

J. C. Risset, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1969

Un Catalogo Introduttivo di Suoni Sintetizzati al
Computer

Indice

Elenco delle figure	5
Introduzione	9
Riconoscimenti	9
Abstract	9
Note introduttive	10
Legni	13
#100 - Melodia di Flauto (Traccia 1)	13
Strumento #2	13
Strumento #3	14
#150 - Passaggio Seriale con suoni di Clarinetto tramite non linearità (Traccia 2)	15
Strumento #1	16
Strumento #2	17
Strumento #3	17
Ottoni	19
#200 - Suoni di Ottoni ottenuti tramite controllo indipendente delle armoniche (Traccia 3)	19
Strumento #1	19
Strumenti dal #2 al #6	19
Strumento #7	20
#201 - Come #200 eseguito a diverse frequenze di sampling (Traccia 4)	20
#210 - Suoni di Ottoni semplificati (Traccia 5)	21
Prima sezione	22
Seconda sezione	23
#250 - Toni di strumenti ad ancia e pizzicati; Effetti corali (Traccia 6)	23
Prima sezione	24
Seconda sezione	24
Terza sezione	24
Esperimenti sui tipi di involuppo	25
#300 - Esperimenti di decadimento lineare ed esponenziale (Traccia 7)	25
Prima sezione	25
#301 - Passaggio con suoni di pianoforte (Traccia 8)	26
1 - Note basse e brevi suonate con lo strumento #1 (durata $\leq 0.2 s$, frequenza $\leq 250 Hz$)	27
2 - Note brevi e corte eseguite con lo strumento #2 (durata $\leq 0.2 s$, frequenza $\geq 250 Hz$)	28
3 - Note lunghe e basse eseguite con lo strumento #3 (durata $\geq 2 s$, frequenza $\geq 250 Hz$)	28
4 - note lunghe e alte suonate con lo strumento #4 (durata $\geq 0.2 s$, frequenza $\geq 250 Hz$)	29
Suoni percussivi	31
#400 - Suoni percussivi e di rullante (Traccia 9)	31
Prima sezione	32
Seconda sezione	32
Terza sezione	32
#410 - Suoni percussivi e di campana (Traccia 10)	33
Prima sezione	34
Seconda sezione	34
Terza sezione	35
Quarta sezione	35
#411 - Analogo a #410 (Traccia 11)	35
Sezioni (da 1 a 7)	35
#420 - Suoni di Gong (Traccia 12)	35
#430 - Tre approssimazioni successive di un suono di Campana (Traccia 13)	36

#440 - Percussioni ad altezza variabile (Traccia 14)	37
Prima sezione	38
Seconda sezione	38
Terza sezione	38
Quarta sezione	39
Quinta sezione	39
#490 - Esempio di missaggio (Traccia 15)	39
Altri esperimenti di sintesi	43
#500 - Analisi spettrale di un accordo (Traccia 16)	43
#501 - Come #500 ma con un differente involuppo temporale (Traccia 17)	44
#502 - Missaggio partendo da #500 (Traccia 18)	44
#503 - Missaggio partendo da #501 (Traccia 19)	45
#510 - Glissandi di sirene (Traccia 20)	45
Strumento #1	45
Strumento #2	45
Strumento #3	46
Strumento #4	46
#511 - Glissandi, in particolare con differenza costante di frequenza fra le voci (Traccia 21)	47
Prima sezione	47
Strumento #1	47
Strumento #2	48
Strumento #3	48
Seconda sezione	48
Strumento #4	48
#512 - Missaggio partendo dai suoni dell'esempio #511 (Traccia 22)	50
#513 - Frammento di glissando infinito (Traccia 23)	50
#514 - Un suono la cui altezza va simultaneamente sia verso l'alto che verso il basso (Traccia 24)	52
#515 - Traslazione di involuppo per Suoni con componenti in relazione di ottava (Traccia 25)	53
Strumento #1	53
Prima sezione	54
Seconda sezione	54
Terza sezione	54
Quarta sezione	54
#516 - Traslazione di involuppo di componenti armoniche e inarmoniche (Traccia 26)	54
Sezioni da 1 a 3	54
Sezioni da 3 a 6	54
#517 - Missaggio da #510 a #516 (Traccia 27)	55
#550 - Accordo ottenuto con modulazione ad anello con risonanza di Gong (Traccia 28)	55
Strumento #1	55
Strumento 2	56
Bibliografia	57

