BELLINZONA SAM

Anno scolastico 2017-18
Lavoro Professionale Individuale

Nome Cognome:	**Naoki Pross**
Professione:	**Elettronico**
Titolo del progetto:	**Spectrum Analyzer**

Azienda:	**CPT Bellinzona** Centro Professionale Tecnico Viale S. Franscini 25 6500 Bellinzona		
Formazione approfondita:	**S.2 Sviluppare prototipi**		
Formatore:	**Rinaldo Geiler, Daniele Kamm**		
Data d'inizio:	**12.04.2018**	Ore a disposizione:	**83 UD**
Data file lavoro:	**15.05.2018**	Ore effettive:	**– UD**

Indice

1 Introduzione

1.1 Contesto

Per portare a termine il percorso formativo per un attestato di capacità federale presso la Scuola Arti e Mestieri di Bellinzona è richiesto lo sviluppo individuale di un progetto di produzione di un prodotto. Per interesse personale nella matematica della trasformata di Fourier mi è stato assegnato di sviluppare un analizzatore spettrale.

1.2 Requisiti

È richiesto di sviluppare circuito per analizzare lo spettro dei segnali di frequenza fino a 10 kHz. Il dispositivo dovrà avere 3 possibili sorgenti: RCA/Cinch e 2 Audio Jack per un microfono e per una sorgente di audio generica. È inoltre richiesto che il calcolo dei dati dello spettrogramma sia eseguito da un microcontroller della Microchip, collegato a due altri dispositivi quali, un display e ad un computer in RS232, per poter visualizzare lo spettrogramma computato.

1.3 Concetti matematici

Il circuito realizzato si appoggia sul concetto matematico di importanza fondamentale, nelle discipline come la fisica e l'elettrotecnica, della *Trasformata di Fourier*. Questa operazione matematica è fondata su su un principio dimostrato da Joseph Fourier che asserisce che è possibile rappresentare una qualsiasi funzione periodica, in alcuni casi anche non periodica, con una serie di sinusoidi di frequenze multiple ad una di base. L'operazione di *Trasformata* dunque è uno strumento per osservare le frequenze di queste armoniche, esso trasforma una funzione in funzione del tempo $f(t)$ in una funzione rispetto alla frequenza o alla pulsazione $\hat{f}(\omega)$, che restituisce ad ogni ω l'ampiezza e la fase dell'armonica.

Secondariamente, il progetto usufruisce anche di un altro strumento chiamato *Fast Fourier Transform* (FFT) scoperto inizialmente nel 1965 dai matematici J. Cooley e J. Tukey. La FFT è un algoritmo con molte implementazioni che riduce la complessità computazionale della trasformata di fourier discreta da $\mathcal{O}(n^2)$ a $\mathcal{O}(n \log n)$. Questo è necessario perchè le operazioni matematiche da eseguire sono dei prodotti tra numeri complessi, i quali impiegano molto tempo per essere computati.

Tutti i concetti descritti saranno approfonditi nei capitoli seguenti.

1.4 Norme di progetto

Tabella 1.1: Norme di progetto: Software

Componente	**Software**
Version control	Git
Documentazione	LaTeX
Diario di lavoro	LaTeX
Pianificazione	MS Excel 2016
LaTeX engine	XeLaTeX
ECAD	Altium Designer 2017
Embedded toolchain	Microchip XC, MPLabX
Desktop Toolchain	QtCreator, g++, MinGW

Per i valori non specificati sono utilizzati i predefiniti del software ECAD.

Tabella 1.2: Norme di progetto: Hardware

Regola	**Valore**	**Unità**
Number of Layers	2	–
Silkscreen / Overlay	No	–
Minimum trace width	30	mil
Maximum trace width	60	mil
Minimum trace clearance	20	mil
Minimum power rail width	50	mil

Tabella 1.3: Norme di progetto: Programmazione

Regole per programmazione embedded	
Paradigma	Imperativo sequenziale
Convenzione per i nomi	`snake_case`, sempre minuscolo
Tabulatore	4 spazi
Tabulato con gli spazi	Sì
Regole per programmazione desktop	
Paradigma	Imperativo ad oggetti (OOP)
Convenzione per i nomi	Convenzioni di Qt
Tabulatore	4 spazi
Tabulato con gli spazi	Sì

2 Hardware

2.1 Schema a blocchi

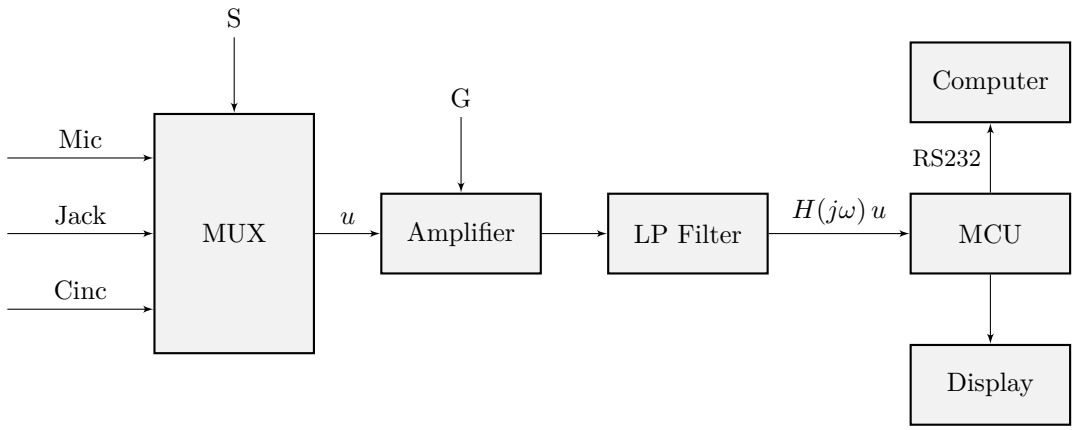


Figura 2.1: Schema a blocchi

2.2 Selezione delle entrate

Essendo richiesta dai requisiti la possibilità di selezione tra 3 entrate, è stato utilizzando un semplice multiplexer controllato direttamente dal microcontroller. Per la sua semplicità non sono necessari particolari osservarzioni.

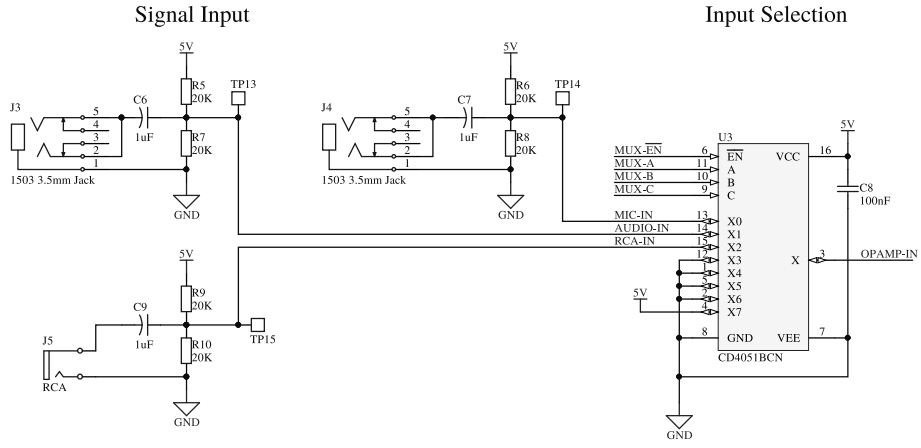


Figura 2.2: Circuito di selezione delle entrate

Tutte le entrate dispongono di un condensatore di disaccoppiamento seguito da un partitore di tensione simmetrico per aggiungere un offset pari a metà dell'alimentazione. Il valore delle resistenze di 20 kΩ è scelto per avere un impedenza rispetto al connettore uguale all'impedenza caratteristica dei cavi audio di 10 kΩ.

2.3 Circuito di entrata

Il segnale di cui si analizza lo spettro, prima di essere campionato, viene adattato mediate un circuito di amplificazione e filtraggio. Esso è necessario per due ragioni. Il circuito di amplificazione è presente per poter regolare il circuito nel caso in cui si dovesse avere in entrata un segnale di ampiezza molto piccola. Il secondo circuito invece, di filtraggio, è necessario per rimuovere disturbi di alta frequenza che potrebbero introdurre disturbi nel campionamento. Questa è una tipica configurazione prima di un circuito di conversione AD (analogico - digitale), ed è conosciuto anche come circuito di filtraggio *anti-alias*.

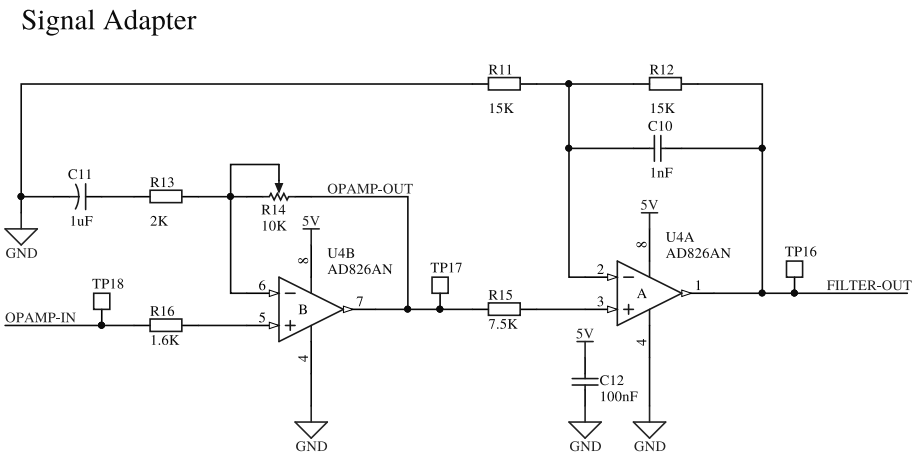


Figura 2.3: Circuito di adattamento del segnale in entrata.

È importante notare che per questa applicazione si è scelto utilizzare degli opamp *rail to rail*[1], che hanno una tensione di saturazione vicina a quella di alimentazione. Essi sono necessari per poter raggiungere tensioni vicino allo 0 V, che non sarebbero possibili con un opamp normale siccome l'alimentazione del circuito è asimmetrica tra 0 e 12 V.

Amplificatore. Come si può notare a sinistra nella figura 2.3, il circuito di amplificazione non ha una configurazione tipica. Esso è basato su una configurazione non invertente ma dispone di un consensatore (C11) che modifica la retroazione in modo da reagire unicamente alla componente AC del segnale. Questo permette di amplificare la componente alternata ignorando l'offset del segnale, perciò di *non* utilizzare un'alimentazione simmetrica ± 5 V.

L'amplificazione di questo amplificatore è comunque data dal rapporto $1 + R_{14}/R_{13}$ che permette un un guadagno fino a 6 oppure 15,5 dB.

Filtro. A destra della figura 2.3 vi è il circuito di filtraggio, realizzato utilizzando un tipico filtro passa basso attivo di primo ordine. Esso è dimensionato con una frequenza di taglio di 10 kHz poichè quest'ultimo è il limite di Nyquist, conosciuto anche dal teorema di Shannon, il quale stata che la frequenza di campionamento deve essere almeno doppia della frequenza dell'armonica di frequenza maggiore.

Anche il filtro essendo non invertente ha un rapporto di amplificazione dato da $1 + R_{12}/R_{11}$. Nella figura il valore della resistenza R_{11} è **incorretto** (Vedi sezione 4.1.2). Dopo la correzzione ($R_{11} \geq 750\,\mathrm{k\Omega}$) il filtro ha un amplificazione approssimativamente unitaria (≈ 1.02).

[1] Vedi sezione 4.1.1

2.4 Microcontroller

Per questa applicazione è stato deciso di utilizzare il microcontroller a 8 bit di Microchip PIC18F45K22, principalmente per la sua frequenza di lavoro. Questo PIC senza oscillatori esterni dispone di un clock a 16 MHz che grazie ad un PLL interno può essere aumentata fino a ad un massimo di 64 MHz.

Inoltre questo microcontroller dispone di un moltiplicatore hardware 8x8 che impiega un solo ciclo, risparmiando la difficoltà di dover ottimizzare le computazioni della Fast Fourier Tranform.

Un ultima ragione importante per la scelta di questo componente è data dalla disponibilità di una libreria per controllare il la matrice LED, utilizzata per la visualizzazione, adattata da Arduino da P. Randjelovic in un LPI precedente.

In allegato è presente una pagina riassuntiva dal datasheet.

2.5 Visualizzazione

3 Software

3.1 Campionamento

Per campionare il segnale è stato scelto di utilizzare il TIMER2, sia per la sua semplicità che per la granulatià offerta dal registro di comparazione. Il campionamento è eseguito ad una frequenza di 20 kHz, poco sotto al valore massimo possibile che si può ottenere considerando il tempo di conversione dell'ADC.

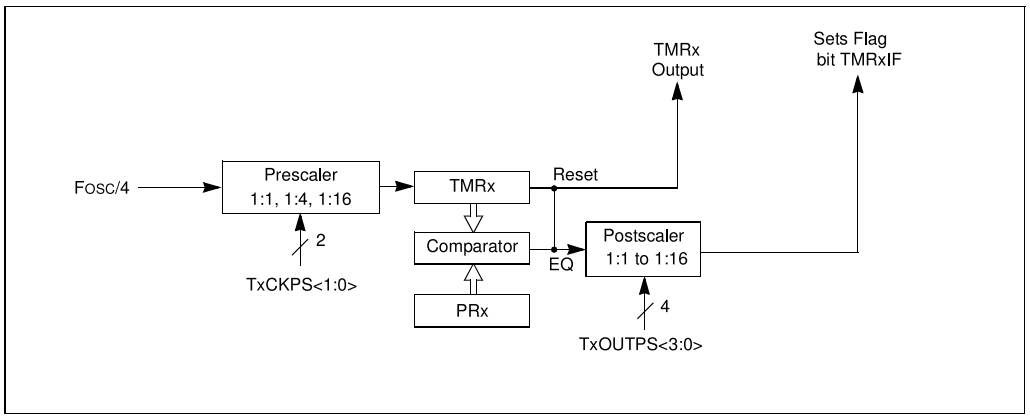


Figura 3.1: Schema a blocchi del TIMER2. Fonte: Microchip PIC18F2X/4XK22 datasheet

Dallo schema a blocchi nella figura 3.1, si può osservare che la frequenza degli interrupt, ossia di campionamento, è data dalla seguente relazione.

$$f = \frac{F_{osc}}{4} \cdot \frac{1}{\text{prescaler}} \cdot \frac{1}{\text{comparator}} \cdot \frac{1}{\text{postscaler}}$$

Per il questo progetto il PIC18F45K22 è configurato con un postscaler 1:1 ed un prescaler 1:16, per far corrispondere un unità del comparatore ad 1 microsecondo. Perciò il comparatore è impostato a 50, poichè $1/50\,\mu\text{s} = 20\,\text{kHz}$.

$$f = \frac{64\,\text{MHz}}{4} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\text{comparator}} \cdot \frac{1}{16} = \frac{1\,\text{MHz}}{\text{comparator}}$$

3.2 Trasferimento dei dati

Per trasferire i dati campionati era inizialmente stato scelto di utilizzare una struttura dati binaria. In seguito però si è deciso di utilizzare un formato interamente ASCII per semplificare il debugging.

