

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di laurea triennale in Informatica

**Post processing di dati radioastronomici orientato alla
rivelazione di segnali intelligenti**

Tesi di laurea in Fisica Generale

Relatore

Prof. SANDRO RAMBALDI

Correlatore

Ing. LUCA ZONI

Candidata

MONICA MARCHIONI

Sessione III – Marzo 2006
Anno Accademico 2004-2005

INDICE

1. INTRODUZIONE	- 5 -
1.1 Le antenne di Medicina	- 6 -
2. PROGETTO SETI	- 11 -
2.1 Introduzione	- 11 -
2.2 Progetto Seti	- 12 -
2.3 Un po' di storia	- 13 -
2.4 Equazione di Drake	- 16 -
2.5 Serendip	- 17 -
3. ANALISI DI SPETTRO	- 21 -
3.1 Segnali analogici e digitali	- 21 -
3.2 Banda di un segnale	- 22 -
3.2.1 <i>Larghezza di banda</i>	- 22 -
3.2.2 <i>Analisi della banda</i>	- 23 -
3.3 Trasformata di Fourier	- 25 -
3.4 Campionamento dei segnali	- 25 -
3.5 Teorema del campionamento	- 26 -
4. IMPLEMENTAZIONE	- 27 -
4.1 Acquisizione segnali	- 27 -
4.2 Segnali intelligenti	- 29 -

4.3	Fast Fourier Transform (FFT)	- 31 -
4.4	BoxCar	- 33 -
4.5	Interpolation	- 34 -
4.6	Thread	- 35 -
4.7	Tempo siderale	- 37 -
4.8	Hits	- 40 -
4.9	Matrice tridimensionale	- 41 -
5.	PRESTAZIONI E TEST	- 43 -
5.1	Utilizzo RAM	- 43 -
5.2	Utilizzo CPU	- 44 -
5.3	Tempi di elaborazione	- 45 -
6.	CONCLUSIONI	-47-
7.	BIBLIOGRAFIA	-49-

1. INTRODUZIONE

La tesi presentata descrive la progettazione e la realizzazione di un sistema software che analizza e elabora dei segnali provenienti dallo spazio per facilitare il riconoscimento di segnali radio extraterrestri di origine intelligente. Il meccanismo si fonda sul presupposto che una civiltà extraterrestre tecnologicamente evoluta voglia comunicare inviando segnali radio verso la Terra.

Il progetto è stato svolto presso l'istituto di Radioastronomia di Medicina dove è situata l'antenna Croce del Nord che fornirà i dati per le sperimentazioni.



Figura 1.1 L'antenna Croce del Nord e, in secondo piano, la parabola VLBI di Medicina (BO)

Introduzione

1.1 Le antenne di Medicina

La radioastronomia in Italia ha avuto inizio con l'inaugurazione il 24 ottobre 1964 del radiotelescopio “Croce del Nord” a Medicina (figura 1.1).

Un radiotelescopio è un telescopio che, a differenza di quelli classici che osservano la luce visibile, rileva onde radio emesse dalle varie radiosorgenti sparse per l'Universo generalmente tramite una grande antenna parabolica o più antenne collegate.

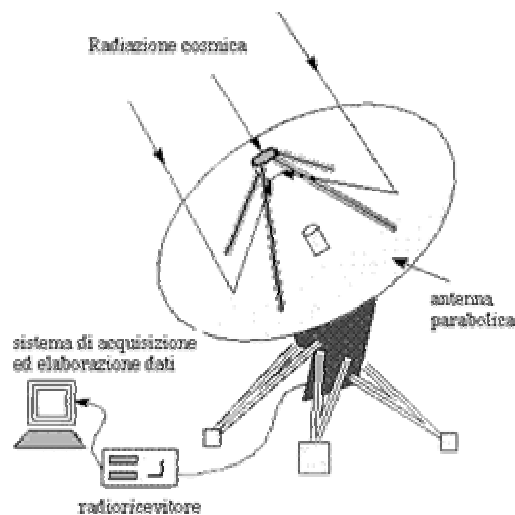


Figura 1.2 Meccanismo di ricezione dei segnali da parte di un radiotelescopio

L'Istituto di Radioastronomia di Medicina dispone di due antenne: la Croce del Nord e l'antenna VLBI.

La Croce del Nord è un interferometro formato da una serie di antenne minori disposte a croce e i cui specchi sono costituiti da

Introduzione

sottili fili metallici di una lunghezza totale di 1300 Km (figura 1.3).



Figura 1.3 Particolare dell'antenna Croce del Nord (sono visibili i fili metallici)

Esso è stato costruito in modo tale da ricevere le onde radio centrate alla frequenza di 408 MHz, corrispondente a una lunghezza d'onda di 73.5 cm, con una banda di circa 2.5 MHz che può essere estesa fino a 16 MHz senza perdite significative.

L'antenna è uno strumento di transito, vale a dire che si muove su un solo asse, regolabile unicamente in declinazione, che osserva quindi soltanto gli oggetti celesti che culminano sul meridiano celeste del luogo.

Il radiotelescopio è costituito da due serie di antenne: una posta in direzione Est-Ovest (E-W), l'altra in direzione Nord-Sud (N-S).

Il braccio E-W è costituito da un'unica antenna con uno specchio di forma cilindrico-parabolica lungo 564 m e largo 35 m. Lungo l'asse

Introduzione

focale, parallelo all'asse di rotazione, e a distanza di circa 20 m da esso, si trovano allineati 1536 dipoli (equidistanti di 36 cm) che trasformano le onde radio incidenti in tensioni elettriche misurabili.

Il braccio N-S è costituito da 64 antenne (anche queste di forma cilindrico-parabolica) lunghe 23.5 m e larghe 8 m, disposte parallelamente a 10 m l'una dall'altra. Sull'asse focale di ogni antenna, analogamente al braccio E-W, sono disposti 64 dipoli.

La forma parabolica dello specchio è stata scelta per le proprietà matematiche della parabola che permettono di far convergere sul fuoco tutte le radiazioni provenienti da una direzione parallela all'asse della parabola e di ottenere che tutti i punti di una superficie d'onda (punti in fase) provenienti da tale direzione si trovino ancora in fase nel fuoco.

La precisione meccanica della struttura non è da considerare in senso assoluto, ma relativamente alla lunghezza d'onda alla quale lo strumento lavora. Se la forma dello specchio non differisce da un profilo parabolico per più di un sedicesimo della lunghezza d'onda (tolleranza che deve comprendere gli effetti di deformazione meccanica, degli agenti atmosferici ecc.), si può ritenere che tali imperfezioni non influenzino il rendimento del telescopio.

Lavorando ad una lunghezza d'onda di 73.5 cm è stato possibile costruire lo specchio non a superficie completamente piena, ma utilizzando fili d'acciaio tesi a circa 2 cm di distanza l'uno dall'altro.

Il potere risolutore è di 4'-5' in direzione N-S e di 4' in direzione E-W. Tuttavia è molto sensibile in quanto la quantità di radiazione raccolta dalla Croce è proporzionale alla superficie dello specchio che è di circa 30000 mq. Tale caratteristica permette di misurare ed individuare sorgenti estremamente deboli e pertanto la Croce del Nord è particolarmente adatta per ricerche su sorgenti extragalattiche. L'antenna VLBI (figure 1.4 e 1.5) invece è un paraboloido di 32 m di

Introduzione

diametro con un subriflettore da 3 m. Essa si orienta su due assi motorizzati con motori antagonisti che consentono una precisione di 20" e per questo è detta "ad inseguimento".



