

Ministero dell'Università
e
della ricerca scientifica
e tecnologica

Dipartimento per la programmazione il coordinamento
e gli affari economici – SAUS

Resoconto finale del Progetto di rilevante interesse nazionale

*Sviluppo di metodologie
per la caratterizzazione metrologica di apparati
per sistemi di telecomunicazione
di terza generazione*

a cura di Roberto Lojacono



Copyright © MMIV
ARACNE EDITRICE S.r.l.

www.aracne-editrice.it
info@aracne-editrice.it

00173 Roma
via Raffaele Garofalo, 133 A/B
(06) 72672222 – (06) 93781065
telefax 72672233

ISBN 88-7999-624-X

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

I edizione: gennaio 2004

Indice

Presentazione	7
Relazione del coordinatore	9
Relazioni delle singole Unità partecipanti al progetto	
Relazione dell'Unità di "Roma Tre".....	15
Relazione dell'Unità di Catania	19
Relazione dell'Unità dell'Università del Sannio	35
Relazione dell'Unità di Roma "Tor Vergata".....	43

Presentazione

Le comunicazioni mobili sono cresciute al di là di ogni aspettativa sin dai primi anni '90, in particolare per la introduzione della seconda generazione dei sistemi mobili (2g). Dalla introduzione della prima rete cellulare nel 1992, sono stati venduti più di 250 milioni di terminali. In questo l'Europa ha assunto una posizione di leader con i prodotti basati sul "Global System for Mobile Communication (GSM), che rappresentano almeno il 60 % del mercato per le apparecchiature relative al 2G. Delle cinque fabbriche di terminali che hanno il maggiore fatturato, quattro sono localizzate in Europa: la NOKIA in Finlandia, la ERICSSON in Svezia, la ALCATEL in Francia e la SIEMENS in Germania.

Negli anni '80 furono implementate le prime applicazioni della telefonia mobile a livello di singoli paesi e basate su diverse soluzioni di tipo analogico, che rendevano di fatto impossibile lo scambio delle chiamate tra vari provider. Con la introduzione invece della telefonia digitale, gli utenti hanno avuto modo di accedere ad un largo spettro di servizi e la intercomunicazione delle chiamate tra vari paesi, non avendo più a scontrarsi con la incompatibilità hardware, si è estesa a tutta l'Europa ed è attualmente disponibile a livello mondiale.

I massicci investimenti effettuati hanno consentito di abbattere i costi dei terminali e di favorire il successo e la diffusione del GSM. La microelettronica ha determinato il successo dei terminali 2g, offrendo soluzioni a basso costo e continui miglioramenti nella versatilità e nella dissipazione di potenza dei terminali, sia nel tempo di conversazione sia nel tempo di attesa (standby), che si sono poi tradotti in una maggiore autonomia delle batterie. Ad esempio, la riduzione della tensione di esercizio da 5V a 2V si è tradotta in una maggiore autonomia e analogo risultato si è ottenuto riducendo la larghezza di canale dei processi CMOS da 1 micron agli attuali 0,25 micron e meno.

A fronte di tanto progresso nei servizi, la caratterizzazione delle apparecchiature e dei servizi stessi dal punto vista metrologico è praticamente inesistente. L'utente può scegliere tra i vari fornitori di servizi basandosi unicamente sulle tariffe applicate, che variano in continuazione, e su vaghe notizie, per lo più dettate dalla esperienza degli utenti, che riguardano la qualità del servizio. Queste notizie, viste dagli utenti, si limitano alla stima della copertura delle varie aree, tuttavia in continua evoluzione, ed alla percezione vaga di migliore o peggiore qualità del servizio dei vari fornitori. A livello di questi fornitori, l'unica vera metrica al momento attuabile è quella di riferirsi al BER, misurato "end to end" in un singolo collegamento.

Il presente progetto si è posto il problema di definire ed attuare una metrica delle singole sezioni del collegamento. I singoli apparati sono stati studiati e, in alcuni casi, trattandosi di un progetto di ricerca, anche riprogettati in forma avanzata rispetto alla tecnologia in uso corrente. Sono stati definiti e messe a punto procedure di misura, software per apparati di misura e sono state esplorate soluzioni innovative per alcune delle sezioni hardware dei sistemi in esame.