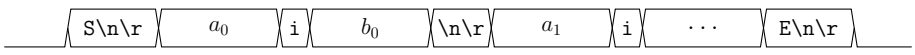


Figura 3.2: Protocollo di trasmissione dei dati, il primo dato mandato è $a_0 + ib_0$

I dati sono trasferiti con un semplice protocollo illustrato nella figura 3.2. Un frame di dati incomincia con il carattere ASCII maiuscolo 'S' seguito da un line break (`\n\r`). Ogni riga seguente è un numero complesso a 4 cifre con il carattere 'i' come separatore tra la parte immaginaria e complessa (Es: `0140i0670`). Il frame termina con il carattere ASCII maiuscolo 'E'.

3.3 Interfaccia al Computer

Per preferenze principalmente personali è stato scelto di realizzare l'interfaccia al computer utilizzando il moderno linguaggio di programmazione C++ (versione ≥ 11) utilizzando un framework (Qt) che sarà descritto successivamente. I vantaggi dati dall'utilizzo del C++ anzichè linguaggi interpretati come il Python, linguaggi compilati in bytecode come Java, o con runtime particolari come LabView / CVI sono molteplici. Innanzitutto tutti gli strumenti necessari per lo sviluppo hanno mezzi o varianti *open source / libre*, di conseguenza gratuiti e in molti casi multipiattaforma. Al contrario invece dei sistemi proprietari come quelli offerti da National Instruments che sono estremamente costosi e possono essere utilizzati unicamente sulle piattaforme con un supporto ufficiale. Tra i vari linguaggi di programmazione non proprietari il C++ è comunque in posizione di vantaggio siccome è tra i più performanti in quanto non richiede alcun interpreter (bytecode o non) o nessuna runtime, stando quindi alla pari con il linguaggio C guadagnando però i vantaggi dell'astrazione data dalla programmazione ad oggetti.

3.3.1 Librerie e codice di terzi

Per ridurre i tempi dedicati alla realizzazione del programma, seppur mantenendo una buona qualità, è stato scelto di utilizzare le seguenti librerie.

- Serial (http://wjwwood.io/serial/): Utilizzata come interfaccia multipiattaforma per l'accesso di basso livello alla porta seriale del sistema operativo sottostatante. Descrizione dal sito:

  > This is a cross-platform library for interfacing with rs-232 serial like ports written in C++. It provides a modern C++ interface with a workflow designed to look and feel like PySerial, but with the speed and control provided by C++.

- QCustomPlot (http://qcustomplot.com): Utilizzata per produrre il grafico all'interno del software, per visualizzare i dati dal microcontroller. Descrizione dal sito:

  > QCustomPlot is a Qt C++ widget for plotting and data visualization. It has no further dependencies and is well documented. This plotting library focuses on making good looking, publication quality 2D plots, graphs and charts, as well as offering high performance for realtime visualization applications.

3.3.2 Qt Framework

La dipendenza principale utilizzata per realizzare la grafica è il framework di Qt. Oggi Qt è un'azienda indipendente che vende un supporto commerciale per lo sviluppo di applicazioni su praticamente ogni piattaforma. Qt è un framework maturo che esiste oramai da 22 anni ed è disponibile sia con una licenza commerciale che con le licenze open source LGPL e GPL.

La toolchain di Qt aggiunge al normale sviluppo un preprocessore speciale chiamato MOC che genera in automatico il codice dalle strutture grafiche realizzate con QtDesigner. Il resto della toolchain è composta da componenti tipici che possono essere intercambiati liberamente poichè Qt supporta gcc/g++, clang, MSVC e MinGW. Per compilare il codice è dunque necessario un compiler qualsiasi di C++ e l'IDE QtCreator, oppure qmake. Pochè questi pacchetti offrono il preprocessore MOC. Per progetti open source entrambi sono offerti gratuitamente dal sito ufficiale www.qt.io.

3.3.3 Compilazione sotto Linux

Il programma è stato realizzato in parte sotto Debian 9.4 Stretch ed in parte sotto Fedora 27. Per entrambi i sistemi sono necessarie le dipendenze per lo sviluppo in Qt5.

Una volta installate le dipendenze dalla cartella di progetto è possibile utilizzare il makefile per compilare le dipendenze e il codice.

```
$ make build-deps   # dependencies
$ make              # spectrum analyzer code
```

Purtroppo la liberia QCustomPlot utilizza un sistema di build molto particolare che richiede molte dipendenze. Perciò in alcuni casi è preferibile scaricare dal seguente link l'ultima versione dei due files `qcustomplot.cpp` e `qcustomplot.hpp` ed immetterli manualmente nella cartella `lib/qcustomplot/`.

http://qcustomplot.com/index.php/download

Ed infine si compila con

```
$ make serial       # build only Serial library dep
$ make              # build spectrum analyzer code
```

3.3.4 Compilazione manuale sotto Linux

Per compilare manualmente il progetto sono necessari pochi steps grazie a qmake. Come per il caso precedente la libreria QCustomPlot può essere scaricata dal sito.

1. Scaricare le dipendenze.

   ```
   $ git submodule init
   $ git submodule update
   ```

2. Compilare la libreria Serial

   ```
   $ mkdir -p lib/build-serial
   $ qmake -makefile -o Makefile -Wall "CONFIG+=releae" \
       -o lib/build-serial/ lib/serial

   $ make -C lib/build-serial/
   ```

3. Compilare la libreria QCustomPlot

   ```
   $ cd lib/qcustomplot/src
   $ sed -i -e 's/qmake474/qmake/' release.py
   $ ./release.py
   $ cd ../.. # go back to project root dir
   ```

4. Compilare il progetto

   ```
   $ mkdir -p build-deskop
   $ qmake -makefile -o Makefile -Wall "CONFIG+=release" \
       -o build-desktop/ src-desktop

   $ make -C build-desktop
   ```

3.3.5 Compilazione sotto Windows

Per compilare il progetto in Windows è necessario installare QtCreator dal sito ufficiale `www.qt.io`.

1. Installare QtCreator, Qt $\geq$ 5.0 (consigliato 5.10.0)
2. Installare MinGW oppure MSVC + Visual Studio (consigliato MinGW)
3. Inizializzare ed aggiornare i submoduli di Git oppure clonare recursivamente il progetto.
4. Scaricare dal sito `http://qcustomplot.com/index.php/download` i documenti `qcustomplot.cpp` `qcustomplot.hpp` della libreria QCustomPlots ed immetterli nella cartella `lib/qcustomplots/`
5. Aprire il progetto `lib/serial/serial.pro` ed impostare la build directory sia per release che per debug in `lib/build-serial`.
6. Compilare la libreria Serial come release.
7. Aprire il progetto `src-desktop/SpectrumAnalyzer.pro` ed impostare la cartella di build sia per release che debug nella cartella `build-desktop/`
8. Compilare il progetto SpectrumAnalyzer come release
9. Controllare che lo script `deploy-desktop.cmd` abbia le variabili `QT_PATH` e `QT_VERSION` che corrispondano con la vostra l'installazione.
10. Eseguire lo script `deploy-desktop.cmd`.

Nella cartella `build-desktop` sarà pronto l'eseguibile con tutte le librerie dinamiche (DLL) necessarie.

3.3.6 Architettura

Il programma desktop è programmato per agire ad eventi asincroni dati dalla porta seriale del sistema operativo e dalle interazioni dell'utente. La gestione degli eventi grafici è gestita interamente da Qt, perciò sono stati scritti solamente i metodi che vengono attivati in funzione degli eventi dall'utente.

Per la porta seriale invece il compito della gestione è stato delegato ad una classe `SerialWorker` che ha un rapporto di *composizione* con la classe `MainWindow` in quanto essa esiste unicamente quando esiste `MainWindow`. Nella figura 3.3 è mostrato un diagramma delle sequenze che mostra il flusso dei dati attraverso le componenti del programma.

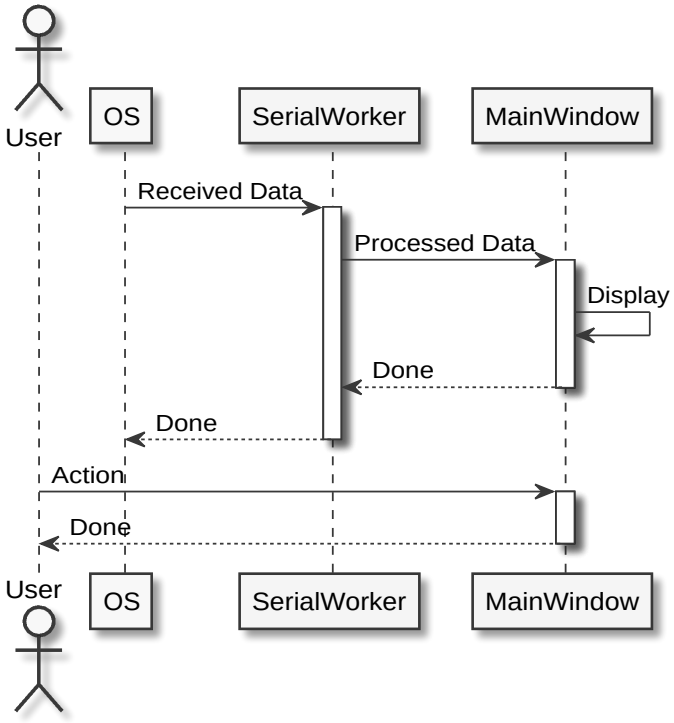


Figura 3.3: Diagramma delle sequenze

Per l'implementazione nella figura 3.4 è possibile osservare il diagramma UML delle classi. È importante notare che Qt introduce dei nuovi tipi di membri chiamati *slots* e *signals*. Gli slots sono dei normali metodi che rispondo ai signals. I signals invece sono delle funzioni prive di implementazione che possono essere *emesse*.

Quando viene realizzato un modello ad oggetti in Qt è possibile collegare degli slots a dei segnali per poter gestire delle azioni asincrone. Nel progetto dello SpectrumAnalyzer il segnale `receivedData` della classe `SerialWorker` viene messo quando sono stati ricevuti dei dati validi dalla seriale. Il segnale ha come argomento un vettore di numeri complessi interi.

Nella classe `MainWindow` il segnale di `receivedData` è associato allo slot `serialDataReceiver` con argomento uguale al segnale, dunque un vettore di numeri complessi interi, che processa i dati e li mostra nell'interfaccia utente.

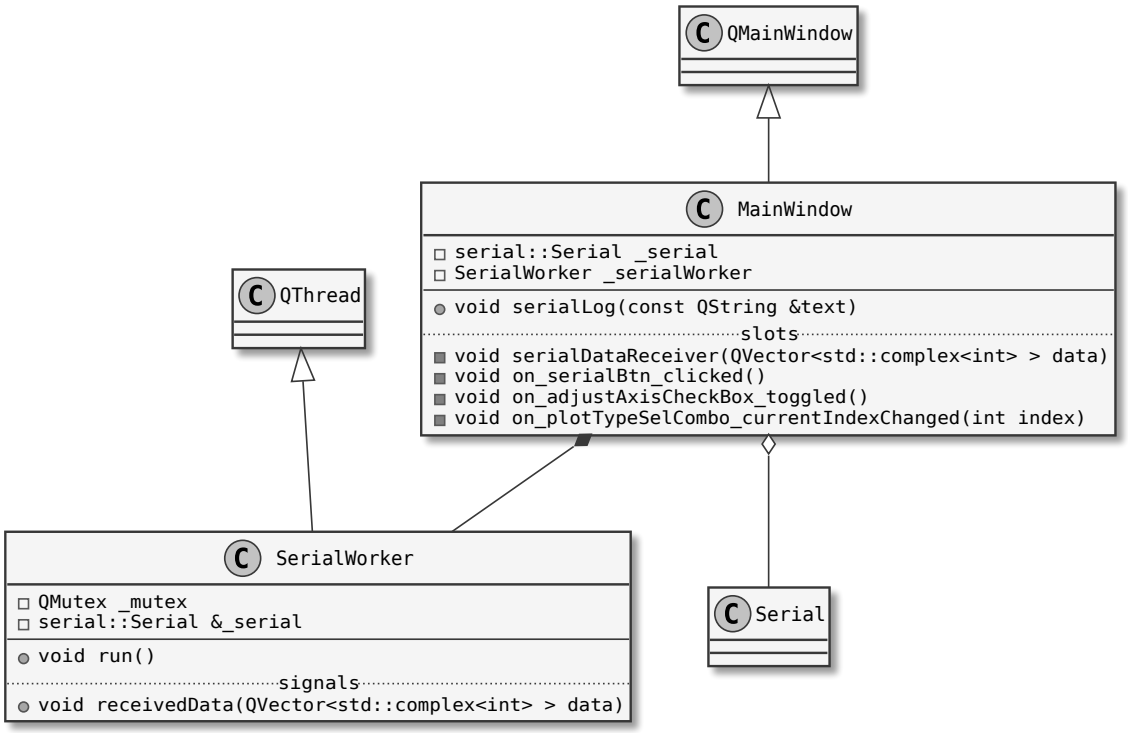


Figura 3.4: Diagramma delle classi

3.3.7 Interfaccia utente

L'interfaccia utente, realizzata con Qt è molto semplice e non dovrebbe richiedere spiegazioni.