Elenco delle figure

1.	Melodia eseguita dallo strumento 13	
2.	Andamento della funzione F_5 (anche F_4 , F_6 e F_7)	13
3.	Andamento di F_{12}	13
4.	Esempio #100, strumento #2	14
5.	Diagramma dello strumento #3	14
6.	Serie dodecafoniche memorizzate in F_7 e in F_8	15
7.	Serie ritmica presente in F_5	15
8.	Strumento #1: andamento delle funzioni F_2 , F_5 e F_7	16
9.	Diagramma dello strumento #1; andamento di F_1	17
10.	Andamento della funzione esponenziale decrescente in F_4	17
11.	Melodia eseguita dallo strumento	19
12.	Lo strumento #1 (generatore di valori aleatori)	19
13.	Diagramma degli strumenti #2 ... #6 e andamento delle funzioni F_2 e F_6	20
14.	Diagramma dello strumento #7	20
15.	Diagramma dello strumento #1	21
16.	Grafici delle funzioni per l'esempio #210	22
17.	Strumenti #1, #2 e #3	23
18.	Diagramma dello strumento #4	24
19.	Strumento #1	25
20.	Andamento di F_4 (decadimento lineare)	25
21.	Andamento di F_5 (decadimento esponenziale)	26
22.	Passaggio eseguito dallo strumento #1	27
23.	Andamento della funzione di involuppo d'ampiezza F_3	27
24.	Diagramma dello strumento #1	27
25.	Ampiezze delle armoniche di F_1	28
26.	Ampiezze delle armoniche di F_2	28
27.	Andamento di F_4	28
28.	Diagramma dello strumento #1	31
29.	Funzione di involuppo esponenziale decrescente in F_2	31
30.	Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (con "maglia del rullante")	32
31.	Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (senza "maglia del rullante")	32
32.	Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (di nuovo con "maglia del rullante")	32
33.	Diagramma dello strumento #1 utilizzato nelle prime due sezioni	33
34.	Decadimento esponenziale di F_2	33
35.	Decadimento esponenziale di F_8	34
36.	Diagramma dello strumento #2	34
37.	Diagramma dello strumento #1	35
38.	Diagramma dello strumento #1	36
39.	Lo strumento (degenere) #2	37
40.	Strumento #3	37
41.	Andamento di F_6	38
42.	Funzioni di controllo dell'ampiezza	38
43.	La funzione F_2 di controllo della frequenza	39
44.	Diagramma della parte iniziale del missaggio	41
45.	note calcolate per $DD = 0$ e $N = 4$	43
46.	Conformazione dell'accordo generato per $DD = TS$	43
47.	Accordo originario usato come ingresso della sotto routine compositiva	44
48.	Andamento di F_2 e del suo quadrato (curva tratteggiata); diagramma dello strumento #1 (#2)	44
49.	Strumento #1	45
50.	Strumento #2	46

51.	Diagramma dello strumento #3	46
52.	Diagramma dello strumento #4	47
53.	Strumento #1	47
54.	Strumento #2	48
55.	Strumento #3	48
56.	Strumento #4	49
57.	Andamento della funzione di controllo della frequenza F_8	49
58.	Glissando infinito - strumento #1	50
59.	Andamento della funzione F_3 (controllo dell'altezza delle componenti)	51
60.	Andamento della funzione F_4 (controllo dell'ampiezza delle componenti)	51
61.	Diagramma dello strumento di base	52
62.	Avvicendamento dei valori di F_3 e F_4 nel caso di un incremento di lettura della funzione F_4 maggiore (F_4 risulta "compressa" nel tempo)	53
63.	Strumento #1	53
64.	Curve a campana con singolo, doppio e triplo picco	54
65.	Prolungamento di un'armonia in un timbro: passaggio musicale	55
66.	Strumento #1	56

Introduzione

Riconoscimenti

Dedico questo catalogo a Max V. Mathews come segno di ammirazione e gratitudine. È stato davvero una grande fortuna ed un grande piacere per me lavorare con lui e utilizzare i nuovi meravigliosi mezzi da lui forgiati per fare musica.

