcolatore real time della centralina prototipale, ma solo l'hardware riprogrammabile FPGA.

L'hardware riprogrammabile del cRIO ha risorse ridotte. In particolare, i fattori critici sono:

- Il numero di moltiplicatori disponibile
- La quantità di memoria per variabili e costanti (slices)
- La mancata gestione dei tipi numerici decimali

Il massimo numero di moltiplicatori a 16 bit disponibili è 40. Tuttavia l'applicazione necessita di moltiplicatori a 32 bit, che per essere implementati richiedono l'uso di 3 moltiplicatori a 16 bit; in questo modo il numero di moltiplicatori disponibili scende a 13.

Per superare questo limite sono state condivise le risorse hardware disponibili tra le diverse funzioni software del programma. Come visibile in Figura 3.3, è stato fatto ampio uso di files subVI contenenti le strutture dei filtri; in alcuni casi si è reso necessario arrivare a condividere i singoli moltiplicatori.

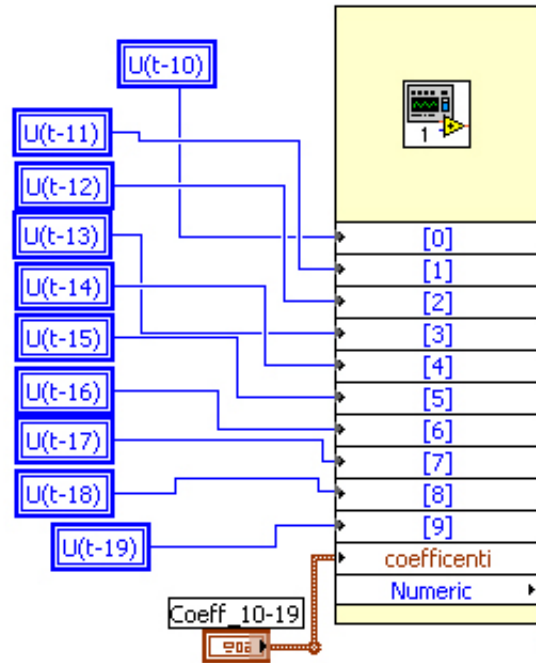


Figura 3.3: Codice LabView: esempio di subVI contenente un filtro digitale. Le costanti moltiplicative vengono passate tramite un cluster

La condivisione delle risorse costringe a serializzare alcune operazioni che potrebbero essere svolte in parallelo, rallentando la velocità di clock massima a cui il codice può essere eseguito sul cRIO. Per limitare gli effetti negativi di questo metodo di programmazione sono stati studiati e applicati tutti i principi di buona programmazione in Labview, spiegati dai tutorial del sito della National Instruments [11].

I miglioramenti più significativi nella velocità di esecuzione sono indotti dal pipelining dei cicli di esecuzione: attraverso questa ottimizzazione è possibile parallelizzare una serie di cicli in cascata, riducendo il tempo totale di esecuzione, e ottenendo così uno speedup significativo che bilanci almeno in parte la perdita di prestazioni dovuta alla condivisione.

Il numero di "slices", con il quale il sistema implementa in hardware tutte

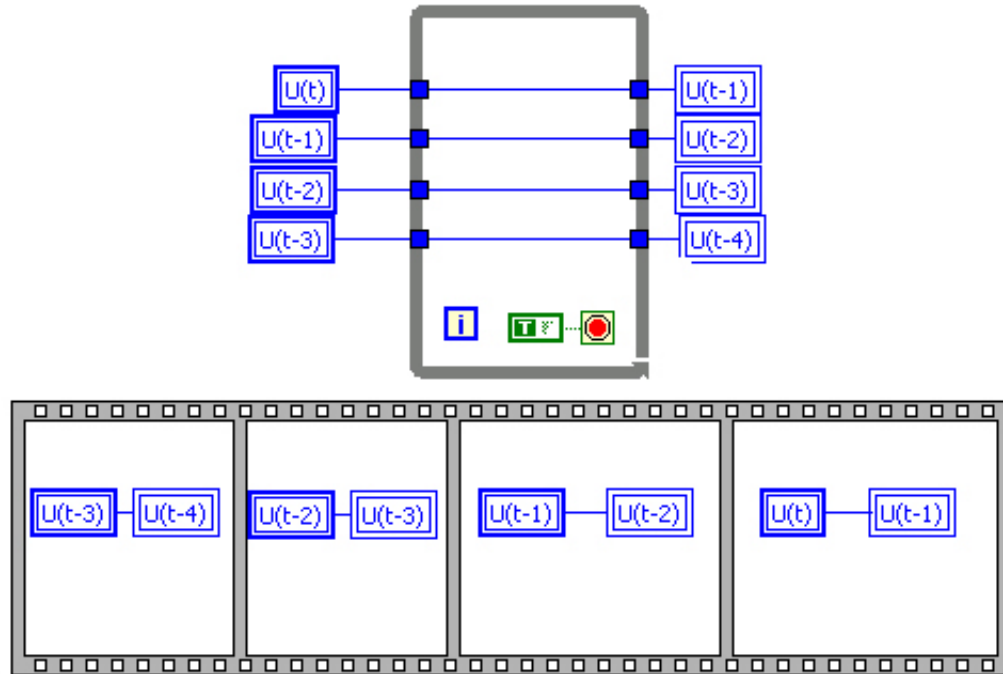


Figura 3.4: Esempio di esecuzione di codice Labview in parallelo (in alto) e in serie (in basso)

le costanti, le variabili e le strutture di controllo, è di 7000.

Questo limita fortemente la dimensione complessiva del codice che è possibile eseguire: è stato possibile implementare filtri di ordine elevato (40) solo attraverso l'ottimizzazione spinta degli algoritmi e la condivisione delle risorse. Per limitare l'uso degli slices è stato obbligatorio utilizzare il tipo numerico minimo per ogni costante che veniva inserita. Un ulteriore risparmio di spazio di memorizzazione per le variabili è stato ottenuto accorpendo le costanti moltiplicative dei filtri all'interno di clusters, come visibile in Figura 3.3.

I tipi numerici double e float non sono supportati, al massimo sono disponibili numeri interi a 32 bit.

L'assenza di numeri decimali ha costretto ad utilizzare la divisione intera:

i coefficienti dei filtri sono stati approssimati alla quarta cifra decimale, moltiplicando entrambi i membri per 10000.

La limitata capacità di calcolo della centralina prototipale ha certamente rallentato i tempi di sviluppo, inoltre l'utilizzo dell'hardware riprogrammabile FPGA al posto che dell'host ha costretto alla completa compilazione del software ad ogni singola modifica.

Ogni compilazione viene svolta con tempi variabili tra i 20 e i 75 minuti, a seconda della complessità delle funzioni implementate e della capacità di calcolo del personal computer impiegato. Per superare almeno in parte questi limiti sono stati utilizzati quattro sistemi in parallelo, due notebook e due pc desktop, per la compilazione del codice Labview.

A causa delle limitazioni illustrate qui sopra i risultati ottenuti nelle prove di filtraggio effettuate con questo apparato sono certamente migliorabili utilizzando hardware dedicato: questo potrà essere verificato implementando i filtri e il sistema di comunicazione digitale sulla board definitiva.

3.2 Analisi del campionamento del segnale vocale

Dopo l'assemblaggio dell'apparato sperimentale sono state effettuate prove di ascolto in configurazione a filo diretto, collegando in Labview l'input del cRIO con l'output. Le prove "a filo diretto" hanno permesso di verificare il funzionamento dei componenti hardware del sistema e di affinare la taratura dei volumi di ingresso e di uscita.

3.2.1 Frequenza di campionamento

La configurazione "a filo diretto" è stata sfruttata per l'analisi e la successiva scelta della frequenza di campionamento. La caratteristica spettrale

della centralina Stilo causa problemi di aliasing al sistema sperimentale digitale quando la frequenza di campionamento scende sotto i 16kHz, perché non viene più rispettato il teorema di Shannon (per l'enunciato del teorema del campionamento di Shannon e la spiegazione dell'effetto di aliasing vedi capitolo 4.1).

Inizialmente si riteneva che, se la centralina Stilo avesse avuto un taglio netto dello spettro a 4kHz¹, sarebbe stato possibile utilizzare senza problemi una frequenza di campionamento di 8/10kHz, simile a quella del sistema ST. Per verificare questa ipotesi in condizioni differenti (senza avere l'handicap dello spettro con componenti fino a 7kHz) è stato sfruttato un microfono collegato ad un notebook ed è stata effettuata una registrazione vocale di prova utilizzando il lettore multimediale di Windows, senza utilizzare l'apparato sperimentale. La voce campionata alla frequenza di 8kHz a 16 bit di risoluzione è equiparabile a quella del sistema ST: ha una dinamica inferiore a quella della centralina analogica Stilo ma rimane sufficientemente naturale e intellegibile.

Per provare sul sistema sperimentale l'effetto di una frequenza di campionamento inferiore ai 18/20kHz permessi dallo spettro della centralina Stilo è stato realizzato un semplice filtro antialiasing del primo ordine, costituito da una resistenza ed un condensatore, da interporre tra la centralina Stilo in input e il modulo di acquisizione cRIO 9215.

Il filtro antialiasing realizzato, che non è alimentato da una fonte di energia, abbassa in modo rilevante il volume di ingresso, e questo impedisce di provare un ordine superiore al primo senza diminuire eccessivamente l'intensità del segnale. Nonostante la sua semplicità il filtro del primo ordine con frequenza di taglio a 5kHz ha permesso di abbassare la frequenza di campio-

¹La voce umana non presenta grosse componenti oltre i 2kHz, quindi se si usassero 4kHz, come frequenza di taglio della centralina Stilo, anziché 7kHz non cambierebbero in maniera netta la resa.

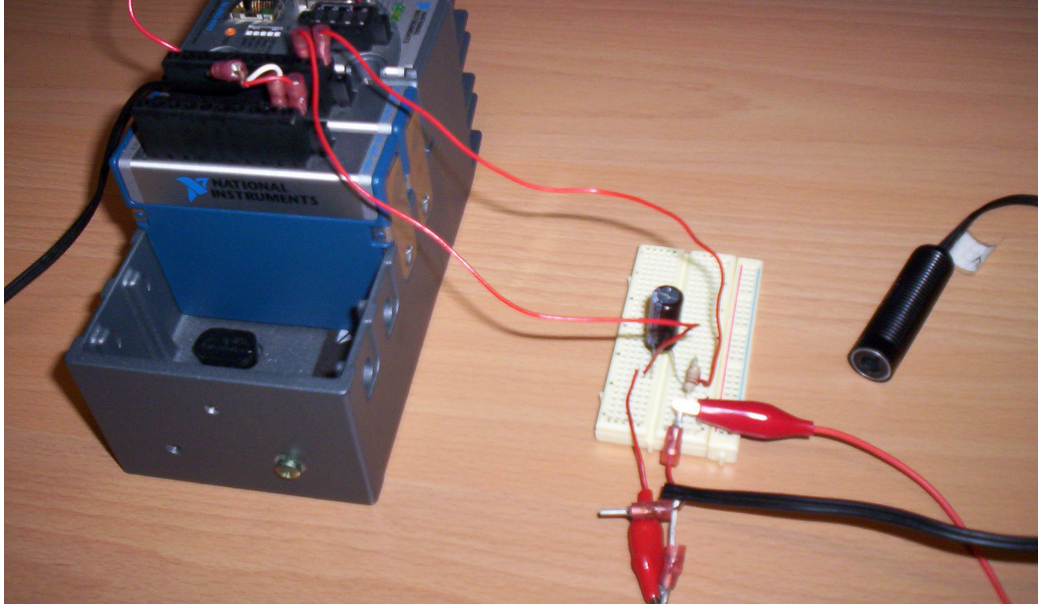


Figura 3.5: Collegamento del filtro antialiasing (a destra) al cRIO (a sinistra)

namiento del sistema sperimentale a 12kHz senza avere problemi di aliasing. Questa prova ha evidenziato quindi la necessità di modificare la taratura del WRC03 per avere uno spettro con una frequenza di taglio inferiore se si desidera abbassare la frequenza di campionamento. Per le altre prove sperimentali effettuate non è stato utilizzato il filtro e la frequenza di campionamento è stata fissata a 20kHz, per evitare un degrado del segnale causato dall'aliasing.

3.2.2 Risoluzione in bit

Questo esperimento ha l'obiettivo di individuare il bit range effettivamente utilizzato del cRIO acquisendo in ingresso 5 secondi di segnale (voce + rumore di tipo rally) passato attraverso la centralina Stilo a volume massimo.

Il campionatore A/D in ingresso al cRIO dispone di un ingresso a $\pm 10V$ e 16bit, corrispondenti a valori numerici massimi di ± 32767 : dal plot numerico

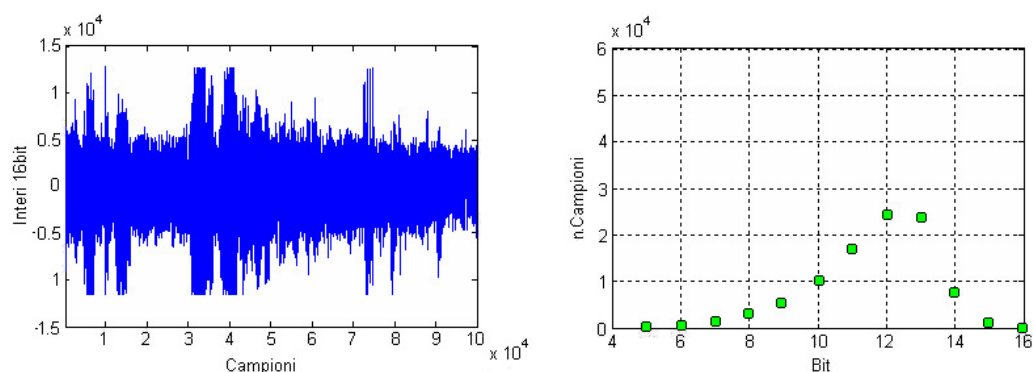


Figura 3.6: Andamento del segnale voce più rumore in uscita dal WRC03 a volume massimo, e relativa distribuzione su 100000 campioni

nel tempo del segnale si vede che arriva a valori numerici di circa ± 12000 (15 bit effettivamente utilizzati). Per capire la distribuzione dei campioni, (ovvero quanti dei 100000 campioni acquisiti richiedono l'uso di almeno n bit) è stato fatto un conteggio: l'analisi mostra che nessun campione utilizza 16 bit e solo il 3 per cento utilizza 15 bit, circa l'8 per cento richiede 14 bit, e il 25 per cento ne richiede almeno 13. Da questa misura emerge che è possibile utilizzare un campionatore A/D a 14 bit senza un'evidente approssimazione del segnale digitale.

Per comprendere meglio il livello di approssimazione introdotto da una riduzione del numero di bit del segnale digitale si è provveduto a sottocampionare in Matlab un segnale voce già acquisito, dividendo opportunamente il segnale². Per simulare un campionatore 14 bit a partire da uno a 16 sono stati uniti 4 livelli in uno solo, sono stati accorpati 16 valori per simulare il campionatore a 12bit, e 256 per quello a 8bit.

Da prove di ascolto effettuate è emerso che passare a 14bit non impatta in

²ricordiamo che l'ultimo bit del campionatore per ora rimane inutilizzato, quindi quando scriveremo "campionatore a n bit" in realtà i bit utilizzati effettivamente dal range di uscita della centralina Stilo sono $n-1$.

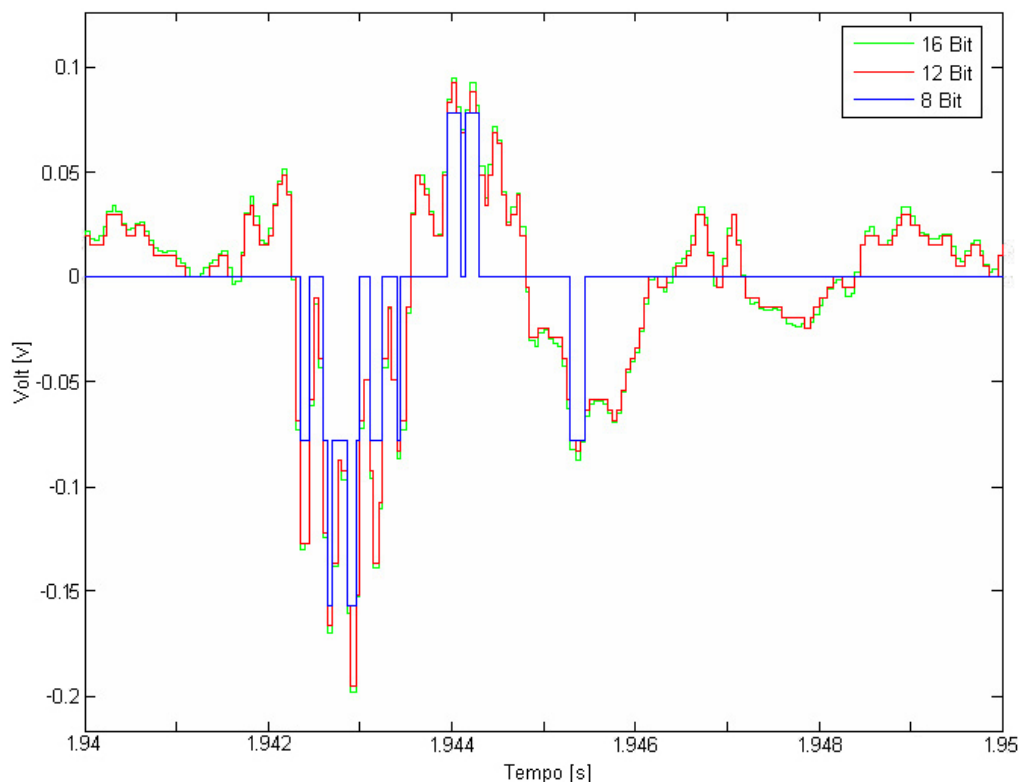


Figura 3.7: Al calare della risoluzione il segnale originale è sempre più approssimato

modo evidente sulla qualità del segnale (è ancora possibile riconoscere l'identità dell'interlocutore che sta parlando); a 12 bit si avverte una leggera tonalità metallica nella voce, con resa della voce simile a quello di una telefonata; a 8 bit la voce è scarsamente intellegibile e completamente metallica. L'immagine ingrandita evidenzia la differenza di precisione tra le diverse soluzioni: i segnali con bitrate poco degradato riescono quasi a sovrapporsi con quello originale a 16 bit, quello a 8 no.

Va fatto rilevare che la differenza di costo industriale tra un campionario A/D a 16 bit e uno a 14 o a 12 non è molto elevata (si tratta di pochi dollari al pezzo), considerando anche i volumi di produzione della Stilo. Si ritiene opportuno effettuare queste analisi per aumentare la comprensione del com-

portamento del segnale voce digitalizzato, e per avere tutti i parametri definiti quando si dovrà effettuare la scelta dell'architettura hardware definitiva.

3.2.3 Ritardo temporale massimo del sistema

All'interno di un impianto di comunicazione pilota-navigatore il problema del ritardo temporale è critico: il sistema ST è risultato inutilizzabile dalla Stilo proprio per questo motivo.

Un soggetto umano che parla aspetta a iniziare una nuova parola finché non percepisce (attraverso l'udito) che ha finito di pronunciare la precedente: il ritardo temporale introdotto artificialmente dal sistema rallenta questo meccanismo, impedendo di parlare normalmente. Se il ritardo tra la l'emissione della voce e il suo ascolto è troppo elevato colui che sta parlando è spinto a rallentare, scandendo le parole e le sillabe, fino a bloccarsi completamente.

Per realizzare questo esperimento è stata programmata l'FPGA in modo che fosse possibile inserire un ritardo temporale variabile (da 0 a 1 secondo a passi di un millisecondo) sul canale di comunicazione. Il ritardo temporale massimo sopportabile non è rilevabile tramite misurazioni strumentali, in quanto causa una reazione solo in un soggetto umano, pertanto sono state effettuate da diverse persone numerose prove di ascolto con ritardi differenti. Va sottolineato che i risultati sono soggettivi, leggermente variabili tra una persona e un'altra, tuttavia l'effetto di rallentamento e di fastidio sono stati comuni a tutti gli ascoltatori.

- Quando il ritardo che viene aggiunto è assente o ridotto non è percepibile, si parla normalmente. Questo risultato, per quanto sembri scontato, conferma che il campionamento e la successiva riconversione analogica del segnale non introducono ritardi significativi.
- Il ritardo temporale diventa percepibile quando si avvicina ai 30 ms,

inizialmente dà la sensazione di un leggero eco, poi diventa sempre più fastidioso.

- Attorno ai 75/100ms diventa praticamente impossibile parlare velocemente ed ascoltarsi (si ha quest'effetto nel sistema ST, come visto nel capitolo 2.2).
- Oltre i 300/400ms la voce nelle cuffie non è più percepita come propria e si riesce a parlare velocemente, senza però sentirsi.

In base ai risultati illustrati qui sopra è evidente che il sistema di comunicazione da realizzare dovrà avere un ritardo ridotto, inferiore ai 30ms.

3.3 Analisi spettrale della voce umana e del rumore rally

La condizione necessaria per ottenere un buon risultato con un filtraggio solo passivo è verificare che ci sia separazione in frequenza tra segnale e rumore. A tale scopo sono stati acquisiti separatamente voce e rumore rally tramite la centralina Stilo ed è stata effettuata l'analisi spettrale.

Il segnale voce presenta le componenti di intensità maggiore tra i 400 e 1500Hz. Il segnale rally presenta componenti di intensità non trascurabile attorno ad 1kHz, via via crescenti fino al picco a 2,5kHz (dovuto alla particolare amplificazione della centralina Stilo) e poi cala fino a diventare trascurabile attorno ai 3,5kHz.

Essendoci parziale separazione in frequenza (i due segnali risultano sovrapposti tra 1kHz e 1,5/2kHz) è possibile eliminare le componenti del rumore attraverso un filtraggio passivo passabasso. Poichè i segnali sono parzialmente sovrapposti la frequenza di taglio ottima del filtro non è identificabile univocamente, occorre cercare un trade-off tra la presenza delle componenti acute della voce e la cancellazione delle componenti gravi del rumore, e

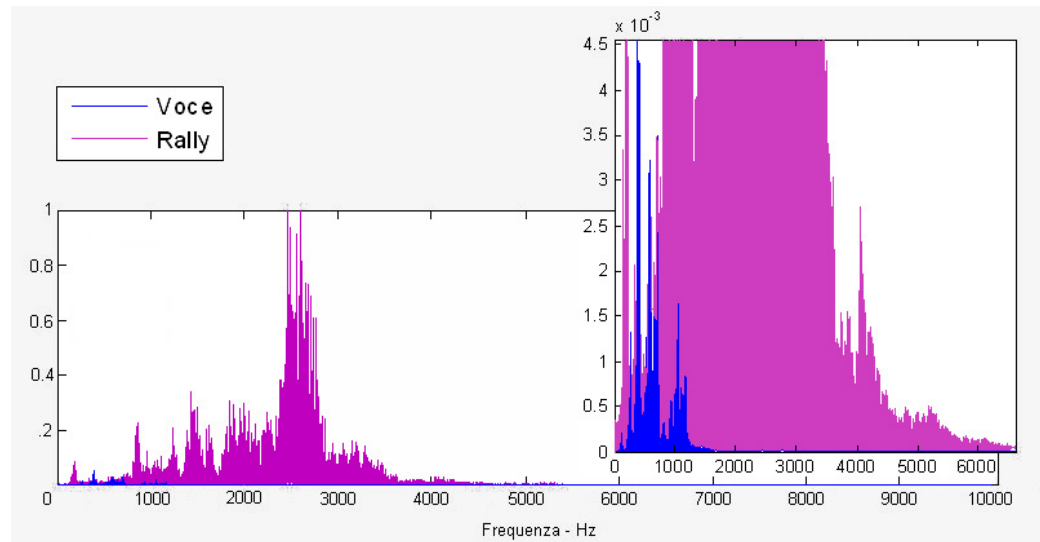


Figura 3.8: Il segnale voce e il rumore (normalizzati uno rispetto all'altro) sono parzialmente sovrapposti: a destra è visibile un ingrandimento

questo può essere fatto al meglio solo attraverso l'ascolto del risultato del filtraggio.

