www.farelettronica.com

fare elettronica

PROGETTAZIONE & COSTRUZIONE
DIDATTICA & APPROFONDIMENTI

n.280 OTTOBRE - Anno XXIV - € 6,00

ELABORAZIONE NUMERICA DEI SEGNALI

LA RIVOLUZIONE DELL'ELETTRONICA DIGITALE

progetti

UN CARICABATTERIA PER iPHONE

PULSANTI TATTILI

TERMOMETRO DIGITALE A LED

UN ROBOT TELECOMANDATO

IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE AUTOMATICO

PER IMPARARE

Corso di elettronica digitale
le memorie

Tutorial PIC 32
librerie software

Poscope
l'analizzatore di spettro

robotica

ROBOT UMANOIDI

ISSN 1591-2272
80280
9 771591 227008

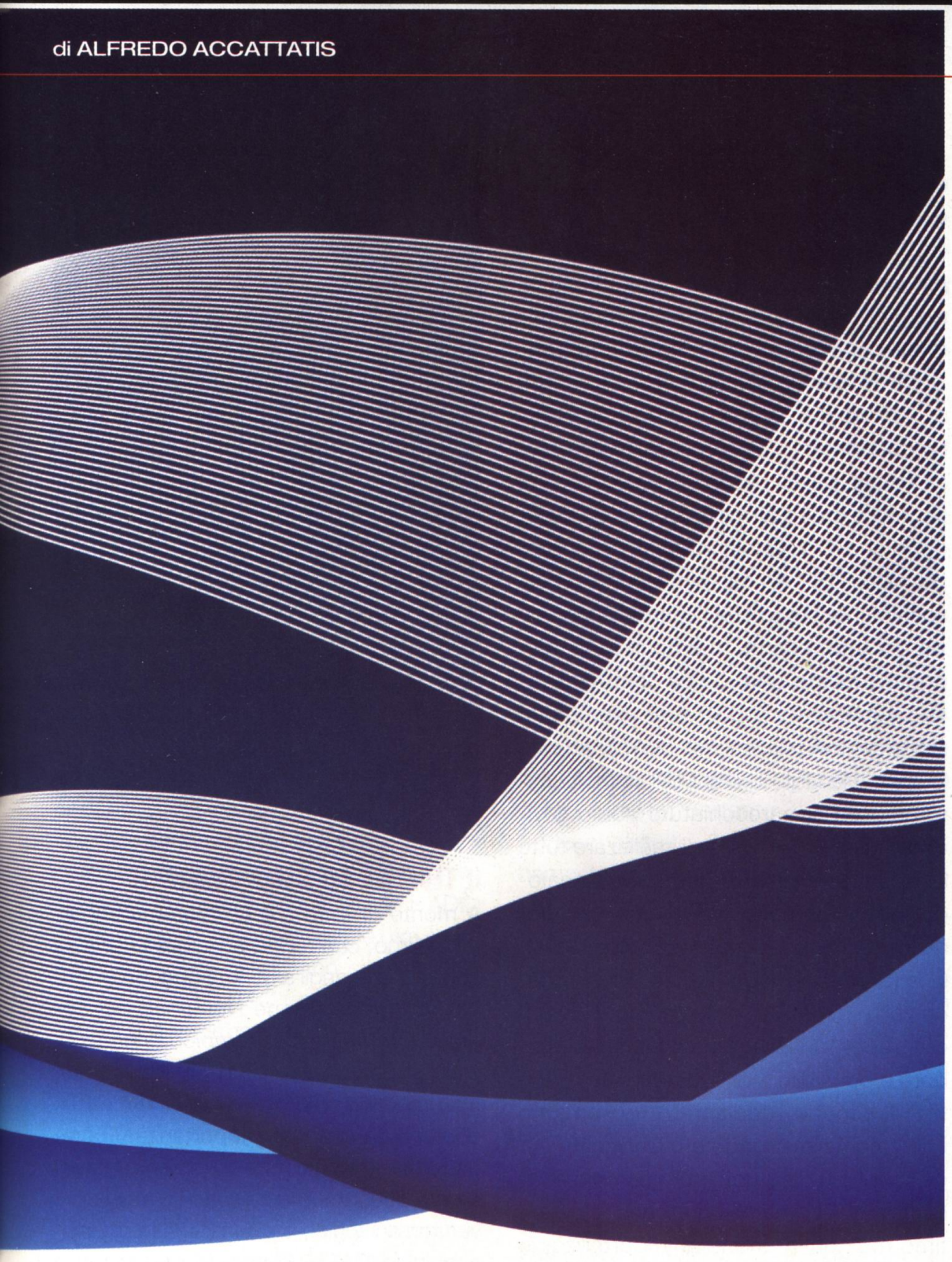
MENSILE Poste Italiane Spa - Spedizione in abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. In L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma1, DCB Milano. In caso di mancato recapito, restituire all'editore che si impegna a pagare la relativa tassa presso il CPM di Roserio - Milano

zoom in

zoom in

ELABORAZ
dei segnali

di ALFREDO ACCATTATIS



L'Elaborazione Numerica dei Segnali è una materia giovane che ha rivoluzionato il mondo dell'Elettronica e della Microelettronica. Viene utilizzata in un numero enorme di settori e di continuo ne nascono di nuovi. Il teorema del campionamento, i convertitori ADC, DAC e i microprocessori DSP hanno consentito la pratica applicazione dei concetti fondamentali della materia

ONE NUMERICA

L'elaborazione numerica dei segnali è una materia relativamente moderna, in tempi piuttosto recenti divenuta corso Universitario, ed oramai massicciamente utilizzata nella maggior parte delle moderne apparecchiature elettroniche. L'Elettronica contemporanea è una materia assai vasta ed affascinante, ma non è una esagerazione affermare che l'attuale inarrestabile corsa che ha intrapreso è dovuta in buona parte all'Elaborazione Numerica dei Segnali. Il contenuto di questo articolo non è una mera dissertazione teorica su argomenti difficili da comprendere e di nicchia, ma al contrario è una introduzione ad un affascinante mondo che co-

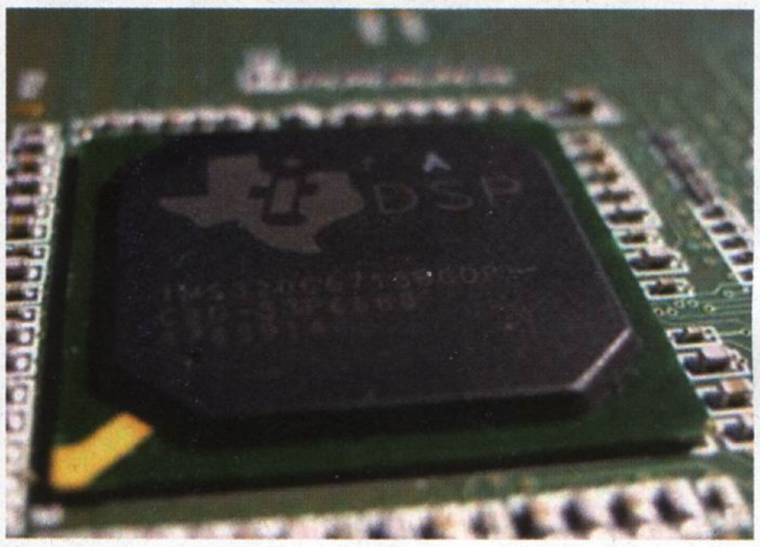


Figura 1: DSP.