Abstract

Questo catalogo introduttivo presenta circa 25 esempi di suoni generati dal computer utilizzando programmi scritti per il linguaggio di programmazione MUSIC V ideato da M. V. Mathews. Alcuni dei suoni emulano strumenti musicali, altri no. Il catalogo consiste nella combinazione di un nastro (o di un disco) contenente i suoni per poterli valutare acusticamente unitamente ai dati per il computer utilizzati per la sintesi dei suoni i quali forniscono una descrizione esauriente della struttura fisica di questi suoni. Questo catalogo è inteso come un esempio da seguire dalle persone che lavorano sulla sintesi sonora in modo che altri possano beneficiare delle loro scoperte e dimodoché sia disponibile un repertorio esteso di suoni per studi sulle qualità dei toni e sulla *computer-music*.

Note introduttive

Questo limitato “catalogo” porta esempi di vari tipi di suoni musicali generati dal computer utilizzando programmi scritti nel linguaggio MUSIC V. Una descrizione generale del processo di sintesi viene fornita in [1]; maggiori dettagli sia sul processo che sul particolare programma usato possono essere trovati in [2]. Per ogni sintesi l’utente del programma deve fornire dati che corrispondano ai parametri fisici del suono desiderato. I dati utilizzati per sintetizzare un brano musicale verranno d’ora in poi chiamati come la *score* per computer di quel brano.

È stato da molto tempo riconosciuto [3] che per trarre vantaggio dalle illimitate risorse per la sintesi del suono tramite computer fosse necessario sviluppare un corpo di conoscenze riguardo la psicoacustica per essere in grado di specificare i parametri fisici corrispondenti ad un tipo di suono desiderato. Esperimenti con i suoni apparentemente ben conosciuti di alcuni strumenti musicali [4] hanno mostrato che una tale conoscenza era ancora molto povera e anche che la sintesi dei suoni tramite computer era uno strumento di valore inestimabile per rimediare a questa situazione.

Questo catalogo presenta risultati di sintesi al computer per alcuni suoni, strumentali e non. È costituito dalla combinazione di un nastro (o di un disco) con i suoni, il che permette la valutazione uditiva di questi suoni, e delle corrispondenti *score* per computer con alcune spiegazioni aggiuntive che forniscono la ricetta per la sintesi e che forniscono anche una esauriente descrizione della struttura fisica dei suoni. Pertanto il lettore-ascoltatore può confrontare i parametri fisici dei suoni ed il loro effetto soggettivo. Si è anche in grado di risintetizzare i suoni utilizzando lo stesso o altri programmi o qualsiasi processo che consente di controllare i parametri fisici necessari.

Ogni esempio presentato è numerato sul nastro e sul libretto allegato. Assieme alla *score* vengono date alcune spiegazioni riguardo all’esempio, alla progettazione dello strumento e alle funzioni memorizzate usate.

Deve essere sottolineato che i suoni sono presentati come esempi e assolutamente non come modelli. In molti casi non è stato fatto nessun tentativo di ottimizzare la sintesi riguardo alla semplicità o all’efficienza; inoltre la maggior parte dei suoni emulativi di strumento non tentano un’imitazione fedele dei suoni reali. Secondo la nostra esperienza gli esempi di certi tipi di suono con la loro descrizione sono i più utili per il fatto che questo fornisce un punto di partenza per l’esplorazione sistematica della sintesi dei suoni di questo tipo: è poi piuttosto immediato scovare e scartare caratteristiche non importanti attraverso variazioni sistematiche dei parametri. Per i suoni qui presentati i parametri fisici sono stati dedotti dai dati relativi a strumenti musicali reali o dai risultati di vari tentativi di sintesi.

Diverse delle sintesi presentate non sono molto economiche. Le sintesi semplici ed economiche sono di solito semplici da esplorare e la complessità sembra spesso necessaria per la generazione di suoni variati dotati di vita e di interesse musicale. Tuttavia esistono metodi economici e non triviali per sintetizzare suoni interessanti: ad esempio attraverso l’uso di modulazioni di frequenza inusuali, come esplorato da John Chowning alla Stanford University; oppure attraverso l’uso di cambiamenti non lineari di forme d’onda o tramite operazioni simili alla modulazione ad anello, come esemplificato negli esempi #150 e #550 di questo catalogo.