Un altro aspetto rilevante nella riduzione del rumore percepito in cuffia è data dal rapporto tra il segnale voce e il rumore: il filtro da implementare pertanto dovrà avere un'elevata amplificazione delle frequenze voce e un'elevata riduzione di quelle del rumore.

Capitolo 4

Progetto logico della soluzione del problema

Verranno ora presentati e discussi una serie di enunciati e teorie che costituiscono le basi sulle quali poggia la nostra analisi ed il progetto del nuovo sistema digitale.

Verranno brevemente illustrate alcune considerazioni su:

- Teoria del campionamento
- Aliasing
- Il problema del filtraggio digitale
- Gli algoritmi di AGC

4.1 Teoria del Campionamento

Il campionamento consiste nell'osservazione, in determinati istanti di tempo, di grandezze analogiche variabili nel tempo e nelle ampiezze.

Nel caso di campionamento ripetuto con periodicità T_s , ossia alla frequenza

di campionamento $f = 1/T_s$, il fondamentale *Teorema del Campionamento* fornisce le condizioni da rispettare affinché il segnale originale ed il segnale campionato abbiano lo stesso contenuto informativo.

L'importanza del teorema è insita nel fatto che esso consente di rappresentare un segnale tempo-continuo mediante uno tempo-discreto, senza alterare l'informazione.

L'enunciato originale del teorema del campionamento, come appare nell'articolo di Shannon del 1949, è il seguente[6]: " *se una funzione $s(t)$ non contiene frequenze superiori a BW Hz, allora essa è completamente determinata dai valori assunti in corrispondenza di istanti spazati tra loro di $1/2BW$ secondi*".

In pratica si afferma che un segnale tempo-continuo può essere ricostruito partendo da una successione di campioni tempo-discreti cadenzati a distanza $T_s = 1/2BW$, se ad ogni campione si sostituisce (in effetti si convolve) un seno cardinale $\text{sinc}(\cdot) = \sin(\cdot)/(\cdot)$ largo quanto la distanza stessa dei campioni. In definitiva, si utilizza la seguente formula di ricostruzione:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(n \cdot T_s) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot (t/T_s - n))}{(\pi \cdot (t/T_s - n))}$$

in cui $s(t)$ è la funzione analogica tempo-continua, mentre $s(n \cdot T_s)$ è la sequenza dei campioni.

4.1.1 Aliasing

Se si campiona ad una frequenza f_s non sufficientemente elevata, si possono creare campioni tempo-discreti che, una volta inviati all'utilizzatore finale (il ricostruttore del segnale tempo-continuo) daranno origine ad un segnale diverso da quello originale desiderato. Questo problema è quasi sempre da evitare per non causare dei grossolani errori nel segnale convertito.

Solamente con una frequenza $f_s > 2 \cdot f_{in}$, cioè equivalente a dire $T_s < 1/2 \cdot T_{in}$, ovvero quando il campionamento fornisce almeno due campioni

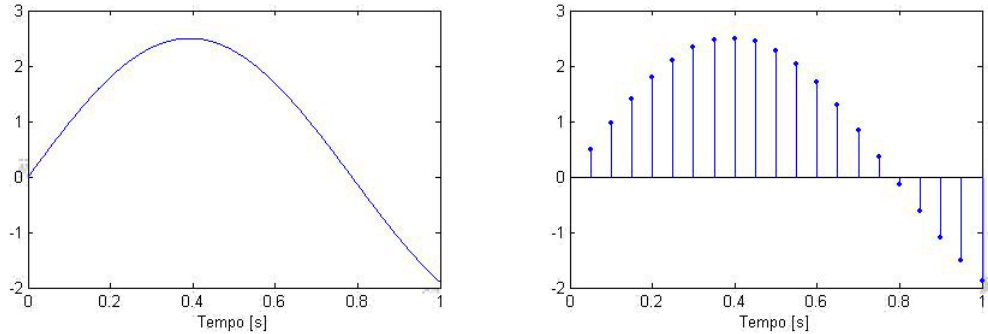


Figura 4.1: esempio di un segnale analogico e di un suo campionamento

all'interno del periodo della sinusoide in ingresso, il segnale campionato mantiene l'informazione corretta sul segnale originario.

Filtraggio antialiasing

Come visto poco prima, data una banda utile del segnale di ingresso, f_{max} , è necessario scegliere una frequenza di campionamento f_s almeno doppia. Purtroppo, però, oltre al segnale utile sono presenti in ingresso anche altre componenti, quali disturbi, rumore, armoniche spurie. Anche se alcune di esse presentassero componenti a frequenze maggiori di $f_s/2$, queste potrebbero essere riportate in banda base dall'operazione di campionamento, generando distorsione ed aliasing.

La cosa estremamente deleteria è che queste componenti spurie equivocate, finirebbero con l'avere una frequenza nella banda utile del segnale e, in definitiva, verrebbero interpretate come facenti parte del segnale in ingresso originario.

Per questo motivo è sempre necessario assicurarsi che all'ingresso del campionatore entrino segnali limitati in banda, al di sotto di $f_s/2$. Si dovrà per questo ricorrere ad un filtro particolarmente selettivo, che viene appunto

indicato come *filtro anti-aliasing* (Lo studio e la realizzazione di un filtro anti-aliasing per la nostra applicazione sono discussi nel capitolo 3.2.1).

4.2 Filtraggio digitale

In base alla loro risposta in frequenza (H) i filtri vengono classificati in: passa-basso, passa-alto, passa-banda e arresta-banda (o notch)[1][2].

La risposta in frequenza del filtro *passa-basso* è caratterizzata dalla frequenza f_0 denominata frequenza di taglio, tale per cui le frequenze $f < f_0$ si abbia $|H| = 1$, mentre per le frequenze $f > f_0$ sia $|H| = 0$.

Ciò significa che le sinusoidi in ingresso al filtro aventi frequenza minore di f_0 nell'attraversarlo non subiranno nessuna variazione di ampiezza, mentre le sinusoidi aventi frequenza maggiore di f_0 subiranno una completa attenuazione nell'attraversarlo.

La risposta in frequenza di un *passa-alto* è complementare a quella del passa-basso; le sinusoidi poste in ingresso al filtro aventi frequenze $f > f_0$ lo attraversano inalterate, mentre le sinusoidi con frequenze minori di f_0 subiscono un'attenuazione completa.

La risposta in frequenza di un filtro *passa-banda* è caratterizzata da una banda di frequenze $f_l < f < f_h$ tale per cui tutte le sinusoidi in ingresso al filtro aventi frequenze all'interno di una tale banda emergono all'uscita del filtro con le ampiezze invariate, mentre quelle con frequenze al di fuori della banda sono attenuate. La differenza $f_h - f_l$ è detta *larghezza di banda* del filtro.

4.2.1 Ordine dei filtri

Le definizioni della sezione precedente riguardavano *filtri ideali*: nell'implementazione pratica non è possibile ottenere dei filtri con simili prestazioni,

ma al più si possono ottenere filtri che al crescere dell'*ordine* tendono ad avvicinarsi a questi ideali.

I filtri reali vengono classificati in base al loro ordine, che corrisponde al grado della funzione di trasferimento H del filtro, ossia all'ordine dell'equazione differenziale che lega le grandezze in uscita a quelle in ingresso.

I filtri vengono suddivisi in due grosse categorie: i *filtri FIR*, a risposta dell'impulso finita ed i *filtri IIR* a risposta dell'impulso infinita.

I filtri FIR, Finite Impulse Response, sono del tipo ad anello aperto. Le loro uscite sono esclusivamente in funzione di un numero finito di segnali d'ingresso e non hanno alcun elemento di reazione.

Un filtro di ordine n presenterà una funzione di trasferimento di questo tipo:

$$Y(t) = c_0 \cdot U(t) + c_1 \cdot U(t-1) + c_2 \cdot U(t-2) + \dots + c_n \cdot U(t-n)$$

Un filtro IIR, Infinite Impulse response, può essere visto come una cascata di due blocchi. Un blocco è la classica struttura di un filtro FIR con N ritardi, un secondo blocco è quello dove il segnale d'uscita $Y(t)$ è prelevato, ritardato, pesato e riportato all'ingresso (retroazione).

La funzione di trasferimento di questi filtri sarà del tipo:

$$Y(t) = b_0 \cdot U(t) + b_1 \cdot U(t-1) + b_2 \cdot U(t-2) + \dots + b_{n_b} \cdot U(t-n_b) + \\ a_1 \cdot Y(t-1) + a_2 \cdot Y(t-2) + \dots + a_{n_a} \cdot Y(t-n_a)$$

Lo svantaggio dei FIR, rispetto ai IIR, è che questi richiedono un maggiore ritardo di fase. Tuttavia i coefficienti c di un FIR sono meno sensibili ad errori dovuti ad eventuali approssimazioni numeriche.

La Figura 4.2 riporta il modulo di alcuni filtri passa-basso con taglio a $2KHz$. Qui si vede come all'aumentare dell'ordine del filtro aumenti anche la pendenza del taglio effettuato, e di conseguenza diminuisce la distorsione sul segnale: nel caso del IIR del secondo ordine si vede come il filtro comincia a tagliare, e dunque a distorcere segnale, intorno ad $1KHz$ circa. Inoltre si vede

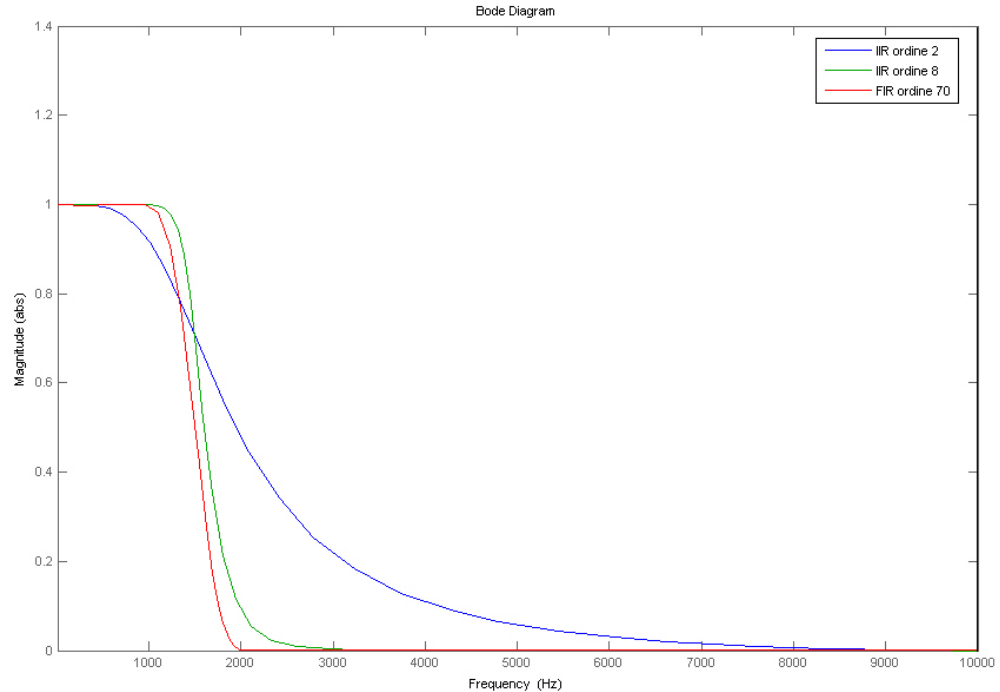


Figura 4.2: Esempi di passa-basso di diverso ordine

come questo tipo di filtro non elimina completamente tutte le alte frequenze. Invece i filtri di ordine più elevato presentano una maggiore pendenza del taglio, distorcono meno la banda del segnale e cancellano le frequenze non desiderate.

Si noti, infine, come alle medesime condizioni di taglio, un FIR presenti un grado sensibilmente inferiore rispetto ad un IIR.

4.3 Algoritmo di AGC

L'*Automatic Gain Control* (AGC) è una procedura tramite la quale si modifica l'ampiezza complessiva del segnale allo scopo di mantenerne ottimale il livello. Questa operazione è ottenuta modificando dinamicamente il guada-

gno del sistema.

E' molto utilizzato, in generale, per fare in modo che il segnale abbia sempre una certa ampiezza[5].

Come visto nel capitolo 2.2, anche la soluzione ST lo adottava: l'AGC, applicato ad un segnale che ha subito un filtraggio, apporta considerevoli benefici in termini del volume di audio in uscita dal sistema.

Il segnale filtrato, infatti, presenta una riduzione dell'ampiezza media del segnale rispetto al segnale originale. Questo si traduce in una perdita del volume: infatti il volume in cuffia è direttamente proporzionale all'ampiezza, in volt, che entra nello speaker.

Applicando sullo stadio di uscita un AGC invece, si elimina completamente il problema della perdita di volume. Infatti basta impostare i parametri che regolano il funzionamento della procedura per far sì che si sfrutti tutto il range disponibile, riuscendo così a dare un uscita un segnale molto ampio.

Funzionamento dell'AGC

Ad ogni istante t , il *guadagno* K del sistema viene aggiornato in funzione della differenza tra il valore misurato ed un set-point di riferimento R definito dall'utente.

L'operazione eseguita può essere formalizzata attraverso il seguente insieme di equazioni:

$$Y_{OUT}(t) = K(t) \cdot Y_{IN}(t)$$

$$E(t) = R - |Y_{IN}(t)|$$

$$K(t+1) = K(t) + g \cdot E(t)$$

dove g è un "fattore correttivo" dell'algoritmo ($g \approx 10^{-6}$).

In generale più g è piccolo e più lentamente l'algoritmo convergerà all'ampiez-

za desiderata, tuttavia con un g troppo grande l'algoritmo non è più convergente.

Rapporto segnale rumore

Per quanto riguarda il rapporto segnale/rumore di per sé l'uso di un AGC non ha influenza su questo parametro. Infatti questa procedura si limita ad amplificare un segnale per cercare di mantenerlo in una certa ampiezza.

Tuttavia, se l'AGC viene applicato in uscita ad un filtro che cancella il rumore (e di conseguenza il rapporto segnale/rumore è già stato in parte modificato dal filtro), introduce un ulteriore beneficio aumentando ulteriormente questo rapporto.

Sull'uscita dell'AGC il rapporto segnale/rumore sarà notevolmente migliorato perché si è amplificata la sola parte di segnale (in quanto in uscita dal filtro il rumore viene cancellato) riportandola a quei valori medi di energia che aveva il segnale originario rumoroso.

Tutte queste considerazioni si possono vedere nelle seguenti analisi.

4.3.1 Prove sperimentali

Per avere una conferma sperimentale sulla bontà dell'utilizzo dell'AGC abbiamo eseguito una serie di *simulazioni* Matlab (il codice sorgente di tale procedure è visibile nell'Appendice A.2) al fine di verificare quanto detto nei paragrafi precedenti.

Va chiarito fin da subito che, per quanto sarebbe stato interessante provare una realizzazione pratica dell'AGC, utilizzando il cRIO ciò non era possibile. Infatti il parametro g è nell'ordine del 10^{-6} ed un tale numero non è implementabile con le risorse hardware fornite dal cRIO.

Per questo ci siamo limitati ad applicare sui dati, utilizzati anche per le analisi precedenti, un algoritmo di Automatic Gain Control al fine di illustrarne

le peculiarità.

Sono state effettuate tre prove:

- con la voce umana
- con il rumore rally
- con il WN

Tutte eseguite usando i seguenti valori:

Parametro di correzione $g = 0.000001$

Guadagno K all'inizio dell'algoritmo $K(0) = 1$

Valore di riferimento desiderato $R = 1000$

Per tutte le prove verrà mostrato l'andamento nel tempo dei due segnali, a monte ed a valle dell'AGC, e si analizzerà l'andamento del parametro $K(t)$ al variare delle condizioni.

AGC e voce umana

La prima prova proposta è l'analisi di un segnale voce.

Questa prova è molto significativa poichè, come si vede chiaramente nella Figura 4.3, in questo caso l'AGC agisce in maniera ottima andando ad amplificare di molto il segnale vocale (corrispondente ai picchi) ed invece lasciando quasi inalterate le parti di segnale che non contenevano voce.

Ciò è possibile poichè si va a moltiplicare il segnale per un coefficiente $K(t)$ che non è statico, ma varia dinamicamente in funzione dell'errore tra l'ingresso e la soglia desiderata.

Nella figura si può vedere anche l'andamento del guadagno $K(t)$: a parte la prima parte iniziale di assestamento, l'andamento sia piuttosto vario con molti picchi e avvallamenti. Questo comportamento è dovuto al fatto che in presenza di una parola (picco nel segnale verde) $K(t)$ tende a crescere, mentre nelle pause tra una parola e l'altra tende a diminuire. Ciò implica che le

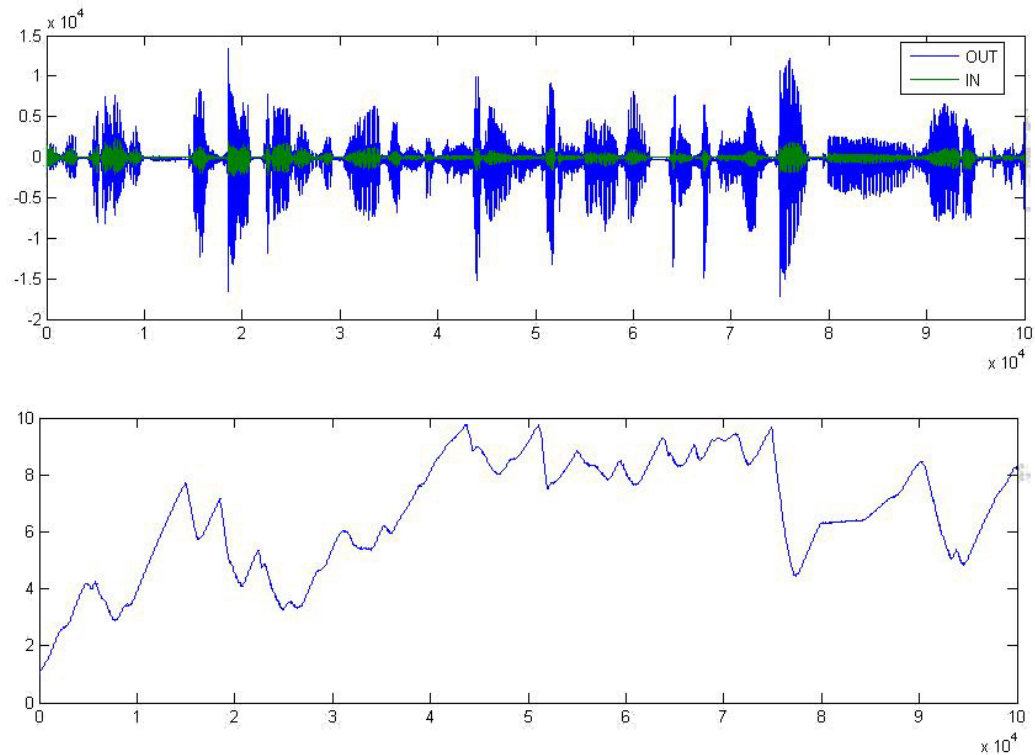


Figura 4.3: Andamento temporale del segnale vocale in ingresso ed uscita all'AGC; in basso i relativi valori del parametro $K(t)$

parti di segnale con parole verranno amplificate maggiormente rispetto alle parti senza parole, e cioè che contengono del rumore di fondo, e ciò migliora il rapporto segnale/rumore.

AGC e rumore rally

La seconda analisi del rumore rally. In questo caso, visibile nella Figura 4.4, l'AGC non introduce particolari benefici: infatti si limita ad amplificare (o meglio a diminuire) tutto il segnale introdotto senza particolari distinzioni.

Infatti si osserva che il guadagno $K(t)$ non ha un andamento determinato, ma oscilla in un range di valori inferiori all'unità: questo implica che il segnale verrà diminuito nella sua intensità poichè sorpassa il range desiderato.

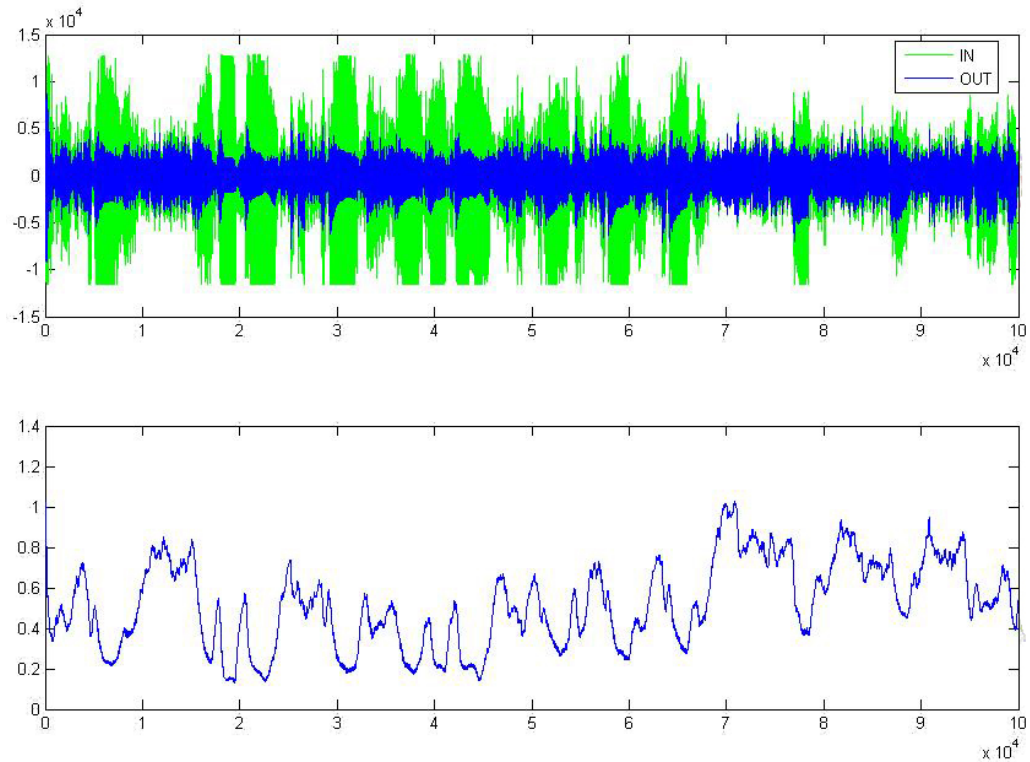


Figura 4.4: Andamento dell'ingresso e dell'uscita per un segnale rally; in basso i relativi valori del parametro $K(t)$

AGC e WN

Infine analizziamo il comportamento dell'AGC con del rumore bianco. In questo caso l'algoritmo non fa praticamente niente. Infatti l'intensità del segnale in ingresso era molto vicina alla soglia e per questo c'era una minima amplificazione, come visibile in Figura 4.5.

Tuttavia, nella figura si nota una particolarità: l'andamento di $K(t)$, dopo l'iniziale crescita, è praticamente costante. Questo poichè il WN non presenta pause o differenze che facciano modificare l'errore misurato tra ingresso e soglia.