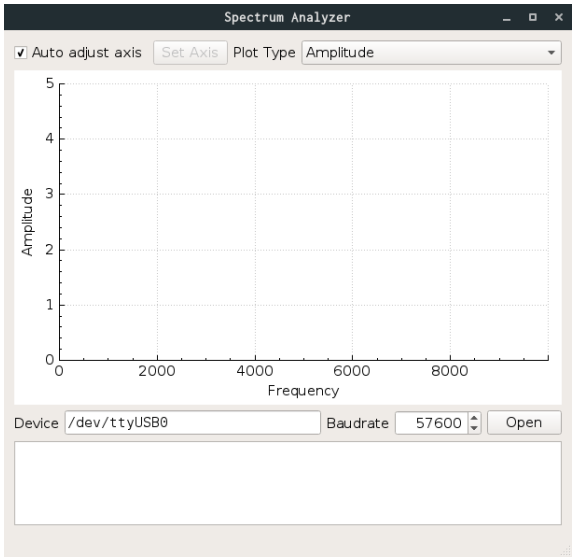


Figura 3.5: L'applicativo sotto Debian 9.4 Stretch

3.4 Interfaccia al Display

3.5 Fast Fourier Transform

Il codice della FFT è stato preso dal dominio pubblico. Originalmente scritto da Tom Roberts (8.11.1989), successivamente adattato da Malcom Stanley (15.12.1994), Dimitrios P. Buras (14.6.2006) ed infine da Simon Inns (4.1.2011) [1] non ha praticamente necessitato modifiche. L'algoritmo implementato è chiamato "Fixed-Point in-place Fast Fourier"

4 Conclusioni

4.1 Risultati

4.2 Problemi riscontrati

4.2.1 Errore nella scelta dell'opamp

Durante la fase di test, dopo l'assemblaggio, si è notato che l'amplificatore operazionale AD826 non è un opamp rail to rail come l'AD820, utilizzato durante la fase di sviluppo su piastra sperimentale. Ciò limita l'escursione del segnale amplificato di quasi 1 V, riducendo la precisione del campionamento.

Fortunatamente il pinout DIP8 degli operazionali dual package è standard, perciò non vi sono eccessive difficoltà nella sostituzione del componente. Purtroppo però non sarà possibile acquistare in tempo un opamp sostitutivo.

4.2.2 Errore nel dimensionamento del filtro attivo

Durante la fase di test è stato inoltre rilevato che il filtro attivo (vedi figura 2.3) di anti-alias aveva un amplificazione non unitaria, dunque incorretta. La tensione di offset di 2.5 V veniva amplificata ed in molti punti l'operazionale entrava in saturazione. Ciò era causato dal valore incorretto di R_{11} poichè l'amplificazione, data dalla relazione sottostante, era di 2.

$$A_v = 1 + R_{12}/R_{11} = 1 + 15\,\text{k}\Omega/15\,\text{k}\Omega = 2$$

Il valore corretto per il resistore R_{11} è $\geq 750\,\text{k}\Omega$, in modo da ottenere un amplificazione quasi unitaria, con un errore di $+0.02$, che corrisponde ad un incremento di 50 mV della tensione di offset di 2.5 V. Valori di ordini di grandezza maggiori sono preferibili, infatti dopo aver rilevato il guasto a R_{11} è stato assegnato un valore di $910\,\text{k}\Omega$.

$$A_v = 1 + R_{12}/R_{11} = 1 + 15\,\text{k}\Omega/910\,\text{k}\Omega \approx 1.016$$

4.2.3 Sincronizzazione dei threads

Durante lo sviluppo del software desktop è stato riscontrato un unico problema riguardante la sincronizzazione dei threads. La risorsa `serial::Serial MainWindow::_serial` come implica il nome è instanziata nella classe `MainWindow`, ma essa è gestita anche dalla classe `SerialWorker` siccome è suo compito leggere i dati.

Perciò la risorsa deve essere protetta da un `QMutex` e la sua *lifetime* (ciclo di vita) deve essere gestita tenendo in considerazione il thread parallelo. Il bug era causato da una chiusura della risorsa seriale mentre il thread era ancora attivo. Chiudendo la risorsa mentre il thread del `SerialWorker` è attivo, al prossimo tentativo di lettura il metodo `serial::Serial::read()` causa una `serial::IOException` che fa crashare il programma.

La ragione per cui il thread non veniva fermato, era da da utilizzo incorretto dell'API dei `QThread`. Per chiudere correttamente un thread secondo il framework di Qt si richiede un interruzione con `QThread::requestInterruption()`. Invece nel codice veniva utilizzato `QThread::quit()`, che se non in condizioni particolari non chiude il processo parallelo.

Il diff sottostante mostra il commit in cui il problema viene risolto.

```
diff --git a/src-desktop/mainwindow.cpp b/src-desktop/mainwindow.cpp
index 73c416e..15c7d77 100644
--- a/src-desktop/mainwindow.cpp
+++ b/src-desktop/mainwindow.cpp
@@ -42,8 +42,12 @@ void MainWindow::serialDataReceiver(const QString &data)
 void MainWindow::on_serialBtn_clicked()
 {
     if (_serial.isOpen()) {
-        _serialWorker.quit();
-        while (_serialWorker.isRunning());
+        // _serialWorker.quit();
+        // while (_serialWorker.isRunning());
+        if (_serialWorker.isRunning()) {
+            _serialWorker.requestInterruption();
+            _serialWorker.wait();
+        }

         _serial.close();
         serialLog("Serial device closed");
diff --git a/src-desktop/serialworker.cpp b/src-desktop/serialworker.cpp
index 15301cb..f70bce8 100644
--- a/src-desktop/serialworker.cpp
+++ b/src-desktop/serialworker.cpp
@@ -1,6 +1,7 @@
 #include "serialworker.h"

 #include <QMutexLocker>
+#include <string>

 SerialWorker::SerialWorker(serial::Serial &serial) :
     _mutex(), _serial(serial)
@@ -15,12 +16,17 @@ SerialWorker::~SerialWorker()

 void SerialWorker::run()
 {
-    while (isRunning()) {
+    while (!isInterruptionRequested()) {
         QMutexLocker locker(&_mutex);
-        while (!_serial.available() && isRunning());
+        while (!_serial.available() && !isInterruptionRequested());

-        QString data = QString::fromStdString(_serial.readline());
-        emit receivedData(data);
+        for (std::string line : _serial.readlines()) {
+            QString data = QString::fromStdString(line);
+            emit receivedData(data);
+        }
+
+        // QString data = QString::fromStdString(_serial.readline());
+        // emit receivedData(data);
         _serial.flushOutput();
     }
 }
```

4.3 Commento

Personalmente ho trovato il progetto molto interessante e coinvolgente. Malgrado la complessità dell'argomento trattato, grazie al supporto di docenti ed amici, sono riuscito ad avere una comprensione tutto sommato abbastanza completa del funzionamento del principio matematico dell'analisi spettrale.

4.4 Ringraziamenti

Vorrei ringraziare Eduardo Cima: professore di elettrotecnica alla SAM e Raffaele Ancarola: studente di fisica del primo anno al Politecnico Federale di Losanna (EPFL), per il grande supporto attraverso spiegazioni e chiarimenti degli strumenti matematici della trasformata di Fourier; ed infine vorrei ringraziare anche il professor Emidio Planamente per l'aiuto a risolvere il bug di sincronizzazione (4.1.3).

4.5 Certificazione

Il sottoscritto dichiara di aver redatto e prodotto individualmente il lavoro di produzione.

Data: _____ Firma: _____
Naoki Pross

5 Trasformata di Fourier

5.1 Nozioni preliminarie

5.1.1 Regressione lineare con il metodo dei minimi quadrati

La regressione lineare è un'approssimazione di una serie di dati ad una funzione lineare. Questa retta di approssimazione può essere calcolata in molteplici modi, per questo progetto è di interesse utilizzare il *metodo dei minimi quadrati*. Sarà dunque esplicato come trovare i coefficienti di una retta a $m+1$ termini interpolando N punti.

$$r(x, a_0, \ldots, a_m) = a_0 + x \sum_{i=1}^{m} a_i \tag{5.1}$$

Consideriamo di avere gli insiemi X e Y entrambi con N termini di cui si prende le coppie ordinate di valori, ossia i punti da interopolare. Il metodo dei minimi quadrati trova i coefficienti della retta minimizzando il quadrato della differenza tra il valore stimato dalla retta $y = r(x_k)$ e il valore realey_k.

$$\min((r(x_k) - y_k)^2) \quad \forall x_k \in X,\, y_k \in Y$$

Definiamo quindi la funzione da minimizzare ε

$$\varepsilon(a_0, \ldots, a_m) = \sum_{k=1}^{N} \Big[r(x_k, a_0, \ldots, a_m) - y_k \Big]^2 \tag{5.2}$$

Da cui si computa le derivati parziali rispetto ai coefficienti ricercati, ottenendo un sistema di equazioni lineare poichè si cerca per ogni derivata quando essa equivale a 0. Ciò corrisponde anche ad affermare che il *gradiente* di ε è un vettore $\in \mathbb{R}^{m+1}$ con tutte le componenti a 0.

$$\nabla\varepsilon = (0, \ldots, 0)$$

A questo punto si può procedere risolvendo il sistema con l'algebra lineare definendo la matrice di trasformazione $\mathbf{A}$ e il vettore dei termini noti $\vec{u}$

$$\nabla\varepsilon = \mathbf{A}\langle a_0, \ldots, a_m\rangle + \vec{u} \iff \langle a_0, \ldots, a_m\rangle = \mathbf{A}^{-1}(-\vec{u})$$

5.1.2 Funzione armonica

Una funzione armonica, sinusoidale, può essere descritta in molteplici modi.

$$f(x) = a \cdot \sin(\omega x + \varphi)$$
$$f(x) = b \cdot \cos(\omega x + \vartheta)$$

Conoscendo la formula di Eulero

$$e^{i\varphi} = \cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)$$

possiamo riscrivere $f(x)$ utilizzando la forma complessa del seno e del coseno.

$$f(x) = \frac{a}{2i} \cdot (e^{i(x\omega+\varphi)} - e^{-i(x\omega+\varphi)})$$
$$f(x) = \frac{b}{2} \cdot (e^{i(x\omega+\vartheta)} + e^{-i(x\omega+\vartheta)})$$

5.1.3 Proprietà di ortogonalità del seno e del coseno

Per avere delle fondamenta solide prima dell'introduzione dell'argomento principale, saranno dimostrate le proprietà di ortogonalità del seno e coseno considerando il periodo T in uno spazio euclideo.

Intuizione geometrica

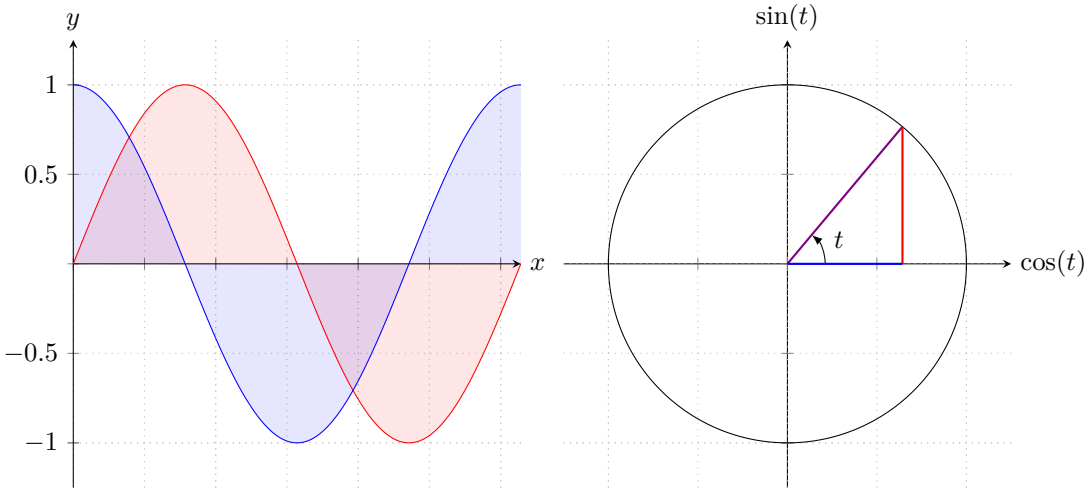


Figura 5.1: Funzioni $\sin$ e $\cos$

Si può osservare intuitivamente dal cerchio unitario nella figura 5.1 che le funzioni seno e coseno sono ortogonali tra loro. Dal grafico a sinistra possiamo inoltre osservare che l'area (integrale) di un periodo è sempre nulla.