Alcuni degli esempi sonori presentati (#490, 502, 503, 512, 517) non sono l’output immediato del computer ma sono bensì ottenuti dal missaggio di una o più esecuzioni del programma di sintesi. Ovviamente il missaggio priva l’utente di parte della precisione e convenienza del computer e richiede buone apparecchiature elettroacustiche. Tuttavia, come discusso nell’esempio #512, questo aiuta l’utente a controllare il bilanciamento fra le ampiezze di diverse voci e potrebbe consentire di usare più volte il singolo risultato dell’elaborazione del computer.

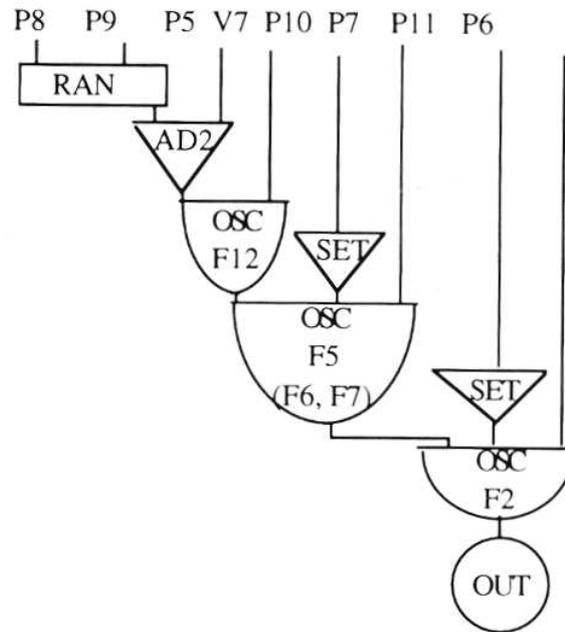
Gli ascoltatori sono incoraggiati ad ascoltare gli esempi sonori a diverse velocità e anche all’indietro: queste semplici manipolazioni corrispondono a semplici cambiamenti dei parametri fisici.

I numeri degli esempi di genere non sono contigui, questo per permetterci di inserire più tardi nuovi esempi ovunque sembri essere il posto più logico. Purtroppo si deve sottolineare che non è stato fatto nessun tentativo di classificazione rigorosa dei suoni presentati. I problemi in questo ambito sono formidabili dal momento che la dimensionalità della percezione del timbro sembra essere molto alta.

Questo catalogo è solamente un sottoprodotto di alcune esplorazioni sonore ma speria-

mo che stimolerà altre persone che lavorano nel campo del suono sintetico a fare lo stesso tipo di presentazione del loro lavoro: a quel punto sarebbe possibile trarre vantaggio dei loro risultati ed un repertorio esteso di suoni si formerebbe gradualmente e sarebbe immediatamente disponibile, cosa che potrebbe giovare agli studi sulle qualità dei toni e forse ad altri campi della psicoacustica [5] nonché alla *computer music*.

Figura 4. Esempio #100, strumento #2

**Strumento #3**

Questo strumento viene semplicemente usato per introdurre glissandi di frequenza controllati da F_9 o per aumentare le proporzioni della fondamentale (in congiunzione con lo strumento #2).

