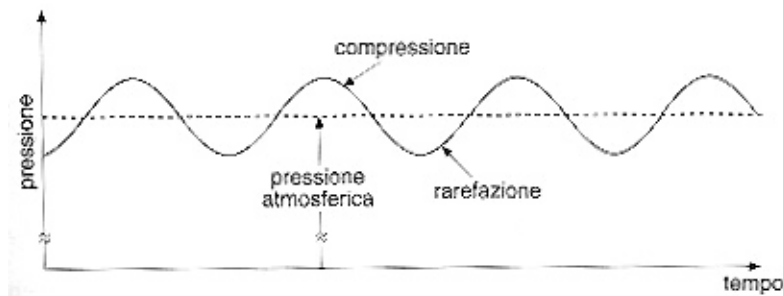


5. IL SUONO

Le onde che si propagano in mezzi deformabili o elastici sono chiamate **onde meccaniche**. Esse hanno origine dallo spostamento di una porzione di un mezzo elastico dalla sua posizione normale, con successiva oscillazione attorno ad una posizione di equilibrio. A causa delle proprietà elastiche del mezzo la perturbazione si trasmette ad uno strato successivo. E' importante notare che il mezzo stesso non si muova, nel suo insieme, seguendo il movimento dell'onda; le varie parti del mezzo si limitano a oscillare entro limiti ristretti. Le onde meccaniche hanno quindi per propagarsi bisogno di materia (non è invece necessaria per quelle elettromagnetiche). La velocità dell'onda è determinata dalla caratteristica del mezzo di propagazione (per esempio aria, acqua, acciaio, ecc..).



A



B

Le **onde sonore sono onde meccaniche longitudinali**, ciò

significa che il movimento delle particelle avviene nella stessa direzione di propagazione. Nei fluidi (come l'aria) le onde

longitudinali sono le uniche che possano propagarsi. L'orecchio umano è in grado di essere

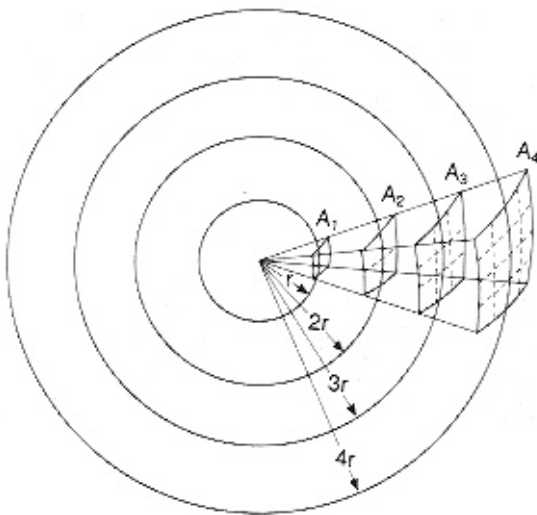
stimolato da frequenze comprese

tra 20 e 20.000 cicli/s (Hz). Un'onda con frequenza inferiore a quella del campo di udibilità è chiamata *infrasuono*, con frequenza superiore *ultrasuono*.

Il suono può essere interpretato sia come fenomeno ondulatorio nell'aria o in altri mezzi elastici (stimolo) sia come eccitazione del meccanismo uditivo che dà luogo alla percezione acustica (sensazione). La scelta dell'uno o dell'altro punto di vista dà luogo a due aspetti dell'acustica, la *fisica* e la *psicofisica*, a cui corrispondono diverse grandezze: *frequenza e altezza, intensità sonora e sensazione sonora, forma d'onda (o spettro equivalente) e timbro*. Ecco un breve esempio: per le frequenze basse l'orecchio umano percepisce un'altezza differente a intensità differenti, aumentando il volume l'altezza

scende (ovviamente la frequenza invece rimane la stessa). Note pure di frequenza 168 e 318 Hz a basso volume risultano discordanti e questi sgradevoli, a volumi più alti tuttavia l'orecchio li percepisce come in relazione di ottava (come fossero 150 e 300 Hz). Questo per far capire come l'orecchio umano non sia uno strumento di misura esatto, anche se estremamente sensibile. La *psicoacustica* studia le modalità con cui il sistema uditivo e il cervello elaborano suoni e rumori .