stituisce uno dei pilastri dell'Elettronica moderna. Fino a pochi anni fa l'Elaborazione Numerica dei Segnali era appannaggio quasi esclusivo di microprocessori appositamente dedicati allo scopo: i DSP (Digital Signal Processor). Comparsi all'inizio degli anni '80, essi sono stati più volte oggetto di altri articoli ([5]), per cui non entreremo nei dettagli. Basti sapere che i DSP utilizzano un'architettura particolare (Harvard) appositamente progettata per effettuare molte operazioni matematiche (anche parallele) in tempi estremamente ridotti. La velocità di calcolo è essenziale quando è necessario elaborare un segnale (numerico) in tempo reale. Successivamente, l'inarrestabile ascesa prestazionale dei Personal Computer ha fatto si che molti algoritmi appannaggio esclusivo dei DSP fossero finalmente alla portata di un normale PC. Si pensi ad un programma di analisi ed elaborazione di segnali audio (es. Adobe Audition), o ad un programma di fotoritocco (es. Adobe Photoshop). Oppure

un programma per la compressione MP3 od un programma di "ripping" per DVD (es. DVD-shrink). Per arrivare a programmi più vicini al mondo dell'Elettronica come Visual Analyser ([3], [4]) che utilizza molti degli algoritmi tipici dell'Elaborazione Numerica per simulare strumenti di misura (es. Analizzatore di Spettro, Frequenzimetro, oscilloscopio) Filtri (passa banda, passa basso etc.) generatori di segnali e molto altro. Alcuni autori ritengono che il PC abbia praticamente soppiantato i DSP sin dai primi anni '90, personalmente credo che l'affermazione non sia del tutto esatta. Intanto in molti dispositivi esiste una logica "embedded" che è realizzata a DSP (per esempio in molte centrali telefoniche); nei moderni telefonini si fa largo uso di DSP; in molte autoradio ed apparecchiature audio o video si usano dei DSP per realizzare tutte le operazioni di filtraggio (prima analogiche) anche molto complesse, ed operazioni di compressione video/audio. Nella stragrande maggioranza delle schede audio per PC è presente uno o più microprocessori DSP. Come esempio ulteriore è possibile citare la notevole quantità di schede "dedicate" che vengono utilizzate nelle aziende e/o Università per gli scopi più disparati (per esempio analisi di immagini mammografiche). E, per ultimo ma non in ordine di importanza, in questa stessa rivista sovente molti progetti si avvalgono di DSP appositamente programmati. Piuttosto, il PC si è *affiancato* ai DSP consentendo nuovi sviluppi e dando a tutti la possibilità di fruire facilmente di nuovi e preziosi strumenti.

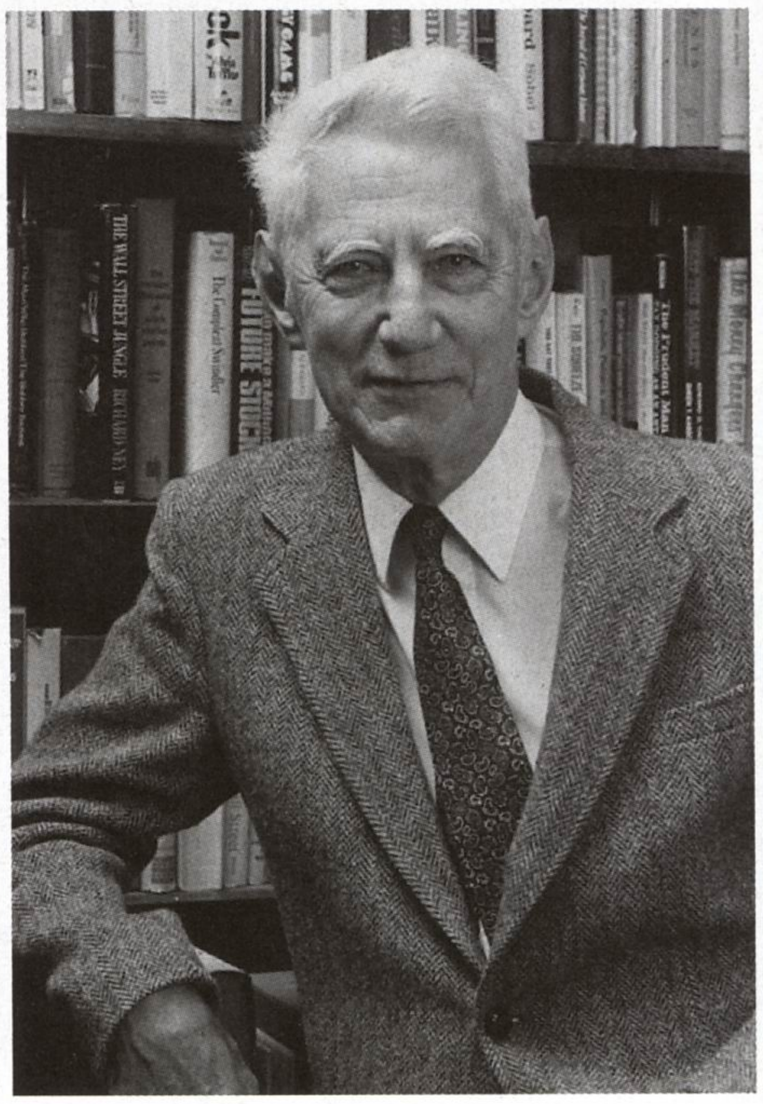
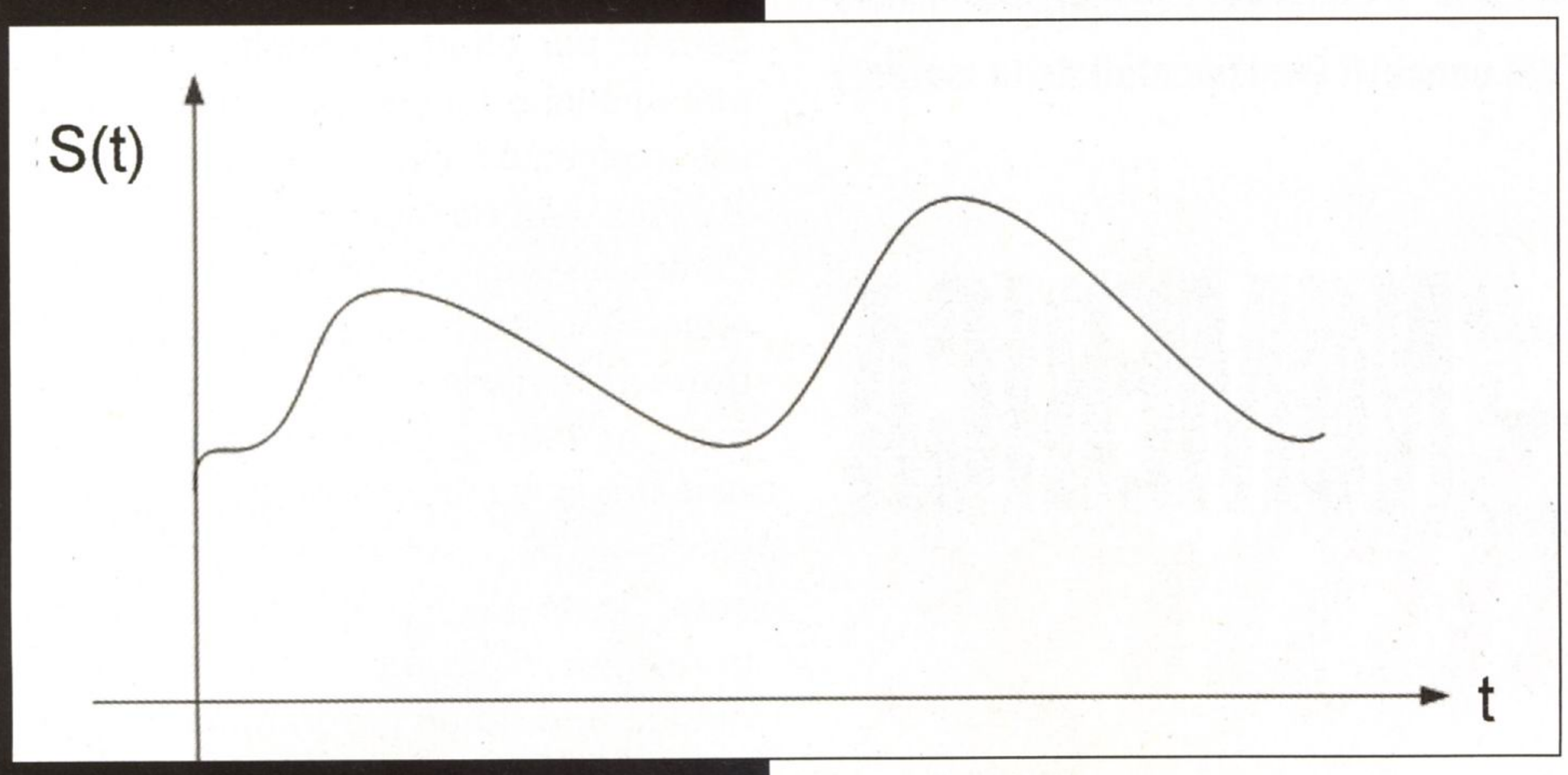