Figura 1.4 Antenna VLBI di Medicina

Lavora su una dozzina di frequenze diverse comprese tra 1 e 43 GHz.



Figura 1.5 Antenna VLBI di Medicina

Introduzione

Essa viene utilizzata 4 volte all'anno per 20-25 giorni per il VLBI (Very Long Baseline Interferometry), un interferometro di enormi dimensioni che comprende radiotelescopi in tutto il mondo e compie studi in due direzioni fondamentali: l'osservazione qualitativa e quantitativa della deriva dei continenti per mezzo di triangolazioni con un oggetto conosciuto per mezzo di radiotelescopi posti su zolle diverse e la determinazione della posizione e delle proprietà fisico-chimiche di oggetti extraterrestri.



Figura 1.6 La Croce del Nord e l'antenna VLBI viste dall'alto

2. PROGETTO SETI

2.1 Introduzione

Osservando e studiando l'Universo l'uomo ha scoperto che il nostro Sole è solo una delle 200 miliardi di stelle della nostra galassia e che la via Lattea è una delle 100 miliardi di galassie presenti nell'Universo osservabile.



Figura 2.1 La galassia NGC 7331

Sapendo che i pianeti sono una parte del processo naturale di formazione delle stelle e che il cosmo abbonda degli elementi chimici che costituiscono le nostre cellule, è ragionevole domandarsi se esistono, oltre a noi, altre forme di vita intelligenti nell'Universo.

Progetto Seti

2.2 Progetti Seti

Il progetto SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence) è nato alla NASA negli anni 70 e ha il compito di cercare vita intelligente nelle profondità dello spazio.

L'idea su cui si basa questo programma è l'assunzione che eventuali forme di vita extraterrestri vogliono mettersi in contatto con noi.

Si ipotizza quindi che per questo scopo venga usato, dalla potenziale civiltà aliena, il mezzo di comunicazione più veloce ed efficace fino ad ora conosciuto e cioè un segnale radio. Le onde radio sono le uniche in grado di attraversare lo spazio ad una velocità pari a quella della luce e sono caratterizzate dalla loro frequenza, cioè il numero di onde per secondo. In particolare il tipo di segnale che si cerca è monocromatico cioè composto da una sola frequenza, molto facile da generare e facilmente distinguibile, con gli analizzatori di spettro, da altri segnali a larga banda di origine naturale provenienti dal cosmo.

Anche noi terrestri emettiamo radiazioni elettromagnetiche involontarie, infatti le onde elettromagnetiche a più alta frequenza emanate dalla Terra si espandono alla velocità della luce intorno al nostro pianeta. Queste emissioni radio, radar e televisive sono cominciate 50 anni fa e quindi riempiono una sfera intorno al nostro pianeta di circa 100 anni luce di diametro. Quindi una eventuale civiltà extraterrestre che utilizzi questa stessa tecnica di comunicazione, che desideri comunicare con altre civiltà e che si trovi ad una distanza inferiore a 100 anni luce, puntando un'antenna verso la Terra e sintonizzando il proprio ricevitore ad una frequenza giusta, potrebbe ricevere le nostre trasmissioni. Tutto questo è vero se il rumore di fondo dell'universo non supera il segnale che si propaga.

2.3 Un po' di storia

Nel 1959 i fisici Giuseppe Cocconi e Philip Morrison della Cornell University pubblicarono un articolo su *Nature* all'interno del quale suggerirono agli astronomi di puntare i loro radiotelescopi verso le stelle di classe solare e cercare eventuali segnali provenienti da civiltà extraterrestri alla frequenza di 1420 MHz. Questa è la linea di emissione radio dell'idrogeno neutro ed è molto importante in radioastronomia in quanto permette di studiare



Figura 2.2
Philip
Morrison



Figura 2.3
Giuseppe
Cocconi

l'estensione ed il moto della nostra galassia. Infatti nella via Lattea, le nubi di idrogeno sono elementi fondamentali della sua struttura e inoltre esso è l'elemento più abbondante dell'intero Universo. Una qualità che caratterizza le frequenze tra 1 a 10 GHz, e quindi anche quella dell'idrogeno, è la presenza di una bassa intensità del rumore di fondo proveniente dall'Universo. Questo permette comunicazioni a

lunghe distanze, facilmente riconoscibili.

Ipotizzarono dunque che una eventuale civiltà aliena con conoscenze minime di radioastronomia avrebbe scoperto questa emissione radio e quindi sarebbe stata in possesso di ricevitori dedicati all'analisi di questa frequenza.

Quindi, se una civiltà aliena volesse trasmettere un segnale facilmente riconoscibile ad un'altra potenziale civiltà, è molto

Progetto Seti

probabile che userebbe la frequenza a 1420 MHz, che, per la sua importanza, sarebbe un segno di riconoscimento universale.

A questo punto si aprivano due interessanti possibilità: una era riuscire ad intercettare segnali inviati nello spazio da altre civiltà, l'altra era ricevere segnali appositamente inviati da civiltà aliene desiderose di comunicare.

In seguito, all'inizio degli anni 60, un giovane Frank Drake decise di andare a lavorare al NRAO a Green Bank. Il suo primo progetto, chiamato Ozma, fu quello di puntare il telescopio verso determinate stelle allo scopo di scoprire eventuali segnali di chiara origine artificiale. Queste stelle erano due: Tau Ceti e Epsilon Erinadi, distanti circa 11 anni luce dalla Terra. Tramontata la prima, l'antenna veniva puntata verso la seconda. La frequenza scelta da Drake era 1420 MHz, non a causa dell'articolo di Cocconi e Morrison, ma per il fatto che allora al NRAO esistevano già ricevitori per lo studio della linea di emissione dell'idrogeno e quindi non era costretto a chiedere ulteriori fondi per la costruzione di apparecchi dedicati.



Figura 2.4
Frank Drake

Il progetto su cui lavorava Drake era assai modesto e non durò molto: l'analisi veniva fatta solo sui 1420 MHz ed il target erano solo due stelle. Si trattava comunque dell'inizio vero e proprio della ricerca SETI.

Le ricerche di Drake entusiasmarono altri astronomi e immediatamente gli astronomi russi portarono avanti ricerche simili, seguiti da molti altri che utilizzarono il tempo libero dei loro telescopi per puntare nelle direzioni concesse dalla posizione dell'antenna in quel momento. Non si trattava di progetti organizzati

Progetto Seti

sistematicamente: non erano sintonizzati alle frequenze migliori, non usavano i ricevitori adatti e non puntavano alle zone di cielo più interessanti.

Negli anni 70 la ricerca SETI riscosse interesse all'interno della NASA che cominciò ad esaminare possibili vie per la realizzazione di un proprio progetto. Il NASA SETI partì nel 1992 e fu portato avanti con strumenti incredibilmente all'avanguardia e con le migliori menti americane e straniere. La ricezione delle onde radio veniva eseguita attraverso il DSN (Deep Space Network) di Pasadena per una copertura dell'intera volta celeste, mentre sarebbero stati utilizzati i radiotelescopi più potenti del mondo per una simultanea ricerca puntata alle 1000 stelle di classe solare più vicine a noi.

Progetto Seti

2.4 Equazione di Drake

Mentre stava lavorando come radioastronomo all'osservatorio nazionale di radioastronomia a Green Bank, West Virginia, Frank Drake si pose la domanda di come si potesse riuscire a stimare il numero di civiltà tecnologicamente evolute che possono esistere nella nostra galassia.