Torniamo ora alla fisica del suono. Abbiamo visto che l'onda sonora è costituita da una perturbazione del mezzo di trasmissione. In particolare le particelle dell'aria (quasi 100.000 ogni metro cubo) nella loro oscillazione creano delle aree di compressione, dove la pressione è leggermente maggiore di quella atmosferica, e delle sacche di rarefazione, dove la pressione è leggermente inferiore a quella atmosferica. I segnali trasmessi dalla voce e dalla musica sono quindi lievi increspature che si sovrappongono alla pressione atmosferica. Durante lo spostamento dell'onda sonora le zone di compressione e di rarefazione si spostano lungo la direzione del raggio di propagazione.



Il suono, in assenza di interferenze dovute ad oggetti circostanti, si propaga uniformemente in tutte le direzioni, ciò significa che i fronti d'onda formano rispetto ad una sorgente puntiforme dei **gusci sferici**. L'intensità del suono diminuisce quindi con il quadrato del raggio, questo significa che raddoppiando la distanza l'intensità si riduce a 1/4 del valore iniziale, se si triplica la riduzione sarà di 1/9, e così via.

Lunghezza d'onda. Per lunghezza d'onda si intende la distanza percorsa da un'onda per completare un

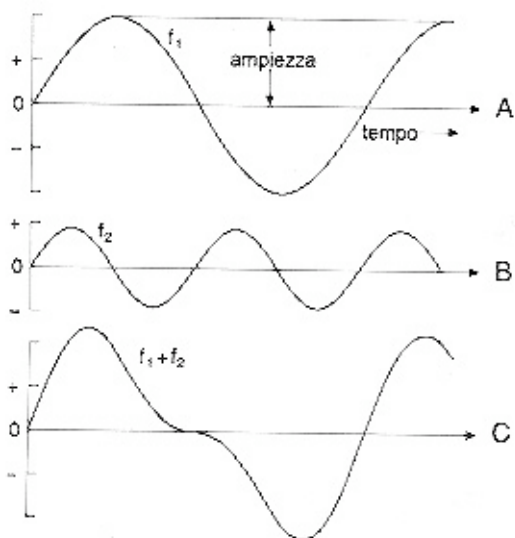
ciclo, cioè un periodo.

Frequenza. Per frequenza si intende il numero di cicli al secondo, e si misura in Hz.

L'equazione che lega lunghezza d'onda e frequenza è la seguente:

$$\text{lunghezza d'onda} = \frac{\text{velocità del suono (m/s)}}{\text{frequenza (Hz)}}$$

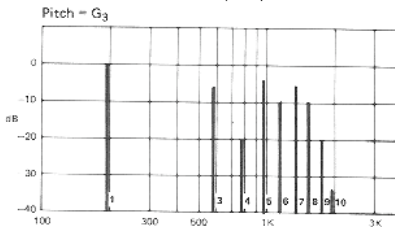
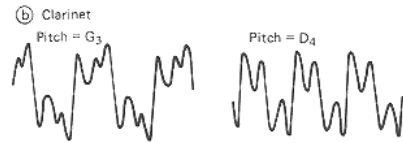
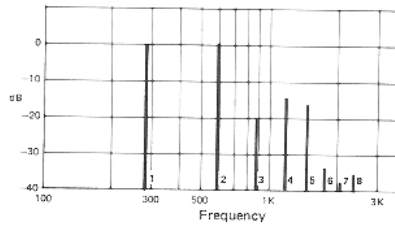
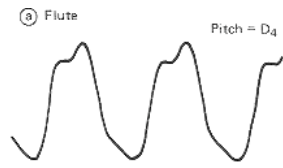
La velocità del suono nell'aria è di circa 340 m/s, quindi se per esempio volessimo calcolare la lunghezza d'onda di un suono con frequenza 440 Hz dovremmo dividere $340 / 440 = 0.77$ metri.