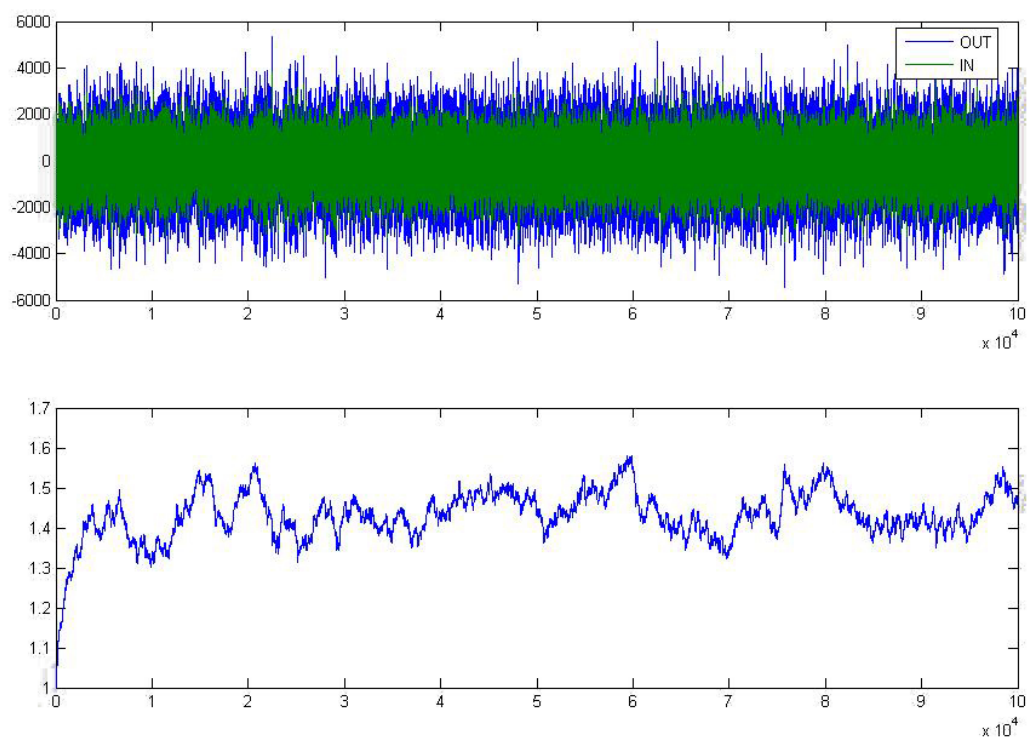


Figura 4.5: Andamento dell'ingresso e dell'uscita per un WN; in basso i relativi valori del parametro $K(t)$

Capitolo 5

Architettura del sistema

In questo capitolo verrà presentata l'architettura proposta per il sistema di cancellazione del rumore. Questa è composta da una serie di moduli i quali svolgono le differenti funzionalità.

Il primo modulo presentato è il filtro per la cancellazione del rumore: vi è una descrizione del tipo di filtro utilizzato e la sua implementazione sulla centralina prototipale cRIO. Inoltre vengono svolte una serie di analisi sperimentali dei filtri utilizzati.

Successivamente si discutono gli algoritmi che permettono la realizzazione di una logica di attivazione, per il filtro, che sia funzione del rumore rilevato.

Infine viene presentato il modulo che implementa l'equalizzatore: si descrive l'architettura scelta per costruire il modulo e si analizza il comportamento spettrale del sistema così ottenuto.

5.1 L'architettura a moduli del sistema

Sono stati realizzati diversi prototipi tesi ad illustrare le funzionalità di un singolo componente dell'applicazione definitiva: tutti questi moduli sono stati realizzati usando come supporto la centralina della National Instru-

ments cRIO[11] e programmandola attraverso il software fornito (LabView). Questa architettura, presentata e discussa nel capitolo 3.1.1, è molto potente e versatile, ma l'uso della sola FPGA ha imposto alcuni vincoli alle applicazioni.

Nella realizzazione finale sarà seguito il seguente schema logico complessivo, visibile in Figura 5.1. In ingresso al sistema è presente uno stadio di

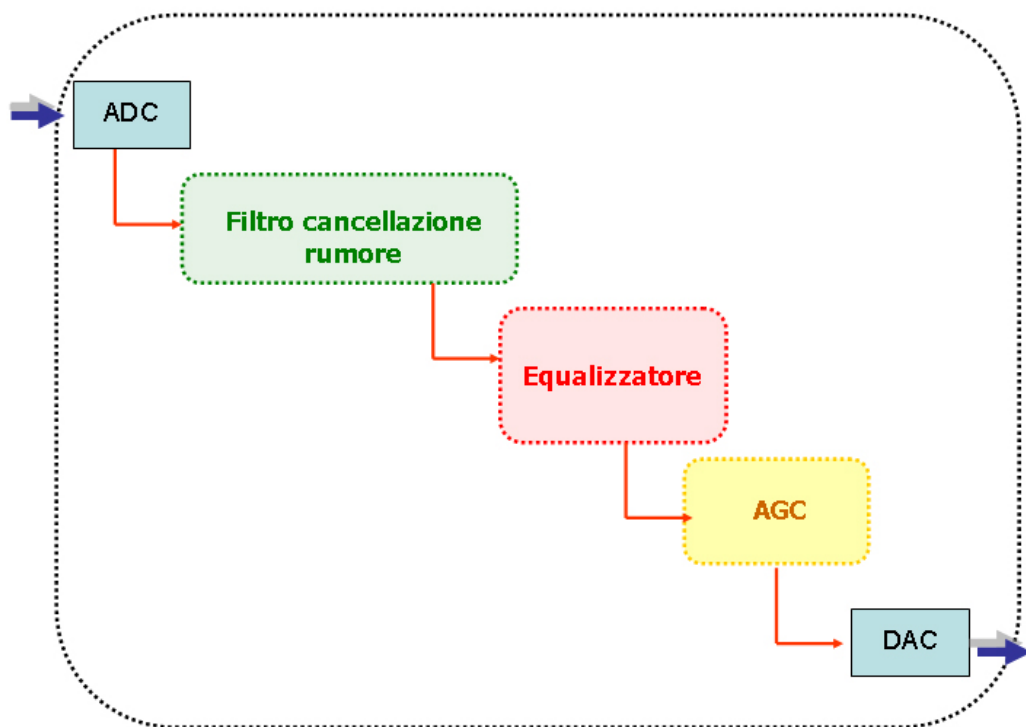


Figura 5.1: Schema concettuale del sistema completo

acquisizione e campionamento del segnale analogico, in cascata si trova un modulo che implementa il filtro di cancellazione del rumore, successivamente si trova un modulo con l'equalizzatore, al fine di rendere migliorare la qualità della voce, e prima dello stadio di uscita un modulo con l'AGC, che permette di sfruttare appieno tutta la potenza elettrica del segnale.

Questo schema, così com'è, non è stato realizzato in un unico prototipo: le

risorse dell'hardware della FPGA, intese come spazio disponibile in memoria, non erano sufficienti. Tuttavia è stata realizzata un'implementazione a sè stante di ciascun modulo, al fine di poter mettere a punto il componente e in seguito illustrarne ai tecnici della Stilo le potenzialità.

Il primo componente realizzato è stato un filtro statico per la cancellazione del rumore dalla comunicazione. Infatti il filtro digitale statico è il componente fondamentale del progetto, mentre la presenza dell'equalizzatore e dell'AGC permettono di aumentare la flessibilità e le prestazioni del sistema.

Tramite l'equalizzatore è possibile migliorare la qualità della voce regolando le sue tonalità: questo permette di ottimizzare il prodotto per le esigenze di un cliente specifico.

Infine utilizzando l'AGC è possibile migliorare ulteriormente il rapporto *segnale/rumore* ed avere un elevato volume all'uscita del sistema.

Di seguito viene presentata l'analisi dettagliata di ciascuno di questi componenti.

5.2 Il filtro per la cancellazione del rumore

Come si è evidenziato nelle analisi precedenti, discusse nel capitolo 3.3, per ottenere la cancellazione del rumore da una conversazione è necessario applicare un filtro che elimini le frequenze non desiderate.

Tramite un *filtro passa-basso* che taglia intorno alla frequenza dei $2kHz$ è possibile ottenere questo effetto senza introdurre distorsione nel segnale voce; questo filtro dev'essere il più verticale possibile al fine di eliminare la maggior parte delle frequenze non desiderate.

5.2.1 Scelta del tipo di filtro

La scelta della tipologia di filtro da implementare è stata fatta dopo un'attenta analisi e numerose prove sperimentali. Infatti, come visto nel capitolo 4.2.1, esistono due grosse famiglie di filtri, i FIR ed gli IIR: sostanzialmente sono identiche nelle prestazioni, differiscono principalmente per la natura dei coefficienti che le caratterizzano.

Nel primo esperimento è stato implementato un filtro IIR del quarto ordine. Questo tuttavia non ha portato a buoni risultati: con un ordine così ridotto non si riesce a tagliare il rumore senza distorcere in maniera significativa la voce. Il sistema implementato in questo modo riduce il rumore al costo di una qualità voce inaccettabile con una frequenza di taglio più bassa, oppure permette di avere una buona voce lasciando praticamente inalterato il rumore.

La soluzione a questo problema è alzare l'ordine del filtro: l'ideale sarebbe stato poter utilizzare un IIR almeno dell'ottavo ordine. Tuttavia questa soluzione non è implementabile sul cRIO in quanto un IIR di ordine superiore a 4 presenta una differenza negli ordini di grandezza dei coefficienti molto elevata: i coefficienti b_n della parte autoregressiva hanno valori nell'ordine dei 10^{-5} mentre i coefficienti a_n della parte della media mobile sono dell'ordine di 10^2 .

Un simile range numerico non è implementabile attraverso l'FPGA, che può lavorare solo con interi a 32bit. Usando la divisione per intero, moltiplicando i coefficienti prima dell'elaborazione e dividendo il risultato in uscita, il filtro diviene instabile a causa delle numerose approssimazioni numeriche introdotte.

A causa dei problemi qui descritti è stato necessario utilizzare filtri di tipo FIR, infatti i coefficienti dei FIR variano in un range compreso tra il $\pm 10^3$, che è supportato dall'architettura a 32 bit del cRIO.

L'utilizzo dei FIR presenta un ulteriore vantaggio: attraverso uno studio

preparatorio eseguito col Matlab, per trovare il set di coefficienti migliori, è possibile implementare filtri che non siano dei semplici passabasso.

In questo modo è possibile ottenere dei filtri complessi che amplificano le frequenze della voce e riducono i segnali nelle frequenze non utili.

5.2.2 Architettura del modulo di filtraggio

È stato implementato un prototipo funzionante con il sistema cRIO per la scelta del tipo di filtro e la successiva messa a punto della frequenza di taglio e del guadagno.

Questo prototipo serve solo per dimostrare le potenzialità di cancellazione di un filtro statico, per questo è composto dal filtro, da un semplice controllo di volume e da un pulsante, che permette di inserire o di escludere il filtro dalla linea di comunicazione (vedi Figura 5.2). L'attivazione del processo di filtraggio tramite un pulsante serve per percepire istantaneamente la differenza di tonalità della voce e il taglio del rumore introdotti dal filtro.

Come spiegato in precedenza è stato implementato un filtro FIR del quarantesimo ordine¹ che sfrutta dei coefficienti arrotondati alla quarta cifra decimale.

La scelta dell'ordine è stata effettuata in base alle risorse hardware messe a disposizione dalla centralina di prototipazione: sono necessarie almeno quaranta variabili per memorizzare i campioni per il calcolo del filtraggio ad ogni passo, ed il sistema non ne supporta molte di più.

Per superare il limite imposto dal ridotto numero di moltiplicatori (discusso nel capitolo 3.1.1) si è scelto di creare un modulo da dieci moltiplicatori ciascuno e di richiamare per quattro volte questo modulo. In questo modo,

¹Più precisamente si tratta di un FIR 39 che usa 40 moltiplicatori e che utilizza i campioni da $U(t)$ a $U(t - 39)$ e ciò è stato fatto per ragioni di risparmio delle risorse hardware

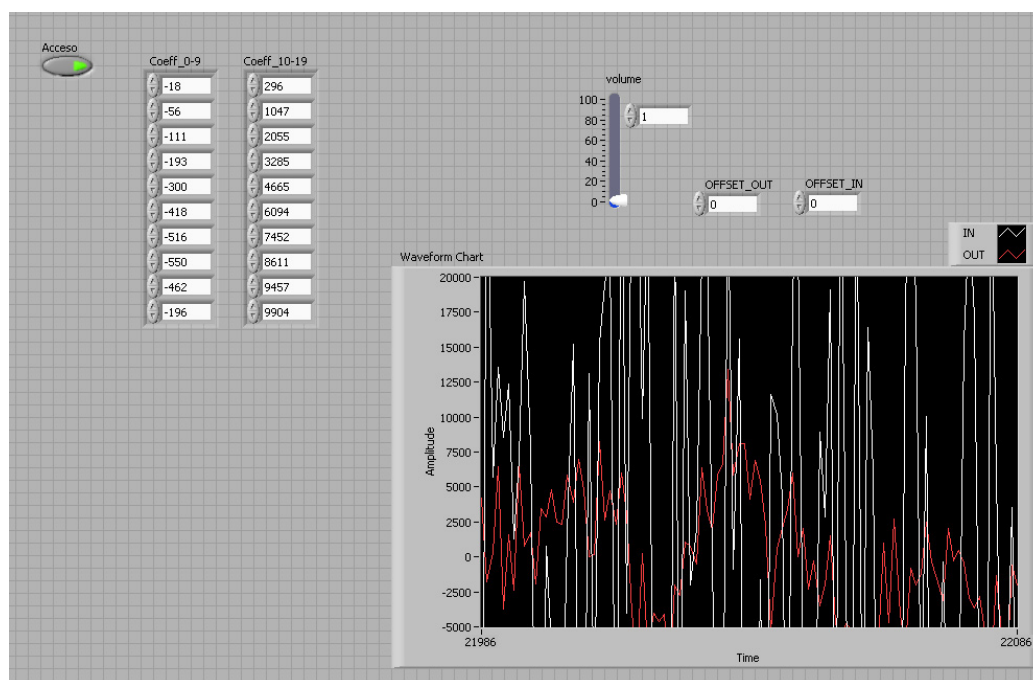


Figura 5.2: L'interfaccia grafica di controllo del filtro

a scapito di un leggero ritardo di elaborazione, si è potuto implementare un filtro di ordine elevato.

Inoltre i coefficienti di un FIR sono *simmetrici*: $b_0 \equiv b_{39}$, $b_1 \equiv b_{38}, \dots$, $b_{19} \equiv b_{20}$. In questo modo al posto di dover utilizzare quaranta variabili, per memorizzare i coefficienti da passare ai gruppi moltiplicativi, sono state necessarie solo venti variabili, riuscendo in questo modo a non oltrepassare i limiti imposti dall'architettura.

5.2.3 L'utilizzo di uno shape particolare

Nella Figura 5.4 è illustrato l'andamento dei moduli di due filtri presi in esame. Il primo è un semplice passa basso con guadagno unitario e con taglio a $2kHz$.

Come termine di raffronto è riportato anche un filtro IIR dell'ottavo ordine:

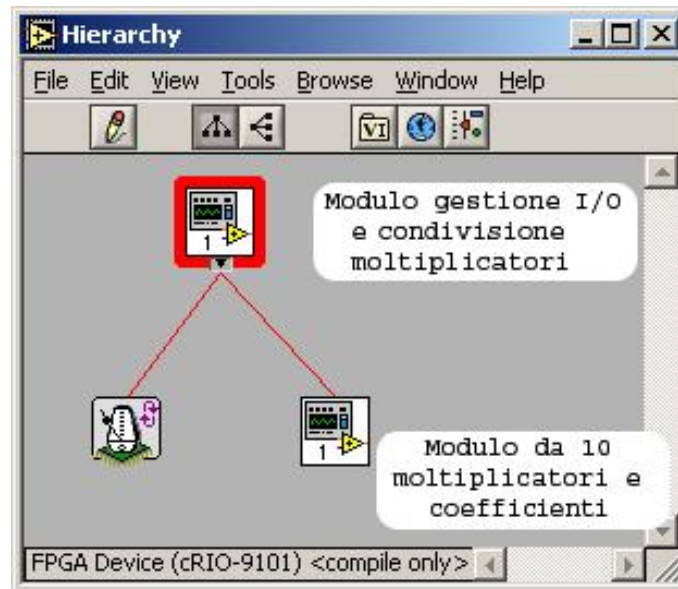


Figura 5.3: Schema gerarchico dell'utilizzo dei moduli in LabView

come si vede questo è paragonabile, in termini di prestazioni di taglio in frequenza, al FIR del quarantesimo ordine usato. Da qui si può dunque concludere che usare un FIR non è deleterio, in termini di prestazione, ai fini della cancellazione.

Nella figura si vede anche un secondo FIR con uno shape diverso dal classico passa-basso. Questo filtro è quello effettivamente implementato perché con questa forma spettrale, scelta dopo una serie di prove sperimentali, si ottengono le migliori prestazioni in termini di cancellazione.

Infatti, come visto anche per il "Sistema ST" nel capitolo 2.2.6, per migliorare il rapporto *segnale/rumore* è opportuno, oltre a filtrare le frequenze non desiderate, applicare un guadagno alle frequenze di interesse.

Si potrebbe obiettare che sarebbe stato identico anche applicare un guadagno dopo il filtro passa-basso unitario: ciò non è del tutto vero poiché così facendo si sarebbero anche amplificate le parti residue del rumore.

Invece, utilizzando un filtro con diversi guadagni a differenti frequenze, è

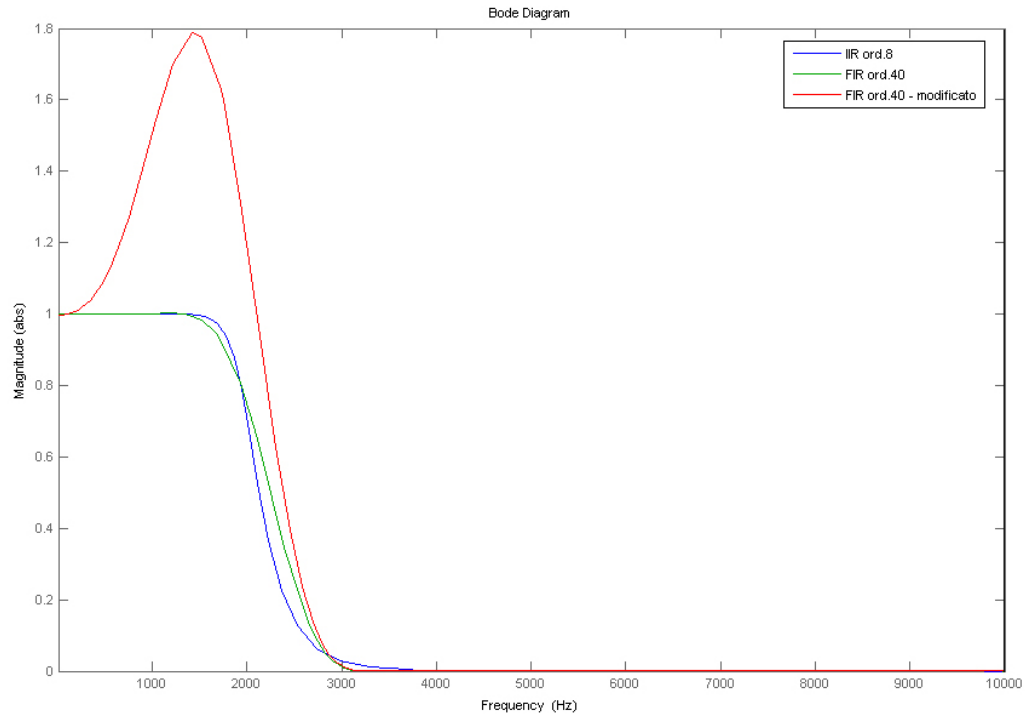


Figura 5.4: Diagramma di Bode del filtro implementato

possibile massimizzare il rapporto *segnale/rumore*, andando ad abbattere le frequenze di rumore ed amplificando quelle di segnale.

Infine si può notare che il filtro con guadagno non unitario non taglia nettamente a $2kHz$, ma lascia passare anche una piccola parte delle frequenze più alte. Questo è dovuto al fatto che per avere un "picco" di amplificazione necessariamente si deve rinunciare alla ottimale frequenza di taglio. Questo tuttavia non è un problema: il beneficio introdotto, in termini di amplificazione sul segnale vocale, compensa largamente le frequenze di rumore introdotte.

5.2.4 Analisi in frequenza del filtro

Verrà ora analizzato il comportamento in frequenza del filtro scelto, andando a confrontare con un semplice filtro passa-basso.

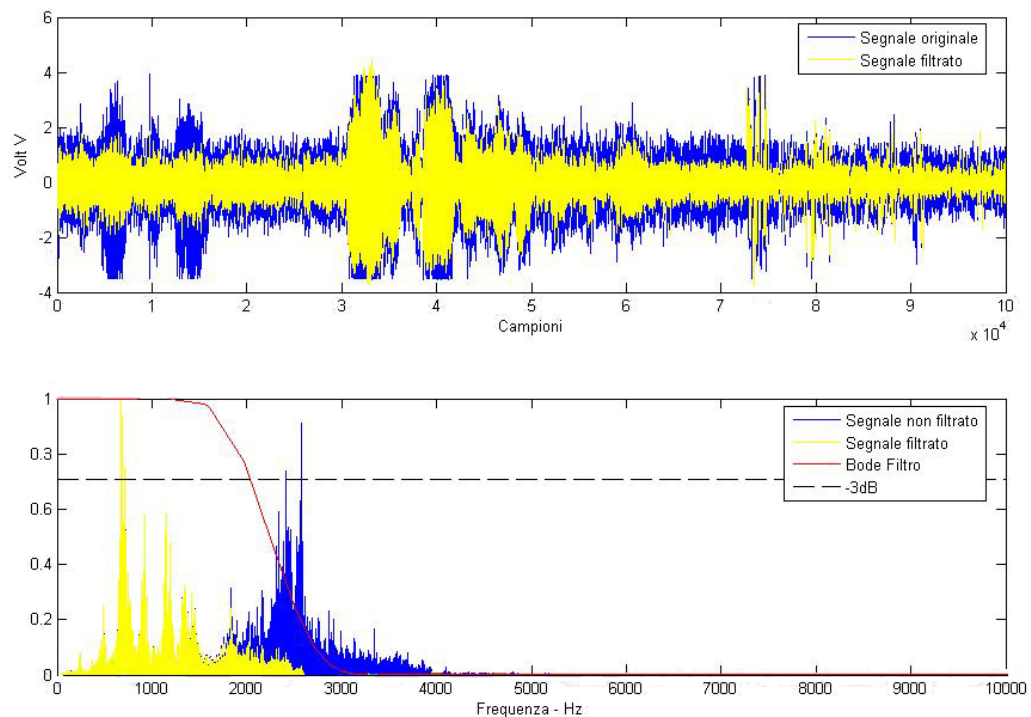


Figura 5.5: FIR con guadagno unitario: esempio di segnale filtrato e relativi spettri

Nella Figura 5.5 si può vedere il comportamento del sistema con un FIR del quarantesimo ordine e con guadagno unitario.

Dall'analisi spettrale nella parte bassa della figura, si vede chiaramente come le alte frequenze, corrispondenti al rumore, vengono correttamente cancellate a partire dai 2kHz in poi. Dall'analisi del segnale si vede come l'uscita del filtro sia, in ampiezza, sempre inferiore all'ingresso: filtrando delle componenti in frequenza è stata ridotta l'energia del segnale.

Questo filtro presenta delle ottime performance in termini di cancellazione

del rumore: nella prova sperimentale è stato molto apprezzato, anche se il volume della voce in uscita dal filtro era ancora troppo basso.