Relazione del Coordinatore

*introdotta nel "modulo D"
del consuntivo presentato al MIUR*

I sistemi di comunicazione di terza generazione avranno la possibilità di supportare una folta serie di servizi che includono la voce, i dati, le immagini televisive, e le comunicazioni multimediali basate sul protocollo internet. Ci si aspetta che questi servizi facciano uso anche di canali satellitari per la copertura di aree molto grandi e scarsamente popolate. Questo ruolo complementare è previsto non solo per una completa copertura geografica ma per estendere il servizio ad alcune nicchie particolari del mercato delle comunicazioni mobili, come ad esempio l'estensione agli utenti dei servizi di trasporto marittimo e aeronautico. In ogni caso, l'impiego di reti di comunicazione basate sui satelliti sarà essenziale per raggiungere lo scopo di costruire un sistema di comunicazioni che serva a larga banda tutti gli utenti del globo. Questo significa che la qualità del servizio (QoS) dovrà essere migliorata e che avrà grande importanza la gestione del servizio stesso: questa gestione dovrà tenere in conto le capacità e caratteristiche momentanee del sistema, determinate continuamente in tempo reale.

Il problema della gestione di una rete integrata è ancora in parte aperto e numerose proposte appaiono nella recente letteratura. Alcune proposte sono basate sulla sorveglianza continua della efficienza di trasmissione basata sulla analisi statistica della trasmissione digitale su ciascuno dei canali del sistema: una negoziazione preventiva, che tiene conto di alcuni parametri caratteristici opportunamente fissati per la valutazione della QoS, assegna ad un nuovo utente il canale adatto alla esigenza richiesta. Un altro approccio recentemente proposto, tiene conto della cosiddetta "qualità della percezione" (QoP): questo è un nuovo termine, riferito ai collegamenti internet, che tiene conto della qualità della presentazione delle immagini ed anche della capacità dell'utente di assimilare il loro contenuto informativo.

Tuttavia, fino ad ora, tutte queste procedure fanno riferimento ad una valutazione della qualità del collegamento che è basata essenzialmente su misure "end to end" (EtE) di Bit Error Rate (BER). E' chiaro quindi che un simile modo di procedere non consente di individuare la parte di canale responsabile di una eventuale peggioramento delle prestazioni. E' apparsa quindi nella letteratura più recente la tendenza a valutare, per la QoS, le singole tratte che compongono il canale di trasmissione. Tuttavia, questa analisi distribuita, mira comunque a definire le prestazioni EtE del canale. La presente ricerca ha seguito in parte questo ultimo citato indirizzo della ricerca nella QoS, ma si è proposta la valutazione delle singole tratte del canale nella prospettiva di potere attuare azioni locali che ne determinino un miglioramento delle prestazioni.

La idea di base è quella di sorvegliare la qualità del segnale analogico (QoAS) introducendo una serie di apparati valutatori della qualità del segnale analogico distribuiti nel sistema.