Figura 2: Shannon.

IL TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO

A monte di tutto c'è un teorema importantissimo, che rende possibile la pratica applicazione degli algoritmi oggetto di studio dell'Elaborazione Numerica dei Segnali: il *teorema del campionamento*. Di esso si sente parlare un po' dovunque, ma probabilmente non ci si rende mai ben conto della sua reale importanza. I componenti elettronici che applicano fattivamente questo teorema sono i famosi convertitori analogico-digitale (ADC) e digitale-analogico (DAC). L'Elaborazione Numerica dei Segnali si applica a segnali numerici, ossia rappresentati da vettori di numeri interi (memorizzati in RAM e codificati in binario); ma i segnali "reali", ossia quelli normalmente oggetto dell'Elettronica "classica" sono per loro natura strettamente analogici. Ossia sono segnali elettrici, rappresentativi di segnali di altra natura (per esempio musica e/o voce) che variano con continuità nel tempo: possono assumere un qualsiasi valore compreso tra un minimo ed un massimo, ed in un istante di tempo anch'esso variabile con continuità. I segnali "comprensibili" ad un PC o DSP sono invece dei numeri (generalmente codificati in codice binario), il cui valore rappresenta il segnale ad un ben definito istante di tempo, ossia quei segnali chiamati *numerici*. Il problema che si pone è quindi: è possibile convertire un segnale analogico in un se-

Figura 3: il segnale analogico.



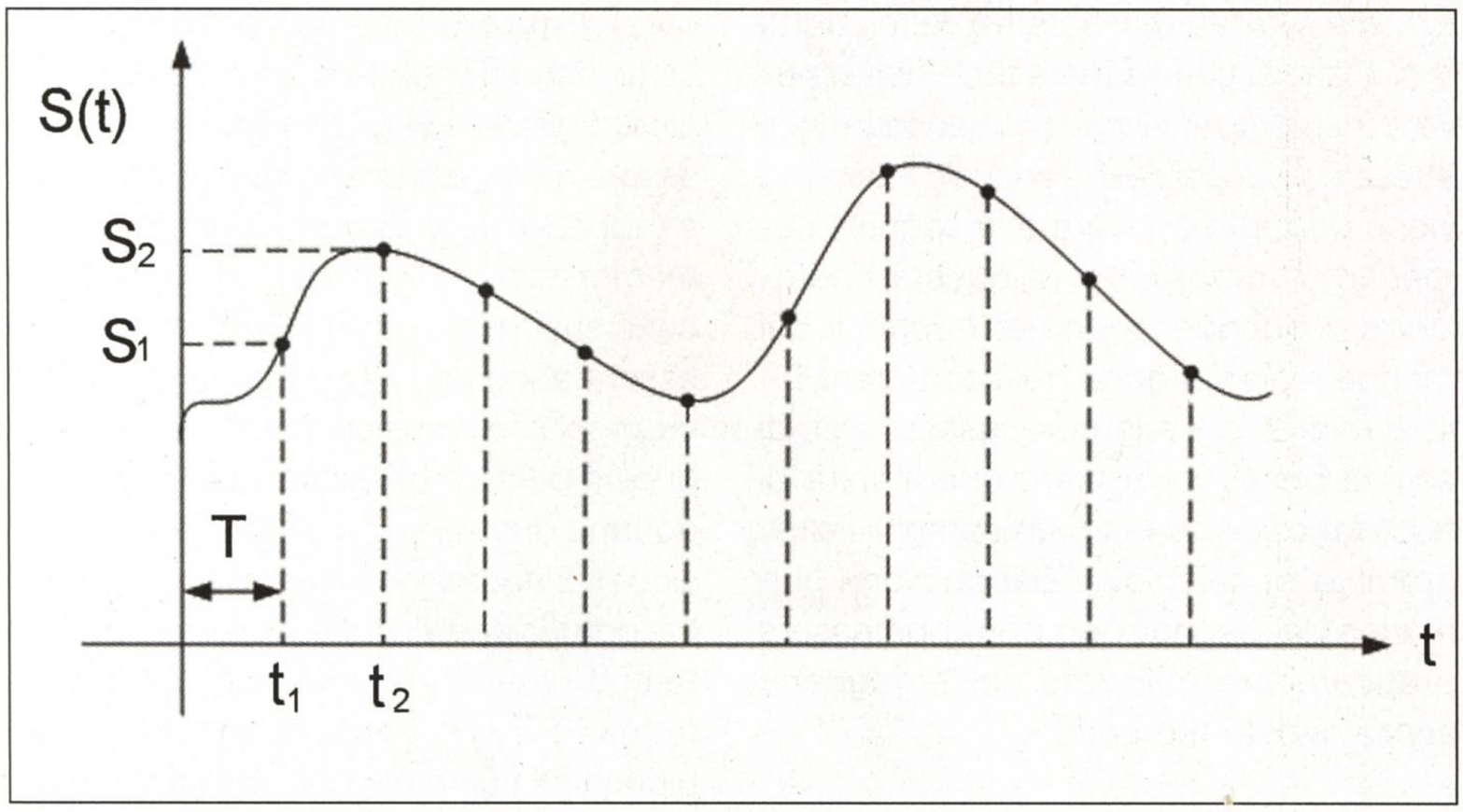


Figura 4: campionamento del segnale analogico.

gnale numerico? La risposta è: sì, grazie al teorema del campionamento. Ogni applicazione citata nella precedente sezione opera su segnali di tipo numerico; essi sono stati ottenuti trasformando un segnale analogico in uno numerico tramite un ADC; elaborati da un programma che gira su un PC o DSP e se necessario riconvertiti in analogico da un DAC (questa importante catena di trasformazioni sarà oggetto della prossima sezione).