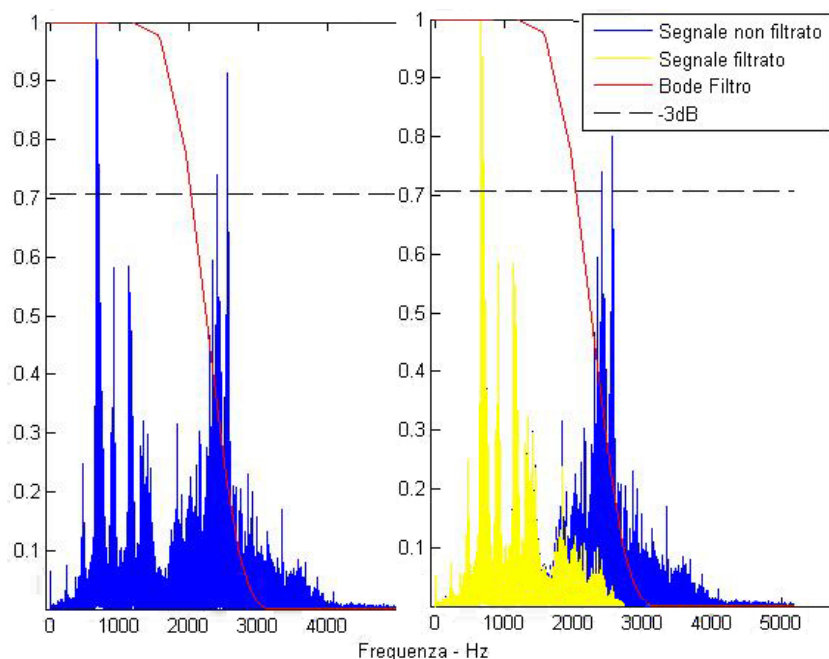


Figura 5.6: Particolare degli spettri nella frequenza voce

La mancanza di volume in cuffia è dovuta al guadagno unitario del filtro. Cancellando le alte frequenze si toglie anche energia dal segnale, ma la parte di segnale vocale rimane inalterata. Nella figura precedente questo fatto non era ben visibile poichè lo spettro in uscita copriva completamente lo spettro in entrata impedendo la visione di questo nella frequenza della voce. Nella Figura 5.6, invece, si evidenzia questo comportamento: nella parte sinistra si vede lo spettro del segnale che entra nel filtro, nella destra quello in uscita. Si vede chiaramente che i due spettri sono identici e coincidono finchè il filtro non comincia a tagliare.

Al fine riuscire a migliorare ulteriormente il rapporto *segnale/rumore*, percepibile in cuffia come un volume più elevato della voce rispetto al rumore, si è passati all'utilizzo di un FIR del quarantesimo ordine con uno shape

studiato ad hoc, al fine di amplificare maggiormente le frequenze acute della voce umana.

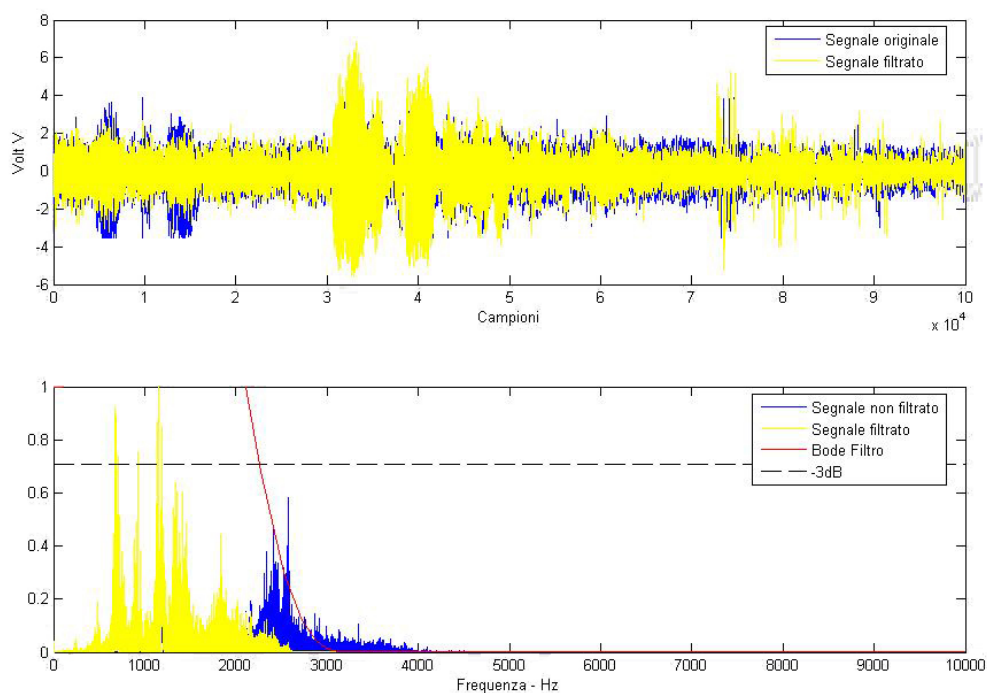


Figura 5.7: FIR con shape ottimizzato: esempio di segnale filtrato e relativi spettri

Il comportamento di questo filtro è visibile nella Figura 5.7 (il diagramma di bode del filtro completo è visibile nella Figura 5.4). Qui si vede come l'andamento nel segnale (grafico in alto della figura) abbia un valore medio paragonabile, in intensità, all'ingresso: l'amplificazione delle frequenze voce ha riportato l'energia del segnale ai valori precedenti.

L'entità dell'amplificazione non è ben visibile in questa figura poichè lo spettro dell'uscita copre quello dell'ingresso. Tuttavia in Figura 5.8 è possibile vedere i due spettri affiancati: si nota chiaramente come le frequenze nell'intorno del kHz siano amplificate di quasi il quaranta per cento.

Nella prova sperimentale, le prestazioni di questo filtro si sono rilevate notevolmente migliori rispetto al precedente. Infatti, oltre all'ottima cancel-

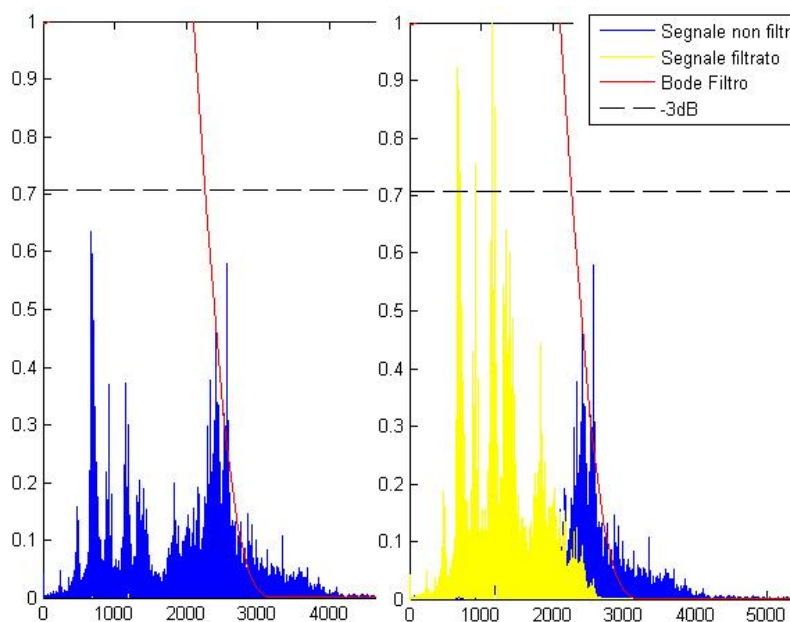


Figura 5.8: Particolare degli spettri nella frequenza voce

lazione del rumore, si è riusciti a dare un elevato volume alla voce: ciò era proprio l'obiettivo preposto alla cancellazione del rumore.

5.3 Logica di attivazione del filtro

Dopo aver implementato diversi tipi di filtraggio, con varie frequenze di taglio e guadagni diversi, è emerso che i filtri che danno i risultati migliori in termini di riduzione del rumore sono quelli di ordine elevato con guadagno alto (10) e frequenza di taglio attorno ad 1,5kHz.

Questi filtri si comportano molto bene in presenza di un forte disturbo, in quanto migliorano in modo sensibile il rapporto tra voce e rumore con effetti benefici per la comunicazione, tuttavia distorcono la voce stessa in modo evidente: questo fenomeno negativo però è rilevabile solo senza rumore.

Le prove effettuate con i tecnici della Stilo prevedevano inizialmente l'as-

colto della sola voce, senza rumore, e poi l'inserimento del disturbo: in questo modo un filtro molto estremo non veniva apprezzato in quanto la qualità della voce in un ambiente silenzioso era deludente, anche se la riduzione del rumore, quando presente, era molto elevata.

Per rimediare a questo problema si è emulato il comportamento del sistema digitale ST, che applica diversi gradi di filtraggio in base al rumore rilevato [4] (come visto nell'analisi del sistema ST al capitolo 2.2), attraverso un'opportuna logica di attivazione del filtro, in modo da non introdurre distorsione del segnale audio quando non necessario.

Per poter estremizzare il livello di filtraggio e il successivo aumento di guadagno del filtro è stata implementata una logica di attivazione a 2 stadi (on-off) simile a quella impiegata dal sistema ST: questa permette di rilevare la presenza di un determinato livello di rumore e di conseguenza attivare il filtraggio, senza penalizzare la resa del sistema in condizioni di silenzio.

Grazie a questo meccanismo è stato possibile diminuire la frequenza di taglio e aumentare il guadagno del filtro, poichè la distorsione nella voce introdotta dal filtro in presenza di rumore non è apprezzabile a orecchio.

La logica confronta il valore medio del modulo dell'ampiezza del segnale con una soglia preimpostata: se viene superata il filtro si attiva. La logica di attivazione sfrutta l'andamento temporale caratteristico della voce umana, dato dalla presenza di numerose pause all'interno di una frase, tra una parola e l'altra, che causa elevata varianza; il rumore ambientale invece ha una varianza molto ridotta e aumenta l'energia del segnale in ingresso in modo rilevante.

L'implementazione effettiva della logica di attivazione utilizzata non sfrutta la varianza, ma la media del valore assoluto del segnale in ingresso: la scelta è stata modificata a causa delle ridotte risorse hardware a disposizione, in quanto questa grandezza richiede uno sforzo computazionale inferiore per essere calcolata.

Ogni N/fs secondi (fs = frequenza di campionamento), viene calcolata la media $MED(t)$ del valore assoluto del segnale in ingresso:

$$MED(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=t-(N-1)}^t |y(j)|$$

Se $MED(t)$ supera un valore SOGLIA, allora viene attivato il filtro per la riduzione della rumorosità di fondo, altrimenti il segnale non viene alterato. Eventualmente, in funzione del valore di $MED(t)$, si possono attivare filtri differenti per avere un taglio più o meno deciso e la voce più o meno distorta.

La taratura dei parametri scelta è la seguente: il segnale in ingresso viene sottocampionato, salvando un campione ogni 50 (uno ogni 2,5ms); quando i campioni salvati sono 200 (ogni 500ms) viene calcolata la loro media $MED(t)$, se questa risulta superiore alla SOGLIA di rumore (posta a 400) il filtro viene attivato. La finestra di calcolo utilizzata non è mobile, i 200 campioni su cui viene calcolata $MED(t)$ vengono eliminati tutti insieme.

In questo modo occorre mezzo secondo di rumore affinché il filtro si attivi: per avere una reattività superiore occorre utilizzare meno campioni o variare il sottocampionamento, aumenta però la probabilità di interpretare erroneamente una singola parola come rumore.

Il comportamento del sistema è evidente nella Figura 5.9: il filtro si attiva solo quando $MED(t)$ è superiore al valore 400, ovvero in presenza di un elevato rumore di fondo (in questo caso 5 secondi di rumore rally seguiti da 5 secondi di rumore bianco) e si disattiva quando in ingresso è presente solo il segnale voce.

Nell'implementazione pratica l'algoritmo di filtraggio è sempre attivo, e il filtro continua a ricevere campioni dall'ingresso e a memorizzarli, calcolandone di nuovi: la logica di attivazione sposta solo un deviatore sull'uscita, collegando il filo diretto o il filtro a seconda del rumore rilevato. Questa implementazione è necessaria in quanto il filtro ha memoria: sarebbe scorretto filtrare ad ogni nuova attivazione il primo campione al tempo "t" in

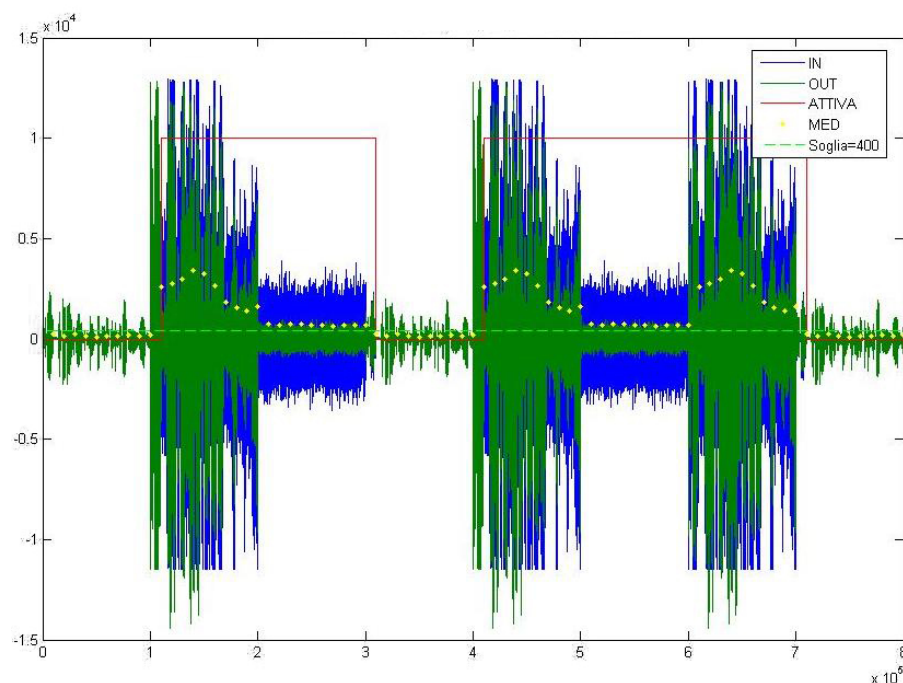


Figura 5.9: Esempio di applicazione della logica di attivazione

base a campioni memorizzati nelle attivazioni precedenti, che possono essere avvenute in un tempo indefinito nel passato.

5.4 Equalizzatore

Il modulo equalizzatore non svolge un ruolo fondamentale in termini di cancellazione, ma è molto utile per migliorare le prestazioni del prodotto finale.

Infatti, grazie a questo componente, il segnale filtrato può essere amplificato/ridotto nelle singole componenti spettrali, al fine di ottenere un segnale vocale ottimale: la percezione della qualità voce è *soggettiva* e grazie a questo componente è possibile ottenere facilmente la tonalità di voce desiderata.

Senza equalizzatore sarebbe necessario implementare via hardware una

serie di filtri per ottenere una tonalità desiderata che rimarrebbe fissa su ciascun prodotto. Invece grazie a questo componente sarà possibile una personalizzazione del singolo prodotto perfino sulle esigenze del singolo pilota.

5.4.1 Architettura del modulo

Un equalizzatore è fondamentalmente costituito da una serie di filtri passa-banda in parallelo ai quali è applicato un guadagno variabile.

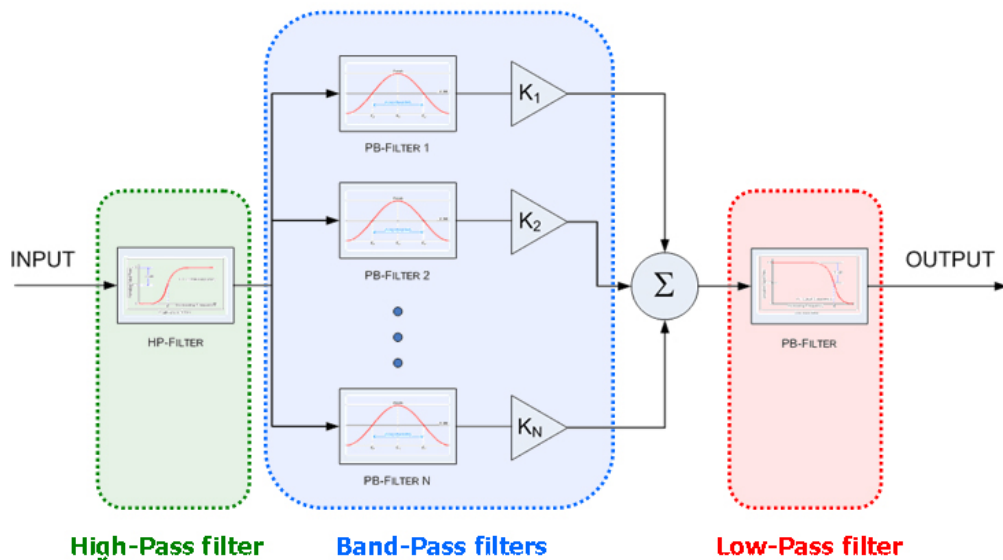


Figura 5.10: Schema concettuale di un equalizzatore

Il sistema implementato, visibile nello schema in Figura 5.10, è costituito da quattro filtri passa-banda messi in parallelo, più un bassa-basso finale ed un passa-alto finale.

Il segnale viene per primo passato in un filtro passa-alto con una frequenza di taglio intorno ai 200Hz. Questo serve per eliminare le bassissime frequenze

che possono dare una serie di problemi se amplificate eccessivamente: infatti tendono a inserire disturbi elettrici in bassa frequenza nella comunicazione.

Dopo questo stadio il segnale viene passato nei *quattro filtri passa-banda in parallelo*: all'uscita di ciascun filtro si trova un modulo che applica un guadagno alla banda di frequenza che si vuole manipolare.

Questi filtri operano alle seguenti frequenze:

$$Filtro1 : 500Hz - 1000Hz$$

$$Filtro2 : 1050Hz - 1500Hz$$

$$Filtro3 : 1550Hz - 2000Hz$$

$$Filtro4 : 2050Hz - 2500Hz$$

Come si può notare tra le diverse bande ci sono degli spazi di 50Hz, questo serve ad evitare problemi dovuti a sovrapposizioni, a causa dell'uso di filtri di ordine ridotto.

Infatti, nel caso di *filtri ideali* questi "buchi" in frequenza avrebbero l'effetto di un filtro "stop-band", ma con i filtri reali implementati questi vuoti di amplificazione sono ampiamente colmati.

Infine il segnale viene ricomposto e passato all'uscita, dove si trova un filtro passa-basso caratterizzato da una frequenza di taglio di circa 2kHz: questo serve per filtrare tutti i rumori in alta frequenza, che vengono generati per via delle approssimazioni numeriche introdotte dai filtri.

I filtri implementati sono tutti dei IIR del quarto ordine: una precisione maggiore sarebbe stata preferibile, ma non era possibile. Anche in questo caso valgono le considerazioni discusse nel capitolo precedente: le approssimazioni dei coefficienti rendono i filtri di ordine maggiore del quarto instabili.

Tutti i filtri implementati sono dunque del tipo:

$$Y(t) = b_0 \cdot U(t) + b_1 \cdot U(t-1) + b_2 \cdot U(t-2) + b_3 \cdot U(t-3) + b_4 \cdot U(t-4) + \\ a_1 \cdot Y(t-1) + a_2 \cdot Y(t-2) + a_3 \cdot Y(t-3) + a_4 \cdot Y(t-4)$$

cambiano i coefficienti a_i e b_i è possibile ottenere diverse bande di taglio.

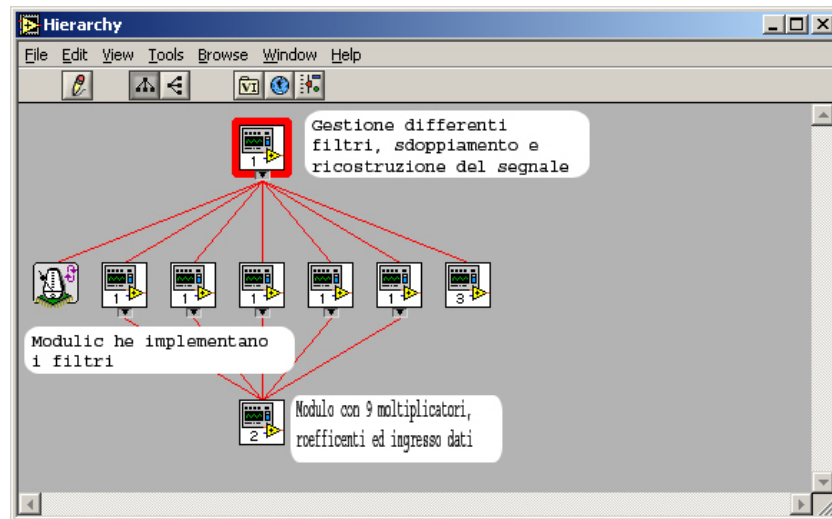


Figura 5.11: Equalizzatore: gerarchia tra i moduli LabView

Grazie al fatto che tutti i filtri sono simili è stato possibile condividere il codice contenente i gruppi moltiplicativi sfruttati da ciascun filtro: in questo modo sono state sfruttate al meglio le risorse critiche (i moltiplicatori) al fine di poter avere più bande di equalizzazione. È stato creato un modulo con 9 moltiplicatori (dei 10 disponibili) ed è stato richiamato più volte in ciascun ciclo per eseguire l'algoritmo di filtraggio: questo modulo è utilizzato da tutti i moduli che implementano i filtri (come visibile in Figura 5.11).

5.4.2 Prova sperimentale: equalizzatore dinamico

L'implementazione realizzata dell'equalizzatore aveva lo scopo di illustrare praticamente le potenzialità offerte, in termini di possibilità di miglioramento della qualità della voce.

Per questo motivo è stata realizzata una semplice interfaccia grafica, vi-

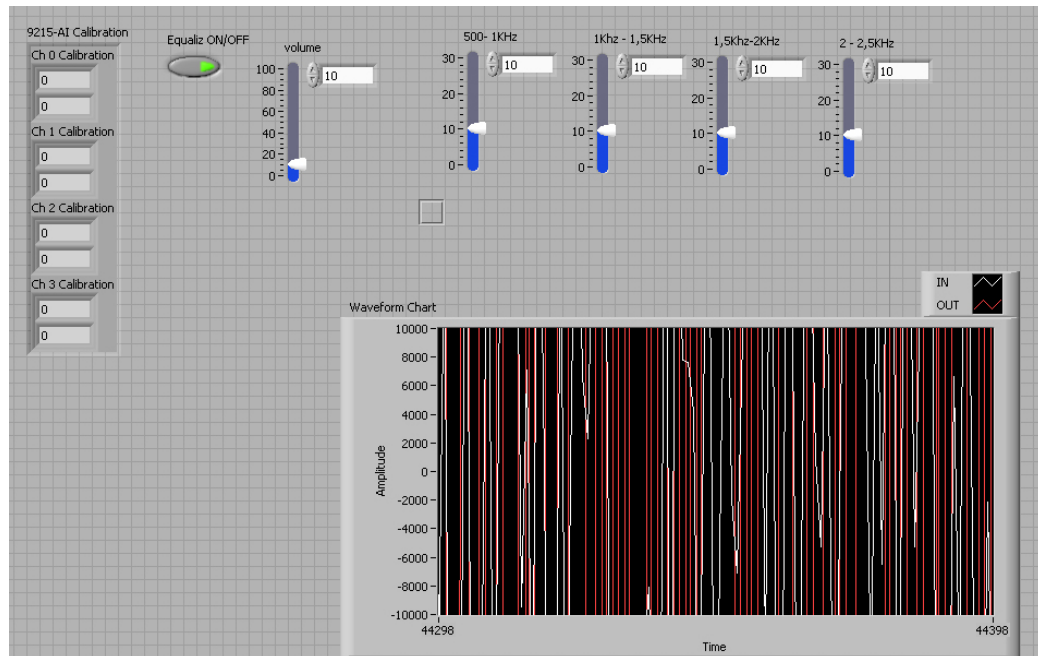


Figura 5.12: Equalizzatore: interfaccia grafica di controllo

sibile in Figura 5.12 che permette di controllare i parametri del sistema. Tramite questa interfaccia è possibile compiere le seguenti operazioni:

- accensione/spegnimento dell'equalizzatore
- modifica dei guadagni dei singoli filtri
- modifica del volume di uscita

L'accensione del processo di equalizzazione avviene tramite un pulsante: questo serve per spegnere/riaccendere velocemente il sistema, al fine di poter percepire le differenze di tonalità della voce.