a) – Segnale trasmesso. La qualità del segnale deve essere sorvegliata già a livello di stadio di potenza del trasmettitore. Va cioè sorvegliata la qualità del segnale trasmesso. Nell'ambito del presente progetto l'attività di ricerca su questo tema è stata svolta dall'Unità di Roma "Tor Vergata" e si è incentrata sullo studio e la realizzazione di tecniche di caratterizzazione del comportamento non lineare di un amplificatore di potenza in regime di ampi segnali. Le tecniche di caratterizzazione realizzate variano a seconda della larghezza di banda dell'amplificatore, essendo il comportamento non lineare di questi dipendente dal tipo di segnale (di modulazione) che riceve in ingresso. Nel caso di applicazioni a banda larga, il metodo implementato consiste nella caratterizzazione con il test a due toni, ovvero con un segnale di ingresso costituito da due toni, misurando sia il punto di intercetta del terzo ordine sia il rapporto C/I, ossia misurando le potenze erogate in uscita alle due frequenze portanti ed alle frequenze generate come prodotto di intermodulazione del terzo ordine, dalle non linearità del dispositivo attivo. Nel caso invece di caratterizzazioni di amplificatori a banda stretta sono state implementate tecniche di misura di curve di compressione am/am e di distorsione am/pm, sia a singolo tono che in presenza di segnali a modulazione complessa. Lo studio del segnale trasmesso ha riguardato anche la sezione di modulazione. Anche questa parte dell'attività è stata svolta dall'Unità di Roma "Tor Vergata". Si è studiato in particolare un modulatore digitale in aritmetica finita (RNS) QPSK in gradi di elaborare elevati flussi binari di ingresso con ridotta complessità computazionale. E' stato anche considerato il problema della generazione di segnali da trasmettere con elevato grado di purezza spettrale. Una soluzione avanzata per questo problema è quella di fare uso di convertitori sigma-delta. L'attività sui convertitori sigma delta ha riguardato anche lo studio del segnale trasmesso, in quanto essi vengono utilizzati per la realizzazione di segnali a frequenza nota e con elevata purezza spettrale. L'attività di ricerca in questo settore è stata sviluppata dall'Unità di Catania, in particolare essa è stata sviluppata in collaborazione con ricercatori operanti presso la sede locale dell'ST Microelectronics e attivi nel settore della realizzazione e caratterizzazione di dispositivi per le telecomunicazioni digitali. E' stato affrontato lo sviluppo di strumenti di analisi di PLL frazionari. E' noto infatti che i PLL (Phase Locked Loop) rappresentano una parte fondamentale degli attuali sistemi di telecomunicazione. Inoltre, la possibilità di realizzare un PLL in un singolo Circuito Integrato permette la produzione di massa di dispositivi economicamente competitivi, capaci di funzionare con tensioni di basso livello e con basso consumo. L'Unità di Catania si è occupata della realizzazione di un sistema di strumenti virtuali per l'analisi delle prestazioni di PLL frazionari di terza generazione (utilizzanti modulatori sigma-delta digitali del terzo ordine, in struttura MESH). Il sistema è stato sviluppato in ambiente Labview. In particolare si utilizzano un host computer e degli strumenti elettronici digitali connessi in rete (HP16700 Logic Analyzer). La struttura di test utilizzata è basata su componenti standard per realizzare algoritmi di DSM e controllo di frequenza utilizzando degli FPGA. Il sistema sviluppato prevede sia un modo di funzionamento

automatico, sia la possibilità di impostare manualmente i parametri del PLL (fattore di divisione, parametri del sistema di DSP).

b) – Segnale ricevuto. Il segnale trasmesso dalla radio base terrestre o satellitare degrada nella propagazione verso il terminale mobile. Il progetto ha quindi affrontato il problema della analisi del segnale ricevuto dal terminale mobile. L'analisi proposta richiede: - la captazione del segnale; - la scalatura in frequenza; - la digitalizzazione; - la elaborazione mediante opportuni algoritmi. La intrinseca natura del segnale trasmesso è nonstazionaria. L'analisi classica basata sulla Fast Fourier Transform (FFT) fornisce uno spettro che dà una informazione piatta che ha perduto la cognizione del ritardo relativo tra i campioni che compongono il record convertito. La presente ricerca si è proposta invece di usare una rappresentazione tempo-frequenza dei segnali che si ritiene essere più confacente nella evidenziazione di componenti indesiderate del segnale. Infatti, è un obiettivo molto attrattivo per la ricerca in generale quello di determinare la trasformazione nel dominio tempo-frequenza che meglio si presta ad evidenziare le componenti parassite del segnale analogico che inficiano la qualità del segnale trasmesso o ricevuto. Un simile risultato consentirebbe di costruire un analizzatore di segnale molto compatto, da riprodurre in grande quantità di esemplari e da distribuire su tutto un sistema di trasmissione per effettuare una efficace valutazione della QoAS nelle varie parti del sistema e agire quindi poi concretamente per il miglioramento della QoS. La presente ricerca ha riguardato quindi, per una parte, la elaborazione del segnale digitale ottenuto mediante acquisizione attraverso una scalatura in frequenza del segnale RF e una successiva conversione A/D in vista appunto di una possibile realizzazione di un analizzatore di segnale molto compatto. Uno schema della struttura del processo di analisi che si è studiato è riportato nella figura 1.