Il teorema si Shannon-Nyquist in pratica

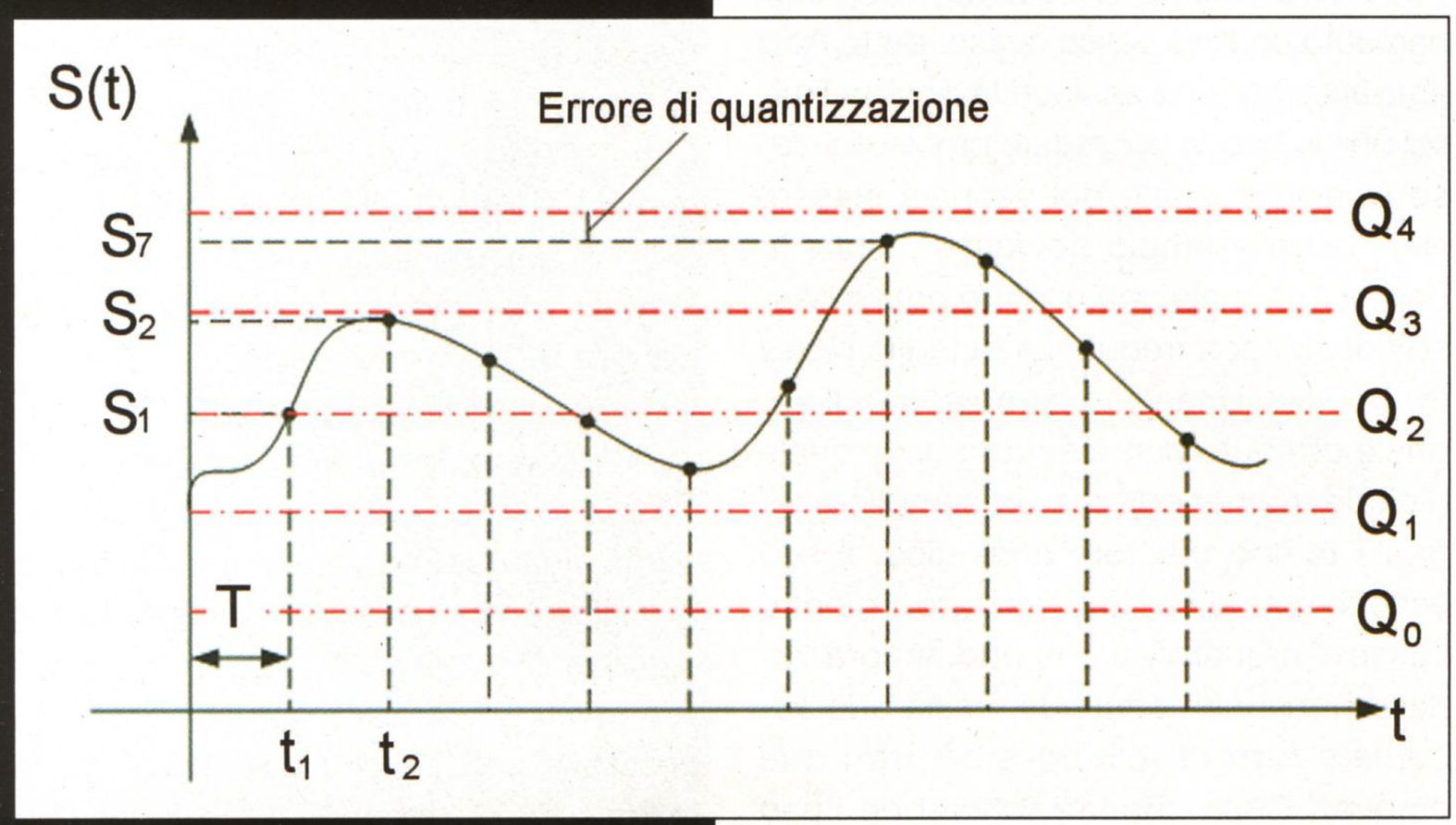
In questa sede ci interessa avere un'idea qualitativa del funzionamento del teorema del campionamento (o di Shannon-Nyquist, dal nome del suo scopritore), pertanto lasciamo ai testi le formule matematiche ([1]). Il teorema dice che un segnale analogico è completamente rappresentato da un numero finito di campioni prelevato ad una cadenza fissa (periodo di campionamento). In altre parole se di un segnale come in **figura 3** preleviamo una serie di campioni con cadenza temporale T **(figura 4)**, è dimostrato che essi sono sufficienti a ricostruire perfettamente il segnale originale. In particolare il teorema del campionamento dice che la fequenza di campionamento1/T deve essere almeno pari al doppio *della massima frequenza contenuta nel segnale.* Quindi, se campioniamo un segnale audio contenente armoniche al più sino a 20.000 Hz dovremo campionare almeno a 40.000 Hz, ossia prelevare 40.000 campioni per secondo. Se questa condizione non è verificata, allora il segnale non potrà essere ricostruito correttamente, dando origine al fenomeno noto come *aliasing*; pertanto è d'uopo anteporre al circuito che effettua il campionamento un filtro passa basso, detto *filtro anti-aliasing,* che assicuri la dovuta limitazione in banda per evitare problemi in fase di ricostruzione del segnale stesso. Nel nostro esempio dovremo limitare in banda il segnale con un filtro passa basso (ideale) con frequenza di taglio pari a 20.000 Hz. Una volta campionato, il segnale ottenuto non è ancora un segnale digitale (numerico), ma un semplice segnale tempo discreto analogico: il suo asse temporale è "discretizzato", mentre l'asse Y è qualcosa che può ancora variare in maniera continua, ossia può assumere tutti i livelli possibili tra i due estremi. Cosa che implicherebbe l'uso di una macchina con la capacità di rappresentare un numero ad infinite cifre, ossia non fisicamente realizzabile. Allora si opera la cosiddetta "quantizzazione", cioè tramite un opportuno criterio si associa un numero intero tra quelli "limitati" disponibili a ciascun livello continuo campionato, approssimandolo opportunamente con qualche criterio (per esempio che si trovi in una certa fascia prima o dopo il livello predefinito). Facciamo un esempio per comprendere meglio. Se abbiamo un DSP od un PC con registri a 16 bit, avremo a disposizione un numero intero a 16 bit, ossia un numero binario capace di rappresentare esattamente 65536 livelli: 2^{16}. Se avessimo registri a 8 bit avremmo 2^8 = 256 diversi numeri. Il processo di quantizzazione consta fondamentalmente nell'approssimare dei livelli di segnale che variano con continuità con un numero predefinito (fisso) di numeri. Esempio: usiamo 8 bit, mettiamo il caso che il nostro segnale vari tra 0 e 10 Volt. Avremo quindi che il "passo" è 10/256 = 0.039 ossia potremo rappresentare con precisione assoluta solo 256 livelli a passi di 0.039 volt; tutte le tensioni che cadono tra due numeri contigui verranno approssimate con il numero più vicino, a patto che cada in un intorno predefinito di esso. Per esempio la tensione di 0.39V sarà rappresentata esattamente dal numero 10 (0.039 * 10 = 0.39), mentre la tensione 0.41V sarà sempre rappresentata dal medesimo numero (ossia 10), perché il prossimo numero disponibile (11) sarebbe rappresentativo di 0.39 + 0.039 = 0.429. Quantizzando introduciamo allora un *errore* detto appunto errore di quantizzazione. Esso sarà tanto minore quanto maggiore sarà il numero di bit utilizzati ("profondità di bit"), ossia quanto migliore sarà la "grana" disponibile. Maggiore è la profondità di bit utilizzata e maggiore è il *rapporto segnale rumore*, per esempio con 24 bit arriviamo al valore teorico di 146 dB. La **figura 5** potrà meglio far comprendere quanto sinora spiegato. In essa vediamo il segnale analogico campionato con periodo T ai vari istanti di tempo t1, t2,....etc. Si osservi che all'istante t1 corrisponde il segnale S1, a t2 il segnale S2 e così via. In rosso sono evidenziati i livelli di quantizzazione Q0, Q1, e così via. Essi sono i livelli "fissi" che possiamo associare al segnale. E' facile osservare che il valore S1 coincide con il livello Q2, e quindi non commettiamo errore nel rappresentarlo con un "numero tra quelli disponibili". Il livello S2 invece "quasi" corrisponde al livello Q3, mentre il livello S7 si discosta decisamente dal livello Q4, ad esso più vicino. L'errore di quantizzazione che commettiamo è dunque (qualitativamente) dovuto alla distanza tra il *vero* valore del segnale e quello che possiamo usare per memorizzarlo in un computer. Tramite i convertitori ADC (e viceversa) si realizzano praticamente tutte le operazioni sin qui descritte: campionamento e quantizzazione.