Fino ad ora abbiamo supposto di avere a che fare con onde semplici (sinusoidali). Nella realtà però le onde hanno forme ben più complesse. Una notevole semplificazione del problema ci viene data dalla teoria della **serie di Fourier**, in base alla quale qualsiasi onda (funzione) periodica complessa può essere sintetizzata partendo da onde sinusoidali di diversa frequenza, di diversa ampiezza e di diversa relazione temporale (fase). Facciamo un esempio : prendiamo un'onda sinusoidale di frequenza f_1 e ampiezza A, un'onda con

frequenza $f_2 = 2 \times f_1$ e ampiezza B, sommando A e B ad ogni istante troviamo un'onda C che è data dalla somma delle due. L'onda sinusoidale A si chiama **fondamentale**, quella a frequenza doppia B si chiama **seconda armonica**, un'eventuale 3 onda con $f_3 = 3 \times f_1$ si chiamerebbe **terza armonica** ecc. Con l'analisi di Fourier si effettua il procedimento inverso, cioè si scompone un'onda complessa nelle sue componenti semplici. Le varie armoniche possono partire entrambe dallo 0, e quindi si dicono **in fase**, oppure presentare dei ritardi. Il ritardo di mezza onda corrisponde a 180° , il ritardo di 360° corrisponde di nuovo alla fase. Spesso le onde complesse presentano delle componenti che non sono multipli interi esatti della frequenza fondamentale, in questo caso non si parla di armonica ma di **parziale**. Spesso le parziali danno la caratteristica timbrica di alcuni strumenti, come le campane, o il suono del pianoforte.

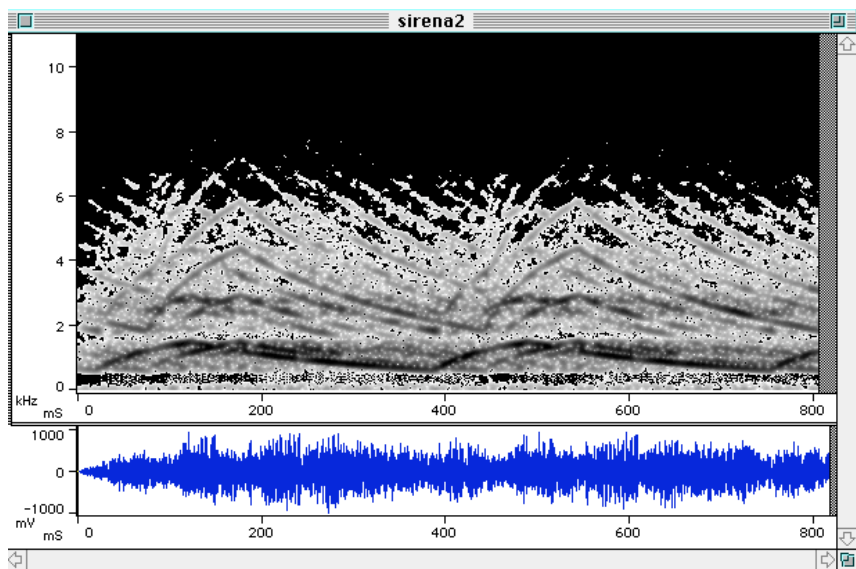
RAPPRESENTAZIONE DEL SUONO



Il suono può essere rappresentato graficamente in modi diversi. Conoscere le sue rappresentazioni è molto utile, perché spesso i nuovi software di editing del suono ci danno l'opportunità di visualizzare le registrazioni audio in tempo