Dimostrzioni algebriche

1. Area di $\sin$ in un periodo.

$$\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall m \in \mathbb{Z}$$

$$\begin{aligned}\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x &= \Big[-\frac{T}{2\pi m} \cdot \cos\big(\frac{2\pi}{T} mx\big)\Big]_0^T \\ &= -\frac{T}{2\pi m} \cdot \cos\big(2\pi m\big) + \frac{T}{2\pi m} \cdot \cos\big(0\big) \\ &= 0\end{aligned}$$

2. Area di $\cos$ in un periodo.

$$\int_0^T \cos(\frac{m2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall m \in \mathbb{Z}^*$$

$$\begin{aligned}\int_0^T \cos(\frac{m2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x &= \left[\frac{T}{2\pi m}\cdot\sin\left(\frac{2\pi}{T}mx\right)\right]_0^T \\ &= \frac{T}{2\pi m}\cdot\sin\big(2\pi m\big) + \frac{T}{2\pi m}\cdot\sin\big(0\big) \\ &= \begin{cases} 0 & \iff m \neq 0 \\ T & \iff m = 0 \end{cases}\end{aligned}$$

3. Prodotto tra $\sin$ e $\cos$.

$$\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\cos(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall m,n \in \mathbb{Z}$$

$$\begin{aligned}\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\cos(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x &= \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \sin\left[\frac{2\pi}{T}(n+m)x\right]\mathrm{d}x}_{0} - \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \sin\left[\frac{2\pi}{T}(n-m)x\right]\mathrm{d}x}_{0} \\ &= 0\end{aligned}$$

4. Prodotto tra due $\sin$ di frequenze diverse.

$$\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\sin(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall m,n \in \mathbb{Z} \mid m \neq \pm n$$

$$\begin{aligned}\int_0^T \sin(\frac{m2\pi x}{T})\sin(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x &= \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \cos\left[\frac{2\pi}{T}(n-m)x\right]\mathrm{d}x}_{m-n \neq 0 \implies 0} - \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \cos\left[\frac{2\pi}{T}(n+m)x\right]\mathrm{d}x}_{m+n \neq 0 \implies 0} \\ &= \begin{cases} 0 & \iff n \neq \pm m \\ T/2 & \iff n = m \\ -T/2 & \iff n = -m \end{cases}\end{aligned}$$

5. Prodotto tra due $\cos$ di frequenze diverse.

$$\int_0^T \cos(\frac{m2\pi x}{T})\cos(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall m,n \in \mathbb{Z}^* \mid m \neq \pm n$$

$$\begin{aligned}\int_0^T \cos(\frac{m2\pi x}{T})\cos(\frac{n2\pi x}{T})\,\mathrm{d}x &= \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \cos\left[\frac{2\pi}{T}(n+m)x\right]\mathrm{d}x}_{m+n \neq 0 \implies 0} + \underbrace{\frac{1}{2}\int_0^T \cos\left[\frac{2\pi}{T}(n-m)x\right]\mathrm{d}x}_{m-n \neq 0 \implies 0} \\ &= \begin{cases} 0 & \iff n \neq \pm m \\ T/2 & \iff n = \pm m \end{cases}\end{aligned}$$

6. $\sin$ e $\cos$ raggruppate nella forma complessa con la formula di Eulero.

$$\int_0^T e^{i2\pi kx/T}\,\mathrm{d}x = 0 \quad \forall k \in \mathbb{Z}^*$$

$$\int_0^T e^{i2\pi kx/T}\,\mathrm{d}x = \underbrace{\int_0^T \cos(\frac{2\pi}{T}kx)\,\mathrm{d}x}_{k\neq 0 \implies 0} + i\underbrace{\int_0^T \sin(\frac{2\pi}{T}kx)\,\mathrm{d}x}_{0}$$
$$= \begin{cases} 0 & \iff k \neq 0 \\ T & \iff k = 0 \end{cases}$$

5.2 Polinomio Trigonometrico

5.2.1 Polinomio Trigonometrico

Analogamente a come è definito un polinomio P "normale", una somma di termini dal grado 0 fino al grado N, è possibile definire anche un polinomio trigonometrico T.

$$P_N(x) = \sum_{n=0}^{N} a_n x^n \qquad a_n \in \mathbb{R},\ a_N \neq 0$$

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} c_n e^{i\omega nx} \qquad c_n \in \mathbb{C},\ \omega \in \mathbb{R},\ c_N \neq 0$$

Questo polinomio è detto *trigonometrico* perchè utilizzando la formula di eulero $e^{i\varphi} = \cos(\varphi) + i\sin(\varphi)$ si può espandere nel seguente modo.

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} \left[a_n \cdot \cos(\omega nx) + ib_n \cdot \sin(\omega nx)\right] \qquad a_n, b_n \in \mathbb{C}$$

5.2.2 Polinomio Trigonometrico Reale

È definito inoltre il polinomio trogonometrico *reale* come

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} \left[a_n \cdot \cos(\omega nx) + b_n \cdot \sin(\omega nx)\right] \qquad a_n, b_n \in \mathbb{R}$$

Mediante delle identità trigonometriche può essere riscritto anche nel modo seguente.

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} A_n \cdot \cos(\omega nx - \varphi)$$

Oppure nella sua forma complessa in cui $c_k = \dfrac{a_k}{2} + \dfrac{b_k}{2i}$.

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} c_n\, e^{i\omega nx} + \bar{c_n}\, e^{-i\omega nx} \qquad c_n \in \mathbb{C}$$

Definendo $c_{-n} = \bar{c_n}$ è possibile ridurre la notazione.

$$T_N(x) = \sum_{n=-N}^{N} c_n \, e^{i\omega n x}$$

In tutti i casi possiamo osservare che il polinomio trogonometrico è una somma di sinusoidi di frequenze multiple ad una base $f = \omega/2\pi$. Se descritto mediante la terminologia dell'algebra lineare, si può anche osservare che un polinomio trigonometrico è una combinazione lineare nello spazio funzionale ortonormato dalle basi $\sqrt{\frac{2}{T}} \cdot \sin(\omega x)$ e $\sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\omega x)$.

5.3 Serie di Fourier

Un polinomio trigonometrico reale di infiniti termini è una serie di Fourier, in onore al matematico francese J. B. Fourier.

$$S(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \, e^{i\omega n x} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \cos(\omega n x) + b_n \cdot \sin(\omega n x)$$

5.3.1 Convergenza della serie

La convergenza puntuale della serie di Fourier è dimostrabile dalle condizioni del teorema di Dirichlet. Purtroppo questa dimostrazione richiede una grande quantità di nozionistica matematica che non può essere riassunta in pochi paragrafi. In allegato e nelle referenze sono presenti dei documenti che analizzano e dimostrano questa proprietà.

Da questo punto è da dare per assunto che è dimostrata la convergenza puntuale della serie di Fourier di una funzione reale a condizione che:

1. $|f(x)|$ (valore assoluto) è integrabile in un periodo.
2. La funzione deve essere di variazione limitata, ossia devono esserci un numero finito di minimi e massimi in un qualsiasi intervallo.
3. La funzione deve avere un numero finito di discontinutià in un qualsiasi intervallo chiuso e le discontinuità non devono essere infinite.

5.4 Trasformata di Fourier discreta

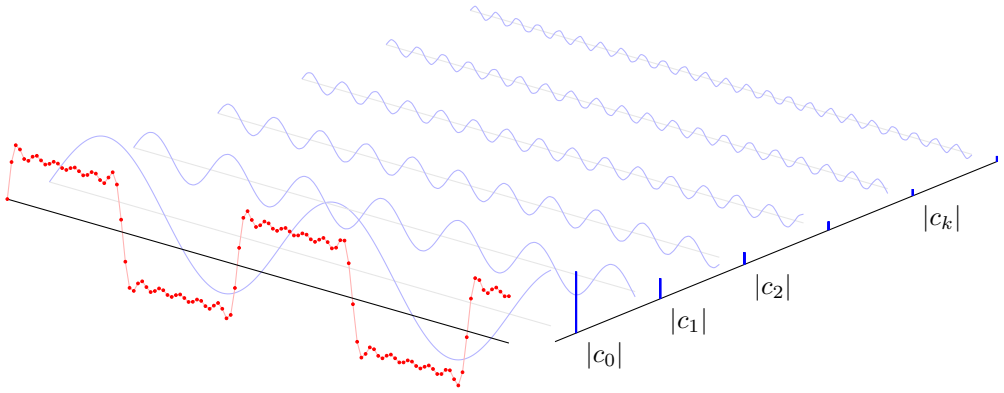


Figura 5.2: Rappresentazione grafica della transformata di Fourier [8]

La Trasformata di Fouerier Discreta (DFT) è l'operazione matematica che permette di trovare i coefficienti della serie di Fourier o di un polinomio trigonometrico, per approssimare al meglio una funzione. Se presa a sestante però essa essendo una *trasformata* può essere osservata anche come una funzione che da uno spettro *discreto* di una funzione. La densità spettrale ottenuta dalla DFT è dipende dalla frequenza di base scelta e nel caso di un polinomio trigonometrico, anche dal numero di termini di quest'ultimo.

$$X_k = c_k \cdot T = \int_0^T f(x) \cdot e^{-ik2\pi fx} \, \mathrm{d}x$$

Nella figura 5.2, possiamo osservare sul grafico $x \perp z$ in rosso la funzione campionata, ed il suo spettro discretto sull'asse $y \perp z$ in blu. Più lo spettro è denso, ossia più campioni, più è precisa l'approssimazione.

5.4.1 Derivazione della DFT

Per trovare la DFT, supponiamo di voler approssimare una funzione, utilizzando il metodo dei minimi quadrati, con un polinomio trigonometrico reale.

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} A_n \cdot \cos(\omega n x - \varphi) \qquad \omega = 2\pi f$$

Sappiamo che questo può essere scritto anche nel seguente modo.

$$T_N(x) = \sum_{n=0}^{N} a_n \cdot \cos(\omega n x) + b_n \cdot \sin(\omega n x)$$

Dunque per trovare i termini $a_0, \ldots, a_N$ e $b_0, \ldots, b_N$ definiamo una funzione ε da minimizzare con il metodo dei minimi quadrati.

$$\varepsilon = \int_0^T \left[T_N(x) - f(x)\right]^2 \mathrm{d}x$$

Per generalizzare sarà dimostrato come trovare il k-esimo termine.

Termini dei coseni

I termini dei coseni a_k sono ottenuti eguagliando la derivata parziale di ε a zero.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_k} = 0 &= \frac{\partial}{\partial a_k} \int_0^T \left[T_N(x) - f(x)\right]^2 \mathrm{d}x \\
0 &= \int_0^T \frac{\partial}{\partial a_k} \left[\sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x) + b_n \sin(\omega n x) - f(x)\right]^2 \mathrm{d}x \\
0 &= \int_0^T 2\left[\sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x) + b_n \sin(\omega n x) - f(x)\right] \cdot a_k \cos(\omega k x)\, \mathrm{d}x \\
0 &= \underbrace{\int_0^T \cos(\omega k x) \sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x)\, \mathrm{d}x}_{k \neq n \implies 0} + \underbrace{\int_0^T \cos(\omega k x) \sum_{n=0}^{N} b_n \sin(\omega n x)\, \mathrm{d}x}_{0} - \int_0^T \cos(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x \\
0 &= a_k \cdot \frac{T}{2} - \int_0^T \cos(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x
\end{aligned}$$

$$\frac{a_k}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x$$

Termini dei seni

I termini dei seni b_k sono ottenuti eguagliando la derivata parziale di ε a zero.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_k} = 0 &= \frac{\partial}{\partial b_k} \int_0^T \left[T_N(x) - f(x)\right]^2 \mathrm{d}x \\
0 &= \int_0^T \frac{\partial}{\partial b_k} \left[\sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x) + b_n \sin(\omega n x) - f(x)\right]^2 \mathrm{d}x \\
0 &= \int_0^T 2\left[\sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x) + b_n \sin(\omega n x) - f(x)\right] \cdot b_k \sin(\omega k x)\, \mathrm{d}x \\
0 &= \underbrace{\int_0^T \sin(\omega k x) \sum_{n=0}^{N} a_n \cos(\omega n x)\, \mathrm{d}x}_{0} + \underbrace{\int_0^T \sin(\omega k x) \sum_{n=0}^{N} b_n \sin(\omega n x)\, \mathrm{d}x}_{k \neq n \implies 0} - \int_0^T \sin(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x \\
0 &= b_k \cdot \frac{T}{2} - \int_0^T \sin(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x
\end{aligned}$$

$$\frac{b_k}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(\omega k x) \cdot f(x)\, \mathrm{d}x$$

Termine complesso

A questo punto è possibile raggurppare i termini a_k e b_k in un unico valore complesso c_k, come descritto nella sezione 5.2.2.

$$c_k = \frac{a_k}{2} + \frac{b_k}{2i}$$
$$c_k = \frac{1}{T}\int_0^T \cos(\omega k x)\cdot f(x)\,\mathrm{d}x + \frac{1}{Ti}\int_0^T \sin(\omega k x)\cdot f(x)\,\mathrm{d}x$$
$$c_k = \frac{1}{T}\int_0^T f(x)\cdot\big[\cos(\omega k x) - i\sin(\omega k x)\big]\,\mathrm{d}x$$

$$c_k = \frac{1}{T}\int_0^T f(x)\cdot e^{-i\omega k x}\,\mathrm{d}x$$

5.5 Trasformata di Fourier

Dalla DFT si è sviluppato lo strumento matematico per ottenere lo spettro discreto di una funzione. Il risultato della DFT però è una funzione discontinua con valori spettrali unicamente multipli della base.

La Trasformata di Fourier estende ulteriormente producendo una funzione di spettro *continua*. Un modo intuitivo per ottenere questo requisito, è di far tendere il limite della densità spettrale, data dal periodo, verso l'infinito. Per i seguenti passaggi sarà utilizzata la funzione s per indicare la funzione reale di cui si osserva lo spettro. Partendo dall'approssimazione data dalla DFT possiamo asserire che

$$s(x) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{X_n}{T}\cdot e^{i2\pi x n/T}$$
$$s(x) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T}\underbrace{\int_{-T/2}^{T/2} s(x)\cdot e^{-i2\pi x n/T}\,\mathrm{d}x}_{X_n = c_n\cdot T}\cdot e^{i2\pi x n/T}$$
$$s(x) = \lim_{T\to\infty}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} s(x)\cdot e^{-i2\pi x n/T}\,\mathrm{d}x\cdot e^{i2\pi x n/T}$$

Osserviamo che

$$\lim_{T\to\infty}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{1}{T} = \int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}f \qquad\qquad \lim_{T\to\infty}\frac{n}{T} = f \quad \text{(variabile continua)}$$

Dunque otteniamo

$$s(x) = \int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}f\underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} s(x)\cdot e^{-i2\pi f x}\,\mathrm{d}x}_{\mathcal{F}\{s\}}\cdot e^{i2\pi f x}$$

Si nota a questo punto che il termine centrale è la trasformata di Fourier ed è una funzione dalla variabile continua f (frequenza). Si osservi inoltre che sono stati cambiati i limiti di integrazione del periodo. Definendo entrambi i limiti in funzione di T e facendo tendere T all'infinito, si ottiene come conseguenza secondaria che la trasformata non è più limitata ad una funzione periodica.