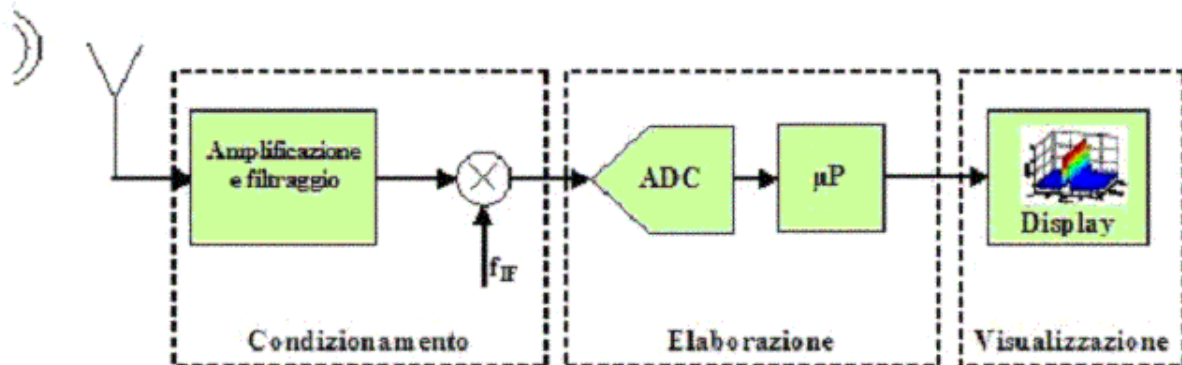


Fig. 1: Schema a blocchi dello strumento di misura

b.1) - Captazione del segnale. Per quanto riguarda la captazione del segnale, il lavoro relativo al presente progetto è stato svolto dall'Unità di ROMA TRE e ha riguardato le applicazioni nella fascia di frequenza che va da .3 a 3 GHz. Il problema più grande è che in questa fascia di frequenza, non sono disponibili sensori direttivi che permettano di selezionare il segnale in base alla direzione di provenienza. Un tale tipo di sensore-ricevitore è di grande aiuto nella rilevazione e analisi dei segnali affetti da multipath. Quindi è stato messo a punto un metodo di misura opportuno che, utilizzando le caratteristiche di un sensore disponibile sul mercato e definito come isotropo, permette di rispondere alle esigenze connesse con l'analisi del segnale ricevuto. Durante il primo anno, il lavoro ha riguardato la realizzazione del supporto orientabile per il sensore di campo tronco conico utilizzato come direzionale nel campo di frequenza che va da 80 MHz a 2.5 GHz, attraverso un metodo integrato di misura che è stato opportunamente progettato, che permette di realizzare le misure adatte alla analisi proposta. E' anche stato messo a punto il software relativo al posizionamento azimutale e angolare del sistema di posizionamento del sensore. Nel software è anche compresa la parte di gestione delle misure di banda che sono eseguite mediante un "Handled Spectrum Analyzer MS2711A", analizzatore di spettro ultraleggero ANRITSU. Il sistema nel suo complesso è anche stato provato presso la camera anecoica della Flextronic a L'Aquila, il cui uso è stato finanziato dalla Anritsu SpA, per un costo che si aggira sui 3000 €, prova che ha segnalato la necessità di studiare un sistema di schermatura dell'analizzatore di spettro, per campi che arrivano a 30 V/m (essendo esso certificato solo per 3 V/m) che è attualmente in fase di progettazione in collaborazione con la stessa Anritsu. Le operazioni messe a punto dopo, hanno riguardato la progettazione di un sistema capace di proteggere lo strumento dai campi elettromagnetici superiori a 30 V/m, in deroga a quello che doveva essere il programma originale. La progettazione è stata affidata ad una ditta esterna che ha messo a disposizione per l'operazione un tecnico esperto in questo campo che ha provveduto anche alla risoluzione di problemi relativi alla movimentazione automatica angolare e alla compattazione su circuito stampato della elettronica di comando dei motori e della operatività del software di misura e della riprogettazione del supporto della testa di misura. La logica di posizionamento è stata sviluppata in forma originale. La calibrazione metrologica del sistema non è stata possibile per due problemi sostanziali. Il primo si riferisce alla gestione sperimentale delle camere anecoiche capaci di eseguire queste calibrazioni che hanno radiatori