La modifica dei guadagni è l'aspetto più importante di questo prototipo: tramite quattro distinte manopole di comando, una per ciascun filtro, è possibile agire sui singoli guadagni che amplificano le frequenze.

In questo modo è possibile intervenire dinamicamente, mentre l'applicazione è in esecuzione, al fine di migliorare le prestazioni provando tutte le possibili combinazioni dei valori.

Come si noterà nella figura, le barre di comando dei guadagni possono variare da un valore di zero fino a trenta, i valori inseriti sono divisi per dieci prima di essere applicati: questo è l'unico modo possibile per ottenere dei guadagni non interi, poichè l'FPGA non supporta numeri decimali.

Per questo motivo si sta utilizzando il filtro con guadagno unitario quando lo slide è in posizione "10": con valori inferiori si attenua la banda di segnale, con valori superiori si amplifica. Inserendo un valore nullo di guadagno la banda in questione verrà completamente cancellata, mentre inserendo il massimo valore possibile, cioè 30, si applicherà un guadagno di tre.

Infine è messo a disposizione dell'utente anche un semplice controllo del volume, implementato come un guadagno variabile che viene applicato prima dello stadio di uscita. Ciò implica che si applica a tutte le frequenze in uscita dell'equalizzatore, perciò non altera il rapporto *segnale/rumore* ma semplicemente si limita ad amplificare il segnale in uscita.

5.4.3 Analisi in frequenza dell'equalizzatore

Dopo questa breve presentazione delle funzionalità del sistema implementato viene presentata l'analisi del suo comportamento spettrale.

Questo comportamento è ovviamente funzione dei guadagni inseriti, perciò l'analisi sarà divisa in due parti: una prima analisi del sistema con guadagni tutti unitari ed una seconda analisi effettuata su un set di guadagni trovati sperimentalmente.

Il comportamento del sistema con tutti i guadagni unitari

Cominciamo questa analisi studiando il comportamento in frequenza del sistema con tutti i guadagni unitari.

Idealmente un simile equalizzatore dovrebbe comportarsi come un *bassa-banda ideale con guadagno unitario*: ciò dovrebbe lasciare inalterate le frequenze della banda passante e cancellare tutte le altre. Un simile comportamento, tuttavia, sarebbe ottenibile solo da un equalizzatore ideale, implementato con una serie di filtri ideali.

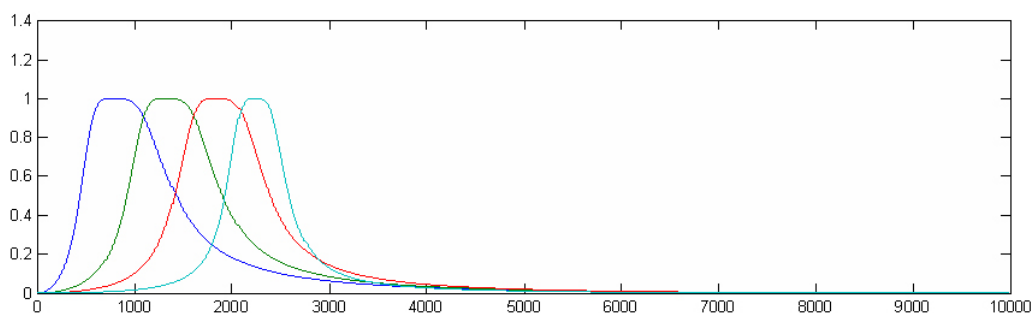


Figura 5.13: Modulo dei filtri che implementano l'equalizzatore

Nella realizzazione pratica, tuttavia, dovendo utilizzare dei filtri reali di ordine ridotto, non è stato possibile ottenere il comportamento descritto qui sopra.

La Figura 5.13 mostra il modulo dei filtri implementati con guadagno unitario: si noti come in questo caso vi siano delle forti sovrapposizioni nelle bande di competenza di ciascun filtro. Questo fatto è causato dal basso ordine dei filtri: con filtri del quarto ordine la pendenza nella retta di taglio è piuttosto scarsa.

Utilizzando filtri di ordine maggiore si potrebbero ottenere prestazioni migliori: tuttavia bisognerebbe usare una serie di filtri IIR di ordine molto elevato (almeno del decimo ordine) che non sono realizzabili con l'architettura prototipale a disposizione.

Calcolando il comportamento in frequenza ottenibile dal parallelo dei quattro filtri appena analizzati si può ottenere un sistema il cui spettro è rappresentato nella Figura 5.14. Qui si vede chiaramente come il sistema si

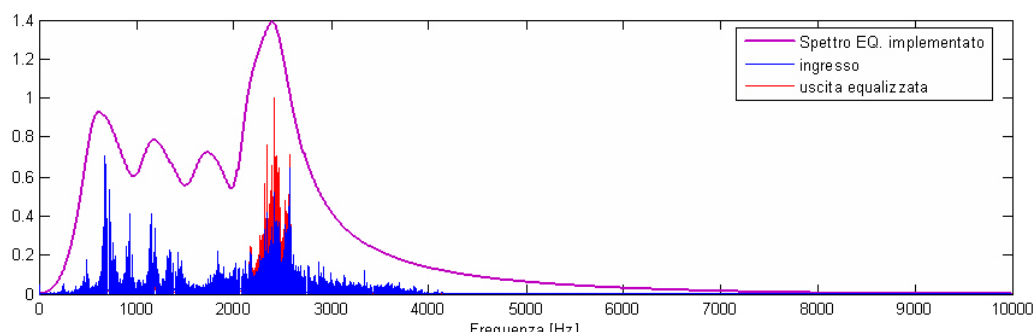


Figura 5.14: Spettri del sistema equalizzatore

discosti di molto dalle prestazioni ideali: non lascia inalterate le basse frequenze, dove c'è la voce che viene attenuata, ed invece amplifica le frequenze con del rumore.

Questo comportamento è anche evidenziato dagli spettri del segnale ingresso/uscita che si trovano sempre in Figura 5.14 (L'ingresso è il segnale in blu e l'uscita il segnale rosso). Qui si vede chiaramente come l'uscita sia molto amplificata solo nella banda di frequenza tra i 2kHz ed i 3kHz, mentre nelle altre frequenze sia attenuata.

Un simile comportamento non è certo accettabile: l'equalizzatore con tutti guadagni unitari non solo non è paragonabile ad un bassa-banda unitario ma addirittura amplifica le frequenze del rumore.

Grazie a questa analisi si è così messo in evidenza che il setup iniziale con tutti i guadagni unitari non è certo la scelta migliore e che il sistema va tarato sperimentalmente per trovare un'insieme di parametri appropriati.

Un set di guadagni migliore

Dopo una serie di prove sperimentali è stata trovata la seguente configurazione dei guadagni:

$$K_1 = 1.8$$

$$K_2 = 2.0$$

$$K_3 = 0.5$$

$$K_4 = 0.1$$

Questa può non essere la configurazione ottima, ma è un buon punto di partenza: si ottiene un'ottima qualità della voce, mantenendo un discreto volume, e si cancella buona parte del rumore residuo. Come si potrà notare

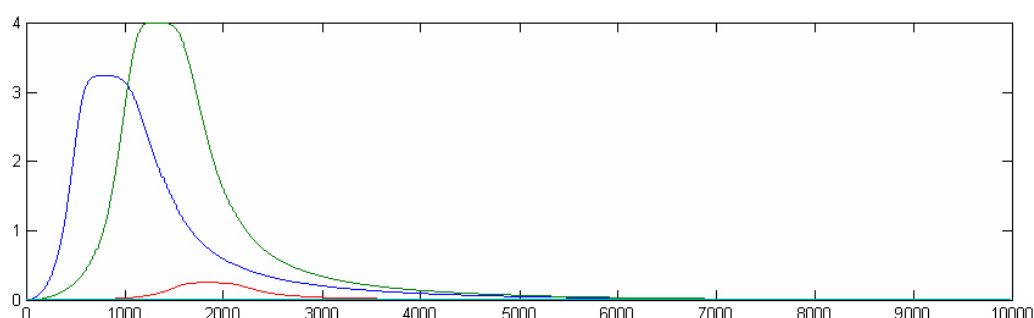


Figura 5.15: Modulo dei filtri che implementano l'equalizzatore

dai guadagni, e come visibile nella Figura 5.15, si amplificano molto le basse frequenze e si attenuano i filtri che agiscono sulle alte. In questo modo si riesce ad amplificare la voce e cancellare il rumore senza distorcere in modo significativo il segnale vocale.

Infatti si attenua molto la banda del terzo filtro, circa 1.55kHz - 2kHz dove è presente ancora segnale voce, ma questa attenuazione è ampiamente compensata dall'amplificazione offerta dai due filtri precedenti.

Come si vede bene in figura, i filtri di ordine basso non effettuano un taglio netto. Così, ad esempio, il secondo filtro, che dovrebbe essere un passa-banda 1.05kHz-1.5kHz, si comporta in pratica come un passa-banda da 900Hz circa fin oltre i 2kHz. Questo effetto si sarebbe ovviamente evitato con filtri di ordine superiore, ma, come già detto, non è possibile implementarli.

Le prestazioni di questo sistema sono comunque molto buone: nella Figura 5.16 si vede il comportamento del sistema equalizzatore completo. Si vede

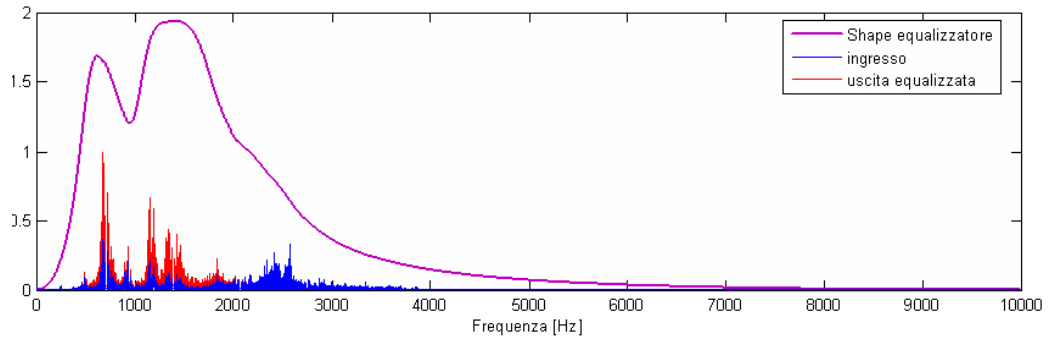


Figura 5.16: Spettri del sistema equalizzatore

come in questo caso il sistema "assomigli" ad un passa-banda molto più dell'equalizzatore con guadagni unitari visto in precedenza.

Inoltre, sempre in figura, è visibile il comportamento dell'equalizzatore su un segnale campione: l'ingresso viene molto amplificato nelle basse frequenze e tagliato dai 2kHz circa in su. In questo modo si riesce a dare un migliore timbro alla voce ottenendo comunque una cancellazione delle frequenze non desiderate.

Capitolo 6

Realizzazioni sperimentali e valutazioni

In questo capitolo vengono definiti i criteri adottati durante le prove sperimentali per la valutazione dei prototipi di sistemi di comunicazione.

Successivamente vengono presentate le conclusioni tratte su un prototipo realizzato con la centralina per lo sviluppo prototipale generica cRIO, con la quale sono stati implementati gli algoritmi durante la fase di studio.

Infine viene illustrata l'architettura del sistema finale, basata su un DSP commerciale, e vengono presentate una serie di prove sperimentali fatte su quest'ultima soluzione.

6.1 Definizione di criteri di giudizio

Un aspetto importante per eseguire le prove sperimentali è la definizione di un criterio di valutazione dell'efficienza del sistema.

Definire l'efficienza di un sistema di cancellazione del rumore non è problema semplice, in quanto coinvolge sia aspetti oggettivi che soggettivi.

L'analisi spettrale del segnale in uscita, fatta attraverso Matlab, può es-

sere considerata un criterio di valutazione oggettivo. Si può effettuare una misura delle grandezze coinvolte (ad esempio la variazione del rapporto segnale/rumore data dal filtraggio) e trarne un giudizio valutando la riduzione (spessa in dB) del rumore.

Tuttavia la sola riduzione dell'intensità del rumore non basta a definire la bontà di un sistema di cancellazione del rumore.

Infatti va anche considerata la qualità del segnale vocale ottenuto: effettuando una prova di ascolto la resa del segnale voce (tonalità, intellegibilità) dopo il filtraggio non deve essere compromessa.

Non esistendo criteri oggettivi di misura per la qualità della voce sono state effettuate valutazioni soggettive.

In questa ottica sono risultati fondamentali gli incontri con i tecnici della Stilo, i quali hanno una lunga esperienza in questo campo: il loro lavoro sul sistema analogico è stato svolto essenzialmente tramite lunghe sessioni di prove di ascolto di varie configurazioni spettrali del sistema.

Grazie al confronto continuo ed allo scambio di opinioni è stato possibile orientare la ricerca nella direzione desiderata da Stilo al fine di trovare una soluzione che, a loro giudizio, fosse la migliore possibile.

6.2 Prova in laboratorio con centralina cRIO

In questa sezione vengono discusse una serie di prove eseguite utilizzando la centralina per lo sviluppo prototipale *cRIO 9101* (presentata nel capitolo 3.1).

Tutte queste prove sono state eseguite alla presenza dei tecnici Stilo, i quali potevano così esprimere il loro giudizio sulla qualità del segnale ottenuto.

Le prove sperimentali in laboratorio sono state eseguite utilizzando dei campioni di rumore preregistrati ed un impianto di diffusione audio.

Prime prove preliminari

Nella fase preliminare del progetto sono stati provati due sistemi di comunicazione esistenti, uno analogico commerciale (Stilo) e un altro digitale sperimentale (ST).

Queste prove furono effettuate per comprendere a fondo le funzionalità offerte dal sistema analogico di Stilo e dal sistema della ST. I dati raccolti in queste sessioni sono stati utilizzati per le analisi introduttive svolte nel capitolo 2.

Inoltre, grazie a queste serie di prove, si è potuto realizzare il primo prototipo di sistema di comunicazione sperimentale: sono stati scelti i parametri di campionamento del segnale e fissato il ritardo temporale massimo di elaborazione del sistema.

Prove di filtraggio digitale

Nella fase successiva del progetto si è posto l'obiettivo di analizzare gli spettri della voce e del rumore di una vettura da rally, al fine di trovare la forma e la frequenza di taglio migliore del filtro digitale.

Dopo aver implementato diversi tipi di filtri, con differenti frequenze di taglio e guadagni, è emerso che i sistemi che portano migliori benefici, in termini di riduzione del rumore, sono quelli di ordine elevato con guadagno alto (10) e frequenza di taglio attorno ad 1,5kHz.

Questi filtri si comportano molto bene in presenza di un forte disturbo, in quanto migliorano in modo sensibile il rapporto tra voce e rumore con effetti benefici per la comunicazione, tuttavia distorcono la voce stessa in modo evidente: questo fenomeno negativo però è rilevabile solo senza rumore.

Le prove effettuate coi tecnici della Stilo prevedevano inizialmente l'ascolto della sola voce, senza rumore, e poi l'inserimento del disturbo: in questo modo un filtro molto estremo non veniva apprezzato in quanto la qualità

della voce in un ambiente silenzioso era deludente, anche se la riduzione del rumore, quando presente, era molto elevata.

Grazie a questa serie di prove si è potuto così evidenziare che il solo filtraggio del rumore non era accettabile come soluzione finale: qualsiasi operazione effettuata sul segnale doveva riuscire a migliorare il rapporto segnale/rumore senza intaccare la qualità percepita del segnale vocale.

Prove dei moduli

Le ultime prove effettuate, con prototipo realizzato con la centralina cRIO, sono state quelle per testare le funzionalità degli algoritmi presentati nel capitolo 5.

In sede di analisi si erano proposte una serie di soluzioni adatte per migliorare la cancellazione del rumore senza penalizzare in maniera eccessiva la qualità del segnale vocale.

Queste soluzioni (filtro statico, equalizzatore ed logica di attivazione) sono state provate anche dai tecnici di Stilo i quali sono stati soddisfatti dai benefici introdotti in termini di cancellazione del rumore.

Tuttavia, con quest'ultima serie di prove, sono stati anche evidenziati i limiti strutturali imposti della soluzione prototipale fino ad ora adottata. Il prototipo basato sulla centralina cRIO, discusso nelle sue funzionalità e relativi limiti nel capitolo 3.1, presenta una serie di caratteristiche che rendevano difficile una valutazione oggettiva delle prestazioni del sistema in termini di qualità della voce.

Infatti il sistema cRIO è afflitto da una serie di disturbi che degradano sensibilmente a qualità dell'audio in uscita dalla centralina. Ne seguiva che si potevano percepire i benefici introdotti dalla cancellazione, ma con una serie di disturbi che rendevano in parte inadeguate le rilevazioni.

Limiti del primo apparato sperimentale realizzato

Come accennato nella sezione precedente, lo sviluppo prototipale utilizzando la centralina cRIO ha portato buoni risultati: tuttavia questi venivano in parte offuscati dalla scarsa qualità del segnale audio percepito.

La qualità del segnale vocale in uscita dalla centralina cRIO è soggetta ad una serie di disturbi che sono imputabili principalmente alle seguenti cause:

1. Cavi lunghi e mancate schermature nei punti di giunzione.
2. Partitore di tensione.
3. Centralina non ottimizzata per processi audio.
4. Offset iniziale della centralina.

Per ridurre il rumore elettrico introdotto sono stati utilizzati cavi schermati di elevata qualità, così da impedire la degradazione del segnale lungo il percorso. Tuttavia gli ingressi e le uscite della centralina sono costituiti da semplici morsetti non schermati: attraverso questi punti entra una parte del rumore.

Una seconda fonte di disturbi è costituita dal *partitore di tensione* posto sull'uscita della centralina. L'utilità di questo componente è stata discussa nel capitolo 3.1.1: è necessario per permettere al sistema Stilo di funzionare correttamente, simulando la presenza di un microfono sull'ingresso.

Purtroppo tale sistema, per la sua natura, agisce da antenna captando ed amplificando il rumore elettromagnetico presente nell'ambiente circostante: in una delle prime prove in laboratorio si sentiva il segnale di una radio privata sovrapposto al segnale vocale.

Per questo si è cercato di isolare il partitore creando un'opportuna schermatura e collegando quest'ultima alla massa del cavo: in questo modo è stato possibile minimizzare i disturbi elettrici percepiti.

Un'altra causa di disturbo direttamente legata alla centralina è costituita dall'*offset* iniziale di taratura dei segnali.

Infatti un segnale acquisito dal cRIO non sempre presenta un valore medio nullo, anche se il segnale analogico è definito un range di valori simmetrico (come nel nostro caso di $\pm 4V$). La natura di tale discrepanza è dovuta alla componentistica interna della centralina, molto sensibile alla temperatura ed alle prime tensioni rilevate.

La presenza di questo offset è molto dannosa in quanto, se questo è quantitativamente rilevante, porta alla saturazione del segnale in uscita. Se al segnale elaborato si somma un valore costante piccolo ciò non introduce un disturbo evidente. Tuttavia, se il valore costante aggiunto è molto elevato, lo diventa anche il segnale in uscita: in questo modo sui morsetti dell'output si ha una tensione ben più elevata dei $\pm 4V$ supportati dalle cuffie, che di conseguenza saturano.

La presenza di questo disturbo non è deterministica: a parità di segnale fornito in ingresso, in prove uguali eseguite in momenti diversi, l'uscita può saturare o comportarsi correttamente. Questo comportamento non è nemmeno statico: l'uscita può saturare e poi, con l'asstarsi della temperatura dell'apparecchiatura, tornare a valori ammissibili.

Per ovviare a questo disturbo è stata introdotta, nelle applicazioni realizzare con cRIO, una coppia di parametri che vanno settati manualmente da un operatore. Tale soluzione riesce a compensare buona parte del offset rilevato, ma ha il difetto di essere un rimedio di natura sperimentale, che va tarato prima di ogni prova.

Per superare i limiti imposti dall'uso della centralina cRIO si è ritenuto opportuno implementare le soluzioni proposte su una nuova architettura hardware prototipale, ottimizzata per applicazioni audio, che fosse simile al sistema commerciale definitivo.

6.3 Realizzazione prototipo su DSP commerciale

Nella fase finale del progetto si è provveduto alla realizzazione di un prototipo identico, sia nei componenti fondamentali utilizzati, sia nelle funzionalità, al prodotto da commercializzare.

Grazie a questo si è potuto così valutare quali saranno le prestazioni effettive del sistema completo di tutte le sue funzionalità.

Per questa serie di prove si è utilizzata una evaluation board, la *SigmaDSP 28/56-Bit Audio Processor Evaluation Board (EVAL-AD1940EB)*, con la quale è possibile programmare la logica del DSP audio multicanale AD1940 di Analog Device [12].

6.3.1 Caratteristiche hardware del sistema

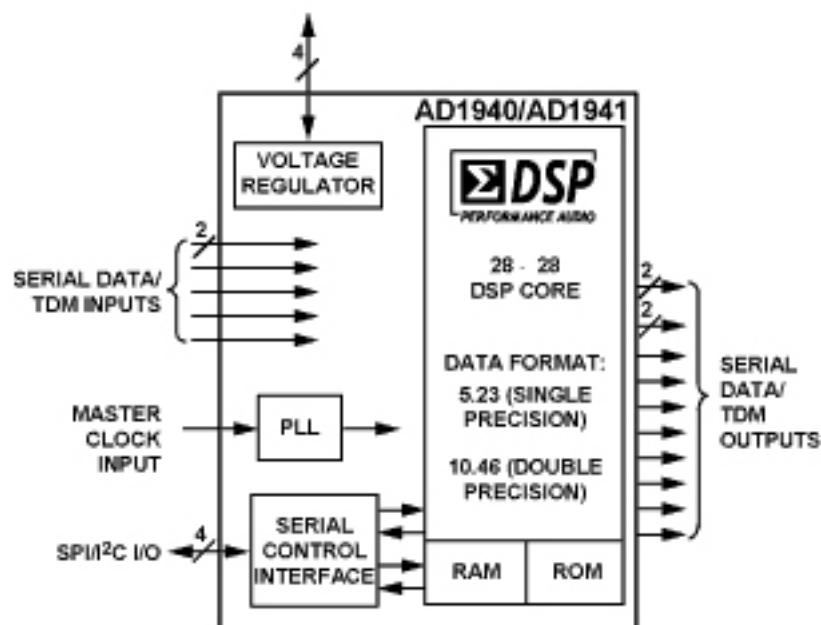


Figura 6.1: Diagramma a blocchi funzioni del DSP

Il DSP utilizzato per la prova ¹ è un chip studiato per applicazioni audio ed integra le seguenti funzionalità:

- processore audio a 28 bit, numeri in virgola mobile gestiti a 56 bit
- processore per audio digitale fino a 16 canali
- sample rates fino a $192kHz$
- 4 canali stereo in ingresso
- 8 canali stereo in uscita
- memoria RAM completamente programmabile
- 1024 parametri programmabili della RAM
- supporto al bus di comunicazione I^2S
- tensione di alimentazione regolabile per compatibilità con sistemi a 3.3V o 5V

Per quanto riguarda la scheda di valutazione essa integra una serie di ingressi ed uscite. più la relativa elettronica di controllo.

Sulla scheda sono presenti sia un ADC che un DAC per la gestione degli ingressi e delle uscite analogiche.

Sono inoltre presenti varie periferiche di I/O digitali e l'interfaccia parallela per la comunicazione con il pc (attraverso la quale si programma il DSP).

¹Il DSP utilizzato, come detto poc'anzi, è il modello AD1940 ed è quello che probabilmente verrà utilizzato in fase di produzione.