reale. Le variabili fisiche con cui si rappresenta un evento sonoro sono 3: **TEMPO, FREQUENZA, AMPIEZZA**. La rappresentazione più comune usata dalla maggior parte dei software audio è l'*oscillogramma*, chiamato anche *forma d'onda*. L'oscillogramma mette in relazione il tempo e l'ampiezza. L'ampiezza (misurabile in decibel, o in byte come vedremo più avanti) può assumere valori positivi o negativi a seconda che vi sia compressione o rarefazione. L'oscillogramma è la visualizzazione migliore effettuare tagli / montaggi digitali in quanto ci dà un'ottima visualizzazione nel tempo. Ci permette di vedere i transienti di colpi percussivi come la batteria, di individuare in una traccia di canto le singole sillabe, di capire dall'ampiezza del suono l'andamento dinamico. L'oscillogramma non ci dice però niente sulla timbrica del suono, ed è molto artificioso avere informazioni sulla frequenza. Lo **spettro sonoro** mette invece in relazione ampiezza e frequenza. In uno spettro sonoro il segnale del suono è scomposto in tutte le sue varie componenti, che sono riportate insieme alla loro ampiezza nel grafico. Lo spettro ci permette di vedere la fotografia della timbrica di un suono, quindi le varie armoniche e parziali che lo compongono. Esistono analizzatori di spettro che fotografano lo spettro sonoro in tempo reale, in maniera da seguire la distribuzione delle frequenze in una registrazione.

Una rappresentazione del suono spesso poco utilizzata nella computer music è lo **spettrogramma**, che



mette in relazione tempo, frequenza e energia sonora. E' invece molto utilizzato in altre applicazioni audio, come il riconoscimento vocale, la bioacustica ecc. Un suono può cambiare nel tempo, cambiando la frequenza della fondamentale e cambiando il suo spettro armonico. Lo spettrogramma ci

permette di osservare questi cambiamenti. Lo spettrogramma viene rappresentato in due dimensioni, in ascisse il tempo e in ordinate la frequenza. Per indicare le ampiezze delle varie frequenze si utilizza invece o bande di colori o tonalità di grigio, come se fosse una fotografia dall'alto, e i chiari scuri indicassero rilievi e depressioni. In realtà è come se si utilizzasse una rappresentazioni in tre dimensioni (Frequenza, Ampiezza, Tempo), e l'ampiezza venisse proiettata sul piano Tempo-Frequenza. Alcuni programmi permettono di puntare il cursore sulle varie aree del grafico e avere misurazioni precise delle tre variabili.

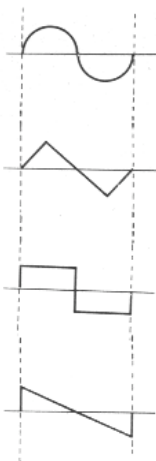
IL SINTETIZZATORE ANALOGICO

I primi sintetizzatori realizzati erano completamente analogici, costituiti da circuiti analogici che permettevano di sintetizzare forme d'onda e modificarle attraverso alcune elaborazioni. Anche adesso tuttavia, nell'epoca del digitale, molti concetti sono rimasti gli stessi e tradotti in digitale. Vi è poi anche la tendenza di riscoprire i synth vintage dal suono tipicamente sintetico, dopo che sintetizzatori sono riusciti a simulare molti strumenti acustici e elettrici c'è quindi una riscoperta del sintetizzatore come produttore di suoni non realizzabili con mezzi acustici.

I sintetizzatori analogici erano composti con una struttura **modulare**, ciò significa che erano costituiti da più componenti (circuiti) ognuno con una funzione diversa. In generale possiamo dividere i circuiti di

un sintetizzatore analogico in 3 categorie : CIRCUITI DI GENERAZIONE, DI ELABORAZIONE, DI CONTROLLO.