Ed in realtà anche un'altra fase, detta "hold" che si pone a metà tra le due e serve a memorizzare il campione acquisito in attesa del successivo. Il segnale analogico viene pertanto convertito in segnale numerico. L'importanza di questa operazione è dunque evidente: i segnali del mondo reale vengono "resi comprensibili" al mondo dei microprocessori, e su di essi si possono operare una infinità di trasformazioni tramite un semplice programma di calcolo. L'Elaborazione Numerica dei Segnali non potrebbe essere praticamente utilizzata nell'Ingegneria senza questo teorema.

CIRCUITI UNIVERSALI

Il precedente paragrafo apre le porte ad una nuova classe di circuiti, base fondamentale dell'Elaborazione Numerica dei Segnali. Si osservi lo schema a blocchi di **figura 6**. Esso consiste in un circuito che effettua la conversione analogico/digitale; il segnale che fuoriesce da esso è un segnale numerico. Ossia, esso è rappresentato da valori numerici binari memorizzati nella memoria Ram. Il circuito successivo è un DSP, ma potrebbe essere anche un PC od un qualsiasi microprocessore sufficientemente veloce. A questo punto è possibile applicare un algoritmo qualsiasi, per esempio uno classico di Elaborazione Numerica (v. avanti). La condizione perché esso avvenga in tempo reale è che i calcoli vengano effettuati *tra un campione e l'altro,* o tra blocchi di campioni preventivamente accumulati. Per esempio si potrebbe applicare un semplicissimo algoritmo che serve a ridurre l'ampiezza del segnale (controllo di volume): basta moltiplicare ogni campione per un numero che varia tra zero (volume nullo) e uno (volume massimo). E' un'applicazione che certamente non richiede un DSP, ma rende bene l'idea. Successivamente i campioni numerici così ottenuti sono passati al convertitore digitale/analogico che provvede a ritrasformare il segnale in un segnale analogico. Ecco dunque un circuito "Universale": visto come una scatola nera, esso è un circuito che riceve in ingresso un segnale analogico e restituisce in uscita un segnale anch'esso analogico ma sul quale è stata effettuata una trasformazione: la scatola è caratterizzata da una *funzione di trasferimento*. Esattamente come fa un qualsiasi circuito analogico, per esempio un semplice potenziometro usato come controllo di volume. La differenza notevole è che in questo caso la funzione di trasferimento dipende da un programma di calcolo mentre il circuito resta sempre lo stesso (entro certi limiti). Un circuito completamente analogico effettua sempre una trasformazione matematica, ma il cui algoritmo è definito dalle connessioni hardware dei suoi componenti, e quindi per cambiare funzione di trasferimento deve essere modificato "fisicamente" cambiando le connessioni e/o aggiungendo/togliendo componenti. Si pensi per esempio al controllo di volume già preso ad esempio: esso potrebbe essere realizzato con un potenziometro ed al più qualche resistenza aggiuntiva; e magari un conden-

Figura 5: quantizzazione.



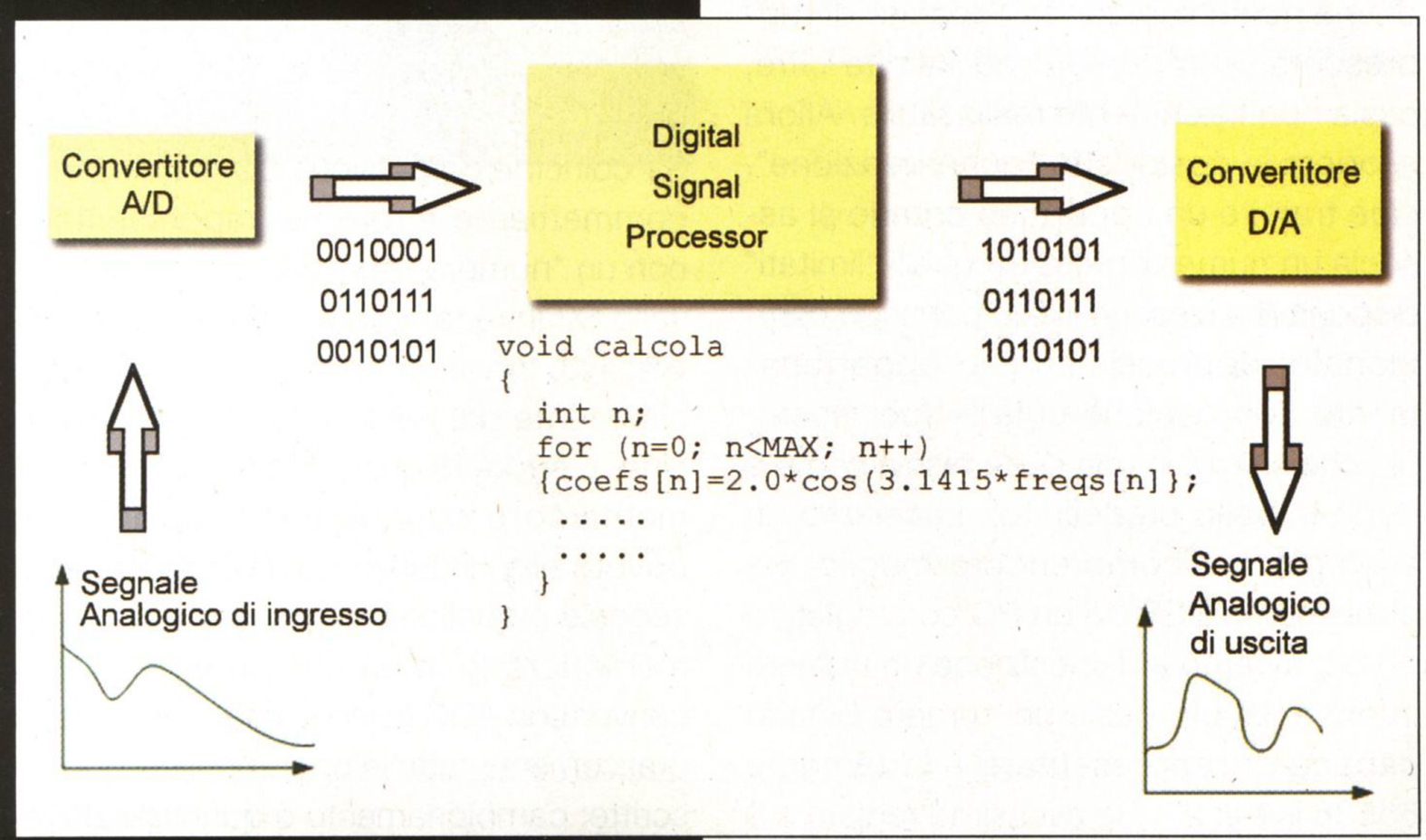


Figura 6: circuito universale.

satore per eliminare la componente continua. Per realizzare una funzione differente dovremo mettere mano al saldatore, e realizzare un diverso circuito. Nel caso del nostro circuito universale sarà sufficiente modificare/riscrivere un programma; se per esempio vogliamo aggiungere una funzione di CAG (Controllo Automatico di Guadagno) potremo scrivere un programma che effettua dei controlli sull'ampiezza di ogni campione, limitandolo al valore di soglia quando necessario (ossia una operazione del tipo "if livello > soglia then livello = soglia"). In caso di circuito puramente analogico dovremo invece aggiungere fisicamente dei transitor e molti altri componenti.