Nel 1961 presentò l'equazione, ora conosciuta come equazione di Drake, così strutturata:

$$N = R * f(p) * n(e) * f(l) * f(i) * f(c) * \tau$$

Dove:

N è il numero di civiltà nella via Lattea le cui emissioni elettromagnetiche possono essere intercettate;

R è la stima della formazione delle stelle adatte per lo sviluppo di forme di vita intelligenti;

f(p) è la frazione di queste stelle con sistemi planetari;

n(e) è il numero di pianeti per ogni sistema solare avente un ambiente adatto alla vita;

f(l) è la frazione di pianeti adeguati sui quali di solito si forma la vita;

f(i) è la frazione di pianeti adeguati sui quali emerge vita intelligente;

f(c) è la frazione di civiltà che sviluppano una tecnologia che rilascia segnali della loro esistenza nello spazio che si riescono a intercettare;

τ è l'intervallo di tempo in cui questa civiltà emette segnali nello spazio.

2.5 Serendip

Il progetto SETI utilizza numerosi sistemi informatici per coadiuvare la sua ricerca.

Nel 1979 l'Università di Berkeley (California) lanciò un programma chiamato SERENDIP (Search for Extraterrestrial Radio from Nearby Developed Population). Da allora SERENDIP è in costante progresso e l'ultima versione è SERENDIP IV, un potentissimo sistema di analisi dati in tempo reale che è in grado di distinguere debolissimi segnali artificiali nascosti nella miriade di segnali radio, di origine naturale, provenienti dallo spazio.

La particolarità di questo sistema è che lavora in parallelo alle osservazioni in corso al radiotelescopio dove è stato installato senza alterarle. Esso cerca segnali radio di provenienza extraterrestre alla frequenza e puntamento richiesti in quel momento dal radioastronomo all'interno di un determinato programma osservativo, per cui non viene richiesto "tempo antenna" dedicato, raggiungendo due scopi: il primo è di non richiedere l'assegnazione del "tempo antenna" con conseguente abbattimento dei costi, mentre il secondo è di portare a quasi il 100% il tempo osservativo a disposizione. Inoltre il sistema non richiede nessun intervento da parte dell'operatore perché effettua un primo post-processing on line in maniera automatica.

SERENDIP IV è operativo anche nella stazione radioastronomica di Medicina che potrà così effettuare osservazioni finalizzate nell'ambito di una collaborazione con l'Università di Berkeley.

Progetto Seti

Al momento il sistema è installato presso l'Istituto di Radioastronomia del CNR di Bologna ed è collegato all'antenna VLBI da 32 m di diametro di Medicina.



Figura 2.5 Il sistema Serendip IV

Il sistema *Serendip IV* viene spesso utilizzato insieme a *Scan7*, un software di post-processing e di visualizzazione di dati radioastronomici acquisiti da *Serendip IV*. Il sistema è stato costruito in modo modulare per permettere una pipeline di elaborazione.

Progetto Seti

Allo stato attuale sono disponibili tre moduli di post-elaborazione:

- Vfilt: elimina le interferenze verticali, cioè quelle che interessano una frequenza costante in tutti gli istanti di tempo;
- Ofilt: elimina le interferenze orizzontali, cioè quelle che in un determinato istante di tempo interessano gran parte delle frequenze;
- Hough transform: individua i segnali soggetti ad effetto Doppler.

Scan7 prende i file binari generati dal sistema Serendip IV, li elabora attraverso i filtri appena descritti e produce dei file dove sono descritte le interferenze verticali, orizzontali e i segnali soggetti ad effetto Doppler.

3. ANALISI DI SPETTRO

3.1 Segnali analogici e digitali

In natura si possono trovare delle fonti di informazione solo di tipo analogico che, per potere essere trasmesse, registrate o elaborate in forma digitale, devono essere successivamente trasformate in forma numerica.

La differenza fondamentale tra questi due tipi di segnale, quello analogico e quello digitale, è che il primo, per il quale la variazione nel tempo risulta continua, assume infiniti valori in un intervallo limitato di R , mentre il secondo, per il quale il tempo avanza ad intervalli discreti, può assumere un insieme finito di possibili valori.

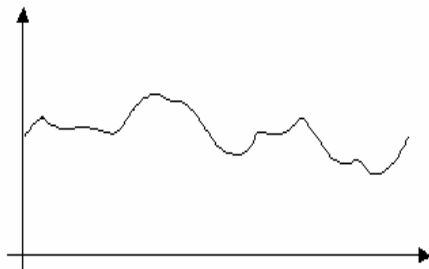


Figura 3.1a Segnale analogico

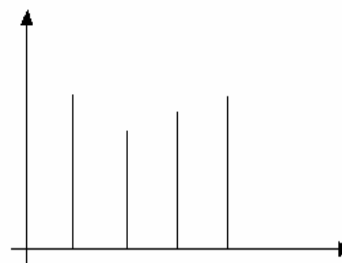


Figura 3.1b Segnale digitale

Analisi di spettro

I segnali digitali, essendo costituiti da simboli, offrono una flessibilità di elaborazione maggiore rispetto a quelli analogici e presentano le seguenti caratteristiche:

1. la trasmissione numerica offre una maggiore robustezza del messaggio anche quando il rumore di fondo che interferisce con esso è elevato.
2. la natura digitale del segnale permette l'utilizzo di numerose tecniche che garantiscono una maggiore affidabilità della comunicazione e permettono l'utilizzo di tecniche di compressione.
3. i segnali digitali possono essere acquisiti da un sistema informatico e quindi elaborati agevolmente tramite innumerevoli algoritmi numerici;
4. è possibile, attraverso tecniche di multiplexing basate per esempio sul tempo o sulla frequenza, trasmettere molti segnali digitali su uno stesso canale.

3.2 Banda di un segnale

3.2.1 Larghezza di banda

La larghezza di banda di un segnale è legata alla quantità di informazione che può essere trasmessa nell'unità di tempo.

Nel caso di segnali digitali l'ampiezza di banda si ricava misurando il numero di bit che possono essere trasmessi in un secondo.

3.2.2 Analisi della banda

Per analizzare la banda di un segnale analogico si può introdurre l'analisi di Fourier.

Fourier, matematico francese dell'800, dimostrò che una qualsiasi funzione $f(t)$ continua e periodica di periodo T :

$$f(t) = f(t + T)$$

può essere espressa come somma di un numero infinito di funzioni sinusoidali. Di seguito si riporta la forma complessa della serie di Fourier:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{i2\pi nt}{T}}$$

dove:

$$i = \sqrt{-1}$$

e i coefficienti sono calcolati attraverso la seguente relazione:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{\frac{-i2\pi nt}{T}} dt$$

C_n sono coefficienti complessi che descrivono le ennesime armoniche

Analisi di spettro

che hanno una frequenza multipla della frequenza fondamentale $1/T$.

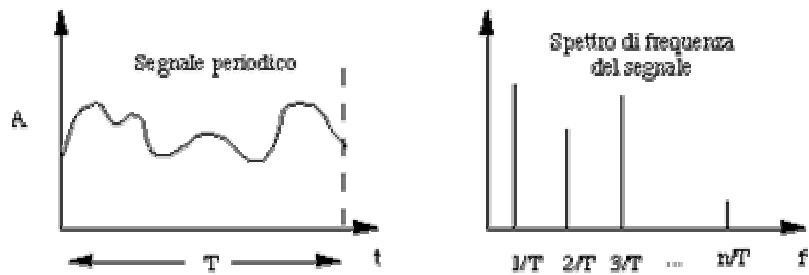


Figura 3.2 Un segnale e il suo spettro di frequenze

Grazie a questa importante scoperta è possibile analizzare anche funzioni molto complicate, perché è possibile scomporle in una serie di funzioni semplici.