I circuiti principali di generazione del suono sono gli **oscillatori**, che generano una tensione elettrica che

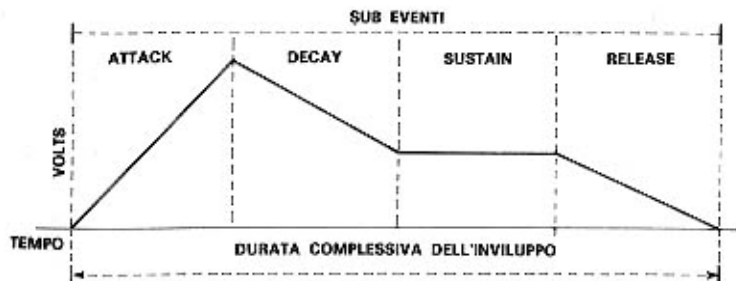


oscilla continuamente da zero positiva a zero negativa . L'oscillatore classico fornisce le quattro forme d'onda che corrispondono a 4 timbriche differenti : *Onda sinusoidale, onda triangolare, onda quadra, onda a dente di sega*. Questi oscillatori sono controllabili tramite una tensione elettrica (**VCO**) e possono assumere frequenze diverse (di solito è la tastiera che tramite variazione di tensioni elettriche pilota la frequenza dell'oscillatore). Un altro circuito di generazione è il **generatore di rumore**. Il generatore di **rumore bianco** produce una fascia sonora composta da tutte le frequenze udibili in una successione e in un rapporto tra loro assolutamente casuale. La sensazione uditiva è quella di un rumore continuo, molto

esteso e abbastanza uniforme, tale rumore viene definito bianco in analogia alla luce bianca che contiene tutti i colori. Un altro tipo di rumore è quello rosa, che contiene tutte le frequenze ma ha una attenuazione graduale delle frequenze acute (3 dB per ottava).

CIRCUITI DI ELABORAZIONE

Il circuito di inviluppo **EG** è un circuito che partendo dal valore 0 passa nel tempo attraverso diversi livelli di tensione per poi ritornare allo 0. Solitamente il generatore di inviluppo controlla l'amplificatore (**VCA**) modificando il volume del suono nel tempo. L'inviluppo è schematizzato in genere da quattro parametri, *attack, decay, sustain, release*, **ADSR**.



ATTACK. E' il valore del tempo che occorre perché si passi dal valore zero iniziale al valore massimo possibile dal circuito.

DECAY. Rappresenta il tempo tra il raggiungimento del valore di tensione massimo raggiunto a quello impostato per il parametro decay (vedi sotto).

SUSTAIN. E' il valore del livello sul quale l'involuppo può stazionare finché non viene a mancare il segnale di controllo. Nel caso più comune, cioè in cui l'involuppo controlla il VCA (il volume del suono nel tempo) il sustain rappresenterà il livello del suono finché la nota viene premiata.

RELEASE. tempo stadio dell'involuppo, e riporta il valore di tensione a 0. Il release rappresenta il tempo che occorre al circuito a ritornare a valore 0 dal momento in cui viene a mancare il segnale di controllo. Esistono poi dei generatori di involuppo (digitali) anche molto più complessi, composti da numerosi punti caratterizzati da due valori : livello e tempo.

I **FILTRI** un altro tipo di circuiti di elaborazione del suono. I filtri sono in grado di modificare il livello solo di alcune frequenze dello spettro sonoro, in pratica un amplificatore che agisce diversamente sulle frequenze.

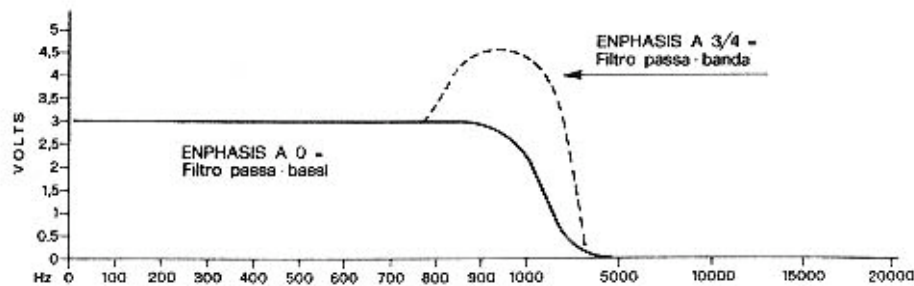
BAND PASS. Permette di far passare solo una banda ristretta di frequenze rispetto a quella udibile. Il filtro è caratterizzato, oltre alla banda di frequenza, alla curva di risposta del filtro (slope), poiché il taglio di frequenza non è netto (curva verticale) ma segue un'inclinazione, che si misura in dB per ottava.