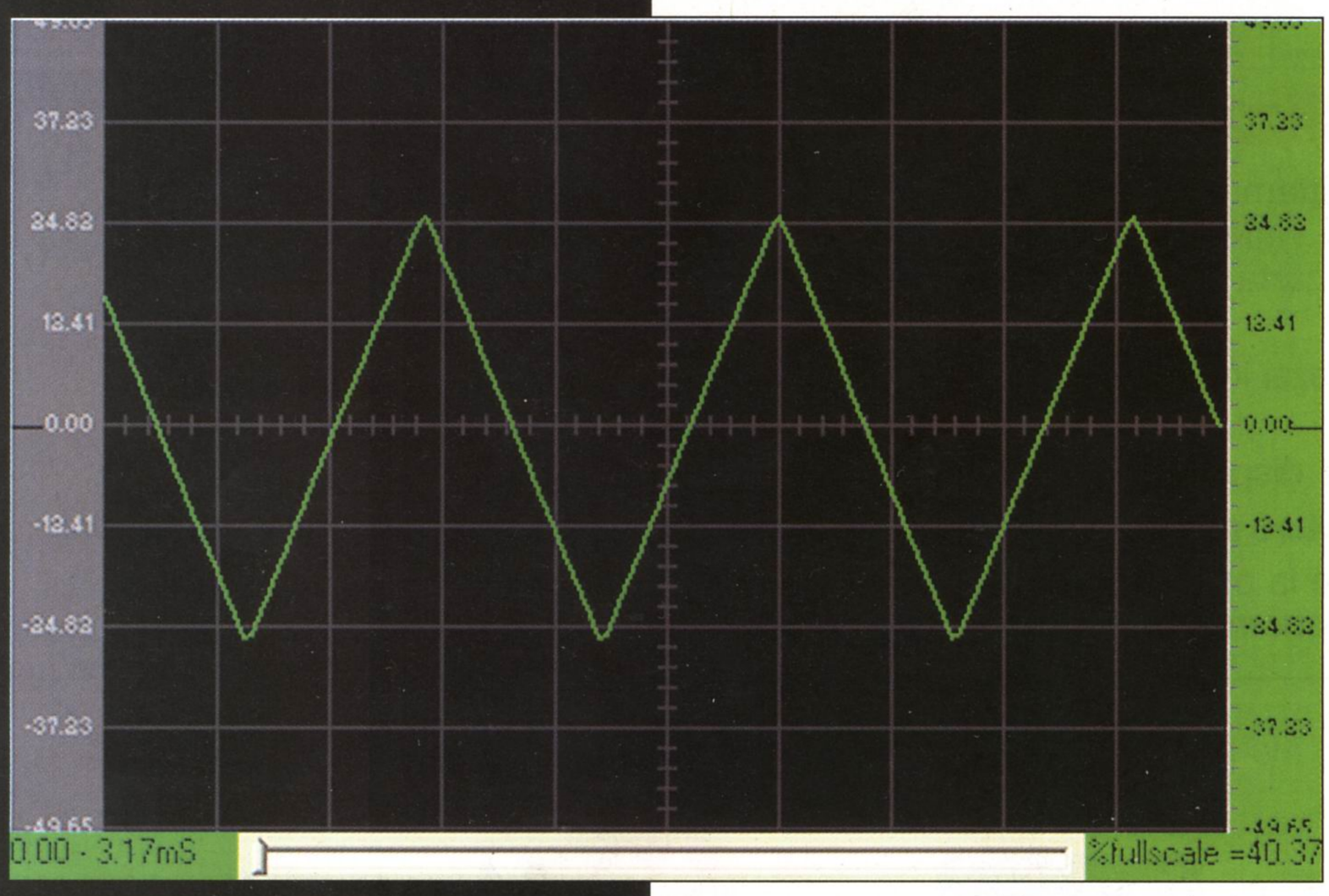
ELABORAZIONE NUMERICA DEI SEGNALI

Siamo oramai maturi per parlare espressamente di Elaborazione Numerica dei Segnali. Il teorema del campionamento consente di trasformare i segnali analogici in numerici; i microprocessori veloci (DSP) consentono di elaborare il segnale numerico in tempo reale. L'Elaborazione Numerica consiste in una famiglia di algoritmi che consentono di effettuare elaborazioni su segnali numerici, utili a espletare varie funzioni. La moderna Elaborazione numerica nasce probabilmente nel 1965, quando Cooley e Tuckey pubblicarono un articolo che descriveva un algoritmo capace di effettuare l'analisi in frequenza di un segnale (periodico) in un numero di passi di calcolo relativamente modesto. Sebbene a quei tempi non esistevano ancora i DSP per effettuare elaborazioni in tempo reale, era pur sempre possibile far girare in tempi accettabili dei programmi su grossi elaboratori che potevano comunque fornire, seppure dopo tempi lunghi (ore o giorni) risultati scientificamente utilizzabili. Pian piano molti algoritmi vennero sviluppati, ma gli elementi fondamentali sono essenzialmente riconducibili a due: la già citata "analisi in frequenza", ossia la FFT (Fast Fourier Transform) ed il filtraggio digitale (filtri FIR e IIR).

FFT : lo spettro di un segnale

In Elettronica si ha spesso a che fare con dei segnali elettrici, tipicamente rappresentati da una tensione od una corrente che varia nel tempo. I segnali elettrici sono spesso a loro volta dei "vettori" che rappresentano un altro tipo di segnale. Per esempio il debole segnale elettrico che fuoriesce da un microfono è un segnale che rappresenta un segnale acustico, ossia è un segnale elettrico che *vibra* come il segnale acustico, a meno dell'alterazione che la minore o maggiore qualità del microfono può introdurre. Il microfono è un *trasduttore, cioè un dispositivo che cambia la natura del segnale senza alterarne la forma.* I segnali elettrici, indipendentemente dal segnale che rappresentano, possono essere scomposti nelle loro componenti atomiche; si dimostra matematicamente che ogni segnale periodico è costituito dalla somma di più segnali elementari. Questi segnali elementari sono di tipo sinusoidale. In altre parole, una sinusoide pura non è composta da altri segnali, mentre un qualsiasi segnale periodico che non sia una sinusoide è generato dalla somma di più sinusoidi di diversa ampiezza e fase. Questo fatto è estremamente importante, è da origine al concetto di *spettro di un segnale.* Lo spettro di un segnale è una possibile "rappresentazione" del segnale, ossia un modo di vederlo graficamente; quella considerata standard è quella detta nel *dominio del tempo* ossia il segnale viene rappresentato graficamente su assi cartesiani, in cui il tempo è riportato in asse X e l'ampiezza sull'asse delle ordinate (asse X). Per intenderci è la classica visualizzazione che usiamo in strumenti ti-

Figura 7: segnale elettrico (onda triangolare).