Dunque, un segnale variabile nel tempo è di fatto approssimabile da una somma di funzioni sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e frequenza multipla della fondamentale. Un segnale è quindi caratterizzato, nel dominio delle frequenze, da un insieme di armoniche costituenti la trasformata di Fourier.

La banda di un segnale analogico è dunque misurata in modo indiretto attraverso l'intervallo di tali frequenze significative.

Diversi fattori influenzano le caratteristiche della banda:

- tanto più breve è la durata T del segnale, tanto più è alto il valore della frequenza fondamentale;
- tanto più velocemente nel tempo varia la $f(t)$, tanto più numerose sono le armoniche necessarie a descriverlo.

3.3 Trasformata di Fourier

Per segnali aperiodici si introduce la trasformata di Fourier.

Data una funzione aperiodica $x(t)$ reale e con t reale definita su \mathbb{R} , tale che esista e sia finito l'integrale:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt$$

è possibile calcolare la trasformata di Fourier della funzione $x(t)$ che risulta:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

dove f è la frequenza, t è il tempo e $x(t)$ è il segnale.

La trasformata di Fourier, che viene utilizzata per innumerevoli applicazioni scientifiche, permette di passare dal dominio temporale di un segnale a quello delle frequenze.

3.4 Campionamento dei segnali

Il campionamento di un segnale analogico è una tecnica che consiste nel valutare l'ampiezza dello stesso ad intervalli di tempo regolari.

L'informazione di tipo analogico viene tradotta in formato digitale per mezzo di appositi convertitori analogico/digitali (A/D) per potere essere elaborata tramite elaboratori numerici.

Analisi di spettro

Un convertitore analogico/digitale è un dispositivo in grado di eseguire due operazioni in sequenza: campionamento e quantizzazione.

Il teorema del campionamento o di Nyquist-Shannon fornisce la condizione necessaria affinché un segnale dopo il campionamento possa univocamente essere ritrasformato in analogico, tramite un convertitore digitale/analogico, riottenendo il segnale di partenza.

3.5 Teorema del campionamento

Il teorema del campionamento afferma che: dato un segnale con larghezza di banda finita e nota, la frequenza minima di campionamento di tale segnale deve essere almeno il doppio della massima frequenza dello stesso.

Più precisamente: se lo spettro $G(\omega)$ di una funzione del tempo $g(t)$ è zero per tutte le frequenze al di sopra della frequenza \bar{f} , la $g(t)$ è univocamente determinata specificando i suoi valori nei punti spazati almeno di $\frac{1}{2\bar{f}}$ sec, cioè campionandola ad una frequenza $f_c = 2\bar{f}$.

Sia $g(t)$ una funzione del tempo il cui spettro di frequenza è limitato in banda, cioè $G(\omega)=0$ fuori dall'intervallo $(-\omega_c, \omega_c)$ dove ω è la pulsazione, legata alla frequenza da $\omega=2\pi f$. Il teorema del campionamento asserisce che la $g(t)$ è univocamente ricostruibile noti i valori campionati a frequenza almeno doppia della massima frequenza contenuta nello spettro. Il periodo di campionamento deve essere dunque inferiore $T_c = \frac{1}{2\bar{f}}$.

4. IMPLEMENTAZIONE

L'intero progetto è stato realizzato utilizzando il linguaggio di programmazione ANSI C sotto piattaforma Linux.

E' stato implementato un algoritmo che, dati 4096 spettri in memoria precedentemente acquisiti, permetta, dopo averli elaborati tramite diverse funzioni, di trasformarli in un formato appropriato per riconoscere eventuali segnali extraterrestri provenienti da forme di vita intelligente.

4.1 Acquisizione segnali

Gli spettri dei segnali vengono acquisiti in continuo ed ogni due secondi viene generata dal software di acquisizione di una scheda hardware una matrice che viene memorizzata in una zona di memoria dalla quale poi verrà letta.

La scheda hardware possiede due ADC (Analog to Digital Converter) da 105 MSPS e riesce quindi a campionare una banda di 100 MHz. I dati campionati vengono passati ad un FPGA (Field-Programmable Gate Array) che è un dispositivo contenente componenti logici programmabili interconnessi che permettono di implementare complesse funzioni combinatorie. In questo caso su di esso è stato implementato un banco di filtri polifase. I dati vengono poi passati ad un acceleratore PCI che si occupa di gestirne il trasferimento verso la memoria del calcolatore. Vista la presenza di un FPGA totalmente riprogrammabile, la scheda è molto flessibile e può essere programmata a seconda dell'applicazione.

Implementazione

La Croce del Nord riceve le onde radio centrate alla frequenza di 408 MHz e possiede una larghezza di banda pari a 16 MHz, quindi riesce ad acquisire le frequenze tra 400 MHz e 416 MHz.

Si presuppone che la potenziale civiltà aliena mandi un segnale monocromatico, quindi a banda stretta, per cui serve una risoluzione elevata per rilevarlo. In questo caso è stata usata una risoluzione di 0.5 Hz.

La scheda di acquisizione riesce a gestire fino a 8192 canali e, siccome si vuole avere una risoluzione di 0.5 Hz, i segnali vengono acquisiti a gruppi di 4096. Infatti, se si divide la larghezza di banda dell'antenna, cioè 16 MHz, per il numero di canali della scheda, cioè 8192, e per 0.5 Hz di risoluzione, si ottiene 4096.

Per memorizzare i dati da elaborare, si è pensato di creare una matrice per ogni gruppo di 4096 spettri dove ogni colonna è uno spettro e ogni riga corrisponde a un canale e contiene l'andamento temporale del segnale di quel canale. (figura 4.1).

Ogni elemento della matrice è un numero complesso formato da due floating point che rappresentano l'ampiezza e la fase del segnale.

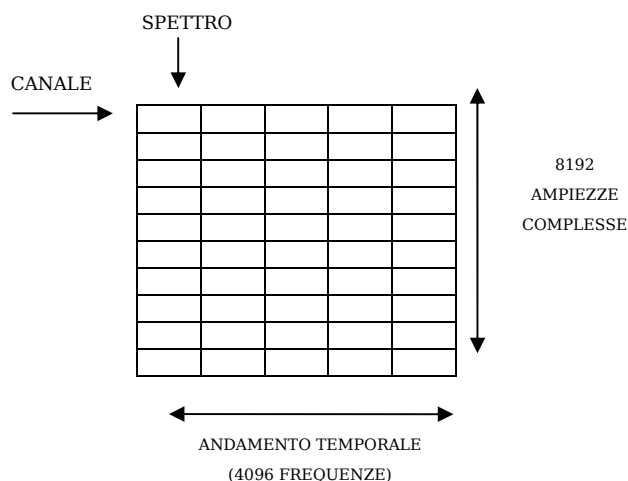


Figura 4.1 Matrice contenente 4096 spettri ognuno avente 8192 numeri complessi

4.2 Segnali intelligenti

Si suppone che esista una vita intelligente su un pianeta che vuole comunicare mandando segnali radio verso la Terra. Questo pianeta in un preciso istante si troverà nel campo di vista (“field of view”) dell’antenna Croce del Nord. A causa della rotazione della Terra e ricordando che Croce del Nord è un’antenna di transito, il segnale radio proveniente dallo stesso pianeta si ripresenterà con la stessa frequenza il giorno dopo nel medesimo intervallo di tempo siderale. Per ciascun giorno si raccolgono i dati relativi agli stessi istanti temporali e si convertono in un apposito formato in modo da poterne visualizzare il grafico. Sul grafico così ottenuto si potranno quindi vedere delle linee continue e si riusciranno a distinguere le interferenze e i segnali artificiali dei satelliti per il fatto che questi saranno visualizzati come linee continue tutti i giorni in qualsiasi istante, mentre, se il segnale proviene da un pianeta alieno, esso verrà individuato da una linea esattamente lunga due secondi continua solo negli istanti temporali in cui questo si trova nel campo di vista dell’antenna. Come si può notare dalla figura 4.2, nello stesso giorno al variare dei secondi le interferenze e i segnali non significativi sono rappresentati con delle linee continue in tutti gli istanti temporali, mentre il segnale intelligente quando esce dal campo di vista dell’antenna non si riesce più a visualizzare. Esso sarà di nuovo visibile solo il giorno dopo nel medesimo istante temporale.