Tuttavia, è in fase di commercializzazione un nuovo prodotto, l' ADAU1701, che integra in un unico package 2 convertitori ADC e 4 convertitori DAC, oltre alle funzioni di DSP: è probabile che il prodotto finale si basi su questo per via della riduzione dei costi di produzione che introduce. Le nostre considerazioni, tuttavia, non vengono alterate poichè si tratta della stessa famiglia di DSP e l'architettura del sistema rimane inalterata: cambierà solo lo schema elettrico del prodotto finale, ma questo esula dai nostri studi.

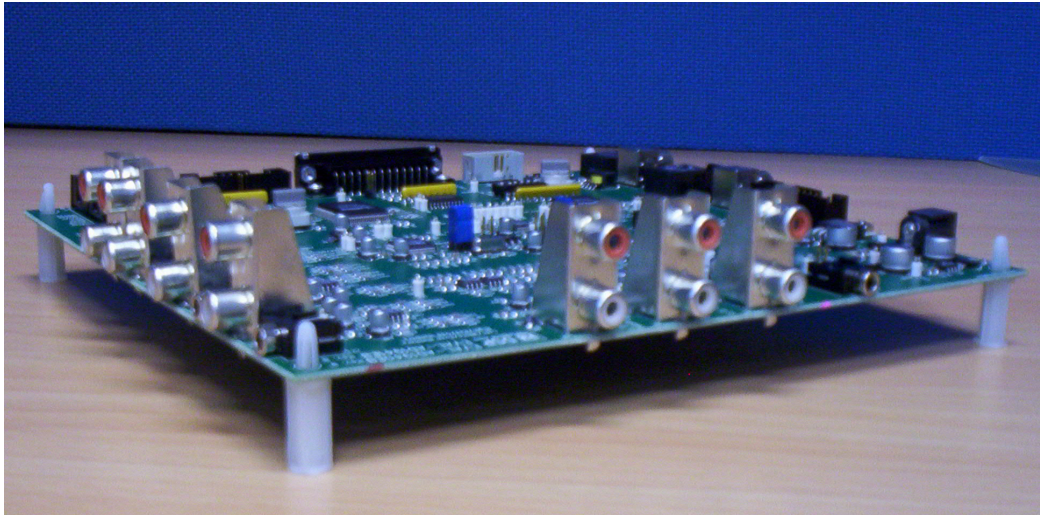


Figura 6.2: Evaluation board e relativi connettori

6.3.2 Funzionalità software del sistema

Tramite il software di CAD elettronico fornito con la evaluation board (Sigma Studio) si è proceduto alla programmazione del DSP al fine di fornire le funzionalità richieste.

Le funzionalità implementate sono le stesse di quelle discusse nel capitolo 5 e cioè un filtro statico, un equalizzatore e la parte di controllo volume.

La nuova architettura, tuttavia, supporta una serie di nuove funzionalità che sono state utilizzate e che hanno reso possibile un prodotto migliore.

Schema generale: input ed output

Questo prototipo è stato concepito per essere testato in un contesto reale (cioè in una prova su un'auto) e perciò necessita di almeno due diversi canali di ingresso ed uscita: uno per il pilota ed uno per il navigatore.

Su richiesta dei tecnici della Stilo è stata realizzata un'applicazione che prevede 2 ingressi e 3 uscite: nella Figura 6.3 è possibile vedere lo schema

logico a blocchi delle funzionalità, mentre nella Figura 6.4 è possibile vedere lo schema di Sigma Studio.

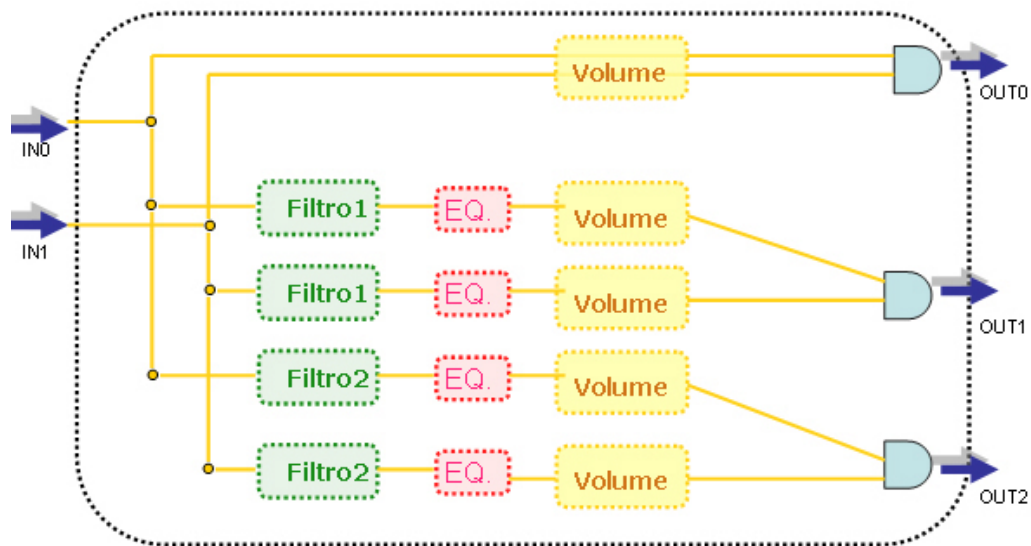


Figura 6.3: Schema logico dei filtri realizzati

Nonostante sia sufficiente un'unica uscita per una comunicazione pilota/navigatore, nella quale sono mixate le voci di entrambi, nell'applicazione ce ne sono diverse, per avere sullo stesso DSP più filtri implementati, così da poter scegliere quello più appropriato tramite un semplice interruttore analogico.

I due canali mono in ingresso (sugli ingressi zero ed uno della evaluation board) ricevono il segnale dai due microfoni: sul canale zero il segnale del pilota e sull'uno quello del navigatore.

Sulle uscite viene effettuato il mix dei segnali audio in ingresso (eventualmente filtrati ed equalizzati): questo permette di avere un'unica uscita con entrambi i canali, in modo da fornire il ritorno in cuffia sia al pilota che al navigatore.

Sulle tre uscite sono disponibili i seguenti segnali:

- sulla prima (uscita zero) c'è il mix dei due segnali in ingresso non elaborati, con un semplice controllo del volume.
- sulla seconda (uscita uno) si trova il mix dei segnali pilota e navigatore passati per il primo gruppo filtrante, e relativi equalizzatori.
- sulla terza uscita (uscita due) si trova il mix dei segnali in ingresso modificati dal secondo gruppo di filtri ed equalizzatori.

Avendo tre distinte uscite è possibile, tramite un semplice commutatore analogico a tre vie, ottenere un prodotto con tre diverse modalità di funzionamento:

1. filtro spento
2. filtro uno
3. filtro due

In questo modo si possono anche settare i due filtri (o eventualmente di più) in funzione del tipo di prova o di terreno, così da fornire al pilota la cancellazione del rumore più appropriata.

Filtro cancellazione rumore

Il DSP oggetto dell'esame offre come funzionalità semplici filtri IIR del secondo ordine già implementati.

Tuttavia per i nostri scopi questi erano di ordine troppo basso per poter ottenere dei risultati soddisfacenti.

Per questo si è deciso di implementare il filtro per la cancellazione del rumore con un *filtro IIR dell'dodicesimo ordine*.

Per realizzarlo sono stati utilizzati sei filtri del secondo ordine in sequenza, tutti con la medesima frequenza di taglio (come visibile in Figura 6.5).

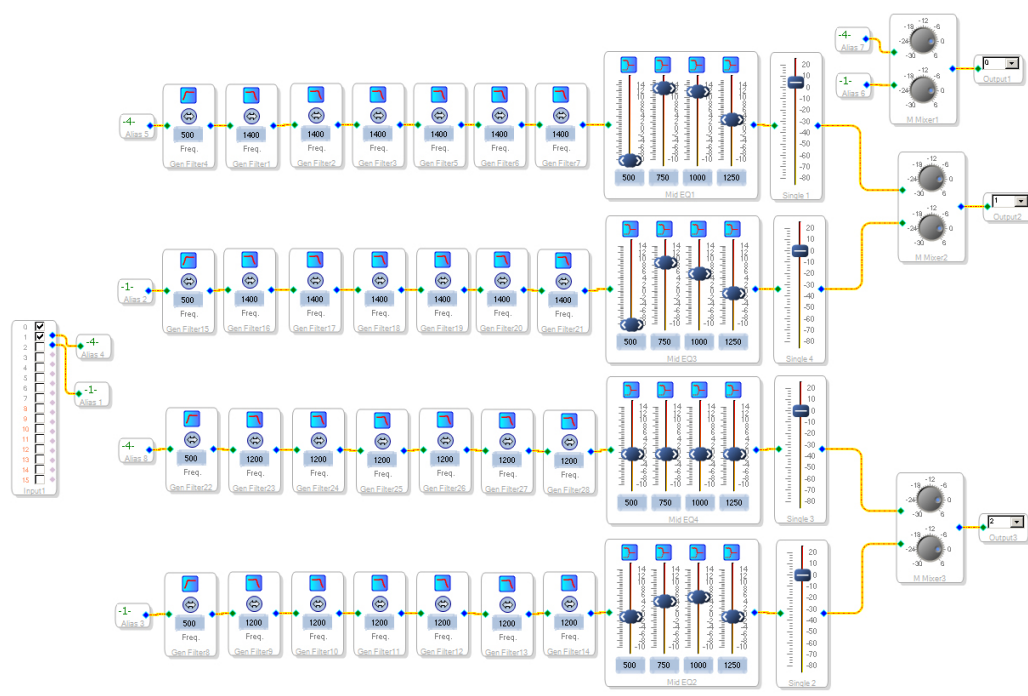


Figura 6.4: Software implementato sul DSP

Tramite una serie di prove sperimentali si è scoperto che la frequenza ottimale di taglio per eliminare la maggior parte del rumore, preservando la qualità voce, è intorno ad 1,4kHz.

Infine si noti come sia presente un filtro passa-alto iniziale: questo serve per filtrare tutte le componenti in bassa frequenza, che altrimenti risulterebbero fastidiose.

Infatti, in questa configurazione, non è più presente una centralina Stilo sullo stadio di ingresso: essa aveva la caratteristica di filtrare le bassissime frequenze, perciò ora è necessario filtrarle esplicitamente.

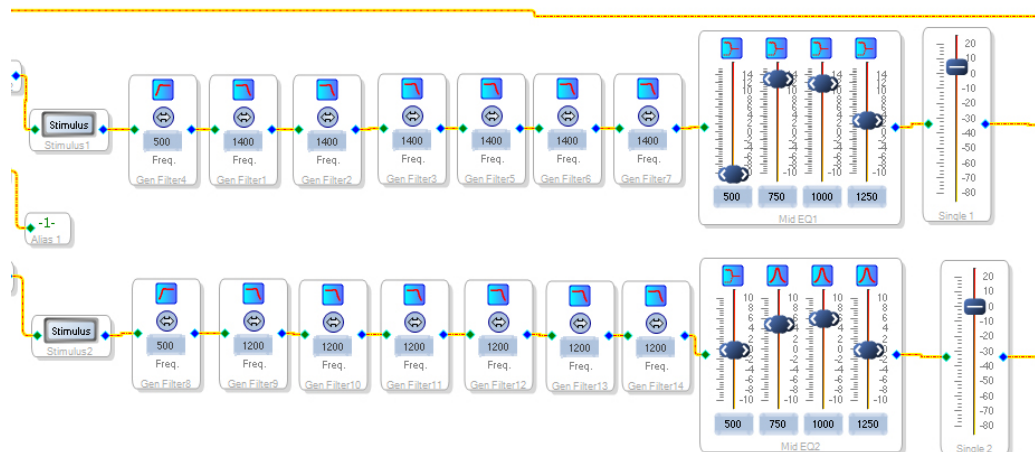


Figura 6.5: Particolare di Sigma Studio raffigurante il filtro statico e l'equalizzatore

Equalizzatore e volumi

Successivamente al blocco filtrante, su ogni canale, è stato aggiunto un equalizzatore a quattro bande, per permettere una regolazione più fine della qualità della voce.

Per implementare l'equalizzatore non è stato necessario utilizzare una serie di filtri passa-banda in parallelo: infatti il DSP integra, tra le varie funzionalità, anche quella di un equalizzatore programmabile.

Infine su ogni canale, prima del mix di uscita, è stato aggiunto un controllo di volume indipendente, così da ottenere la massima libertà di configurazione possibile.

6.3.3 Prove di laboratorio effettuate

L'impianto sperimentale ottenuto, come descritto nel paragrafo precedente, è stato testato in laboratorio anche dai tecnici di Stilo.

La prova è risultata molto soddisfacente in quanto all'elevata cancel-

lazione del rumore, già apprezzata nei precedenti test, ora si è aggiunta un'elevata qualità del segnale vocale.

Inoltre tutti i disturbi di natura elettrica sono scomparsi e la presenza di un equalizzatore ha reso possibile modificare durante la prova, dagli stessi tecnici di Stilo, i parametri di filtraggio così da ottenere una qualità voce ottimale.

6.3.4 Prova su strada

E' previsto, nelle settimane successive alla redazione del presente documento, un collaudo su strada dell'impianto di comunicazione audio, realizzato con l'architettura qui discussa: si proveranno i diversi livelli di filtraggio e di equalizzazione.

La prova verrà svolta su un tratto di strada pubblica, chiuso al traffico veicolare, e con il supporto logistico di Stilo.

Capitolo 7

Direzioni future di ricerca e conclusioni

Il sistema di comunicazione realizzato rappresenta uno strumento flessibile, facile da modificare e da estendere. Le caratteristiche proprie di un sistema digitale permettono di cambiare i parametri di funzionamento semplicemente agendo sulla parte software nel DSP, senza più doversi preoccupare dell'architettura hardware: la possibilità di modificare il prodotto a costo ridotto permetterà di creare sistemi ad hoc per i clienti più importanti.

Gli studi teorici eseguiti sulla centralina analogica e sugli spettri della voce umana e del rumore "rally" rappresentano un bagaglio di conoscenze interessante che si va ad aggiungere a quello dei collaboratori Stilo, che servirà per future realizzazioni.

Il sistema nella sua architettura definitiva è stato concepito in modo da poter essere inserito all'interno di un prodotto qualsiasi della stessa famiglia di processori: questo amplia le possibilità di riutilizzo della particolare implementazione software realizzata, senza il pericolo della dipendenza da uno specifico hardware.

Il filtro digitale statico aumenta il rapporto tra il segnale e il rumore,

senza degradare la voce in maniera significativa.

La logica di attivazione del filtro permette di rilevare la presenza di un determinato livello di rumore e di conseguenza attivare il filtraggio, senza penalizzare la resa del sistema in condizioni normali. Grazie a questo meccanismo è stato possibile diminuire la frequenza di taglio e aumentare il guadagno del filtro, poichè la distorsione introdotta nella voce in questo modo non è rilevabile in presenza di rumore.

L'equalizzatore divide in diverse bande di frequenza il segnale già filtrato e permette di riequilibrarne i guadagni in modo da ottenere una voce più naturale e intellegibile.

7.1 Sviluppi futuri

Qui di seguito vengono presentati alcuni possibili sviluppi per il sistema di cancellazione del rumore analizzato. Questi si possono suddividere in due grossi filoni:

- Miglioramenti all'attuale sistema di filtraggio passivo
- La cancellazione attiva

Per quanto riguarda i possibili cambiamenti, il sistema, essendo stato realizzato in maniera modulare, permette facilmente la modifica dei parametri di funzionamento di un solo componente: in questa ottica sarà possibile cambiare il tipo di filtro digitale utilizzato senza dover modificare l'equalizzatore e la logica di attivazione.

Invece un'evoluzione del sistema verso una cancellazione attiva del rumore richiede grossi cambiamenti e l'introduzione di almeno un'altro microfono.

7.2 Miglioramenti al sistema di filtraggio passivo

Il filtraggio dei disturbi è la componente qualificante del sistema: sicuramente l'utilizzo prolungato dello stesso sui campi di gara porterà a trovare dei margini di miglioramento.

Il filtro implementato è di tipo FIR passabasso ordine 39, ma sarà sempre possibile cambiare il tipo di filtro, ad esempio usare un Filtro Butterworth o passare da un semplice passabasso a un filtro passabanda, in modo da poter gestire meglio la bassa frequenza oltre al taglio delle componenti rumorose.

Un altro scenario possibile è l'implementazione di un sistema con un filtro di ordine inferiore o con una frequenza di taglio più acuta, da utilizzare sulle vetture meno prestanti e rumorose (come le gruppo N aspirate a trazione su un solo asse).

Estendendo questo concetto si può pensare di affinare il filtraggio creando profili specifici a seconda della categoria (WRC, Gruppo N), della superficie stradale su cui si corre, o addirittura del modello di vettura. La caratterizzazione spettrale serve a correggere il filtraggio o l'equalizzazione del segnale in base alle specifiche della vettura.

Alcuni studi avanzati[7][8] dimostrano che è possibile migliorare la percezione dei suoni in automobile correggendo opportunamente lo spettro dei segnali riprodotti: la forma dell'abitacolo e i materiali utilizzati per l'insonorizzazione e i rivestimenti interni tendono ad assorbire alcune lunghezze d'onda e ad amplificarne altre, pertanto questo effetto può essere annullato con un opportuno setup del sistema. Per caratterizzare spettralmente uno specifico modello di una vettura occorre registrare il rumore prodotto durante la corsa (volendo anche su superfici stradali differenti) e analizzarlo: in base a quanto rilevato sarà possibile correggere il filtraggio (o l'equalizzazione) del segnale.

Per facilitare i piloti meno esperti, che necessitano di udire il motore in

fase di cambio marcia, si potrà realizzare un ulteriore filtro passabanda in alta frequenza che amplifichi alcune componenti di rumore legate direttamente al regime di rotazione del motore, senza introdurre in cuffia ciò che ne è indipendente (come i fruscii aerodinamici e il rotolamento).

Per quanto riguarda la messa a punto del filtro statico è in fase di sviluppo uno script Matlab che permetta una più facile creazione dei filtri. L'utilizzo di Matlab e delle sue funzioni per la creazione di filtri permettono uno studio degli spettri più analitico e dettagliato, prima dell'inserimento finale dei parametri all'interno di Sigmastudio. Questo script di supporto, sebbene non essenziale, viene realizzato in modo da velocizzare ulteriormente la fase di messa a punto del sistema durante le prossime prove sperimentali sul campo, effettuate con l'utilizzo di una vettura da gara.

L'implementazione effettiva del filtro statico in Sigmastudio e la forma spettrale finale del sistema completo (filtro e equalizzatore), possono essere verificati e visualizzati in tempo reale durante la modifica, sfruttando le funzionalità grafiche offerte dall'ambiente di sviluppo.

7.2.1 Logica di attivazione

Un possibile interessante sviluppo della logica di attivazione è inserire numerosi livelli differenti di filtraggio audio a seconda dell'intensità rilevata del rumore, in modo da avere sempre il miglior compromesso tra filtraggio dei disturbi e qualità del segnale voce.

Altri interventi, in analogia con quanto proposto per la parte di filtraggio, prevedono la creazione di diversi profili di attivazione del filtro a seconda della categoria della vettura, della superficie stradale, o del livello di abilità del pilota. Si può pensare di rendere le diverse logiche di attivazione selezionabili dal pilota tramite la rotazione di una manopola o la pressione di un tasto.

In analogia con quanto viene fatto da alcuni software per la comunicazione vocale over ip, è possibile mettere a punto una procedura di taratura

automatica del sistema: si può far stimare alla centralina il livello medio del disturbo, acquisendo solo il rumore ambientale durante una corsa di prova (senza il parlato). In base a quanto rilevato sarà possibile stabilire la soglia di intervento del filtraggio audio sulla comunicazione.

Affinando ulteriormente questa procedura si potrebbe inserire un microfono in grado di percepire solo il rumore ambientale, che ne stimi il livello medio e aggiorni dinamicamente la soglia di intervento del filtraggio, garantendo le migliori prestazioni anche nelle tappe in cui la superficie stradale possiede caratteristiche differenti in tratti diversi.

7.2.2 Equalizzatore

La tonalità della voce che viene percepita dipende in gran parte dal profilo dell'equalizzatore, per questo si può pensare di rendere disponibili diversi profili caratteristici fissi, da scegliere a seconda del tipo di voce del navigatore o del pilota: un primo esempio è la distinzione tra voce maschile e femminile.

Per i clienti più importanti, come i team ufficiali del mondiale rally, si può pensare di far scegliere al pilota un profilo di equalizzazione vocale personalizzato, oppure di rendere disponibile una versione della centralina che permetta all'utente finale di agire direttamente sull'equalizzatore ogni volta che lo si desidera.

L'implementazione finale dell'equalizzatore è stata realizzata sfruttando le funzioni rese disponibili dall'ambiente di sviluppo Sigmastudio, che utilizzano filtri passabanda di ordine ridotto. Per migliorare le caratteristiche di funzionamento dell'equalizzatore é possibile realizzare un implementazione ex-novo, aumentando l'ordine dei filtri che separano le differenti bande di frequenza, in modo da permettere una messa a punto della tonalità di voce percepita ancora più raffinata.

7.3 Cancellazione attiva del rumore

Il sistema di filtraggio del rumore realizzato è di tipo passivo, il rapporto *segnale/rumore* viene aumentato filtrando le frequenze in cui la voce non è presente e cercando il miglior compromesso in quelle in cui sono entrambi presenti.

Per le frequenze in cui segnale e rumore sono presenti entrambi è possibile cancellare il rumore in maniera attiva. Poichè questa tecnica è piuttosto complessa e va oltre gli obiettivi della ricerca effettuata l'argomento verrà presentato solo per linee generali, senza scendere nei dettagli.

Un impianto di *cancellazione attiva del rumore* (*Active Noise Control*) necessita di un secondo microfono molto vicino a quello del parlante (che però non rilevi la voce), in modo da avere correlazione tra il rumore sovrapposto al parlato nel primo microfono e quello rilevato nel secondo. Questo studio richiede di individuare una funzione di trasferimento che legghi il rumore acquisito da entrambi i microfoni, che di solito è molto complessa: è di tipo tempovariante, ma è anche legata alle diverse condizioni ambientali (temperatura, umidità). Con questo sistema è possibile utilizzare un impianto di diffusione audio (come le cuffie) per generare un rumore "uguale e contrario" a quello rilevato, per creare un volume di spazio in cui il rumore è assente (idealmente il casco del pilota o del navigatore).

Le dimensioni del volume di spazio in cui il rumore è assente sono legate in modo inversamente proporzionale con la lunghezza d'onda del rumore da cancellare.

La cancellazione attiva del rumore è utilizzata, con successo, da alcuni anni per ridurre il rumore nella cabina di pilotaggio degli aerei. Infatti su un aereo le componenti più rumorose sono quelle a bassa frequenza, quindi è possibile cancellarle efficacemente in un area di spazio piuttosto ampia, come appunto una cabina.

Il caso da noi analizzato è invece più complesso: infatti su una macchina da corsa il rumore maggiore è quello alle alte frequenze.

Così, per generare una regione di spazio grossa all'incirca come un casco è possibile cancellare attivamente solo disturbi che arrivano ad una frequenza massima di 1kHz circa.