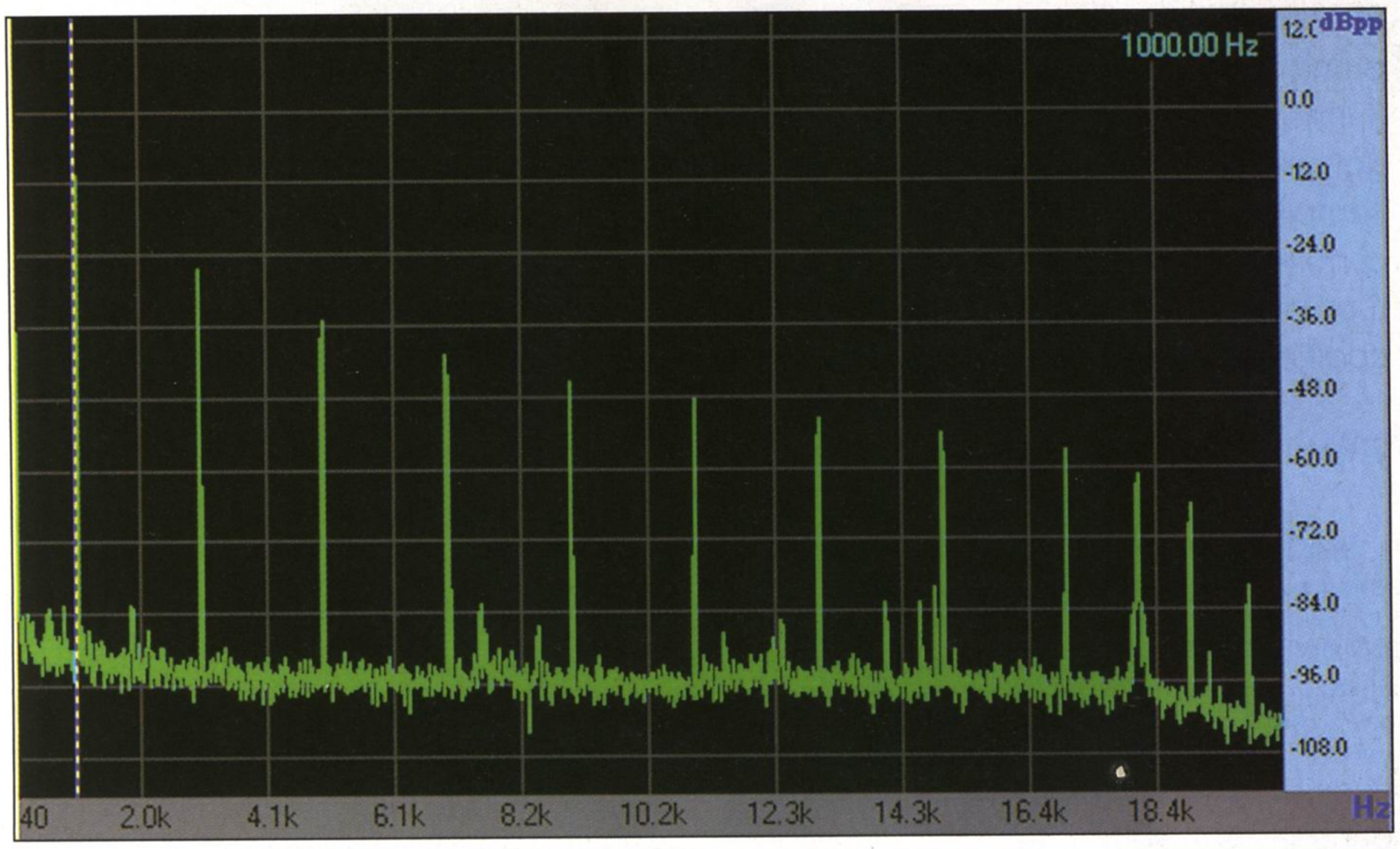


Figura 8: spettro del segnale elettrico (onda triangolare).

po oscilloscopio, ossia quella cui siamo più abituati. Lo "spettro di un segnale" è un'altra modalità di rappresentazione dello stesso segnale; essa che fa uso della frequenza come variabile indipendente. I segnali sono così rappresentati dalla frequenza in asse X e ancora dalle ampiezze in asse Y. I segnale è sempre lo stesso, cambia solo il modo di "vederlo"; questa seconda modalità è quella per esempio usata dagli strumenti chiamati "analizzatori di spettro". In **figura 7** è possibile vedere la rappresentazione nel tempo di un'onda triangolare, nella **figura 8** la rappresentazione nel dominio della frequenza (limitatamente al diagramma dei moduli) dello stesso segnale. Quest'ultimo ci mostra come un onda triangolare a 1000 Hz sia composta da una sinusoide (fondamentale) a 1000 Hz più una serie non trascurabile di armoniche (sinusoidi) multiple della fondamentale. Il fatto di analizzare uno stesso segnale da differenti punti di vista è cosa particolarmente utile giacché talvolta consente di affrontare meglio particolari classi di problemi. Ad esempio, per individuare la banda passante di un dispositivo elettronico (per esempio un filtro) è assai più agevole utilizzare un analizzatore di spettro invece di un oscilloscopio; usando un oscilloscopio la cosa è certamente ancora possibile ma praticamente molto più complicato ed oneroso anche in termini meramente temporali. Infatti, l'uso più diffuso della rappresentazione nel dominio della frequenza è quello di individuare la *banda passante* di un dispositivo audio ([4]). Il passaggio da una rappresentazione all'altra, ossia per esempio da quella nel dominio del tempo a quella nel dominio della frequenza, è ottenuta tramite una operazione di trasformazione, detta *Trasformata di Fourier*. Essa nella sua forma più generale comprende segnali tempo continuo, ma ne esiste una versione specializzata per segnali tempo discreto, quali quelli che possiamo ottenere utilizzando un ADC. Una versione senza dubbio più pratica in termini di complessità di calcolo è la versione detta Trasformata di Fourier veloce (Fast Fourier Transform = FFT). L'algoritmo FFT più diffuso è il già citato algoritmo di Cooley-Tukey. Alcuni tuttavia sostengono che la trasformata veloce di Fourier era stata scoperta ad opera di Carl Friedrich Gauss già nel 1805. Questo algoritmo, base della moderna Elaborazione Numerica dei Segnali, consente di implementare via software uno degli strumenti di misura più costosi, ossia l'analizzatore di spettro. Il programma Visual Analyser descritto nel numero 258 della rivista ne costituisce un possibile esempio.

Filtri digitali

Un'altra delle applicazioni più strepitose dell'Elaborazione Numerica dei Segnali è quella dei filtri digitali. Il nostro "circuito universale" può diventare un filtro dalle prestazioni incredibili, irraggiungibili con circuiti strettamente analogici. Nel mondo analogico esistono dei circuiti che servono ad *alterare lo spettro di un segnale* detti comunemente "filtri". Essi servono essenzialmente a due scopi: *separare* parti di un segnale e *compensare* alterazioni di un segnale dovute alle cause più disparate (esempio: rumore di fondo di un circuito elettrico). Di essi se ne distinguono svariati tipi, tutti riconducibili più o meno ai seguenti tipi base (o loro combinazioni):

- Passa basso
- Passa alto
- Passa banda
- Elimina banda
- Notch

Essi possono essere realizzati tramite componenti discreti e passivi in maniera molto semplice, oppure in maniera "attiva", ossia dotati di elementi che ne compensino l'attenuazione caratteristica tipica dei componenti passivi e ne esaltino globalmente le prestazioni. Le prestazioni dei filtri si misurano (anche) tramite l'analisi della banda passante in termini di *frequenza di taglio a -3dB, frequenza di stop,* ampiezza di *banda di transizione*, *attenuazione* e *linearità di fase.* Varie metodologie di progettazione dei filtri analogici comprendono per esempio i classici filtri di Chebishev o Butterworth, che significa diverse configurazioni hardware e diversi criteri matematici di progettazione. I filtri digitali si ottengono tramite un opportuno algoritmo di calcolo che opera sui campioni numerici. I filtri digitali possono essere progettati a partire da tecniche che tendono a emulare le tecniche di progetto dei filtri analogici classici, oppure con tecniche proprie.