Implementazione

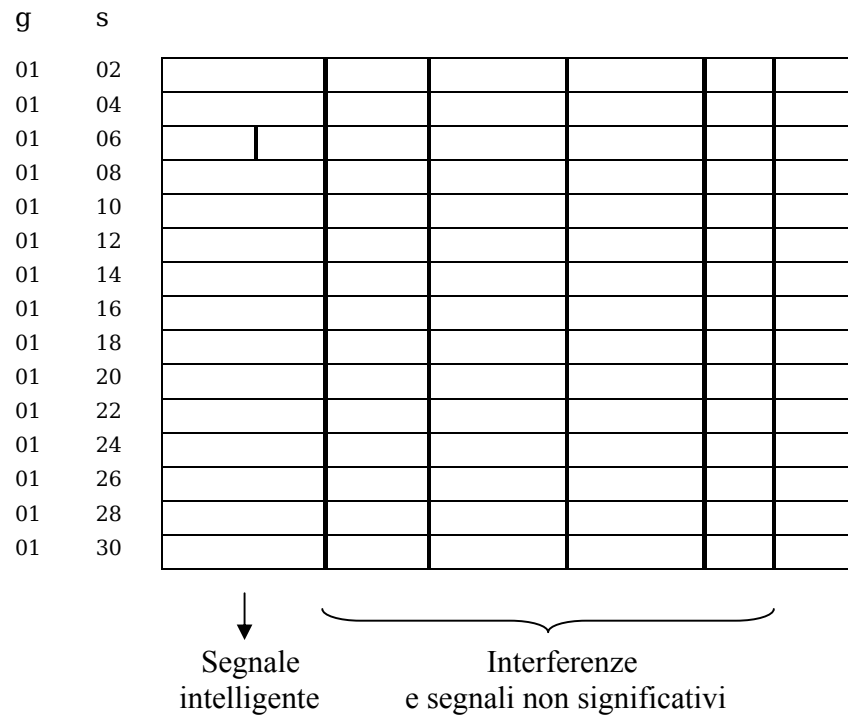


Figura 4.2 Grafico dei dati del giorno 01 al variare dei secondi

4.3 Fast Fourier Transform (FFT)

```
int applicaFFT(float **spettro);
```

La trasformata di Fourier è una funzione matematica che serve per convertire i dati dal dominio del tempo al dominio della frequenza e viceversa.

La conversione tempo - frequenza può essere ottenuta tramite l'applicazione di una trasformata discreta di Fourier (DFT).

Supponendo che N siano i punti di cui si vuole calcolare la DFT e definendo W come il numero complesso:

$$W = e^{2\pi i / N}$$

il numero di computazioni che servono per calcolare la DFT di N punti è:

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} h_k .$$

La moltiplicazione tra il vettore h_k e la matrice $W^{n k}$ richiede N^2 moltiplicazioni complesse.

La trasformata veloce di Fourier (FFT) è un algoritmo sviluppato negli anni per il calcolo veloce della DFT, grazie alla quale si ha una riduzione rilevante del numero di operazioni da compiere nel calcolo della DFT. La FFT riduce il numero di computazioni per N punti da N^2 a $N \log_2 N$.

Nel 1942 Danielson e Lanczos mostrarono che una DFT di lunghezza N può essere riscritta come la somma di due DFT, ognuna di lunghezza N/2. Una delle due DFT in cui è scomposta la DFT originaria è formata dai numeri dispari dei punti N originari e l'altra dai numeri pari. Questo algoritmo può essere usato ricorsivamente. Esso richiede che gli N numeri passati come input siano una potenza di due.

Implementazione

Nel caso di questa tesi ogni riga che viene passata come input alla Fast Fourier Transform è costituita da 4096 numeri complessi.

Quindi una volta caricati tutti i dati degli spettri, si procede a calcolare la Fast Fourier Transform su ogni singola riga della matrice per studiare il segnale nel dominio delle frequenze. A tale scopo è stata utilizzata una funzione per il calcolo della trasformata di Fourier su numeri complessi che utilizza il lemma di Danielson-Lanczos ed è tratta dal libro [PTVF88].

Per testare la funzionalità della trasformata di Fourier è stato generato un segnale fittizio per ogni riga della matrice. Il segnale è stato creato come somma di sinusoidi di ampiezze e fase perfettamente note. Su ogni riga è stata poi eseguita la Fast Fourier Transform e si è verificato che i risultati della FFT fossero compatibili con il segnale generato.

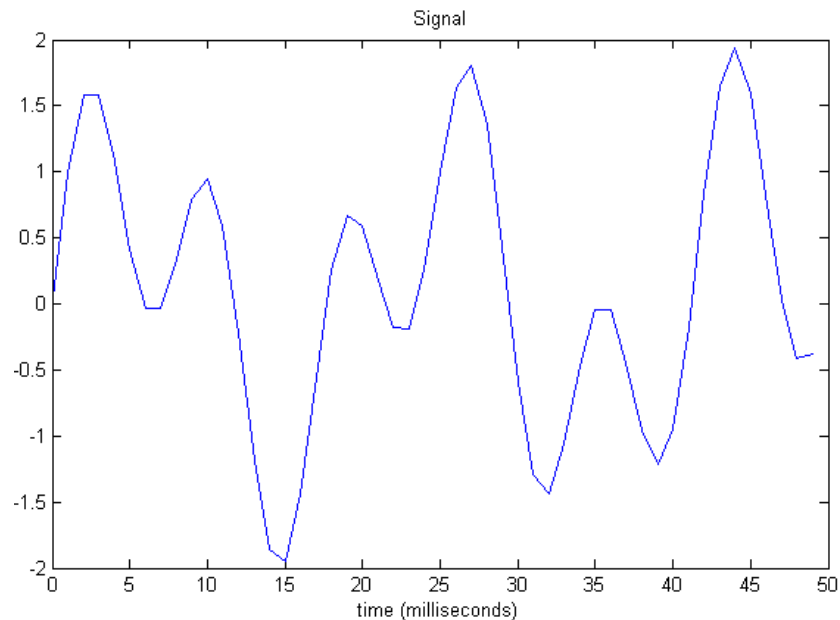


Figura 4.3 Segnale fittizio generato per testare la funzionalità e l'efficienza della FFT