Bibliografia

- [1] *Sergio Bittanti* - Identificazione dei Modelli e Sistemi Adattativi - Pitagora Editrice, Bologna (ultima edizione 2005)
- [2] *Sergio Bittanti* - Teoria della Predizione e del Filtraggio - Pitagora Editrice, Bologna (ultima edizione 2005)
- [3] *Peter Pollàk, Pavel Sovka, Jan Uhlir* - *Czech Technical University, Prague* - Noise suppression system for a car - Fonte: sito IEEE
- [4] *Masanori Kato, Masahiro Serizawa, Nozomi Toki* - Noise Suppression with High Speech Quality Based on Weighted Noise Estimation for 3G Handsets - Fonte: sito IEEE
- [5] *Renny E. Badra and Babak Daneshrad* - *Electrical Engineering Department University of California, Los Angeles* - Automatic gain control in adaptive precoded communication systems - Fonte: sito IEEE
- [6] *Franco e Rita Zappa* - Fondamenti di elettronica - Ed. Progetto Leonardo
- [7] *Ozawa K., Tomita T., Shiba A., Ise T., Suzuki, Y.* - *Yamanashi Univ., Kofu, Japan* - Compensation methods of sound quality for a car-audio equalizer - Fonte: Networking, Sensing and Control, 2005. Proceedings. 2005 IEEE
- [8] *Bellini A., Carpanoni E., Frassi G., Tesauri M., Ugolotti E.* - *Dipartimento di Ing. dell'Informazione, Parma Univ., Italy* - Design of a DSP-based 24

bit digital audio equalizer for automotive applications - Fonte: Circuits and Systems, 2002. ISCAS 2002. IEEE

Risorse web

- [9] www.stilo.it
- [10] www.st.com
- [11] www.ni.com
- [12] www.analog.com
- [13] <http://ieeexplore.ieee.org>

Appendice A

Documentazione del progetto

A.1 Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 2.2

A.1.1 Generazione spettri del sistema

Tramite questo codice si è generato sia lo spettro dell'analisi con il WN sia quello dell'analisi con il rumore rally. Questo poichè cambiavano solo i dati in input all'algoritmo.

```
%Script ANALISI SPETTRALE RUMORE ST
clear all
f=20000;
f_Nyquist=f/2;
load DATI_WN_voce_ST.LVM
U = DATI_WN_voce_ST(:,2);
T = DATI_WN_voce_ST(:,1);
U = U - mean(U);
N=length(U);
N2=N/2;
```

```
%plot del segnale in volt
subplot(2,2,1)
max_val=max(abs(U));
scala=2^16; %io ho 16bit
scala_mezzi=scala/2;
U_volt=U*(20/scala);
plot(U_volt);
title('Plot in VOLT');
xlabel('Campioni');
ylabel('Volt V');
title('Andamento del segnale ST (WN)');
%Calcolo dello spettro tramite FFT.
subplot(2,2,3);
U = U - mean(U);
N=length(U);
N2=N/2;
fft_base_U = fftshift((fft(U).*conj(fft(U)))/N));
max_val_U =max(abs(fft_base_U));
fft_normalizzata_U=fft_base_U;%/max_val_U;
fft_traslata_U =(1:N/2)';
j=1;
for k=N2:N-1
    fft_traslata_U(j)=fft_normalizzata_U(k);
    j=j+1;
end
%ora posso stampare
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyquist , fft_traslata_U, 'b');
%ora ripeto i conti con i dati STILO
clear all
```

```
f=20000;
f_Nyquist=f/2;

load DATI_WN_voce_STILO.LVM
U = DATI_WN_voce_STILO(:,2);
T = DATI_WN_voce_STILO(:,1);
U = U - mean(U);
N=length(U);
N2=N/2;
%plot del segnale in volt
subplot(2,2,2)
max_val=max(abs(U));
scala=2^16;
scala_mezzi=scala/2;
U_volt=U*(20/scala);
plot(U_volt);
title('Plot in VOLT');
xlabel('Campioni');
ylabel('Volt V');
title('Andamento del segnale STILO (WN)');
%Calcolo dello spettro tramite FFT.
subplot(2,2,4);
fft_base_U = fftshift((fft(U).*conj(fft(U))/N));
max_val_U =max(abs(fft_base_U));
fft_normalizzata_U=fft_base_U;%/max_val_U;
fft_traslata_U =(1:N/2)';
j=1;
for k=N2:N-1
    fft_traslata_U(j)=fft_normalizzata_U(k);
```

```
j=j+1;
end
%ora posso stampare
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyquist , fft_traslata_U, 'b');
xlabel('Frequenza Hz');
title('Spettro STILO');
```

A.1.2 Analisi del tempo di attivazione

```
%script con dat rally
clear all
f=20000;
f_Nyquist=f/2;
load DATI_rally_ST.LVM
data=DATI_rally_ST(:,2);
T=DATI_rally_ST(:,1);
%convertito in VOLT
N=length(data);
max_val=max(abs(data));
scala=2^16; %io ho 16bit
scala_mezzi=scala/2;
max_volt=max_val*10/scala_mezzi;
data_volt=data;
for i=1:N
    data_volt(i)= data(i)*10/scala_mezzi;
end
subplot(2,1,1)
plot(T,data_volt);
title('Andamento del segnale nel tempo');
xlabel('Campioni');
```

```
ylabel('Volt V');
subplot(2,1,2)
%spettro primi 20000 campioni
U=data(1:20000);
U = U - mean(U);
N=length(U);
N2=N/2;
fft_base_U = fftshift((fft(U).*conj(fft(U))/N));
max_val_U =max(abs(fft_base_U));
fft_normalizzata_U=fft_base_U;
fft_traslata_U =(1:N/2)';
j=1;
for k=N2:N-1
    fft_traslata_U(j)=fft_normalizzata_U(k);
    j=j+1;
end
%ora posso stampare
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyquist , fft_traslata_U, 'b');
%spettro dei campioni da 40000 a 60000
clear U;
clear T;
clear fft*;
U=data(40001:60000);
U = U - mean(U);
N=length(U);
N2=N/2;
fft_base_U = fftshift((fft(U).*conj(fft(U))/N));
max_val_U =max(abs(fft_base_U));
fft_normalizzata_U=fft_base_U;%/max_val_U;
```

```
fft_traslata_U =(1:N/2)';
j=1;
for k=N2:N-1
    fft_traslata_U(j)=fft_normalizzata_U(k);
    j=j+1;
end
hold on
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyquist , fft_traslata_U, 'r');
title('Spettri del sistema ST (segnali NON normalizzati)');
legend('spento','acceso');
```

A.1.3 Analisi della tensione massima

```
%Script ANALISI VOLTAGGIO
clear all load D:\DATI_RALLY_VOCE.LVM
data=DATI_RALLY_VOCE(:,2);
N=length(data);
subplot(2,2,1);
plot(data);
title('Plot numerico');
xlabel('Campioni');
ylabel('Interi 16bit');
%ora devo calcolare il voltaggio relativo
%devo calcolare il valore assoluto maggiore
max_val=max(abs(data));
scala=2^16; %io ho 16bit
scala_mezzi=scala/2;
%ora imposto la proporzione lineare
%scala_mezzi:10v=max_val:X
max_volt=max_val*10/scala_mezzi; subplot(2,2,3)
```


A.1. Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 2.2 113

```
data_volt=data; for i=1:N
    data_volt(i)= data(i)*10/scala_mezzi;
end
plot(data_volt); title('Plot in VOLT'); xlabel('Campioni');
ylabel('Volt V');
%ora voglio sapere quanti BIT usa per il valore massimo
for i=1:16
    bit(i)=0;
end
for i=1:N
    if(2^14<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^15)
        bit(16)=bit(16)+1;
    elseif(2^13<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^14)
        bit(15)=bit(15)+1;
    elseif(2^12<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^13)
        bit(14)=bit(14)+1;
    elseif(2^11<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^12)
        bit(13)=bit(13)+1;
    elseif(2^10<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^11)
        bit(12)=bit(12)+1;
    elseif(2^9<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^10)
        bit(11)=bit(11)+1;
    elseif(2^8<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^9)
        bit(10)=bit(10)+1;
    elseif(2^7<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^8)
        bit(9)=bit(9)+1;
    elseif(2^6<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^7)
        bit(8)=bit(8)+1;
    elseif(2^5<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^6)
```

```
        bit(7)=bit(7)+1;
    elseif(2^4<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^5)
        bit(6)=bit(6)+1;
    elseif(2^3<=abs(data(i)) & abs(data(i))<2^4)
        bit(5)=bit(5)+1;
    else
        bit(4)=bit(4)+1;
    end
end
subplot(2,2,4)
t=1:16;
plot(t,bit,'rs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k',
'MarkerFaceColor','g','MarkerSize',4)
axis([4 16 0 60000]);
title('Uso dei bit');
xlabel('Bit');
grid on;
for i=1:16
    if(bit(i)> 0)
        max_bit=i;
    end
end
subplot(2,2,2)
plot(max_volt,'rs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','g',
'MarkerFaceColor','g','MarkerSize',4)
hold on
plot(max_bit,'rs','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','r',
'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',4)
title('valori massimi');
```

```
legend('VOLT','BIT');  
grid on;
```

A.1.4 Analisi dei bit

```
clear all load D:\DATI.LVM  
data=DATI(:,2);  
f=20000; %Frequenza segnale 20KHz  
N=length(data);  
data12=data; for i=1:N  
    data12(i)=fix(data(i)/16)*16;  
end data8=data; for i=1:N  
    data8(i)=fix(data(i)/256)*256;  
end  
t=(0:0.00005:(5-0.00005));  
stairs(t,data*20/65536,'g');  
hold on  
stairs(t,data12*20/65536,'r');  
hold on  
stairs(t,data8*20/65536,'b');  
xlabel('Tempo [s]');  
ylabel('Volt[v]');  
legend('16 Bit','12 Bit','8 Bit');
```

A.1.5 Logica di attivazione

```
clear all  
% load vettore.MAT %ho bisogno di tanti campioni  
% U=vettore(:,2); %Segnale da Analizzare  
% T=vettore(:,1); %vettore tempi
```

A.1. Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 2.2 116

```
load DATI_VOCE.LVM IN1=DATI_VOCE(:,2);
load DATI_RALLY.LVM IN2=DATI_RALLY(:,2);
load DATI_WN.LVM IN3=DATI_WN(:,2);
load DATI_VOCE.LVM IN4=DATI_VOCE(:,2);
load DATI_RALLY.LVM IN5=DATI_RALLY(:,2);
load DATI_WN.LVM IN6=DATI_WN(:,2);
load DATI_RALLY.LVM IN7=DATI_RALLY(:,2);
load DATI_VOCE.LVM IN8=DATI_VOCE(:,2);
U=[IN1;IN2;IN3;IN4;IN5;IN6;IN7;IN8];
clear IN* clear DATI*
U = U - mean(U); N=length(U); N2=N/2;
T=1:1:N;
f=20000;
f_Nyquist=f/2;
% %mi costruisco un wav del segnale
% bit=32;
% wavwrite(U,f,bit,'segnale_originale.wav');
%imposto il filtro
freq_taglio= 1250/f_Nyquist; %passa basso 1KHz
ordine_butter=5; [NUM,DEN] =
butter(ordine_butter,freq_taglio,'low');
Y = filter(NUM,DEN,U);
%filtro tutto, è esattamente come faccio nella realtà, cioè io ho un filtro
%ed in parallelo il filo diretto e decido dinamicamente quale passare in
%uscita
%logica x decidere cosa passare in uscita ogni tot mi prendo dei
%prendo dei campioni., li metto in un vettore e se val assoluto della media
% è suo a soglia attivo il filtro, se non no
soglia=400;
```

A.1. Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 2.2 117

```
campioni=200; %uno ogni 10 millisecondi, cioè un campione ogni 500,
    cioè 200 campioni
tempo_soglia=50;
%campioni*tempo_soglia*10= tempo risposta in millisecondi
attiva=0; %booleano per attivare
len=length(U);
vettore_OUT=U;
vett_ATT=zeros(len,1); vett_SOM=zeros(len,1);
vett_MED=zeros(len,1);
num_campioni=0; %indice x sapere quanti ne ho presi
somma=0;
%campioni 1,501,1001, etc..
for i=1:N
    %io devo prendere un campione ogni 500, faccio il conto e se la
    %divisione dà resto zero vuol dire che era un numero divisibile per 500
    x=mod(i-1,tempo_soglia);
    if(x==0)
        somma = somma + abs(U(i));
        num_campioni= num_campioni + 1;
        vett_SOM(i)=somma;
    end
    %ora controllo se ho raggiunto i 200 campioni
    if(num_campioni==campioni)
        %ora devo resettare e sceglie che azione fare
        media=somma/campioni;
        if(media<soglia)
            attiva=0;
        else
            attiva=1;
        end
    end
end
```

```

        end
        vett_MED(i)=media;
        %ora resetto tutto
        somma=0;
        num_campioni=0;
        media=0;
    end
    %ora decido cosa fare
    vett_ATT(i)=attiva;

    if(attiva==0)
        vettore_OUT(i)=U(i); %non filtro
    else
        vettore_OUT(i)=Y(i); %filtro
    end
end
end
%stampo i risultati
plot(T,U,T,vettore_OUT,T,vett_ATT*10000);
hold on
%per motivi grafici è meglio non plottare la media quando è zero
indice=1; for i=1:N
    if(vett_MED(i)~= 0)
        vett_TEMPO(indice)= i;
        vett_MEDIA(indice)= vett_MED(i);
        indice =indice +1;
    end
end
end plot(vett_TEMPO, vett_MEDIA,'.y'); hold on
%stampo anche la riga della soglia
plot([1 800000],[soglia soglia],'--g')
```

```
legend('IN','OUT','ATTIVA','MED','Soglia=400');  
title('Andamento dei segnali, della attivazione e della media');
```

A.2 Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 4.3

```
clear all  
load DATI.LVM;  
campioni=DATI(:,2);  
gain=0.000001;  
iout=1;  
fine=length(campioni);  
setpoint=1000; %valore di riferimento  
yout=1:fine;  
vett_g=1:fine;  
for i=1:fine  
    vett_g(i)=iout;  
    yout(i)=campioni(i)*iout;  
    err=setpoint-abs(yout(i));  
    iout=iout+gain*err;  
end  
figure  
subplot(2,1,1)  
plot(DATI(:,1),campioni,'g',DATI(:,1),yout,'b');  
legend('IN','OUT');  
title('Andamento dei segnali in ingresso ed in uscita al AGC');  
subplot(2,1,2)  
plot(vett_g)  
title('Andamento del Guadagno (parametro K)');
```

```
f=20000;
bit=32;
wavwrite(campioni,f,bit,'IN.wav');
wavwrite(yout,f,bit,'OUT.wav');
```

A.3 Codice sorgente utilizzato per le analisi del Capitolo 5

A.3.1 Studio forme dei FIR

```
% Studio con i fir
% sistema E - passa banda
freq_taglio_bassa = 2000/f_Nyquist;
%freq_taglio_alta = 2500/f_Nyquist;
%ordine=3;
[NUM_BUTT_1,DEN_BUTT_1] = butter(ordine,freq_taglio_bassa);
%SYS_BUTT_1=tf(NUM_BUTT_1,DEN_BUTT_1,1/f);
%MAG_BUTT_1,PHI_BUTT_1]=BODE(SYS_BUTT_1,W);
%MAG_butt_1(1:i) = MAG_BUTT_1(1,1,:);
ordine=8;
[NUM_BUTT_3,DEN_BUTT_3] = butter(ordine,freq_taglio_bassa);
SYS_BUTT_3=tf(NUM_BUTT_3,DEN_BUTT_3,1/f);
[MAG_BUTT_3,PHI_BUTT_3]=BODE(SYS_BUTT_3,W);
MAG_butt_3(1:i) = MAG_BUTT_3(1,1,:);
freq_taglio_bassa = 2000/f_Nyquist;
%ordine=19;
%f2 = [0:10000]/10000;
%m = [1,ones(1,1800), zeros(1,10000-1800)];
%NUM_FIR_1=fir1(ordine,freq_taglio_bassa);
```



```
%DEN_FIR_1=zeros(1 ,ordine+1);
%DEN_FIR_1(1,1)=1;
%SYS_FIR_1=tf(NUM_FIR_1,DEN_FIR_1,1/f);
%[MAG_FIR_1,PHI_FIR_1]=BODE(SYS_FIR_1,W);
%MAG_fir_1(1:i) = MAG_FIR_1(1,1,:);
%ordine=29;
%NUM_FIR_2=fir1(ordine,freq_taglio_bassa);
%DEN_FIR_2=zeros(1 ,ordine+1);
%DEN_FIR_2(1,1)=1;
%SYS_FIR_2=tf(NUM_FIR_2,DEN_FIR_2,1/f);
%[MAG_FIR_2,PHI_FIR_2]=BODE(SYS_FIR_2,W);
%MAG_fir_2(1:i) = MAG_FIR_2(1,1,:);
freq_taglio_bassa = 2250/f_Nyquist;
ordine=39;
NUM_FIR_3=fir1(ordine,freq_taglio_bassa);
DEN_FIR_3=zeros(1 ,ordine+1);
DEN_FIR_3(1,1)=1;
SYS_FIR_3=tf(NUM_FIR_3,DEN_FIR_3,1/f);
[MAG_FIR_3,PHI_FIR_3]=BODE(SYS_FIR_3,W);
MAG_fir_3(1:i) = MAG_FIR_3(1,1,:);
%ora disegniamo una figura che serva a noi
%amplifico la voce tra 1000 e 2000
forma_f = [0 1000 1000 2000 2000 2250 2250 1];
forma_m = [1 1 2 2 1 1 0 0];
forma_f=forma_f/f_Nyquist;
forma_f(1,8)=1;
NUM_FIR_1=fir2(ordine,forma_f,forma_m);
DEN_FIR_1=zeros(1 ,ordine+1);
DEN_FIR_1(1,1)=1;
```

```
SYS_FIR_1=tf(NUM_FIR_1,DEN_FIR_1,1/f);  
[MAG_FIR_1,PHI_FIR_1]=BODE(SYS_FIR_1,W);  
MAG_fir_1(1:i) = MAG_FIR_1(1,1,:);  
figure  
title('Studio di un passa basso - FIR o IIR');  
plot(W/2/pi, MAG_butt_3,W/2/pi, MAG_fir_3,W/2/pi, MAG_fir_1);  
legend('IIR ord.8','FIR ord.40','FIR ord.40 - modificato');  
grid on
```

A.3.2 Analisi Equalizzatore

```
%File di studio equalizzatore  
%A) Passa basso: 0 - 450Hz  
%B) passa banda: 500 -1000  
%c) passa banda: 1050 - 1500  
%D) passa banda: 1550 - 2000  
%E) passa banda: 2050 - 2500  
  
clear all  
ordine_filtro=3;  
f=20000;  
f_Nyquist=f/2;  
%sistema A - passa basso 0 - 450  
freq_taglio= 450/f_Nyquist;  
[NUM_A,DEN_A] = butter(ordine_filtro,freq_taglio,'low');  
SYS_A=tf(NUM_A,DEN_A,1/f);  
%sistema B - passa banda  
freq_taglio_bassa = 500/f_Nyquist;  
freq_taglio_alta = 1000/f_Nyquist;  
[NUM_B,DEN_B] = butter(ordine_filtro,[freq_taglio_bassa freq_taglio_alta]);
```

```

SYS_B=tf(NUM_B,DEN_B,1/f);
%система C - passa banda
freq_taglio_bassa = 1050/f_Nyquist;
freq_taglio_alta  = 1500/f_Nyquist;
[NUM_C,DEN_C] = butter(ordine_filtro,[freq_taglio_bassa freq_taglio_alta]);
SYS_C=tf(NUM_C,DEN_C,1/f);
%система D - passa banda
freq_taglio_bassa = 1550/f_Nyquist;
freq_taglio_alta  = 2000/f_Nyquist;
[NUM_D,DEN_D] = butter(ordine_filtro,[freq_taglio_bassa freq_taglio_alta]);
SYS_D=tf(NUM_D,DEN_D,1/f);
%система E - passa banda
freq_taglio_bassa = 2050/f_Nyquist;
freq_taglio_alta  = 2500/f_Nyquist;
[NUM_E,DEN_E] = butter(ordine_filtro,[freq_taglio_bassa freq_taglio_alta]);
SYS_E=tf(NUM_E,DEN_E,1/f);
%система F - pass abanda fiale
%freq_taglio_bassa = 2250/f_Nyquist;
%freq_taglio_alta  = 2700/f_Nyquist;
%[NUM_F,DEN_F] = butter(ordine_filtro,[freq_taglio_bassa freq_taglio_alta]);
%SYS_F=tf(NUM_F,DEN_F,1/f);
%figure;
%bode(SYS_A,SYS_B,SYS_C,SYS_D,SYS_E,SYS_F);
%guadagni
GA=1;
GB=1;
GC=1;
GD=1;
GE=1;

```

```

GF=1;
i=fix(10000*2*pi);
W=1:1:i;

[MAG_A,PHI_A]=BODE(GA*SYS_A,W);
MAG_a(1:i) = MAG_A(1,1,:);
[MAG_B,PHI]=BODE(GB*SYS_B,W);
MAG_b(1:i) = MAG_B(1,1,:);
[MAG_C,PHI_C]=BODE(GC*SYS_C,W);
MAG_c(1:i) = MAG_C(1,1,:);
[MAG_D,PHI_D]=BODE(GD*SYS_D,W);
MAG_d(1:i) = MAG_D(1,1,:);
[MAG_E,PHI_E]=BODE(GE*SYS_E,W);
MAG_e(1:i) = MAG_E(1,1,:);
figure;
subplot(2,1,1)
plot(W/2/pi,MAG_a,W/2/pi,MAG_b,W/2/pi,MAG_c,W/2/pi,MAG_d,W/2/pi,MAG_e);
title('Spettro dei filtri utilizzati');
subplot(2,1,2)
t=MAG_a+MAG_b+MAG_c+MAG_d+MAG_e;
plot(W/2/pi,t);
title('Spettro del eq (teorico) che esce con guadagni unitari');
grid on
%ora proviamo a disegnare quello che esce vero cioè con le correzioni
%numeriche apportate per avere volume
figure;
NUM_E_bis=NUM_E*10000;
DEN_E_bis=DEN_E*10000;
SYS_E_bis=tf(NUM_E_bis,DEN_E_bis,1/f);

```

```
%bode(SYS_E,SYS_E_bis); -> i bode ovviamente coincidono
%dobbiamo disegnare le risp in frequenza con i dati!!

load DATI.LVM
U =DATI(:,2);      % Segnale da Analizzare
T =DATI(:,1);
%filtro prima con il filtro teorico e poi con quello implementato
Y = filter(NUM_E,DEN_E,U); %filtro
Y_bis = filter(NUM_E_bis,DEN_E_bis,U);
N=length(U);
N2=N/2;
%----- Calcolo dello spettro tramite FFT.
f=20000;    %Frequenza segnale, in questo caso 20KHz
f_Nyq=f/2;  %Frequenza di Nyquist
U = U - mean(U);
Y = Y - mean(Y);
Y_bis = Y_bis - mean(Y_bis);
%FFT originale e filtrato
fft_base_U = fftshift((fft(U).*conj(fft(U))/N));
fft_base_Y = fftshift((fft(Y).*conj(fft(Y))/N));
fft_base_Y_bis = fftshift((fft(Y_bis).*conj(fft(Y_bis))/N));
%Normalizzo, devo usare una serie di condizioni
max_val_U =max(abs(fft_base_U));
max_val_Y =max(abs(fft_base_Y));
max_val_Y_bis =max(abs(fft_base_Y_bis));
if(max_val_U >= max_val_Y)
    fft_normalizzata_U=fft_base_U/max_val_U;
    fft_normalizzata_Y=fft_base_Y/max_val_U;
    fft_normalizzata_Y_bis=fft_base_Y_bis/max_val_U;
```

```

else
    fft_normalizzata_U=fft_base_U/max_val_Y;
    fft_normalizzata_Y=fft_base_Y/max_val_Y;
    fft_normalizzata_Y_bis=fft_base_Y_bis/max_val_Y;
end
%ora traslo i due segnali
fft_traslata_U =(1:N/2)';
fft_traslata_Y =(1:N/2)';
fft_traslata_Y_bis =(1:N/2)';
j=1;
for i=N2:N-1
    fft_traslata_U(j)=fft_normalizzata_U(i);
    fft_traslata_Y(j)=fft_normalizzata_Y(i);
    fft_traslata_Y_bis(j)=fft_normalizzata_Y_bis(i);
    j=j+1;
end
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyq , fft_traslata_U, 'b');
hold on
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyq , fft_traslata_Y, 'y');
hold on
plot([0:N2-1]/N2*f_Nyq , fft_traslata_Y_bis, 'r');
axis([0 f_Nyq 0 1])
legend('U','Y teorico','Y reale');
title('prove filtri teorici/implementati');

```

Appendice B

Documentazione della programmazione

B.1 Sorgenti visuali ottenuti con LabView

In questa sezione vengono presentate le schermate del programma LabView utilizzato per la programmazione della centralina prototipale cRIO 9101.