Formalmente dunque la Trasformata di Fourier, tipicamente notata con $\mathcal{F}$ oppure con l'accento circonflesso $\hat{f}$ sul nome della funzione, è definita come segue.

$$\mathcal{F}\{f\} = \hat{f}\,(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\cdot e^{-i\omega x}\,\mathrm{d}x$$

5.6 Interpretazione geometrica

5.6.1 Spazi funzionali

5.6.2 Prodotto interno

5.6.3 Metodo dei minimi quadrati

5.7 Fast Fourier Transform

5.7.1 Motivazioni e Complessità temporale

5.7.2 Proprietà dei numeri complessi

Elenco delle figure

Elenco delle tabelle

Bibliografia

[1] Real Time Audio Spectrum Analyzer. (online) Simon Inns. Jan 8 2011.
https://www.waitingforfriday.com/?p=325
http://archive.is/IJeAe (archived)

[2] Divide and Couquer: FFT. (online, video)
Erik Demaine, MIT OpenCourseWare. MIT 6.046J Design and Analysis of Algorithms, Spring 2015
https://youtu.be/iTMn0Kt18tg

[3] But what is the Fourier Transform? A visual introduction. (online, video)
Grant Sanderson. Jan 26, 2018. YouTube.
https://youtu.be/spUNpyF58BY

[4] Théorie et traitement des signaux. (Pag. 70 – 72)
Coulon, Frédéric de (1996). Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996 (Traité d'électricité de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne; vol. 6)

[5] Algèbre linéaire. Aide-mémoire, exercices et applications. (Pag. 64 Moindres carrées)
Dalang, Robert C. Chaabouni, Amel (2001). Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001

[6] Algèbre linéaire. (Pag 63 – 65)
Cairoli, R. (1991). Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991

[7] Linear Algebra. An Introductory Approach.
Curtis, Charles W. (2000). New York: Springer, 2000

[8] Example: Fourier transform. (online) Jake. TeX.SE
http://www.pgfplots.net/tikz/examples/fourier-transform/

Progetto: *Spectrum Analyzer* Inizio: 12.04.2018

Persona in formazione: *Naoki Pross* Fine: 15.05.2018

		Data	12.04.2018		13.04.2018		16.04.2018		17.04.2018		26.04.2018		27.04.2018		30.04.2018		01.05.2018		10.05.2018		11.05.2018		14.05.2018		15.05.2018	
		Giorno	Gio		Ve		Lu		Ma		Gio		Ve		Lu		Ma		Gio		Ve		Lu		Ma	
			M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P
	ATTIVITÀ	Tempo																								
0	Analisi e comprensione della FT, DFT, FFT	10																								
		7																								
1	Preparazione di un prototipo su piastra sperimentale	9																								
		3																								
2	Progettazione dello schema elettrico e del PCB	18																								
		24																								
3	Assemblaggio del PCB	4																								
		0																								
4	Programmazione del microcontroller	11																								
		14																								
5	Programmazione dell'interfaccia desktop	11																								
		8																								
6	Allestimento ed esecuzione di test hardware e software	6																								
		0																								
7		0																								
		0																								
8	Stesura documentazione e del diario giornaliero	14																								
		2																								
	Totale preventivo	83																								
	Totale consuntivo	58																								

DIARIO GIORNALIERO

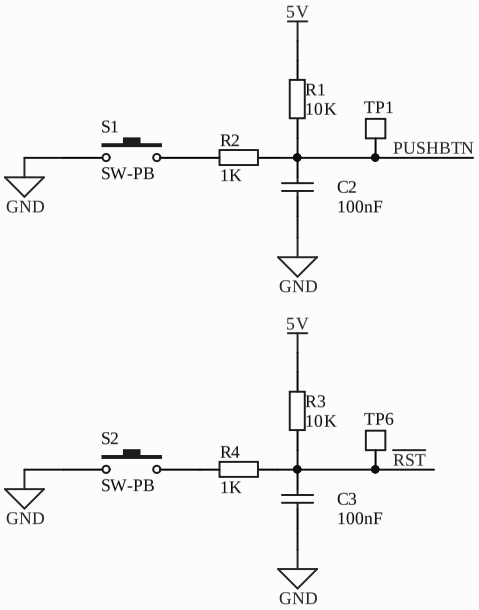
Candidato: Naoki Pross	**Progetto:** Spectrum Analyzer
Formatore: Rinaldo Geiler, Daniele Kamm	**Periodo:** 12.04.2018 – 15.04.2018

Giorno	Data	Ore	Descrizione attività (Attività eseguite, metodi adottati, decisioni prese, dimostrazioni effettuate, ecc.)	Osservazioni
Gio	12.04.2018	2	Preparazione della documentazione, della pianifica ed organizzazione generale del progetto.	
Gio	12.04.2018	5	Analisi e studio del concetto matematico.	
Gio	12.04.2018	1	Raccolto informazioni e librerie software per i componenti utilizzati dal progetto. Inoltre è stata preparata una struttura per la documentazione.	
Ve	13.04.2018	2	Scelto i componenti analogici e passivi e preparato una BOM (Bill Of Materials). Progettato uno schema elettrico.	È stato scelto di utilizzare un unico amplificatore di qualità migliore (per audio) con un multiplexer invece di un package con più amplificatori di precisione inferiore.
Ve	13.04.2018	3	Realizzato la parte centrale dello schema elettrico in formato ECAD (Altium Designer). Ossia i circuiti di multiplexing, di adattamento del segnale e di filtraggio delle frequenze indesiderate.	Manca il jack di alimentazione (non ancora necessaria su tavola sperimentale) e il circuito di adattamento di tensione da 12 V a 5 V.
Ve	13.04.2018	2	Modificato il circuito progettato per utilizzare un filtro attivo anzichè passivo dopo aver osservato sperimentalmente l'attenuazione dal filtro passivo.	Il circuto su piastra sperimentale non è ancora funzionante per sviluppare i primi programmi di test.
Ve	13.04.2018	2	Studiato il concetto matematico della Fourier transform con il professor Edoardo Cima.	L'attività non era programmata poichè la disponibilità dei docenti è limitata.
Lu	16.04.2018	1	Realizzato un circuito di prova su piastra sperimentale.	Si è osservato che il circuito progettato non era idoneo. L'amplificatore scelto in precedenta (TL071) non è in grado di lavorare come necessario nel margine da 0 V a 5 V. Dunque è stato cambiato in un OPAMP Rail-to-Rail AD820 sotto consiglio di D. Kamm.
Lu	16.04.2018	2	Corretto il circuito di amplificazione e risolto imperfezioni minori.	L'amplificatore combinato con il filtro è stato separato in due stadi, di amplificazione e di filtraggio.

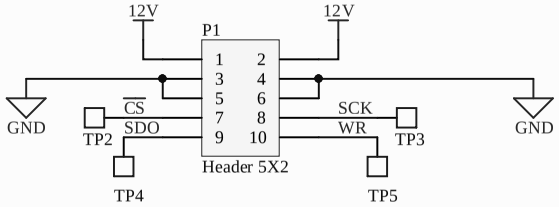
Lu	16.04.2018	1	Corretto il montaggio sulla piastra sperimentale.	Il filtro attivo non è presente sulla tavola perché si deve aspettare la comanda del componente.
Lu	16.04.2018	5	Implementato il codice del microcontroller per configurare l'ADC ed un timer per un campionamento regolare.	Si possono osservare i dettagli su Git nei seguenti commit: `7730a96`, `b836638`, `b482c7e`, `aa19054`, `2996f65`.
Lu	16.04.2018	1	Riordinato lo schema elettrico. Aggiunto il ciruito di regolazione della tensione in entrata con un MC7805.	Manca ancora il connettore principale dell'alimentazione, rimane da decidere se utilizzare dei morsetti o un power jack.
Ma	17.04.2018	2	Diviso lo schema elettrico su più fogli per dendere il tutto più ordinato. Preparato il footprint del Jack Audio.	
Ma	17.04.2018	1	Analizzato un problema inerente alla programmazione dell'interfaccia software per il computer con il professor Emidio Planamente. È presente un errore nella gestione delle risorse nel thread parallelo di gestione del seriale. Il thread della classe `SerialWorker` deve essere terminato per rilasciare la risorsa `MainWindow::_serial`, ma ciò non accade e il programma crasha. Il problema è ancora irrisolto. Riportato lo stato e discusso del progetto con Marco Bertoz (Perito).	Dettagli tecnici: `8ba16b0`
Ma	17.04.2018	2	Terminato lo schema elettrico e controllato tutti i footprints. Richiesto una revisione al professor Rinaldo Geiler prima di procedere al PCB.	Se non vi sono errori si potrà iniziare il design del PCB.
Gio	26.04.2018	4	Integrato dei consigli dal feedback da Geiler, ossia correzioni miniori e l'aggiunta di un bottone di reset manuale. Iniziato il design del PCB.	Presentato il progetto al capo perito.
Gio	26.04.2018	4	Risolto un il bug dell'interfaccia software desktop con il professor E. Planamente. Il thread di lettura del seriale adesso viene chiuso correttamente. Implementato la rappresentazione grafica dei segnali campionati dal microcontroller ricevuti attraverso la seriale RS232.	Vedi `69d5d42`, `2791cdd`
Ve	27.04.2018	5	Terminato il routing del PCB. Risolto i problemi indicati dal DRC.	Il footprint del potenziometro R14 è sbagliato. Il footprint del connettore RCA non può essere controllato poichè il componente non è ancora arrivato. Le correzioni del componente R14 e di eventuali altri saranno eseguite una volta ottenuti tutti i componenti prima della stampa.

Ve	27.04.2018	4	Iniziato ad implementare un protocollo migliore per mandare i dati dal microcontroller al PC. Risolto un bug minore dell'applicativo desktop che causava un malfunzionamento sotto Windows. In dettaglio: la funzione `_serial.waitReadable();` emetteva un `IOException` causando la chiusura del thread di lettura del seriale.	
Lu	30.04.2018	2	Terminato l'implementazione del protocollo per mandare i dati. È ora possibile mandare numeri complessi interi sia positivi che negativi.	
Lu	30.04.2018	4	Implementato il calcolo della FFT sul microcontroller e la corrispondente visualizzazione sul PC.	Commits: `8adeaa8`, `bec4185`, `dd19e0d`
Lu	30.04.2018	1	Corretto i footprints, preparato i lucidi per la stampa.	
Lu	30.04.2018	2	Cambiato il baudrate della trasmissione a 57.6 k e raddoppiato il numero di campioni. Modificato l'implementazione del PC per utilizzare le strutture `std::complex` invece della mia implementazione `sam::complex_int16_t` poichè sono standard ed hanno già tutte le operazioni matematiche definite.	Commits: `d34ffc6`, `41dae5e`
Lu	30.04.2018	1	Continuato la documentazione.	

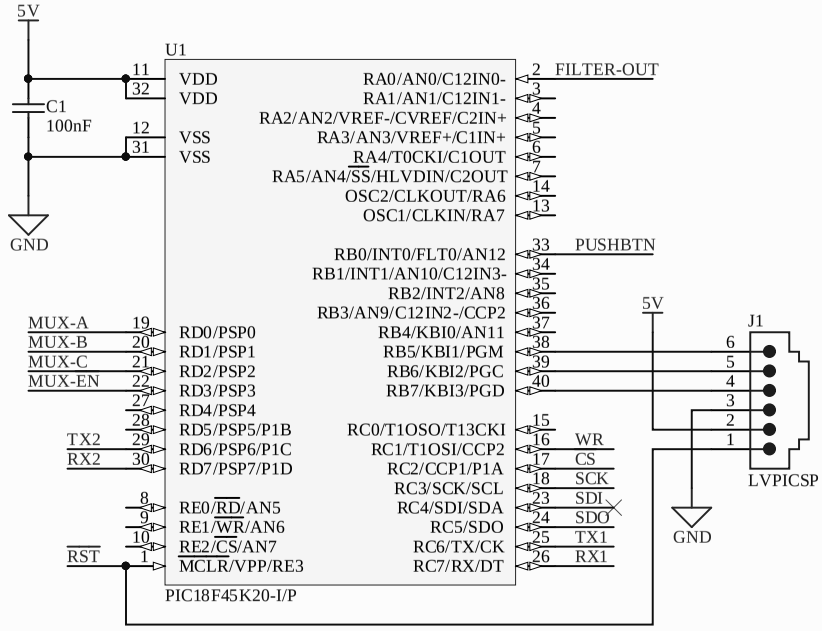
User Input



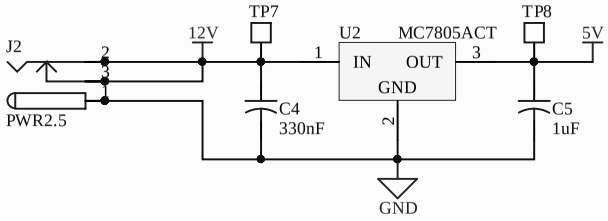
Display Output



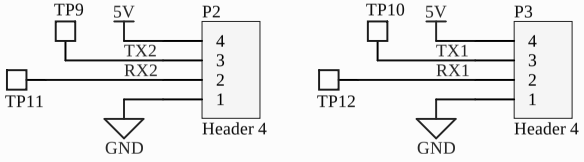
Microcontroller



Power Input

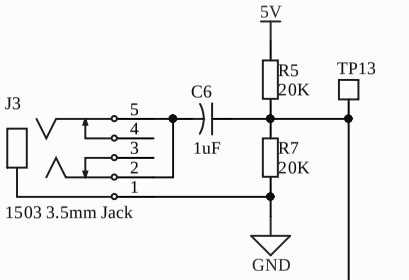


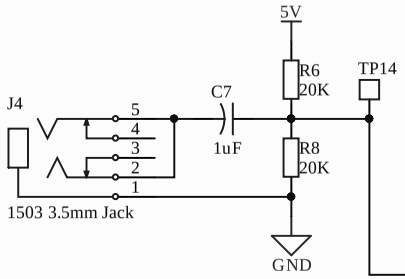
RS232 Output

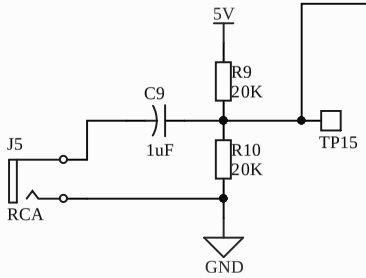


Title: Spectrum Analyzer: Signal Processing		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 27.04.2018		Sheet 1 of 2
File: Z:\SAMB_4\..\SignalProcessing.SchDoc		Drawn By: Naoki Pross