Implementazione

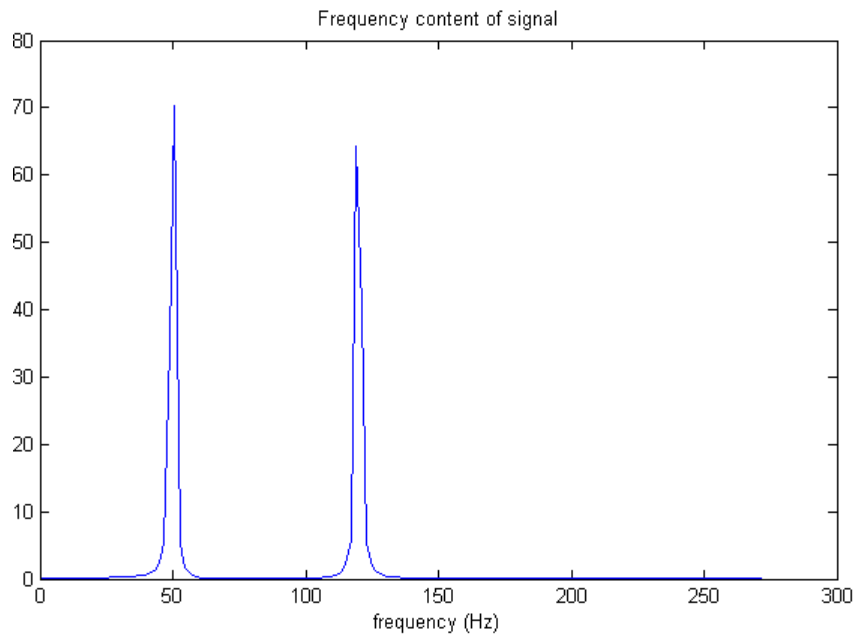


Figura 4.4 FFT sul segnale di figura 4.3

4.4 BoxCar

```
double boxCar (float *spettroR);
```

I numeri complessi della matrice precedentemente creata sono stati poi allocati in un vettore unico ottenuto ponendo adiacenti le righe della matrice alle quali era stata applicata la trasformata di Fourier e calcolando per ognuno di essi il quadrato della sua parte reale sommato al quadrato della sua parte immaginaria in modo da ottenerne la potenza.

Siccome ci potrebbe essere la necessità di spedire i risultati finali in

Implementazione

rete, si è pensato di abbassare il numero dei bit tramite una funzione che calcola la media dei numeri a gruppi di 256 e successivamente per ogni numero, restituisce lo stesso a cui è stata sottratta la media del gruppo a cui apparteneva.

4.5 Interpolation

```
double interpolation(float *spettroR,  
double *soglia);
```

Sono stati considerati solo i valori ritenuti “rilevanti” che da questo momento in avanti verranno chiamati “hit” dove con questo termine si intendono i valori al di sopra di una determinata soglia.

A tale scopo è stata creata una funzione che implementasse la media a partire dalle medie precedentemente ottenute suddividendo i numeri in gruppi di 256 elementi.

Infine per ottenere la soglia che servirà per individuare gli “hit”, si è moltiplicata la media calcolata per una costante modificabile. Quest’ultima è un coefficiente di taratura che dipende dalle caratteristiche fisiche dell’apparato ricevente.

4.6 Thread

Analizzando il codice implementato e osservando i test eseguiti mostrati nel prossimo capitolo, si è riscontrato come l'applicazione sia CPU-bound. Inoltre si è considerata la tipologia di hardware sul quale verrà eseguito il software realizzato. I computer che eseguiranno il codice saranno multiprocessore e quindi sviluppare un sistema single-threaded non sfrutta al meglio le potenzialità del sistema informatico a disposizione. Visti gli scopi del progetto e la necessità di avere tempi di calcolo ristretti, si è deciso di modificare il codice delle funzioni *applicaFFT*, *boxCar* e della funzione che trasforma la matrice in un unico vettore di spettri, che si prestano bene per essere eseguite tramite l'uso di thread.

I sistemi multiprocessore garantiscono la possibilità di eseguire numerose operazioni in parallelo permettendo l'esecuzione di più linee di controllo.

Un thread è l'unità di base d'uso della CPU e comprende un identificatore di thread, un contatore di programma, un insieme di registri ed uno stack. Ad un processo possono essere associati diversi thread che condividono la sezione di codice, la sezione dei dati e altre risorse di sistema. Un processo tradizionale è composto da un unico thread, mentre un processo multithread è in grado di svolgere più compiti in modo concorrente.

I vantaggi della programmazione multithread aumentano notevolmente nelle architetture con più unità di elaborazione, dove i thread si possono eseguire in parallelo (uno per ciascuna unità di elaborazione). In un'architettura con una singola unità di elaborazione invece, i thread si avvicinano rapidamente nell'uso

Implementazione

della CPU creando l'illusione di un'esecuzione parallela, ma in realtà si esegue un unico thread alla volta.

Ci sono varie librerie per creare thread; in questo progetto si è utilizzata la libreria Pthread, dove con questo termine ci si riferisce allo standard POSIX (IEEE 1003.1c) che definisce l'API per la creazione e la sincronizzazione dei thread.

Le funzioni implementate distribuendo l'elaborazione tra alcuni thread si prestano bene a questa ottimizzazione perché eseguono una serie di calcoli in sequenza su dati diversi. In questo modo è possibile dividere il carico di lavoro tra thread senza nessun aggravio di sincronizzazione perché essi agiscono su dati diversi ed indipendenti. Infatti la funzione *applicaFFT* deve eseguire la Fast Fourier Transform su ogni riga della matrice contenente gli spettri. La matrice è implementata come vettore di puntatori, quindi ogni riga è un vettore indipendente e i diversi thread possono dunque lavorare in parallelo senza problemi relativi alla sincronizzazione.

Un discorso analogo vale per la funzione che trasforma la matrice in un unico vettore in quanto viene fatta agire una riga per volta in modo da creare tanti vettori indipendenti quante sono le righe che compongono la matrice.

Per quanto riguarda la funzione *boxCar*, essa opera su blocchi di 256 numeri in modo indipendente. In questo modo è possibile parallelizzare l'esecuzione senza problemi.

Il numero di thread da creare è impostabile dall'utente per permettere di ottimizzare i calcoli a seconda del computer nel quale il programma viene eseguito.

4.7 Tempo siderale

```
struct SidTime siderealTime(int aa, int mm,  
int gg, int hh, int min, int ss);
```

Il giorno è un'unità fondamentale che rappresenta l'intervallo di tempo impiegato dalla Terra a compiere una rotazione su se stessa.

In astronomia si distinguono un giorno siderale e un giorno solare, dove il primo è l'intervallo di tempo che separa due passaggi di una medesima stella sul meridiano di un dato luogo, mentre il secondo è l'intervallo di tempo che intercorre tra due successive culminazioni del Sole a uno stesso meridiano.

In altre parole, il giorno solare è il tempo impiegato dal Sole a compiere un giro apparente di 360 gradi nel cielo, come effetto della rotazione terrestre. Con questo sistema si presenta il problema che la Terra non compie un giro di 360 gradi in un giorno solare in quanto, essendo in orbita intorno al Sole, nel corso di un giorno si muove di circa un grado lungo la propria orbita ($360 \text{ gradi} / 365.25 \text{ giorni per un'orbita completa} \approx \text{un grado al giorno}$) e quindi deve ruotare di 361 gradi per fare sembrare che il Sole abbia compiuto un giro di 360 gradi nel cielo. Di conseguenza in astronomia si usa il giorno siderale che elimina la complicazione dell'orbita terrestre intorno al Sole e si basa solo su quanto tempo la Terra impiega a ruotare di 360 gradi rispetto alle stelle. La differenza tra giorno solare e giorno siderale si può visualizzare in figura 4.5.