posti in posizioni tali da non poter simulare radiazioni provenienti da direzioni quasi verticali: per questo dovrebbe essere previsto un sistema artificiale di inclinazione dell'apparato che di per sé avrebbe dovuto oltre che essere progettato, anche essere realizzato con costi che esulavano assolutamente dall'entità del finanziamento ottenuto. D'altro canto il costo dell'affitto di una camera anecoica capace di fornire certificazione metrologica, anche senza le specifiche sperimentali richieste, è molto elevato. La certificazione non è potuta quindi essere messa in essere visto il grande numero di punti di misura richiesti. L'apparato comunque è funzionante e manca di solo questa determinazione finale per poter essere utilizzato come riferimento metrologico.

b.2) - Condizionamento del segnale. La parte del programma di ricerca che ha riguardato il condizionamento del segnale è stata svolta dalla unità di Roma Tor Vergata. Nella ricerca effettuata si è fatto riferimento in maniera preferenziale al sistema SKYPLEX, che rappresenta la soluzione più avanzata per sistemi di comunicazione satellitare. Questo sistema, realizzato da Alenia Spazio su di un brevetto congiunto Eutelsat e ESA, è il primo processore satellitare on-board in grado di effettuare il multiplexing di numerosi canali in un unico flusso dati compatibili con lo standard DVB (Digital Video Broadcasting). Si tratta di una piattaforma digitale in orbita che rappresenta il primo passo nella evoluzione tecnologica rispetto alla situazione attuale, nella quale i dati trasmessi dai vari operatori devono essere inviati, mediante collegamenti terrestri ad una stazione di terra che li riunisce in un unico flusso da inviare al satellite. Il processore SKYPLEX consente invece uplink diversi e indipendenti da posizioni geografiche diverse all'interno della zona coperta. Parte critica del funzionamento di SKYPLEX è il banco di filtri. Tale banco è stato studiato in maniera particolare ed è stata intravista la possibilità di una realizzazione digitale. Seguendo quindi questa linea innovativa, sono state studiate varie possibilità di realizzazione attraverso sistemi multirate e filtri polifase. Il settore delle telecomunicazioni fa largo uso dei banchi di filtri polifase sia per realizzare rate converter come interpolatori e decimatori che per i banchi per il multiplexing di segnali multiplati a divisione di frequenza; questi dispositivi devono soddisfare requisiti di velocità, risorse impiegate e consumo di potenza tali da consentirne l'impiego nei moderni terminali multimediali mobili. Da questo punto di vista, il sistema numerico dei residui RNS (QRNS) ha acquisito, nel campo del processamento di segnali numerici, un'importanza sempre maggiore poiché consente di ottenere prestazioni ottimali in termini di precisione, occupazione d'area, consumo di potenza e velocità. L'uso dell'aritmetica modulare comporta, infatti, la realizzazione di una struttura parallelizzata in quanto tutte le operazioni tradizionali vengono suddivise in un insieme di semplici operazioni modulari eseguibili in parallelo che richiedono meno area e minore potenza. L'aritmetica QRNS si applica al caso complesso ed introduce l'ulteriore vantaggio di combinare la parte reale e quella immaginaria, richiedendo solamente una duplicazione delle risorse rispetto al caso RNS (mentre nel caso tradizionale le risorse vanno moltiplicate per un fattore 3 o 4). Un ulteriore vantaggio del sistema numerico dei residui consiste nella possibilità di disattivare uno o più blocchi modulari qualora si abbia una riduzione della dinamica da coprire con un conseguente risparmio di energia. Ciò significa che una architettura in aritmetica RNS(QRNS) è intrinsecamente un sistema fault tolerant in quanto, nel caso in cui un modulo si guasti, è possibile disattivarlo consentendo al sistema di continuare a lavorare a dinamica ridotta. Lo studio di alcune realizzazioni è stato effettuato puntando sulle realizzazioni in aritmetica finita e QRNS. La continua riduzione in termini di area e l'aumento della densità dei componenti e della frequenza di funzionamento, ha fatto del consumo di potenza uno dei principali obiettivi di molti centri di ricerca. I moderni microprocessori, microcontrollori e FPGA sono incredibilmente caldi: il Power PC della Motorola consuma 8.5 W, i chip Pentium dell'Intel consumano 16 W e i chip alpha di DEC raggiungono i 30 W di assorbimento mentre l'FPGA (F.P.G.A è l'acronimo di Field Programmable Gate Array) della Xilinx consuma 72.2W. La riduzione del consumo di potenza è diventato uno dei principali obiettivi di progettazione che deve essere affrontato a tutti i livelli del flusso di progetto, non solo a livello circuitale e di dispositivo ma anche ai livelli più alti. Una grossa fetta di mercato beneficerebbe delle nuove soluzioni per la riduzione del consumo di potenza; si pensi alle applicazioni portatili il cui principale requisito è quello dell'autonomia. È noto che nelle tecnologie CMOS, i componenti del chip (porte e celle) assorbono potenza dall'alimentazione solo durante le transizioni logiche (se si ignora la bassa corrente di dispersione). Questo fattore che determina un contributo positivo alle caratteristiche di low power di queste tecnologie, ha reso la dissipazione di potenza fortemente dipendente dall'attività di switching. Essendo il problema della stima del consumo di potenza dipendente dagli stimoli si è riuscito a fornire tali stimoli in maniera da distribuire la potenza assorbita in fase di switching. In questo modo si è ottenuto un notevole miglioramento in termini di consumo di potenza. Per tutte le architetture studiate è stato fatto uso di un ambiente di simulazione integrato software-hardware appositamente studiato. È stata messa a punto una catena di simulazione per i circuiti numerici basata su MATLAB, PSPICE, VHDL, software di implementazione XILINK, implementazione su FPGA e misure (velocità e potenza dissipata) sulle architetture realizzate sulle FPGA stesse.