Figura 5. Diagramma dello strumento #3

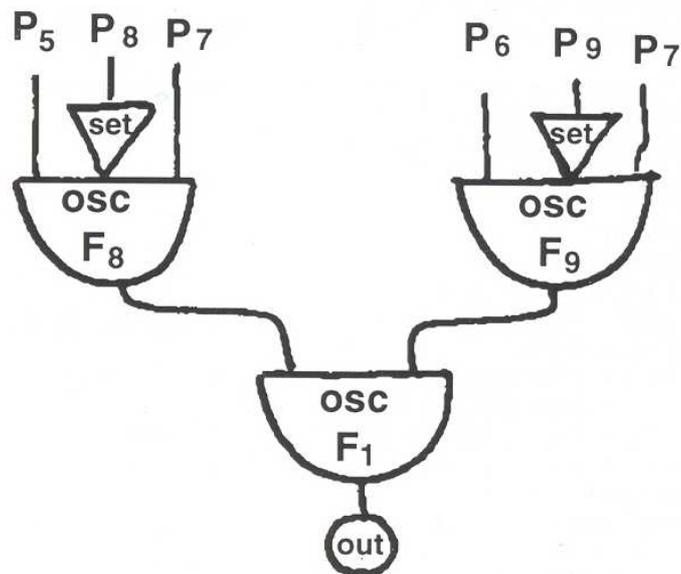
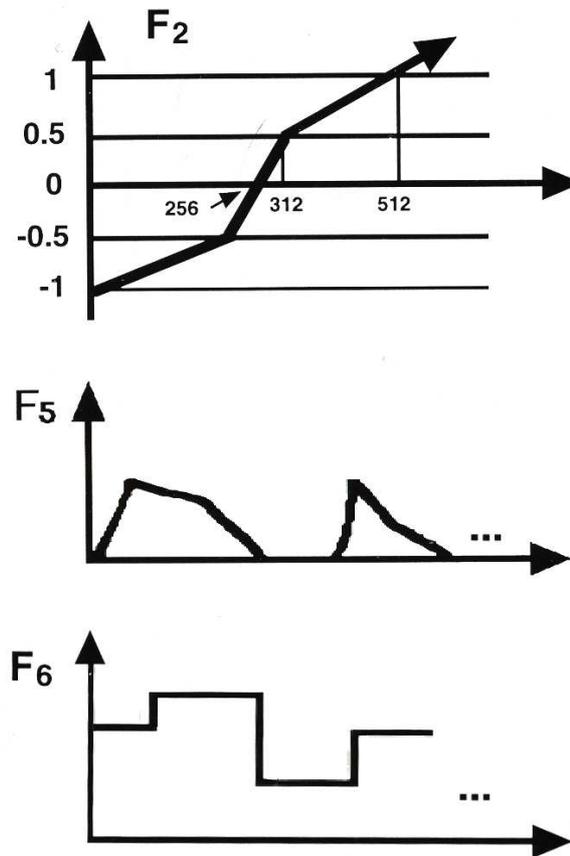
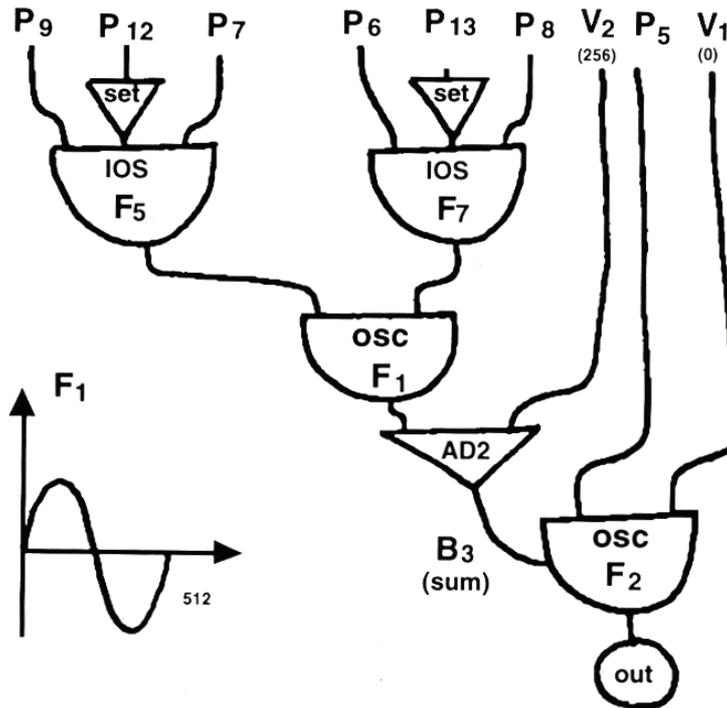


Figura 8. Strumento #1: andamento delle funzioni F_2 , F_5 e F_7 

Strumento #1

Lo strumento #1 è rappresentato nel diagramma di figura 9. Un'onda sinusoidale F_1 è controllata in ampiezza e in frequenza da rispettivamente dalle funzioni F_5 e F_6 e viene quindi sottoposta ad una trasformazione non lineare secondo i valori presenti in F_2 . Il prodotto fra F_2 e P_5 fornisce un'uscita come funzione del valore in ingresso B_3 che deve essere compreso nell'intervallo $[-256, 256]$. Questo viene ottenuto utilizzando l'oscillatore più in basso in maniera degenera secondo cui B_3 è utilizzato come somma con un incremento di frequenza pari a 0 ($V_1 = 0$). Sia P_9 che P_5 determinano la massima ampiezza anche se il valore di P_9 (nell'intervallo $[-256, 256]$) determina l'ammontare di "distorsione" applicato all'onda sinusoidale (l'uscita rimane una sinusoide se $P_9 < 312 - 256 = 56$). La distorsione genera armoniche dispari e per questo si è dovuto utilizzare un *sampling-rate* di 20 KHz per evitare *foldover* obbiettabili per frequenze fondamentali attorno ai 1500 Hz.