Implementazione

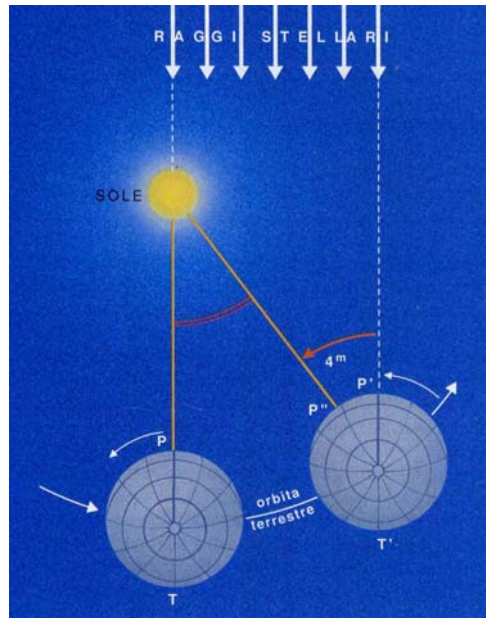


Figura 4.5 Rappresentazione schematica della differenza tra giorno solare e giorno siderale

In questo progetto si è pensato quindi di utilizzare il tempo siderale, ma, siccome quando vengono passati in memoria i 4096 spettri vengono anche passati i secondi solari è stata creata una funzione per la conversione in giorno, mese, anno, ore, minuti e secondi siderali.

A tale scopo è stato utilizzato l'algoritmo di seguito descritto: denotando con A, M e G rispettivamente l'anno solare, il mese solare e il giorno solare, si deve dapprima calcolare il giorno giuliano. Se il mese è gennaio o febbraio ad A viene sottratto 1 e ad M viene sommato 12.

A questo punto il giorno giuliano GG è dato da:

$$GG = b + c + d + G + 1720994.5$$

Implementazione

dove G è il giorno solare che si vuole convertire in siderale;

$$b = 2 - \text{int} \left(\frac{A}{100} \right) + \text{int} \left[\text{int} \left(\frac{A}{100} \right) / 4 \right];$$

$$c = \text{int} (365.25 \cdot A);$$

$$d = \text{int} (30.6001 \cdot (M+1));$$

int è la parte intera.

Ora si può passare al calcolo dell'ora siderale:

$$\text{ora} = \frac{((\text{secondi} / 60) + \text{min uti}) / 60 + \text{ore} - \text{fuso}}{24}$$

dove ora è l'ora siderale che si vuole calcolare;

secondi sono i secondi solari che si vogliono convertire in siderali;

minuti sono i minuti solari che si vogliono convertire in siderali;

ore è l'ora solare che si vuole convertire in siderale;

fuso è la differenza di orario da Greenwich che è di un'ora dall'Italia.

Siccome questi dati vengono passati al programma solo in tempo solare e mai in quello legale il fuso è sempre uguale a 1.

La longitudine del luogo dove vengono acquisiti i segnali deve essere divisa per 360 e si deve tenere presente che il suo segno è positivo verso est e negativo verso ovest.

Si ottiene quindi:

$$\text{Tempo siderale} = \text{ora} + \text{longitudine} + T_3$$

dove T_3 dipende dal giorno giuliano secondo il seguente algoritmo:

$$T_1 = \frac{GG - 2451545}{36525};$$

$$T_2 = 1.07759259 \cdot 10^{-6} - T_1 \cdot 7.17593 \cdot 10^{-11};$$

$$T_3 = 0.2790572732639 + T_1 \cdot (100.002139037801 + T_1 + T_2).$$

Nel caso in cui la prima cifra del tempo siderale venisse diversa da 0, si deve cancellare. Se invece il tempo siderale risultasse negativo ad esso si deve sommare 1.

Implementazione

4.8 Hits

```
int hits (float *spettroR, int anno, int mese,  
int giorno, int secondi, double soglia);
```

E' stata implementata una funzione che, preso come argomento il vettore con tutte le potenze, restituisca un file di testo contenente solo gli hit di quel vettore di spettri, che si ricorda essere relativo ai 4096 spettri acquisiti dalla scheda hardware nell'intervallo di 2 secondi.

Siccome in un giorno solare vi sono 86400 secondi, per ciascun giorno vengono creati 43200 file. Per una migliore gestione di tutti i file creati si è pensato di creare una cartella denominata "hits" a sua volta contenente cartelle, una per ogni mese, aventi al loro interno i file di quel mese. Il nome di queste cartelle è composto dall'anno e dal mese che si sta considerando. Come precedentemente illustrato, per calcolare un hit si è guardato se il numero in esame risulta maggiore della soglia calcolata. In tal caso, esso viene stampato su file insieme al numero del canale nel quale si è verificato.

Il file restituito da questa funzione è formato da un header e dai dati.

Un header è del tipo: gg, mm, aaaa, hh, min, ss, dove gg è il giorno, mm è il mese, aaaa è l'anno, hh sono le ore, min i minuti e ss i secondi siderali. I dati del file invece sono gli hit con il rispettivo numero del canale.

Per quanto riguarda il nome del file, esso è composto dal giorno, mese, anno, ore, minuti e secondi siderali.

Per calcolare se un anno è bisestile o no, si è utilizzato il seguente criterio: sono bisestili gli anni che sono divisibili per 4, ma se l'anno è divisibile per 100 e non per 400, allora non è considerato bisestile.

Lo scopo della creazione di un file per ogni vettore di spettri è quello

Implementazione

di utilizzarli per vederne il grafico tramite alcuni programmi di visualizzazione, tra cui lo *Scan 7* di Serendip.

Scan 7 è un programma di post-processing che prende i dati dallo spettrometro Serendip e, tramite opportuni algoritmi, riesce a separare i file che al loro interno contengono la presenza dell'effetto Doppler da quelli che non la contengono.

4.9 Matrice tridimensionale

```
int matrix(char *str_dir, int anno, int mese);
```

Alla fine di ogni mese si ottengono 43200 file moltiplicati per il numero di giorni in quel mese.

E' stata creata una matrice tridimensionale per ogni mese avente sulle x gli hit dei vari spettri, sulle y i giorni del mese e sulle z le coppie di secondi che ci sono in un giorno.

Questa matrice è un file di testo contenente un insieme di record, dove ogni record è uno dei file contenenti gli hit precedentemente creati. Inizialmente si era pensato di realizzare tale matrice denotando con 1 i canali dove si è verificato un hit e con 0 quelli dove l'hit è assente, ma questo richiedeva un'occupazione di memoria dell'ordine di 5 TeraByte che al giorno d'oggi non è ancora una quantità normalmente disponibile nelle normali workstation. Inoltre la matrice è sparsa e quindi contiene per la maggior parte degli 0. Si è deciso quindi di memorizzare la matrice eliminando gli 0 e mantenendo solo i dati importanti, quindi memorizzando nei file delle triple <tempo siderale, canale, ampiezza dell'hit>.

Implementazione

Per una migliore gestione delle matrici è stata realizzata una directory denominata “matrix” contenente le matrici di ogni mese.

Ogni matrice così creata verrà utilizzata per ulteriori sviluppi di questo progetto e, più precisamente, ad essa verranno applicati algoritmi di clustering tridimensionali per definire la rivelazione di segnali radio provenienti da forme di vita extraterrestri.

5. PRESTAZIONI E TEST

Per analizzare le prestazioni del sistema software realizzato sono stati svolti alcuni test. In particolare si è voluto valutare l'utilizzo di risorse da parte del sistema ed i tempi necessari per svolgere le elaborazioni. I primi test sono stati eseguiti con il codice in versione single-threaded, mentre gli ultimi con il codice multi-threaded nel quale è stato possibile apprezzare il miglioramento portato nel sistema.