La differenza sostanziale che qui è importante sottolineare è che: primo, dipendono da un programma di calcolo e non dall'hardware; secondo, consentono di raggiungere prestazioni che comparate a quelle del mondo analogico sono a dir poco sorprendenti. Per esempio: un tipico filtro passa basso digitale può avere un guadagno di 1 +/- 0,0002 dalla CC sino a 1000 Hz ed un guadagno minore di 0,0002 per una frequenza di 1001 Hz (ossia una incredibile banda di transizione di un 1 Hz con una attenuazione da record). In altri termini, prestazioni dell'ordine di *migliaia* di volte superiori ai corrispondenti filtri analogici! I filtri digitali possono

PER *approfondire...*

- [1] A.V. Oppenheim, R.W. Schafer "Elaborazione numerica dei segnali", Franco Angeli editore, 1988;
- [2] Steven W. Smith "The scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing" Analog Device, http://www.dspguide.com;
- [3] A.Accattatis, "Visual Analyser: un programma Windows per la Simulazione di strumenti di misura e generazione di forma d'onda" Fare Elettronica n. 258
- [4] A.Accattatis, "Visual Analyser:la misura della risposta in frequenza di un dispositivo audio" Fare Elettronica n. 259
- [5] E.Raffone, "Introduzione ai processori DSP", Fare Elettronica n.246

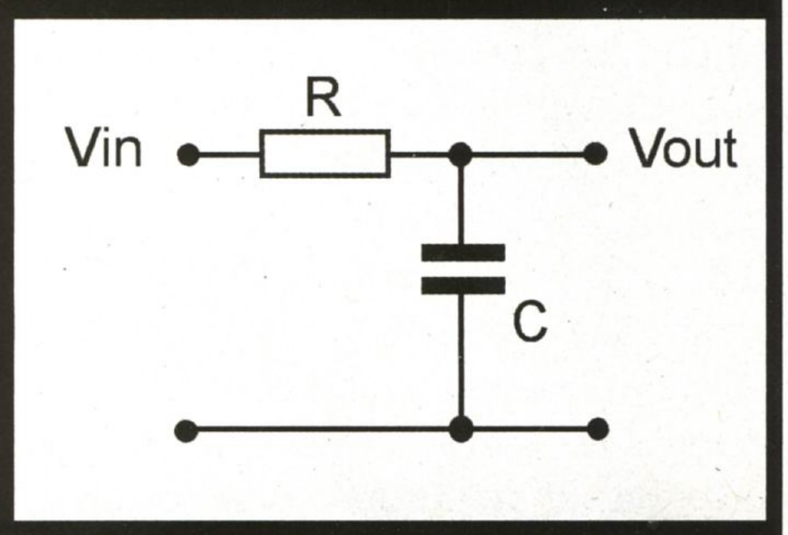


Figura 9: filtro passa basso passivo.

appartenere a due grandi categorie. La prima fa riferimento ai cosiddetti filtri FIR (Finite Impulsive Response). Essi sono governati da una relazione matematica semplice che effettua una somma di un certo numero di valori d'ingresso ad istanti precedenti al corrente, tramite svariati coefficienti (i "tappi"):

$$y[n] = a0 * x[n] + a1 * x[n-1] + a2 * x[n - 2] + \ldots.$$

I filtri IIR sono invece caratterizzati dall'essere implementati da una formula ricorsiva, ossia i cui valori di uscita dipendono, oltre che dai valori d'ingresso ad istanti precedenti, anche da valori *dell'uscita* ad istanti precedenti. La formula generale è la seguente:

$$y[n] = a0 * x[n] + a1 * x[n-1] + a2 * x[n - 2] + \ldots. + b1 * y[n - 1] + b2 * y[n -2] \ldots.$$

Dove "a" e "b" sono dei coefficienti calcolati con delle formule apposite, x[ ] sono i campioni d'ingresso e y[ ] sono i campioni d'uscita. Chiaramente un filtro realizzato con tecniche IIR sarà meno oneroso computazionalmente, ma come contropartita offrirà prestazioni sicuramente più modeste e qualche instabilità; un filtro FIR offrirà maggiori prestazioni (più "tappi" si usano, migliori saranno le prestazioni) ma di converso sarà più oneroso computazionalmente.

ALTRE APPLICAZIONI

I campi in cui l'Elaborazione Numerica dei Segnali fa da padrone sono infiniti. L'analisi delle immagini digitalizzate tramite l'applicazione della trasformata Wavelet sta fornendo promettenti sviluppi per l'analisi automatica di immagini radiografiche e telemedicina; le moderne videocamere e fotocamere, le trasmissioni via satellite e il digitale terrestre fanno largo uso di algoritmi di compressione video (mpeg2, mpeg4, etc.). In fase di post produzione video professionale si fa abbondante utilizzo di effetti digitali e di video/foto ritocco direttamente derivati da algoritmi di Elaborazione Numerica. L'uso di tecniche di Cepstrum è di importanza fondamentale per l'analisi delle vibrazioni dei motori elettrici con cuscinetti a sfera, consentendo previsioni attendibili sullo "stato di salute" dei meccanismi utilizzati nelle catene produttive. In campo audio la possibilità di utilizzare sofisticatissimi filtri digitali consente alle forze dell'ordine di estrarre preziose informazioni da segnali audio e video. Il settore del riconoscimento vocale si avvale largamente di algoritmi di Elaborazione Numerica così come di reti neurali e varie tecniche euristiche ed anche di Cepstrum. Ancora, in ambito telefonico la trasmissione e la compressione del segnale vocale sono oramai esclusivamente digitali e con largo uso dei concetti dell'Elaborazione Numerica quali DTMF receiver, Echo suppression, tone generator, etc. Per finire (e si potrebbe continuare a lungo) il campo della sintesi di segnali audio è in continua ascesa ed oramai dominato dall'Elaborazione Numerica.

Ognuno di questi settori ha sviluppato algoritmi specifici e continuamente se ne trovano di nuovi, cosa che è facile verificare osservando l'enorme mole di pubblicazioni scientifiche che vengono continuamente prodotte.

CONCLUSIONI

Una trattazione esaustiva dell'Elaborazione Numerica dei Segnali non è pensabile in questa sede, ma chi fosse interessato ad approfondire i concetti sin qui esposti può trovare indicazioni preziose nella bibliografia in calce a questo articolo; in questa trattazione si vuole far notare come la moderna Elettronica e Microelettronica siano profondamente intrise da questa materia, e come molti dei moderni circuiti si basino su di una struttura "tipo" comune. Il teorema di base che ha consentito la pratica applicazione dell'Elaborazione Numerica è il teorema di Shannon-Nyquist o teorema del campionamento. Tramite l'Elaborazione Numerica dei Segnali è possibile realizzare filtri dalle prestazioni molto spinte e calcolare in tempo reale lo spettro di un segnale. A partire dagli anni '90 le prestazioni dei PC hanno potuto competere con i DSP, aprendo nuove possibilità di applicazione per ogni tipo di utente in possesso di un Personal Computer. Il campo di applicazione della materia è tutt'ora in fase di espansione ed in continuazione vengono individuati nuovi settori di utilizzo. ❑

CODICE MIP 2750052