Figura 9. Diagramma dello strumento #1; andamento di F_1 .



Strumento #2

Lo strumento #2 genera semplicemente una forma d'onda definita da F_3 , controllata in ampiezza e in frequenza rispettivamente dalle funzioni F_6 e F_8 . F_3 è una forma d'onda di soli valori positivi: è una sinusoide in una scala in dB con il punto più basso ad una distanza di 84 dB dal valore massimo. Esiste una differenza marcata fra l'effetto uditivo di questa forma d'onda e quello di una vera sinusoide.

Strumento #3

Lo strumento #3 genera una sinusoide la cui frequenza è controllata da F_7 e la cui ampiezza è controllata da F_4 . F_4 è una curva esponenziale decrescente: questo da origine ad un suono percussivo. La velocità di lettura della funzione dell'ampiezza è (circa) 12 volte la velocità di lettura della funzione di frequenza: se fosse esattamente 12 questo darebbe origine ad un "attacco" per ogni altezza. Svincolando le velocità di lettura per le funzioni di controllo dell'ampiezza e della frequenza è possibile ottenere altezze ripetute o passaggi legati fra altezze diverse.

Figura 10. Andamento della funzione esponenziale decrescente in F_4

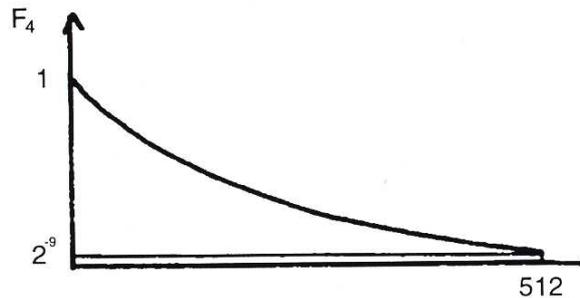
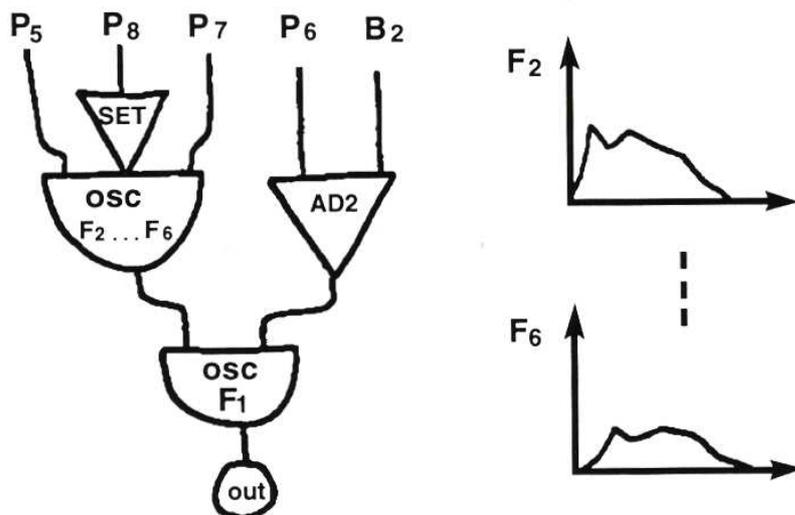
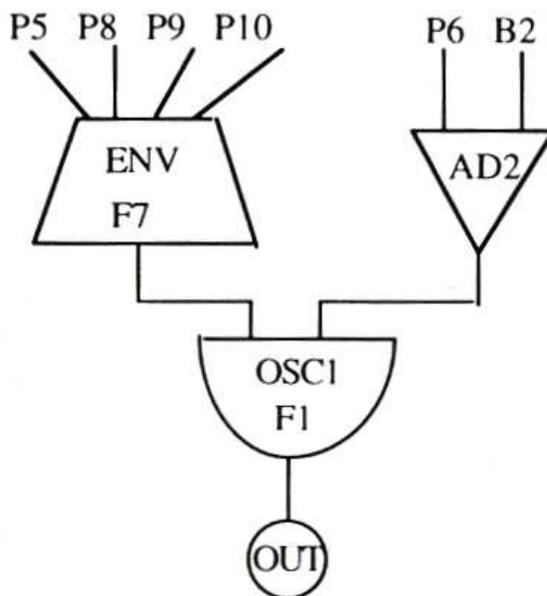


Figura 13. Diagramma degli strumenti #2 ... #6 e andamento delle funzioni F_2 e F_6 **Strumento #7**

Questo strumento è utilizzato per sintetizzare parziali con differenti attacchi e decadimenti.