BAND REJECT. Esattamente il contrario del band pass, permette di filtrare una banda di frequenza ristretta facendo passare tutte le altre.

LOW PASS. Permette di far passare solo le frequenze inferiori a quella che abbiamo impostato nel filtro.

HIGH PASS. Permette di filtrare tutte le frequenze che stanno sotto quella impostata nel filtro.

I Filtri passivi permettono solo di tagliare bande di frequenza, quelli attivi invece possono enfatizzare le bande di frequenza. Nei sintetizzatori spesso si trova un filtro che è dato dalla combinazione di un filtro passa basso (LOW PASS) e uno passa banda attivo. Il parametro **CUT-OFF** regola la frequenza di taglio del passa basso, alla stessa frequenza il filtro attivo effettua una enfasi chiamata **RESONANCE** (aumento di livello) della banda di frequenze intorno a quella di cut-off.



Il filtro (VCF) può essere controllato dal generatore di inviluppo, in modo che il suo effetto sul suono sorgente possa cambiare nel tempo. Un altro circuito

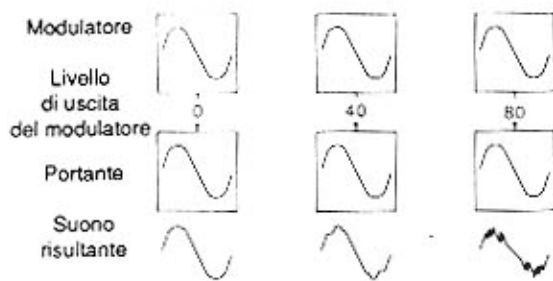
spesso presente nei sintetizzatori è l'**LFO**, cioè l'oscillatore a bassa frequenza, che ha una frequenza di oscillazione inferiore a 20 Hz, in modo che l'orecchio possa individuare i singoli cicli. L'LFO, spesso azionato dal controllo di modulazione, può modulare il segnale in ampiezza, in frequenza, o modulare il VCF.

METODI DI SINTESI

SINTESI SOTTRATTIVA. E' il tipo di sintesi che usavano la maggior parte dei sintetizzatori analogici, come abbiamo visto sopra. Il principio si basa su circuiti (oscillatori) in grado di generare forme d'onda ricche di armoniche, modellabili in seguito attraverso filtri. Quindi al suono sorgente iniziale vengono sottratte (o modificate in ampiezza) armoniche fino ad arrivare al suono voluto. La tecnica permette di ottenere sonorità elettroniche vintage, ora ritornate di moda, ma non è adatta per simulare strumenti acustici.

SINTESI ADDITIVA. Il principio di questo tipo di sintesi è costruire un suono aggiungendo tutte le armoniche che lo compongono. Teoricamente è la tecnica più potente e permette di ricreare qualsiasi suono (come si è visto dalla teoria della serie di Fourier), in pratica però è difficilmente gestibile perché ha bisogno di un numero molto alto di parametri indipendenti, per ogni armonica o parziale cioè il valore di frequenza, fase e ampiezza che variano nel tempo.

SINESI PER MODULAZIONE DI FREQUENZA.

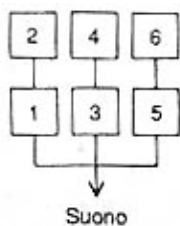


La sintesi per modulazione di frequenza permette di ottenere sonorità interessanti con costi ridotti di progettazione e pochi parametri acusticamente significativi di programmazione. La licenza per il metodo di sintesi in FM appartiene alla Yamaha, che per prima commercializzò un sintetizzatore digitale con questa

tecnica (Yamaha DX7, forse il sintetizzatore che ha avuto il maggiore successo commerciale).