Alcune immagini sono state suddivise in più pagine a causa delle loro dimensioni.

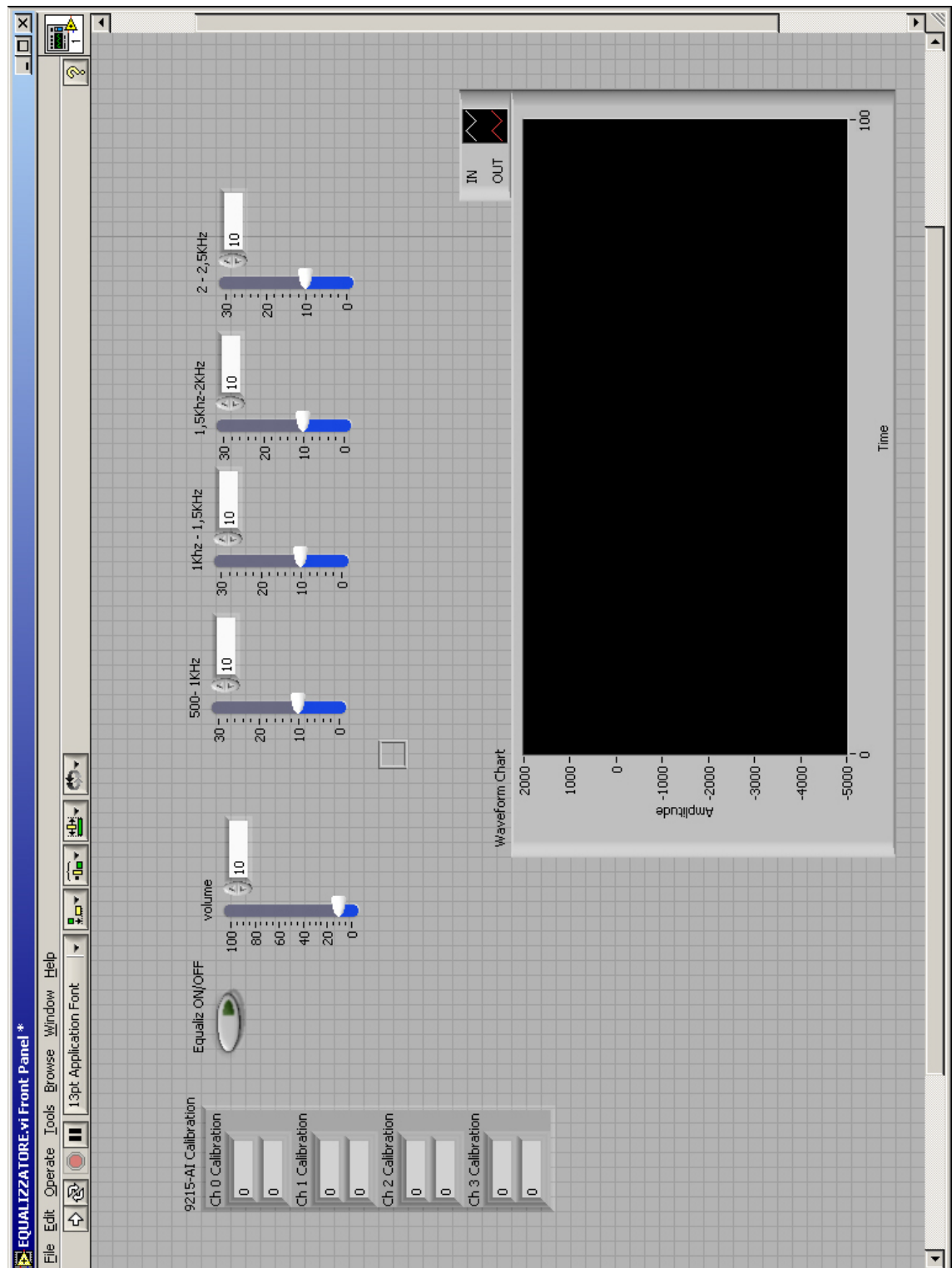
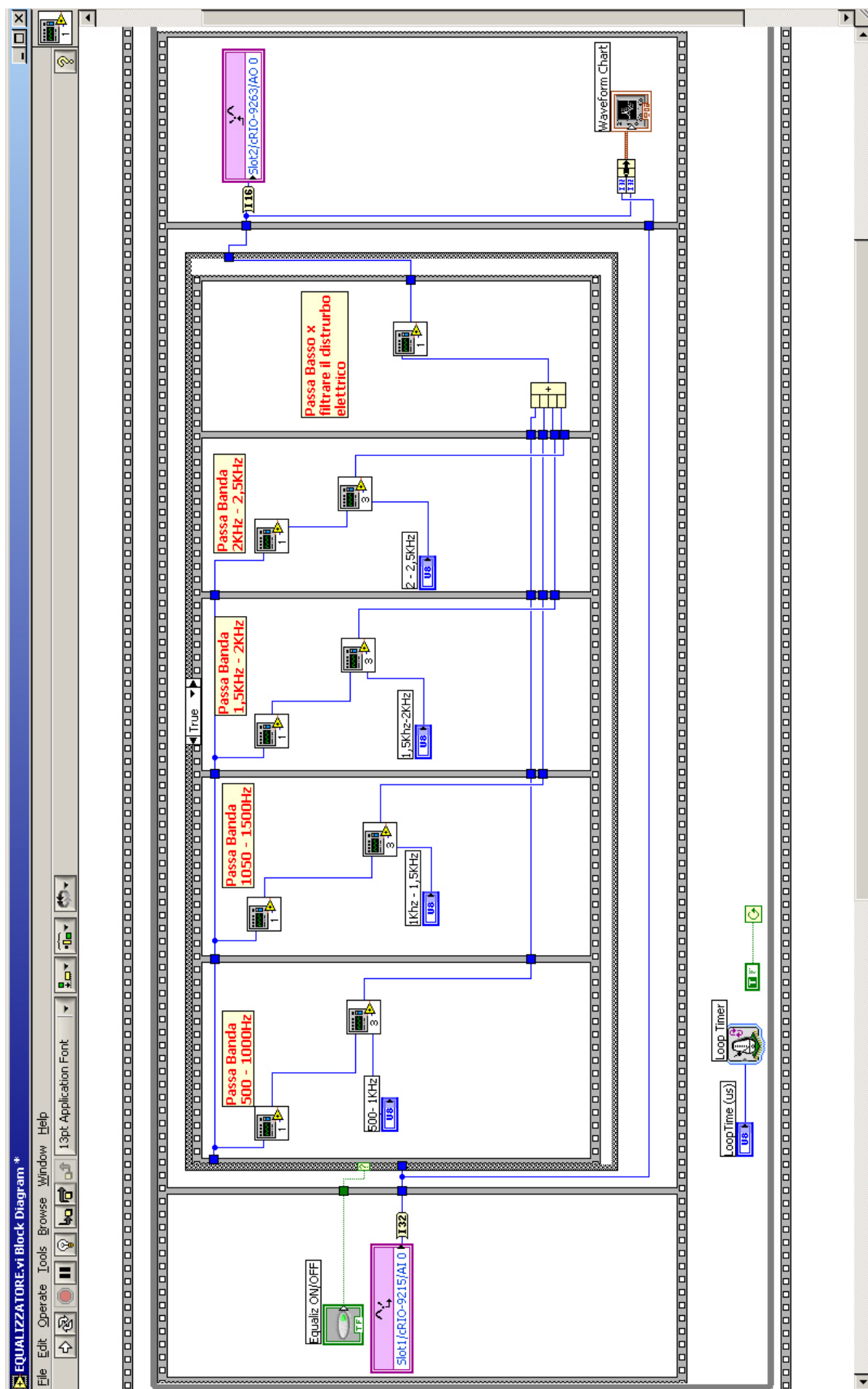
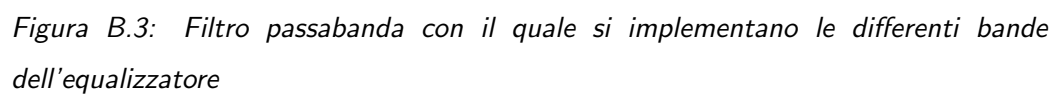
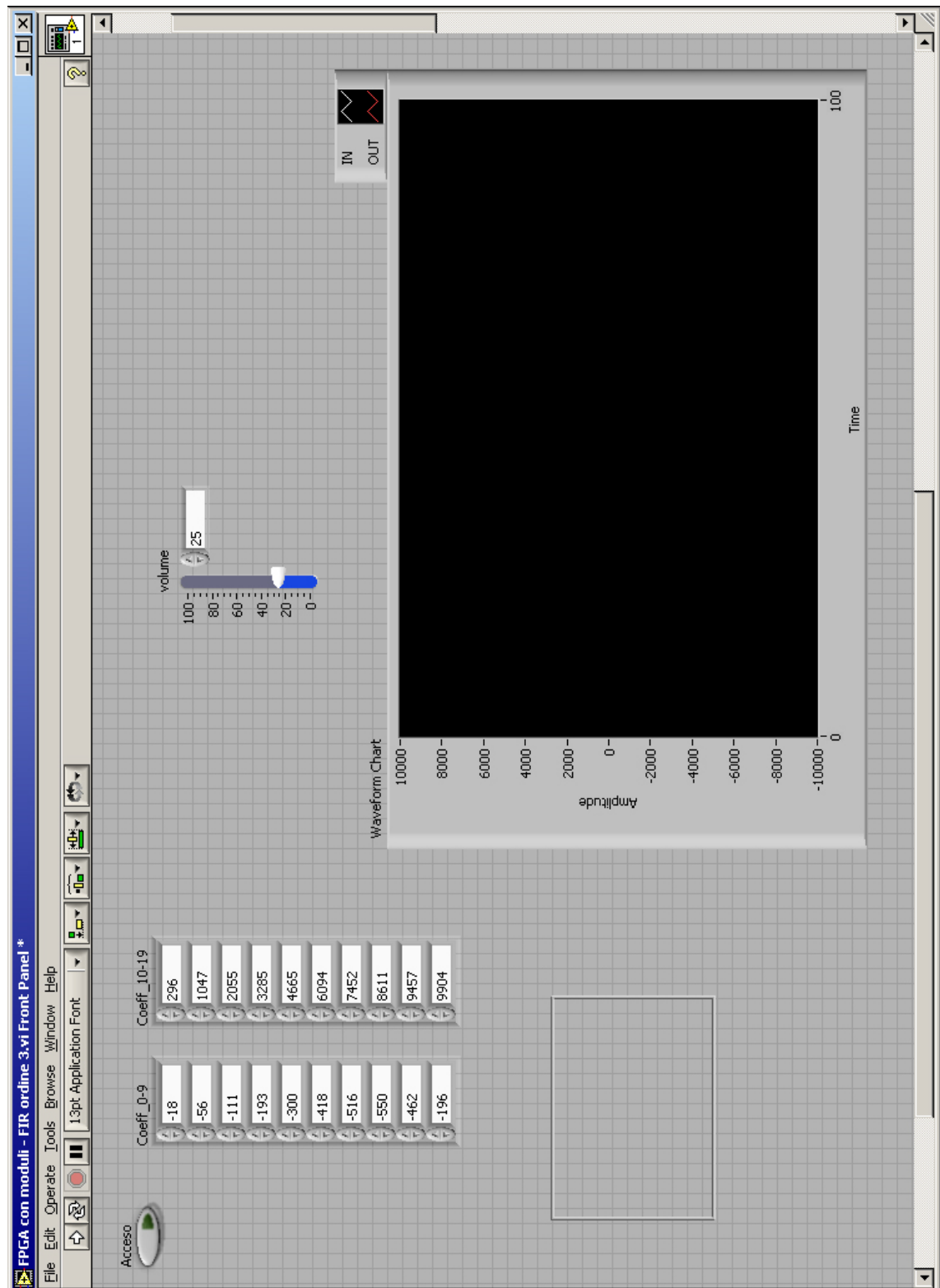


Figura B.1: Interfaccia dell'equalizzatore







*Figura B.5: Interfaccia di controllo del Filtro*

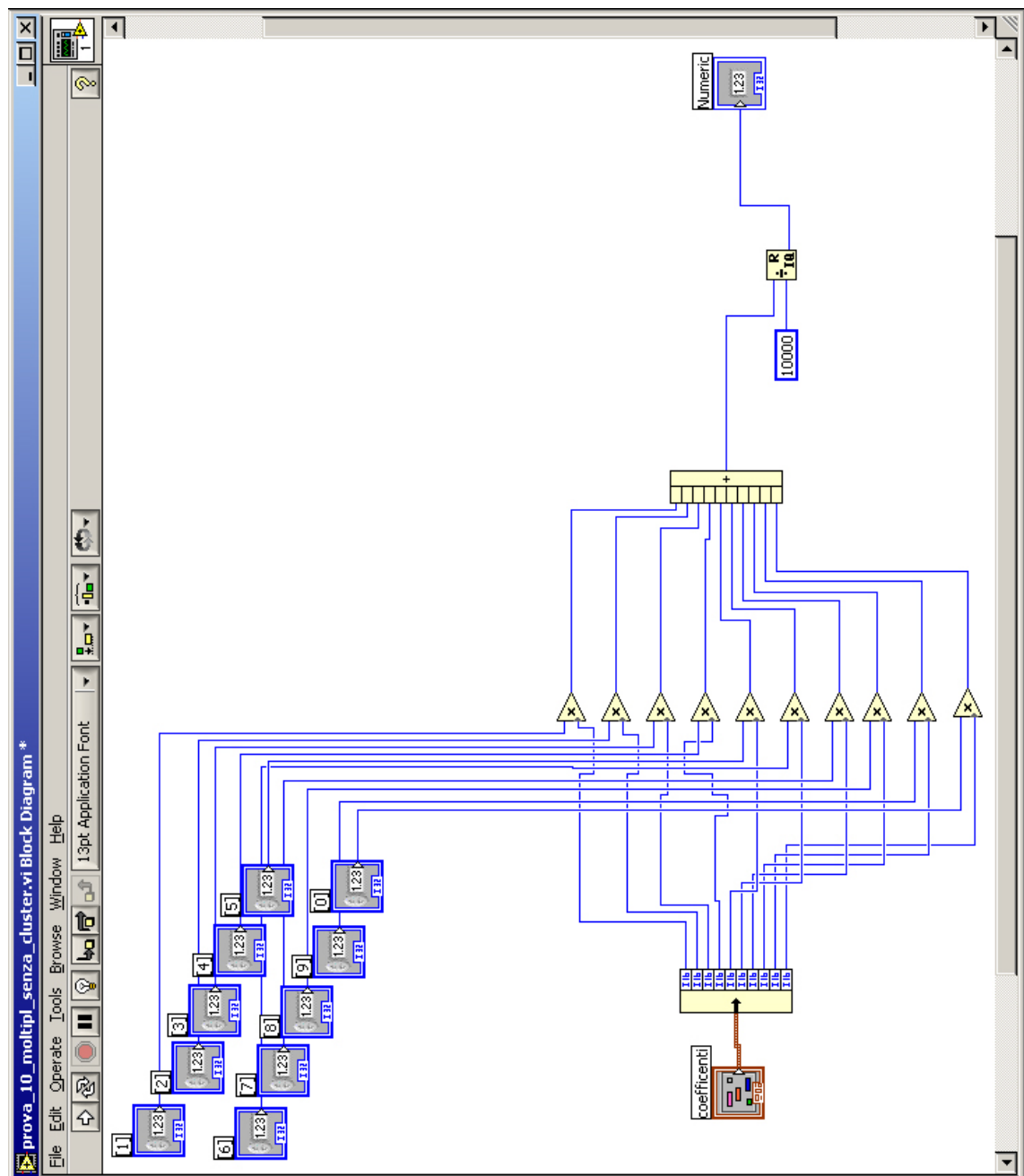


Figura B.6: Gruppo moltiplicativo del FIR40

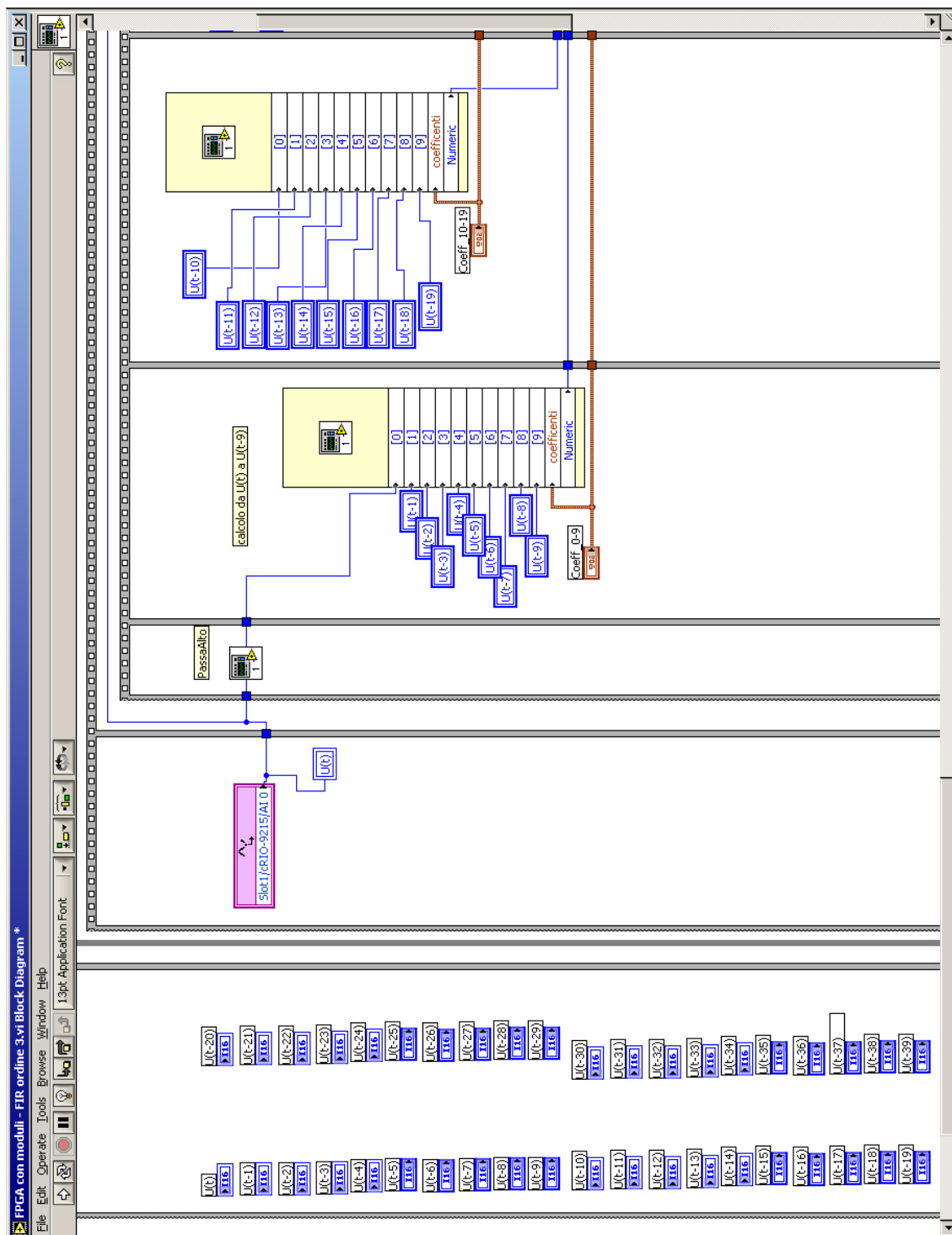


Figura B.7: Struttura del filtro FIR40, parte 1

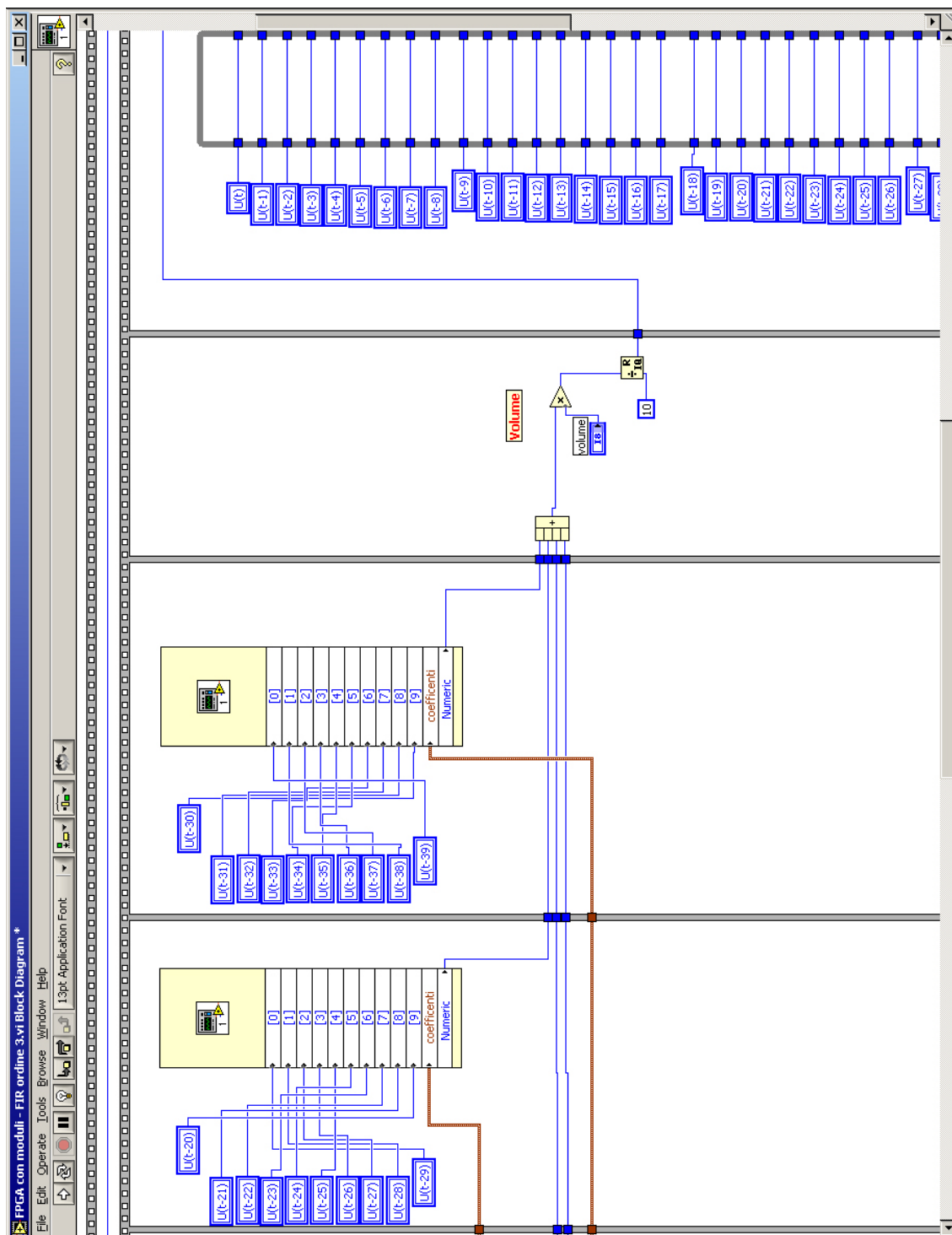


Figura B.8: Struttura del filtro FIR40, parte 2