b.3) - Conversione analogico-digitale (e analogico-RNS). Il passo successivo nella proposta analisi del segnale riguarda la conversione analogico digitale veloce del segnale acquisito. Sono stati studiati convertitori A/D tradizionali e convertitori da analogico a RNS. L'attività sui convertitori tradizionali è stata svolta dall'unità di Catania e ha riguardato lo sviluppo (utilizzando prodotti software adatti, quali il pacchetto Labview della National Instruments) di strumenti per lo studio e la caratterizzazione di sistemi che utilizzano la conversione e/o modulazione di tipo sigma delta. L'Unità di Roma "Tor Vergata" ha sviluppato invece uno studio sulle possibili architetture di convertitori da analogico a RNS molto veloci, in vista di un possibile spostamento della conversione analogico-digitale verso la sezione di captazione, nell'ipotesi di effettuare quindi il condizionamento del segnale in maniera digitale, come già descritto nella sezione b.2. Sono state proposte alcune architetture innovative, sia per quanto riguarda il folding del segnale di ingresso che per la messa a punto di una sezione del convertitore che corregge gli eventuali errori di conversione.

b.4) – Elaborazione del segnale digitalizzato. Questa attività è stata svolta in parallelo dalle Unità “Sannio” e “Roma Tor Vergata”. Tuttavia gli indirizzi nella attività sono stati sostanzialmente diversi: l’Unità “Sannio” ha sviluppato completamente uno strumento di analisi del segnale nel dominio tempo frequenza per uso terrestre mentre l’Unità di “Roma Tor Vergata” ha messo a punto le specifiche di progetto per la realizzazione in hardware di un processore dedicato all’analisi del segnale nel dominio tempo-frequenza molto compatto e con basso consumo di potenza per impiego su satellite.