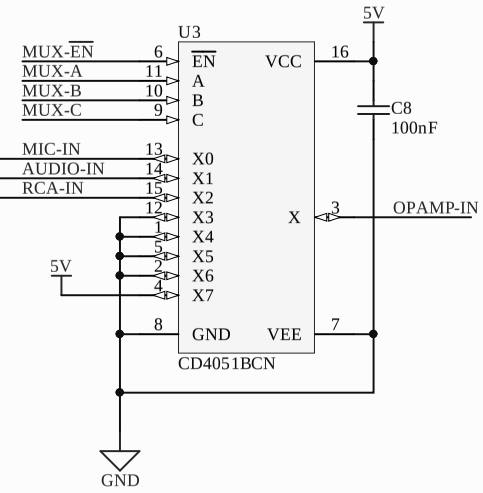
Signal Input



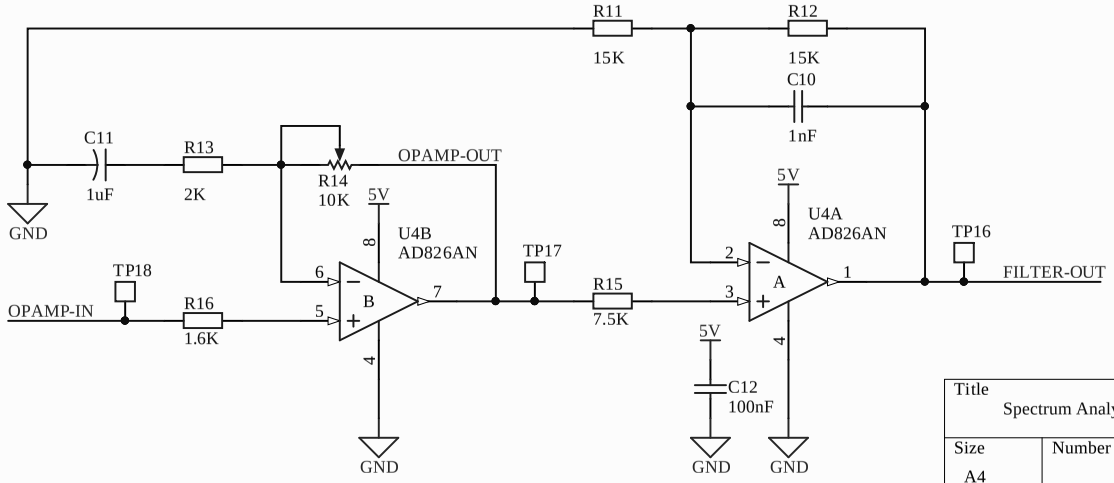




Input Selection



Signal Adapter



Title: Spectrum Analyzer: Signal Adapter		
Size: A4	Number	Revision
Date: 27.04.2018		Sheet 2 of 2
File: Z:\SAMB_4\..\SignalAdapter.SchDoc		Drawn By: Naoki Pross

Codice sorgente

Codice del microcontroller

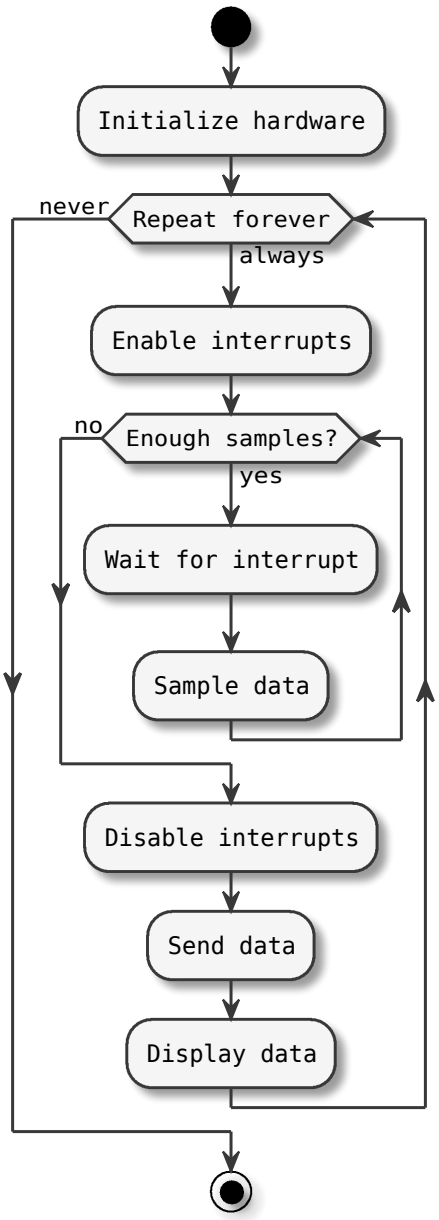


Figura 6.1: Diagramma di flusso del codice del microcontrollore

```
1  /*
2   * File:    main.c
3   * Author:  Naoki Pross
4   * Project: SAM Spectrum Analyzer
5   *
6   * Created on 12.04.2018, 11:57
7   */
8
9  #define DEBUG
10
11 #include "hwconfig.h"
12 #include "rs232.h"
13 #include "ht1632.h"
14
15 #include "fft.h"
16
17 #include <xc.h>
```

```
#include <stdio.h>
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <string.h>

// number of samples to collect
#define SAMPLES_SIZE_POW    7
#define SAMPLES_SIZE        (1<<SAMPLES_SIZE_POW)



volatile uint8_t samples_count;
volatile bool start_sample;


interrupt void isr(void)
{
    if (PIR1bits.TMR2IF && samples_count < SAMPLES_SIZE) {
        // start sampling
        start_sample = true;

        // reset interrupt flag
        PIR1bits.TMR2IF = 0;
    }
}


/* hardware initialization routine */
inline void init_hw()
{
    // disable interrupts
    di();

    /* PLL / FOSC configuration */
    // enable PLL
    OSCTUNEbits.PLLEN = 1;
    // set FOSC to HFINTOSC (max frequency)
    OSCTUNEbits.TUN = 0b011111;
    // set 16 MHz oscillator, datasheet p.30
    OSCCONbits.IRCF = 0b111;
    // select primary clock (with PLL)
    OSCCONbits.SCS = 0b00;

    /* initialize digital i/o */
    // signal input
    TRISAbits.RA0 = 1;
    ANSELAbits.ANSA0 = 1;

    // input selection button
    TRISBbits.TRISB0 = 1;
    ANSELBbits.ANSB0 = 0;
    // eusart and mssp port
    ANSELC = 0x00;
    TRISC = 0x00;
    // mux selection port
    TRISD = 0x00; // 0xF8;
    ANSELD = 0x00; // 0xF8;

    /* intialize ADC i/o */
    // set ADC clock period to Fosc/64 = 1us
    // (maximum without violating Tadmin)
    ADCON2bits.ADCS = 0b110;
    // set ADC acquisition time to 2*Tad)
    ADCON2bits.ACQT = 0b001;
    // set result format 2 bits on ADREDH and 8 bits on ADRESL
    ADCON2bits.ADFM = 1;
    // set internal reference
    ADCON1bits.PVCFG = 0b00;
    // set internal negative reference
```

```
87      ADCON1bits.NVCFG = 0b00;
88      // select channel 0 (AN0)
89      ADCON0bits.CHS = 0b00000;
90      // enable ADC
91      ADCON0bits.ADON = 1;
92
93      /* interrupts initialization */
94      // timer 2 comp value
95      // with post 1:1 and pre 1:16, 1 unit is 1 us
96      PR2 = 50;
97      // postscaler 1:1
98      T2CONbits.T2OUTPS = 0b0000;
99      // prescaler 1:16
100     T2CONbits.T2CKPS = 0b11;
101     // start timer
102     T2CONbits.TMR2ON = 1;
103     // timer 2 interrupts
104     PIE1bits.TMR2IE = 1;
105     PIR1bits.TMR2IF = 0;
106     // enable peripheral interrupts
107     INTCONbits.PEIE = 1;
108
109     /* initialize serial devices */
110     eusart1_init();
111     eusart2_init();
112 }
113
114
115 void main(void)
116 {
117     unsigned int i;
118
119     short real[SAMPLES_SIZE];
120     short imag[SAMPLES_SIZE];
121
122     // set samples to zero
123     memset(real, 0u, SAMPLES_SIZE * sizeof(real[0]));
124     memset(imag, 0u, SAMPLES_SIZE * sizeof(imag[0]));
125
126
127     // initialize hardware
128     init_hw();
129
130     while (true) {
131         // reset samples count
132         samples_count = 0;
133         start_sample = false;
134
135 #ifdef DEBUG
136         PORTDbits.RD1 = 0;
137 #endif
138
139         // sample signal
140         ei();
141         while (samples_count < SAMPLES_SIZE){
142             while (!start_sample);
143
144             ADCON0bits.GO = 1;
145             while (ADCON0bits.nDONE);
146
147             real[samples_count] = ADRESH<<8 | ADRESL;
148
149             samples_count++;
150             start_sample = false;
151         }
152         di();
153
154 #ifdef DEBUG
155         PORTDbits.RD1 = 1;
```

```
#endif
        // compute FFT
        fix_fft(real, imag, SAMPLES_SIZE_POW);

        // send data
        printf("S\n\r");
        for (i = 0; i < SAMPLES_SIZE; i++) {
            printf("%04di%04d\n\r", real[i], imag[i]);

        }
        printf("E\n\r");


#ifdef DEBUG
        // wait
        // __delay_ms(500);
#endif
    }

    return;
}
```

```
/*
 * File:    hwconfig.h
 * Author:  Naoki Pross
 * Project: SAM Spectrum Analyzer
 *
 * Created on 16.04.2018
 */

#ifndef HWCONFIG_H
#define HWCONFIG_H

// PIC18F44K22 Configuration Bit Settings
// 'C' source line config statements

// CONFIG1H
// Oscillator Selection bits (Internal oscillator block)
#pragma config FOSC = INTIO67
// 4X PLL Enable (Oscillator multiplied by 4)
#pragma config PLLCFG = ON
// Primary clock enable bit (Primary clock is always enabled)
#pragma config PRICLKEN = ON
// Fail-Safe Clock Monitor Enable bit (Fail-Safe Clock Monitor disabled)
#pragma config FCMEN = OFF
// Internal/External Oscillator Switchover bit (Oscillator Switchover mode disabled)
#pragma config IESO = OFF

// CONFIG2L
// Power-up Timer Enable bit (Power up timer disabled)
#pragma config PWRTEN = OFF
// Brown-out Reset Enable bits (Brown-out Reset enabled in hardware only (SBOREN is disabled
    ))
#pragma config BOREN = SBORDIS
// Brown Out Reset Voltage bits (VBOR set to 1.90 V nominal)
#pragma config BORV = 190

// CONFIG2H
// Watchdog Timer Enable bits (WDT is always enabled. SWDTEN bit has no effect)
#pragma config WDTEN = OFF
// Watchdog Timer Postscale Select bits (1:32768)
#pragma config WDTPS = 32768

// CONFIG3H
// CCP2 MUX bit (CCP2 input/output is multiplexed with RC1)
#pragma config CCP2MX = PORTC1
// PORTB A/D Enable bit (PORTB<5:0> pins are configured as analog input channels on Reset)
#pragma config PBADEN = ON
// P3A/CCP3 Mux bit (P3A/CCP3 input/output is multiplexed with RB5)
```

```
47 #pragma config CCP3MX = PORTB5
48 // HFINTOSC Fast Start-up (HFINTOSC output and ready status are not delayed by the
       oscillator stable status)
49 #pragma config HFOFST = ON
50 // Timer3 Clock input mux bit (T3CKI is on RC0)
51 #pragma config T3CMX = PORTC0
52 // ECCP2 B output mux bit (P2B is on RD2)
53 #pragma config P2BMX = PORTD2
54 // MCLR Pin Enable bit (MCLR pin enabled, RE3 input pin disabled)
55 #pragma config MCLRE = EXTMCLR
56
57 // CONFIG4L
58 // Stack Full/Underflow Reset Enable bit (Stack full/underflow will cause Reset)
59 #pragma config STVREN = ON
60 // Single-Supply ICSP Enable bit (Single-Supply ICSP enabled if MCLRE is also 1)
61 #pragma config LVP = ON
62 // Extended Instruction Set Enable bit (Instruction set extension and Indexed Addressing
       mode disabled (Legacy mode))
63 #pragma config XINST = OFF
64
65 // CONFIG5L
66 // Code Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not code-protected)
67 #pragma config CP0 = OFF
68 // Code Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not code-protected)
69 #pragma config CP1 = OFF
70 // Code Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not code-protected)
71 #pragma config CP2 = OFF
72 // Code Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not code-protected)
73 #pragma config CP3 = OFF
74
75 // CONFIG5H
76 // Boot Block Code Protection bit (Boot block (000000-0007FFh) not code-protected)
77 #pragma config CPB = OFF
78 // Data EEPROM Code Protection bit (Data EEPROM not code-protected)
79 #pragma config CPD = OFF
80
81 // CONFIG6L
82 // Write Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not write-protected)
83 #pragma config WRT0 = OFF
84 // Write Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not write-protected)
85 #pragma config WRT1 = OFF
86 // Write Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not write-protected)
87 #pragma config WRT2 = OFF
88 // Write Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not write-protected)
89 #pragma config WRT3 = OFF
90
91 // CONFIG6H
92 // Configuration Register Write Protection bit (Configuration registers (300000-3000FFh) not
       write-protected)
93 #pragma config WRTC = OFF
94 // Boot Block Write Protection bit (Boot Block (000000-0007FFh) not write-protected)
95 #pragma config WRTB = OFF
96 // Data EEPROM Write Protection bit (Data EEPROM not write-protected)
97 #pragma config WRTD = OFF
98
99 // CONFIG7L
100 // Table Read Protection Block 0 (Block 0 (000800-001FFFh) not protected from table reads
       executed in other blocks)
101 #pragma config EBTR0 = OFF
102 // Table Read Protection Block 1 (Block 1 (002000-003FFFh) not protected from table reads
       executed in other blocks)
103 #pragma config EBTR1 = OFF
104 // Table Read Protection Block 2 (Block 2 (004000-005FFFh) not protected from table reads
       executed in other blocks)
105 #pragma config EBTR2 = OFF
106 // Table Read Protection Block 3 (Block 3 (006000-007FFFh) not protected from table reads
       executed in other blocks)
107 #pragma config EBTR3 = OFF
108
```

```
109 // CONFIG7H
110 // Boot Block Table Read Protection bit (Boot Block (000000-0007FFh) not protected from
        table reads executed in other blocks)
111 #pragma config EBTRB = OFF
112
113 // #pragma config statements should precede project file includes.
114 // Use project enums instead of #define for ON and OFF.
115
116 #define _XTAL_FREQ 64000000
117
118 #endif  /* HWCONFIG_H */
```