5.1 Utilizzo RAM

Il sistema elabora una serie di dati che devono essere caricati in memoria principale per essere elaborati. I dati sono 4096 spettri ognuno formato da 8192 numeri complessi, ciascuno dei quali è quindi composto da una parte immaginaria ed una reale. In questo modo ogni numero è rappresentato da 2 floating point a singola precisione.

L'occupazione di memoria del programma realizzato è dunque di circa 256 Mbyte. Infatti il totale dei numeri da elaborare è pari a $8192 \cdot 4096$ e, poiché ognuno di essi occupa 8 byte di memoria, si devono memorizzare 268435456 Byte.

Le operazioni svolte sui dati, descritte nel precedente capitolo, non comportano un aggravio significativo alla memoria occupata perché sono stati implementati ed utilizzati degli algoritmi che lavorano "in place", dove con questo termine si intende quella categoria di algoritmi che permette di elaborare i dati sfruttando la memoria

Prestazioni e test

occupata dagli stessi.

5.2 Utilizzo CPU

Per determinare l'utilizzo della CPU verranno in questo paragrafo stimati i costi computazionali delle varie operazioni che devono essere svolte sui dati.

Si rammenta che la trasformata di Fourier deve essere eseguita su ogni riga della matrice. La sua esecuzione, attraverso l'algoritmo della Fast Fourier Transform (FFT), ha un costo computazionale che si può stimare in $O(N \log_2(N))$ dove N è il numero di punti in ogni riga. Quindi l'applicazione della trasformata su tutta la matrice ha un costo computazionale di $O(KN \log_2(N))$ dove K è il numero di righe.

La funzione *boxcar* ha un costo computazionale che si può stimare in $2 \theta(KN)$. Infatti ogni numero deve essere elaborato una volta per determinare la media a gruppi di 256 elementi e un'altra per sottrarre ad ogni numero la media del gruppo al quale appartiene.

La funzione *interpolation* calcola la media di tutti i valori contenuti nella matrice. Questa operazione viene eseguita con un tempo computazionale costante, infatti sfrutta i valori già calcolati dalla *boxcar*.

Il costo computazionale totale delle operazioni descritte in precedenza è in conclusione $O(KN \log_2(N)) + 2 \theta(KN)$.

5.3 Tempi di elaborazione

Il programma è stato testato su dei dati fittizi per verificare i tempi di elaborazione. I test sono stati eseguiti su un computer biprocessore con hyperthread dotato di due processori Xeon da 2.60 GHz e di una RAM da 2GByte.

I test eseguiti utilizzando il codice single-threaded e successivamente quello multi-threaded hanno riportato i seguenti risultati. Per quanto riguarda l'esecuzione single-threaded, i tempi di elaborazione di 4096 spettri, ognuno formato da 8192 numeri, sono dell'ordine di 18.2 secondi. Utilizzando due thread, invece, i tempi di elaborazione per gli stessi dati sono in media di 9.8 secondi.

Confrontando i tempi dell'esecuzione single-threaded con quelli dell'elaborazione multi-threaded degli stessi dati, si può notare che i test svolti con due thread impiegano circa la metà del tempo di esecuzione di quelli eseguiti con un solo thread.

Questo è il risultato atteso infatti l'utilizzo dei thread in questo caso specifico non porta ad un overhead dovuto alla sincronizzazione tra i thread. In questo test è stato scelto di eseguire il programma utilizzando due thread per sfruttare a pieno le capacità del computer biprocessore usato.

6. CONCLUSIONI

La tesi ha avuto come scopo la realizzazione di un meccanismo per elaborare i dati provenienti dall'antenna Croce del Nord per facilitare il riconoscimento di eventuali segnali intelligenti di origine extraterrestre.

Fino ad ora solo l'antenna parabolica VLBI a Medicina permetteva la raccolta di dati per il progetto SETI utilizzando il sistema Serendip ad essa collegato.

Si è quindi pensato che fosse utile realizzare un software che servisse allo stesso scopo per la Croce del Nord, dato che è già disponibile il meccanismo hardware di acquisizione dei segnali che provengono da questa antenna.








Il sistema realizzato per essere utilizzabile deve avere dei tempi di elaborazione molto bassi. Dai test si evince come il sistema abbia buone prestazioni grazie alla parallelizzazione della computazione.










Il progetto così sviluppato faciliterà il futuro sviluppo di software per l'identificazione di segnali di interesse attraverso tecniche di clustering di dati e di pattern recognition su spazi tridimensionali.

Di seguito le parole dell'ingegnere Stelio Montebugnoli, responsabile della stazione radioastronomica di Medicina:

“Enormi saranno i problemi tecnici da affrontare e risolvere, ma questa è un' avventura che abbiamo il dovere di intraprendere tenendo soprattutto presente che, nel caso non si rivelasse nulla, "l'assenza dell'evidenza" potrebbe non significare comunque "l'evidenza dell'assenza".” [Mon]

BIBLIOGRAFIA

-  [Bon] Bongiovanni G., *Il livello fisico*,
[http://www.disi.unige.it/person/BelleG/Reti99/Appunti/
Appunti1/Cap2a/Cap2a.html#livello_fisico](http://www.disi.unige.it/person/BelleG/Reti99/Appunti/Appunti1/Cap2a/Cap2a.html#livello_fisico)
-  [Bos] Boschini L., *Effemeride*,
<http://www.vialattea.net/esperti/astro/effemeride/effemeride.htm>
-  [BPS02] Bramanti M., Pagani C. D., Salsa S.,
Matematica calcolo infinitesimale e algebra lineare, 6^a
Edizione, Bologna, Zanichelli, 2002
-  [CLR90] Cormen T. , *Leiserson C., Rivest T.,
Introduction to Algorithms*, The MIT Press, 1990.
-  [FGP77] Ficarra A., Gandolfi E., Perugini F., *Il
radiotelescopio Croce del Nord*, *Giornale di Astronomia*,
1977
-  [For] Forni I., *La storia del progetto S.E.T.I.*,
<http://www.astrofili.org/astroemag/num8/storiaseti/>
-  [Mar] Marshall A.D. , *Programming in C UNIX System
Call and Subroutines using C*,
<http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/C/CE.html>

-  [Mon] Montebugnoli S., *Seti in Italia*, <http://www.seti-italia.cnr.it/Page01-Frame%20Ita.htm>
-  [PTVF88] Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B., *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, USA, Cambridge University Press, 1988
-  [Riz64] Augé, Gillon, Hollier-Larousse, Moreau & C., *Enciclopedia Universale*, Milano, Rizzoli Editore, 1964
-  [Seti06] Seti Institute, *Drake Equation*, 2006, <http://www.seti.org/site/pp.asp?c=ktJ2J9MMIsE&b=179073>
-  [SGG02] Silberschatz A., Galvin B.P., Gagne G., *Sistemi Operativi*, 6^a Edizione, Milano, Pearson Education Italia S.r.l., 2002
-  [Wei99] Weisstein E.W., *Fast Fourier Transform*, 1999, <http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>
-  [Wei99] Weisstein E.W., *Fast Fourier Transform*, 1999, <http://mathworld.wolfram.com/DiscreteFourierTransform.html>
-  [Wik] Wikipedia, *Tempo siderale*, http://it.wikipedia.org/wiki/Tempo_siderale
-  [Zon04] Zoni L., *Banco di filtri polifase per ricerche radioastronomiche*, 2004