L’Unità “Sannio” ha svolto una notevole mole di lavoro che è ben descritto nella relazione della Unità stessa. Ha effettuato uno studio approfondito sulle trasformate tempo-frequenza (TFR) per la scelta del tipo da utilizzare nell’analisi del segnale UMTS. In particolare ha rivolto l’attenzione alle trasformate di tipo quadratico che possono in particolari condizioni fornire indicazione della distribuzione dell’energia del segnale sul piano tempo-frequenza. La SPWVD (Smoothed Pseudo Wigner-Ville) è una particolare trasformata che consente di scegliere le finestre nel tempo e in frequenza in modo indipendente permettendo di abbattere efficacemente i termini interferenti tipicamente presenti nelle trasformazioni TFR quadratiche. Nell’ambito del progetto, l’Unità "Sannio" ha condotto studi approfonditi per individuare la forma e le lunghezze ottimali delle due finestre che consentono di ottenere il minimo errore nella stima dei parametri di interesse: banda, frequenza portante e potenza media. L’algoritmo della SPWV è stato implementato su di una scheda DSP multi processore e si è sviluppato un prototipo di strumento di misura facile da utilizzare anche da utente non esperto. Tale obiettivo è stato raggiunto grazie allo sviluppo di un’interfaccia semplice ed intuitiva (user friendly) in ambiente Microsoft Visual C++ 6.0 con l’aggiunta di componenti grafici di Measurement Studio della National Instruments. Il pannello frontale dello strumento consente di visualizzare in un’unica interfaccia tutte le grandezze di interesse: 1. la rappresentazione 3D della trasformata tempo-frequenza 2. lo spettro del segnale in un dato istante 3. la larghezza di banda del segnale in un dato istante 4. la potenza in funzione del tempo 5. la potenza media. 6. la frequenza istantanea 7. la frequenza portante La efficacia dello strumento è stata verificata con test di confronto con apparecchiature commerciali che non hanno tuttavia la completezza dello strumento realizzato.

L’Unità di Roma Tor Vergata” ha studiato la possibilità di una implementazione della trasformazione nel dominio tempo-frequenza molto compatta e a basso consumo di potenza. Sono state prese in esame la trasformazione di Wigner-Ville, la Zak transform, il Teager Operator, la trasformazione di Gabor, la trasformazione di Page e per vari altri algoritmi sono state fatte prove esplorative. L’analisi della loro efficacia nella rappresentazione dei segnali di interesse è apparsa essere molto complessa e ci si è resi conto della mancanza assoluta di riferimenti per la gestione degli effetti del principio di indeterminazione frequenza-tempo e per la valutazione delle differenze tra le rappresentazioni dello stesso segnale nel dominio misto tempo-frequenza ottenute da diversi algoritmi. D’altra parte, l’analisi della complessità in vista della realizzazione in hardware ha messo in evidenza, per la trasformazione di Wigner-Ville, a fronte di una migliore risoluzione teorica dei particolari del segnale, una eccessiva richiesta di hardware; riguardo al Teager Operator le prestazioni molto buone da vari punti di vista sono apparse però critiche in presenza di rumore. La trasformazione Zak, ad una prima indagine, effettuata prima di mettere a punto dei concreti criteri di confronto, che sono illustrati a seguito, ha posto dei problemi di scelta di parametri nella implementazione, scelte per le quali non si avevano appunto concreti criteri. E’ apparso allora più solido considerare la trasformazione di Gabor. Si è messo a punto un criterio per la valutazione della finestra ottima da impiegare nella trasformazione, in relazione al principio di indeterminazione frequenza-tempo, facendo riferimento però ai risultati della trasformazione stessa. Si è cioè formulato un criterio “a posteriori”, che consente di effettuare una procedura iterativa in base alla quale vengono effettuate successive rappresentazioni adeguando la ampiezza della finestra Gaussiana fino ad ottenere l’ottimo. Parallelamente è stata messa a punto una metrica che consente di valutare le differenze tra le varie rappresentazioni dello stesso segnale in termini di numero di bit differenti in relazione alla lunghezza di parola impiegata nella trasformazione. Mediante questi due strumenti messi a punto è stata valutata come efficace ai fini della analisi di segnale proposta una trasformazione di Gabor che operi con lunghezza di parola di 8 bit su 32 campioni di segnale complesso nel tempo e dia quindi una rappresentazione tempo-frequenza consistente in una matrice di 32x32 elementi. Partendo da queste indicazioni è stata valutata la complessità in termini di hardware richiesto e le prestazioni in termini di velocità operativa e potenza dissipata mediante le procedure di simulazione, di implementazione su FPGA e di misura descritte nella sezione b.2 della presente relazione.