La sintesi in FM è composta essenzialmente da due oscillatori, uno modulante (modulator) e uno portante (carrier). Il primo oscillatore modula in frequenza il secondo dando come risultante una terza forma d'onda che al contrario delle prime due (sinusoidi) è ricca di armoniche e parziali. Se l'oscillatore modulante ha una frequenza inferiore a 20 Hz l'effetto ottenuto è quello di vibrato, quando invece rientra nella fascia udibile arricchisce il suono armonicamente. Quando le frequenze del modulator e del carrier presentano rapporti numerici semplici si formano nello spettro sonoro risultante frequenze armoniche, altrimenti parziali.

I parametri della sintesi in FM sono La frequenza dell'oscillatore modulante (che può essere fissa o cambiare insieme al modulante), l'involuppo del modulator e del carrier, la fase. I synth in modulazione di frequenza di solito presentano più oscillatori (di solito 6) organizzati in gruppi (algoritmi) per creare sonorità più ricche e interessanti



Algoritmo 42

Nei sintetizzatori Fm della nuova generazione sono stati aggiunti alcune opzioni, come l'utilizzo di forme d'onda complesse (sia per il modulatore che per il portante), l'utilizzo di filtri, aggiunta di effetti digitali ecc.

La tecnica di sintesi per modulazione di frequenza non è adatto per simulare suoni acustici come lo è invece quella per forme d'onda, permette però di creare timbriche estremamente caratteristiche ed espressive.

SINTESI PER FORME D'ONDA.

E' il metodo di sintesi più utilizzato negli ultimi anni. Consiste nell' avere registrato nella memoria ROM (di sola scrittura) una serie di forme d'onda di solito di vario tipo, da quelle classiche dei sintetizzatori analogici a quelle di strumenti acustici (**Wavetable**) . Le forme d'onda non vengono in realtà ricostruite

attraverso modifiche del suono, ma semplicemente registrate attraverso microfoni o altri dispositivi audio, digitalizzate, e risuonate dal sintetizzatore. Il maggiore pregio di questo tipo di sintesi è la semplicità ed efficacia con cui si riesce a simulare strumenti acustici o elettrici. Spesso però i suoni campionati risultano fissi e poco espressivi, per questo i sintetizzatori a forme d'onda (la quasi totalità dei sintetizzatori in commercio) presentano anche dei controlli (in questo caso però digitali) ereditati dalle macchine analogiche : EG, VCF ecc. in modo da poter correggere, modellare e rendere più espressivo il suono.

SINTESI PER MODELLI FISICI.

E' una tecnica di sintesi resa possibile (in tempo reale) solo negli ultimi anni, grazie alla elevata potenza di calcolo che i microprocessori hanno raggiunto. Il principio su cui si base è il seguente : i suoni vengono sintetizzati in base a dei modelli matematici (equazioni periodiche) prendendo in considerazione il sistema fisico che li produce e cercando quindi di rappresentarlo in base a variabili significative che influenzano il suono stesso. Alcuni esempi li troviamo nei sintetizzatori che simulano i synth analogici, in questo caso non abbiamo forme d'onda campionate dagli strumenti originali (che proprio perché registrate per un breve periodo risulterebbero fisse, cioè fredde) ma dei modelli matematici che simulano il comportamento della circuitazione analogica. I modelli fisici possono però simulare non solo circuiti elettronici, ma sistemi acustici reali (chitarre, strumenti a fiato ecc.). Il numero di variabili spesso coinvolto nell'esecuzione di un suono è spesso elevato, per questo per utilizzare questo tipo di sintesi nelle sue potenzialità occorre utilizzare oltre alla tastiera alcuni controller.

Franco Poggiali Berlinghieri

Artestudio53 99-00

email: artestud@tin.it