Fast Fourier Transform

```
 1 /*****************************************************************************
 2         fft.h
 3
 4     FFT Audio Analysis
 5     Copyright (C) 2011 Simon Inns
 6
 7     This program is free software: you can redistribute it and/or modify
 8     it under the terms of the GNU General Public License as published by
 9     the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
10     (at your option) any later version.
11
12     This program is distributed in the hope that it will be useful,
13     but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
14     MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.  See the
15     GNU General Public License for more details.
16
17     You should have received a copy of the GNU General Public License
18     along with this program.  If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
19
20         Email: simon.inns@gmail.com
21
22 *****************************************************************************/
23
24 #ifndef _FFT_H
25 #define _FFT_H
26
27 // Definitions
28 #define N_WAVE      1024    // full length of Sinewave[]
29 #define LOG2_N_WAVE 10      // log2(N_WAVE)
30
31 // Since we only use 3/4 of N_WAVE, we define only
32 // this many samples, in order to conserve data space.
33 const short sinewave[N_WAVE-N_WAVE/4] = {
34       0,    201,    402,    603,    804,   1005,   1206,   1406,
35    1607,   1808,   2009,   2209,   2410,   2610,   2811,   3011,
36    3211,   3411,   3611,   3811,   4011,   4210,   4409,   4608,
37    4807,   5006,   5205,   5403,   5601,   5799,   5997,   6195,
38    6392,   6589,   6786,   6982,   7179,   7375,   7571,   7766,
39    7961,   8156,   8351,   8545,   8739,   8932,   9126,   9319,
40    9511,   9703,   9895,  10087,  10278,  10469,  10659,  10849,
41   11038,  11227,  11416,  11604,  11792,  11980,  12166,  12353,
42   12539,  12724,  12909,  13094,  13278,  13462,  13645,  13827,
43   14009,  14191,  14372,  14552,  14732,  14911,  15090,  15268,
44   15446,  15623,  15799,  15975,  16150,  16325,  16499,  16672,
45   16845,  17017,  17189,  17360,  17530,  17699,  17868,  18036,
46   18204,  18371,  18537,  18702,  18867,  19031,  19194,  19357,
47   19519,  19680,  19840,  20000,  20159,  20317,  20474,  20631,
48   20787,  20942,  21096,  21249,  21402,  21554,  21705,  21855,
49   22004,  22153,  22301,  22448,  22594,  22739,  22883,  23027,
50   23169,  23311,  23452,  23592,  23731,  23869,  24006,  24143,
51   24278,  24413,  24546,  24679,  24811,  24942,  25072,  25201,
52   25329,  25456,  25582,  25707,  25831,  25954,  26077,  26198,
53   26318,  26437,  26556,  26673,  26789,  26905,  27019,  27132,
54   27244,  27355,  27466,  27575,  27683,  27790,  27896,  28001,
55   28105,  28208,  28309,  28410,  28510,  28608,  28706,  28802,
```

```
  28897,  28992,  29085,  29177,  29268,  29358,  29446,  29534,
  29621,  29706,  29790,  29873,  29955,  30036,  30116,  30195,
  30272,  30349,  30424,  30498,  30571,  30643,  30713,  30783,
  30851,  30918,  30984,  31049,  31113,  31175,  31236,  31297,
  31356,  31413,  31470,  31525,  31580,  31633,  31684,  31735,
  31785,  31833,  31880,  31926,  31970,  32014,  32056,  32097,
  32137,  32176,  32213,  32249,  32284,  32318,  32350,  32382,
  32412,  32441,  32468,  32495,  32520,  32544,  32567,  32588,
  32609,  32628,  32646,  32662,  32678,  32692,  32705,  32717,
  32727,  32736,  32744,  32751,  32757,  32761,  32764,  32766,
  32767,  32766,  32764,  32761,  32757,  32751,  32744,  32736,
  32727,  32717,  32705,  32692,  32678,  32662,  32646,  32628,
  32609,  32588,  32567,  32544,  32520,  32495,  32468,  32441,
  32412,  32382,  32350,  32318,  32284,  32249,  32213,  32176,
  32137,  32097,  32056,  32014,  31970,  31926,  31880,  31833,
  31785,  31735,  31684,  31633,  31580,  31525,  31470,  31413,
  31356,  31297,  31236,  31175,  31113,  31049,  30984,  30918,
  30851,  30783,  30713,  30643,  30571,  30498,  30424,  30349,
  30272,  30195,  30116,  30036,  29955,  29873,  29790,  29706,
  29621,  29534,  29446,  29358,  29268,  29177,  29085,  28992,
  28897,  28802,  28706,  28608,  28510,  28410,  28309,  28208,
  28105,  28001,  27896,  27790,  27683,  27575,  27466,  27355,
  27244,  27132,  27019,  26905,  26789,  26673,  26556,  26437,
  26318,  26198,  26077,  25954,  25831,  25707,  25582,  25456,
  25329,  25201,  25072,  24942,  24811,  24679,  24546,  24413,
  24278,  24143,  24006,  23869,  23731,  23592,  23452,  23311,
  23169,  23027,  22883,  22739,  22594,  22448,  22301,  22153,
  22004,  21855,  21705,  21554,  21402,  21249,  21096,  20942,
  20787,  20631,  20474,  20317,  20159,  20000,  19840,  19680,
  19519,  19357,  19194,  19031,  18867,  18702,  18537,  18371,
  18204,  18036,  17868,  17699,  17530,  17360,  17189,  17017,
  16845,  16672,  16499,  16325,  16150,  15975,  15799,  15623,
  15446,  15268,  15090,  14911,  14732,  14552,  14372,  14191,
  14009,  13827,  13645,  13462,  13278,  13094,  12909,  12724,
  12539,  12353,  12166,  11980,  11792,  11604,  11416,  11227,
  11038,  10849,  10659,  10469,  10278,  10087,   9895,   9703,
   9511,   9319,   9126,   8932,   8739,   8545,   8351,   8156,
   7961,   7766,   7571,   7375,   7179,   6982,   6786,   6589,
   6392,   6195,   5997,   5799,   5601,   5403,   5205,   5006,
   4807,   4608,   4409,   4210,   4011,   3811,   3611,   3411,
   3211,   3011,   2811,   2610,   2410,   2209,   2009,   1808,
   1607,   1406,   1206,   1005,    804,    603,    402,    201,
      0,   -201,   -402,   -603,   -804,  -1005,  -1206,  -1406,
  -1607,  -1808,  -2009,  -2209,  -2410,  -2610,  -2811,  -3011,
  -3211,  -3411,  -3611,  -3811,  -4011,  -4210,  -4409,  -4608,
  -4807,  -5006,  -5205,  -5403,  -5601,  -5799,  -5997,  -6195,
  -6392,  -6589,  -6786,  -6982,  -7179,  -7375,  -7571,  -7766,
  -7961,  -8156,  -8351,  -8545,  -8739,  -8932,  -9126,  -9319,
  -9511,  -9703,  -9895, -10087, -10278, -10469, -10659, -10849,
 -11038, -11227, -11416, -11604, -11792, -11980, -12166, -12353,
 -12539, -12724, -12909, -13094, -13278, -13462, -13645, -13827,
 -14009, -14191, -14372, -14552, -14732, -14911, -15090, -15268,
 -15446, -15623, -15799, -15975, -16150, -16325, -16499, -16672,
 -16845, -17017, -17189, -17360, -17530, -17699, -17868, -18036,
 -18204, -18371, -18537, -18702, -18867, -19031, -19194, -19357,
 -19519, -19680, -19840, -20000, -20159, -20317, -20474, -20631,
 -20787, -20942, -21096, -21249, -21402, -21554, -21705, -21855,
 -22004, -22153, -22301, -22448, -22594, -22739, -22883, -23027,
 -23169, -23311, -23452, -23592, -23731, -23869, -24006, -24143,
 -24278, -24413, -24546, -24679, -24811, -24942, -25072, -25201,
 -25329, -25456, -25582, -25707, -25831, -25954, -26077, -26198,
 -26318, -26437, -26556, -26673, -26789, -26905, -27019, -27132,
 -27244, -27355, -27466, -27575, -27683, -27790, -27896, -28001,
 -28105, -28208, -28309, -28410, -28510, -28608, -28706, -28802,
 -28897, -28992, -29085, -29177, -29268, -29358, -29446, -29534,
 -29621, -29706, -29790, -29873, -29955, -30036, -30116, -30195,
 -30272, -30349, -30424, -30498, -30571, -30643, -30713, -30783,
 -30851, -30918, -30984, -31049, -31113, -31175, -31236, -31297,
 -31356, -31413, -31470, -31525, -31580, -31633, -31684, -31735,
```

```
 -31785, -31833, -31880, -31926, -31970, -32014, -32056, -32097,
 -32137, -32176, -32213, -32249, -32284, -32318, -32350, -32382,
 -32412, -32441, -32468, -32495, -32520, -32544, -32567, -32588,
 -32609, -32628, -32646, -32662, -32678, -32692, -32705, -32717,
 -32727, -32736, -32744, -32751, -32757, -32761, -32764, -32766,
};

// Function prototypes
void fix_fft(short fr[], short fi[], short m);

#endif
```

```
/************************************************************************
        fft.c

    FFT Audio Analysis
    Copyright (C) 2011 Simon Inns

    This program is free software: you can redistribute it and/or modify
    it under the terms of the GNU General Public License as published by
    the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
    (at your option) any later version.

    This program is distributed in the hope that it will be useful,
    but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
    MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.  See the
    GNU General Public License for more details.

    You should have received a copy of the GNU General Public License
    along with this program.  If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.

        Email: simon.inns@gmail.com

************************************************************************/

#ifndef FFT_C
#define FFT_C

#include <htc.h>
#include "fft.h"

// fix_fft.c - Fixed-point in-place Fast Fourier Transform

// All data are fixed-point short integers, in which -32768
// to +32768 represent -1.0 to +1.0 respectively. Integer
// arithmetic is used for speed, instead of the more natural
// floating-point.
//
// For the forward FFT (time -> freq), fixed scaling is
// performed to prevent arithmetic overflow, and to map a 0dB
// sine/cosine wave (i.e. amplitude = 32767) to two -6dB freq
// coefficients.
//
// Written by:  Tom Roberts  11/8/89
// Made portable:  Malcolm Slaney 12/15/94 malcolm@interval.com
// Enhanced:  Dimitrios P. Bouras  14 Jun 2006 dbouras@ieee.org
// Ported to PIC18F:  Simon Inns 20110104

/*
  fix_fft() - perform forward fast Fourier transform.
  fr[n],fi[n] are real and imaginary arrays, both INPUT AND
  RESULT (in-place FFT), with 0 <= n < 2**m
*/
void fix_fft(short fr[], short fi[], short m)
{
        long int mr = 0, nn, i, j, l, k, istep, n, shift;
        short qr, qi, tr, ti, wr, wi;

        n = 1 << m;
```

```
58          nn = n - 1;
59
60          /* max FFT size = N_WAVE */
61          //if (n > N_WAVE) return -1;
62
63          /* decimation in time - re-order data */
64          for (m=1; m<=nn; ++m)
65          {
66                  l = n;
67                  do
68                  {
69                          l >>= 1;
70                  } while (mr+l > nn);
71
72                  mr = (mr & (l-1)) + l;
73                  if (mr <= m) continue;
74
75                  tr = fr[m];
76                  fr[m] = fr[mr];
77                  fr[mr] = tr;
78                  ti = fi[m];
79                  fi[m] = fi[mr];
80                  fi[mr] = ti;
81          }
82
83          l = 1;
84          k = LOG2_N_WAVE-1;
85
86          while (l < n)
87          {
88                  /*
89                    fixed scaling, for proper normalization --
90                    there will be log2(n) passes, so this results
91                    in an overall factor of 1/n, distributed to
92                    maximize arithmetic accuracy.
93
94                    It may not be obvious, but the shift will be
95                    performed on each data point exactly once,
96                    during this pass.
97                  */
98
99                  // Variables for multiplication code
100                 long int c;
101                 short b;
102
103                 istep = l << 1;
104                 for (m=0; m<l; ++m)
105                 {
106                         j = m << k;
107                         /* 0 <= j < N_WAVE/2 */
108                         wr =  sinewave[j+N_WAVE/4];
109                         wi = -sinewave[j];
110
111                         wr >>= 1;
112                         wi >>= 1;
113
114                         for (i=m; i<n; i+=istep)
115                         {
116                                 j = i + l;
117
118                                 // Here I unrolled the multiplications to prevent overhead
119                                 // for procedural calls (we don't need to be clever about
120                                 // the actual multiplications since the pic has an onboard
121                                 // 8x8 multiplier in the ALU):
122
123                                 // tr = FIX_MPY(wr,fr[j]) - FIX_MPY(wi,fi[j]);
124                                 c = ((long int)wr * (long int)fr[j]);
125                                 c = c >> 14;
126                                 b = c & 0x01;
```

```
                                tr = (c >> 1) + b;

                                c = ((long int)wi * (long int)fi[j]);
                                c = c >> 14;
                                b = c & 0x01;
                                tr = tr - ((c >> 1) + b);

                                // ti = FIX_MPY(wr,fi[j]) + FIX_MPY(wi,fr[j]);
                                c = ((long int)wr * (long int)fi[j]);
                                c = c >> 14;
                                b = c & 0x01;
                                ti = (c >> 1) + b;

                                c = ((long int)wi * (long int)fr[j]);
                                c = c >> 14;
                                b = c & 0x01;
                                ti = ti + ((c >> 1) + b);

                                qr = fr[i];
                                qi = fi[i];
                                qr >>= 1;
                                qi >>= 1;

                                fr[j] = qr - tr;
                                fi[j] = qi - ti;
                                fr[i] = qr + tr;
                                fi[i] = qi + ti;
                        }
                }

                --k;
                l = istep;
        }
}

#endif
```

Libreria RS232

```
/*
 * File:   rs232.h
 * Author: Naoki Pross
 *
 * Created on 7.12.2017
 */

#ifndef RS232_H
#define RS232_H

#include <stddef.h>

// defines which eusart device is used with prinf()
#define EUSART_1_PRINTF 1

extern void eusart1_init(void);
extern void eusart2_init(void);

extern void eusart1_putch(char c);
extern void eusart2_putch(char c);

extern char eusart1_getch(void);
extern char eusart2_getch(void);

extern char eusart1_getche(void);
extern char eusart2_getche(void);

extern void eusart1_write(void *data, size_t len);
extern void eusart2_write(void *data, size_t len);

```

```
31
32 #endif  /* RS232_H */
```

```
1 #include "rs232.h"
2
3 #include <xc.h>
4
5 #ifdef EUSART_1_PRINTF
6 void putch(char c) {
7 #if EUSART_1_PRINTF
8     eusart1_putch(c);
9 #else
10     eusart2_putch(c);
11 #endif
12 }
13 #endif
14
15 void eusart1_init(void)
16 {
17     // set Async and 8 bits frame
18     TXSTA1bits.SYNC = 0;
19     TXSTA1bits.TX9 = 0;
20
21     // baud prescaler
22     RCSTA1bits.SPEN = 1;
23     // SPBRG1 = 103;        // 9600 bps
24     SPBRG1 = 16;        // 57600 bps
25     SPBRGH1 = 0;
26     TXSTA1bits.BRGH = 0;
27     BAUDCON1bits.BRG16 = 0;
28
29     // set up TX / RX pins
30     TRISCbits.TRISC7 = 1;
31     TRISCbits.TRISC6 = 1;
32     // enable continuous reception
33     RCSTA1bits.CREN = 1;
34     TXSTA1bits.TXEN = 1;
35 }
36
37 void eusart2_init(void)
38 {
39     // set Async and 8 bits frame
40     TXSTA2bits.SYNC = 0;
41     TXSTA2bits.TX9 = 0;
42
43     // baud prescaler
44     RCSTA2bits.SPEN = 1;
45     SPBRG2 = 103;                       // 9600 bps
46     SPBRGH2 = 0;
47     TXSTA2bits.BRGH = 0;
48     BAUDCON2bits.BRG16 = 0;
49
50     // set up TX / RX pins
51     TRISDbits.TRISD7 = 1;
52     TRISDbits.TRISD6 = 1;
53     // enable continuous reception
54     RCSTA2bits.CREN = 1;
55     TXSTA2bits.TXEN = 1;
56 }
57
58 void eusart1_putch(char c)
59 {
60     while (!TX1IF);
61     TX1REG = c;
62 }
63
64 void eusart2_putch(char c)
65 {
66     while (!TX2IF);
```

```
67      TX2REG = c;
68  }
69
70  char eusart1_getch(void)
71  {
72      while (!RC1IF);
73      return RC1REG;
74  }
75
76  char eusart2_getch(void)
77  {
78      while (!RC2IF);
79      return RC2REG;
80  }
81
82  char eusart1_getche(void)
83  {
84      char c = eusart1_getch();
85      eusart1_putch(c); // echo
86
87      return c;
88  }
89
90  char eusart2_getche(void)
91  {
92      char c = eusart2_getch();
93      eusart2_putch(c); // echo
94
95      return c;
96  }
97
98  void eusart1_write(void *data, size_t len)
99  {
100     char *dptr = (char *) data;
101
102     while (len--) {
103         eusart1_putch(*(dptr++));
104     }
105 }
106
107 void eusart2_write(void *data, size_t len)
108 {
109     char *dptr = (char *) data;
110
111     while (len--) {
112         eusart2_putch(*(dptr++));
113     }
114 }
```

Codice dell'applicativo desktop

```
1  #include "mainwindow.h"
2
3  #include <QApplication>
4
5  int main(int argc, char *argv[])
6  {
7      QApplication a(argc, argv);
8      MainWindow w;
9      w.show();
10
11     return a.exec();
12 }
```

Finestra principale

```
1  #ifndef MAINWINDOW_H
2  #define MAINWINDOW_H
```

```
3
4  #include <QMainWindow>
5  #include <QThread>
6  #include <QVector>
7
8  #include <complex>
9
10 #include "serialworker.h"
11 #include "serial/serial.h"
12
13 namespace Ui {
14 class MainWindow;
15 }
16
17 class MainWindow : public QMainWindow
18 {
19     Q_OBJECT
20
21 public:
22     explicit MainWindow(QWidget *parent = 0);
23     ~MainWindow();
24
25     void serialLog(const QString &text);
26
27 private slots:
28     void serialDataReceiver(QVector<std::complex<int>> data);
29
30     void on_serialBtn_clicked();
31     void on_adjustAxisCheckBox_toggled(bool value);
32     void on_plotTypeSelCombo_currentIndexChanged(int index);
33
34 private:
35     Ui::MainWindow *_ui;
36     serial::Serial _serial;
37
38     SerialWorker _serialWorker;
39     QVector<double> _xsamples;
40     QVector<double> _ysamples;
41 };
42
43 #endif // MAINWINDOW_H
```

```
1  #include "mainwindow.h"
2  #include "ui_mainwindow.h"
3
4  #include <QMetaType>
5
6  #include <exception>
7  #include <algorithm>
8  #include <iostream>
9
10 #define _USE_MATH_DEFINES
11 #include <math.h>
12
13 MainWindow::MainWindow(QWidget *parent) :
14     QMainWindow(parent),
15     _ui(new Ui::MainWindow),
16     _serial(),
17     _serialWorker(_serial)
18 {
19     // qt setup ui
20     _ui->setupUi(this);
21
22     // set default serial device
23     _ui->serialDevice->setText(
24 #ifdef _WIN32
25         "COM1"
26 #elif defined(__linux__)
27         "/dev/ttyUSB0"
```

```
#endif
    );

    // enable automatic axis scaling
    _ui->adjustAxisCheckBox->setChecked(true);
    _ui->setAxisBtn->setEnabled(false);

    // graph 0 on bottom and left axis
    _ui->plot->addGraph(_ui->plot->xAxis, _ui->plot->yAxis);

    // set graph data
    _xsamples.clear();
    _ysamples.clear();

    // graph 1 on top and right axis
    // _ui->plot->addGraph(_ui->plot->xAxis2, _ui->plot->yAxis2);

    // primary axis
    _ui->plot->xAxis->setLabel("Frequency");
    _ui->plot->yAxis->setLabel("Amplitude");

    _ui->plot->xAxis->setRange(0, 10000);
    _ui->plot->yAxis->setRange(0, 5);

    // secondary axis
    // _ui->plot->xAxis2->setLabel("");
    // _ui->plot->yAxis2->setLabel("");

    // set seconday axis to log
    // QSharedPointer<QCPAxisTickerLog> logTicker(new QCPAxisTickerLog);
    // _ui->plot->xAxis2->setTicker(logTicker);
    // _ui->plot->xAxis2->setScaleType(QCPAxis::stLogarithmic);
    // _ui->plot->xAxis2->setNumberPrecision(0);
    // _ui->plot->xAxis2->setNumberFormat("ebc");

    // _ui->plot->xAxis2->setRange(0, 1000);
    // _ui->plot->yAxis2->setRange(0, 5);

    // show seconday axis
    // _ui->plot->xAxis2->setVisible(true);
    // _ui->plot->yAxis2->setVisible(true);


    // register metatype to use on qt events (signals)
    qRegisterMetaType<QVector<std::complex<int>>>("QVector<std::complex<int>>");

    // serial device received data callback
    connect(
        &_serialWorker, SIGNAL(receivedData(QVector<std::complex<int>>)),
        this, SLOT(serialDataReceiver(QVector<std::complex<int>>))
    );

    // combobox changed index callback
    connect(_ui->plotTypeSelCombo,
        QOverload<int>::of(&QComboBox::currentIndexChanged),
        [=](int index){on_plotTypeSelCombo_currentIndexChanged(index);}
    );
}

MainWindow::~MainWindow()
{
    if (_serialWorker.isRunning()) {
        _serialWorker.requestInterruption();
        _serialWorker.wait();
    }

    if (_serial.isOpen()) {
        _serial.close();
    }
```

```
97
98      delete _ui;
99  }
100
101 void MainWindow::serialLog(const QString &text)
102 {
103     _ui->serialDisplay->append(text);
104 }
105
106 void MainWindow::serialDataReceiver(QVector<std::complex<int>> data)
107 {
108     // constants to convert from integer data to double
109     //
110     const double xConvert = 20000.0/128.0;
111     double yConvert;
112     //
113     const double yAdjustLowerFactor = 1.0;
114     const double yAdjustUpperFactor = 1.1;
115
116     // reset data
117     _xsamples.clear();
118     _ysamples.clear();
119
120     switch (_ui->plotTypeSelCombo->currentIndex()) {
121     case 0: // amplitude
122     case 2: // complex
123     case 3: // real
124     case 4: // imaginary
125         _ui->plot->yAxis->setRange(0, 5);
126         yConvert = 5.0/1024.0;
127         break;
128
129     case 1: // phase
130         _ui->plot->yAxis->setRange(-M_PI, M_PI);
131         yConvert = 2.0 * M_PI;
132         break;
133     }
134
135
136
137     // add data to plot
138     // the first frequency bucket and the second half cannot be used
139     for (int i = 1; i < data.size() / 2; i++) {
140         // log data, disabled for better performance
141         // serialLog(QString::number(data[i].real()) + "i" + QString::number(data[i].imag())
                );
142
143         double yvalue = 0;
144         switch (_ui->plotTypeSelCombo->currentIndex()) {
145         case 0:
146             // amplitude
147             yvalue = std::abs(data[i]);
148             break;
149         case 1:
150             // phase
151             yvalue = std::arg(data[i]);
152             break;
153         case 2:
154             // complex
155             // TODO
156             break;
157         case 3:
158             // real
159             yvalue = data[i].real();
160             break;
161         case 4:
162             // imaginary
163             yvalue = data[i].imag();
164             break;
```

```
165         }
166
167         _ysamples.append(static_cast<double>(yvalue * yConvert));
168         _xsamples.append(static_cast<double>((_ysamples.size() + 1) * xConvert));
169     }
170
171     // set scale axis
172     if (_ui->adjustAxisCheckBox->isChecked()) {
173         // only y axis needs adjustments
174         _ui->plot->yAxis->setRangeLower((
175                 *std::min_element(_ysamples.begin(), _ysamples.end())
176          ) * yAdjustLowerFactor);
177
178         _ui->plot->yAxis->setRangeUpper((
179                 *std::max_element(_ysamples.begin(), _ysamples.end())
180         ) * yAdjustUpperFactor);
181     }
182
183     // plot data
184     _ui->plot->graph(0)->setData(_xsamples, _ysamples, true);
185     _ui->plot->replot();
186 }
187
188 void MainWindow::on_serialBtn_clicked()
189 {
190     if (_serial.isOpen()) {
191         // close serial thread
192         if (_serialWorker.isRunning()) {
193             _serialWorker.requestInterruption();
194             _serialWorker.wait();
195         }
196
197         // close serial device
198         _serial.close();
199         serialLog("Serial device closed");
200
201         // change text and enable widgets
202         _ui->serialBtn->setText("Open");
203         _ui->serialDevice->setEnabled(true);
204         _ui->baudSpinBox->setEnabled(true);
205
206         return;
207     }
208
209     // open serial device
210     try {
211         _serial.setPort(_ui->serialDevice->text().toStdString());
212         _serial.setBaudrate(_ui->baudSpinBox->value());
213         _serial.open();
214         _serialWorker.start();
215
216         serialLog("Serial device opened");
217
218         // change text and disable widgets
219         _ui->serialBtn->setText("Close");
220         _ui->serialDevice->setEnabled(false);
221         _ui->baudSpinBox->setEnabled(false);
222     } catch (const serial::IOException &e) {
223         serialLog("Failed to open serial device");
224         serialLog("IOException:");
225         serialLog(e.what());
226     } catch (const std::exception &e) {
227         serialLog("Exception:");
228         serialLog(e.what());
229     }
230 }
231
232 void MainWindow::on_adjustAxisCheckBox_toggled(bool value)
233 {
```

```
234     _ui->setAxisBtn->setEnabled(!value);
235 }
236
237 void MainWindow::on_plotTypeSelCombo_currentIndexChanged(int index)
238 {
239     switch (index) {
240     case 0: // amplitude
241     case 2: // complex
242     case 3: // real
243     case 4: // imaginary
244         {
245             QSharedPointer<QCPAxisTickerFixed> fixedTicker(new QCPAxisTickerFixed);
246             _ui->plot->yAxis->setTicker(fixedTicker);
247         }
248         break;
249
250     case 1: // phase
251         {
252             QSharedPointer<QCPAxisTickerPi> piTicker(new QCPAxisTickerPi);
253             _ui->plot->yAxis->setTicker(piTicker);
254         }
255         break;
256     }
257 }
```

Gestione della risorsa seriale

```
1  #ifndef SERIALWORKER_H
2  #define SERIALWORKER_H
3
4  #include <QObject>
5  #include <QThread>
6  #include <QMutex>
7  #include <QVector>
8
9  #include <complex>
10
11 #include "serial/serial.h"
12
13 class SerialWorker : public QThread
14 {
15     Q_OBJECT
16 public:
17     SerialWorker() = delete;
18     explicit SerialWorker(serial::Serial &serial);
19     ~SerialWorker();
20
21     void run() override;
22
23 signals:
24     void receivedData(QVector<std::complex<int>> data);
25
26 private:
27     QMutex _mutex;
28     serial::Serial &_serial;
29 };
30
31 #endif // SERIALWORKER_H
```

```
1  #include "serialworker.h"
2
3  #include <QMutexLocker>
4
5  #include <string>
6  #include <complex>
7
8
9  SerialWorker::SerialWorker(serial::Serial &serial) :
10     _mutex(), _serial(serial)
```

```
{

}

SerialWorker::~SerialWorker()
{

}

void SerialWorker::run()
{
    while (!isInterruptionRequested()) {
        QMutexLocker locker(&_mutex);
        QVector<std::complex<int>> data;

        while (!isInterruptionRequested()) {
            // wait for serial buffer to accumulate at least 12 bytes
            while (_serial.available() < 14)
                if (isInterruptionRequested())
                    return;

            // read data
            QString str = QString::fromStdString(_serial.readline());

            // start of data
            if (str.trimmed() == "S") {
                data.clear();
            }
            // end of data
            else if (str.trimmed() == "E") {
                break;
            }
            // data
            else {
                QStringList valueStr = str.trimmed().split('i');
                if (valueStr.size() < 2)
                    continue;

                bool isInt[2];
                std::complex<int> value(
                    valueStr.at(0).toInt(&isInt[0]),
                    valueStr.at(1).toInt(&isInt[1])
                );

                // if (!isInt[0] || !isInt[1])
                //     continue

                data.push_back(value);
            }
        }

        emit receivedData(data);
    }
}
```