Figura 14. Diagramma dello strumento #7

**#201 - Come #200 eseguito a diverse frequenze di sampling (Traccia 4)**

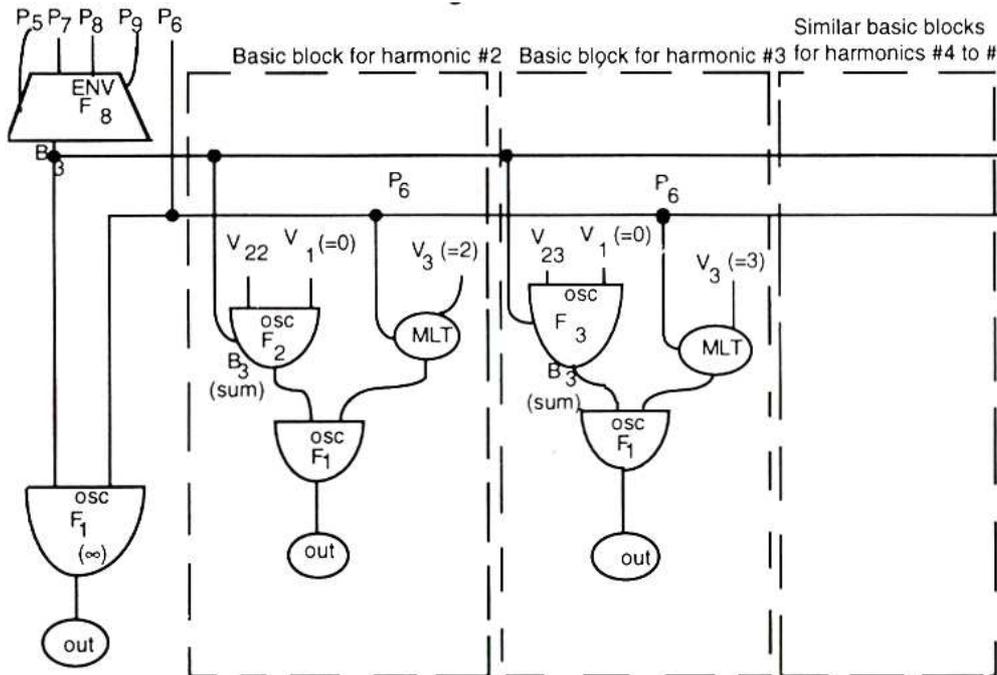
Si tratta dello stesso esempio #200 ma riprodotto con un sampling-rate di $5000Hz$ anziché di $12500Hz$, in questo modo tutte le frequenze sono moltiplicate per 0.4 e tutte le durate per 2.5.

#210 - Suoni di Ottoni semplificati (Traccia 5)

Qui sono forniti alcuni esempi di suoni simili agli ottoni sintetizzati con maggior economia di specificazione che nell'esempio #200. Viene utilizzato uno strumento progettato per produrre suoni i cui spettri dipendono dall'ampiezza di una componente (si veda [10]). Si noti che questo strumento non è per nessun motivo limitato alla generazione di questo tipo di suoni: le componenti non devono necessariamente essere in relazione armonica e le funzioni utilizzate possono essere del tutto differenti.

Il diagramma dello strumento è riportato in figura 15. L'ampiezza di una parziale (che sarà in questo esempio la prima armonica) è controllata dalla funzione F_8 , utilizzata con il generatore di inviluppo denominato ENV;

Figura 15. Diagramma dello strumento #1



la massima ampiezza di questa componente è determinata da P_5 e deve essere inferiore a 512. L'uscita del generatore di inviluppo ENV corrisponde al blocco di *input-output* B_3 . B_3 viene utilizzato come valore di ampiezza in ingresso all'oscillatore che genera il contributo alla prima armonica, e anche per un altro proposito. Pertanto B_3 deve essere riservato in questo strumento e non può ad esempio essere usato come uscita per un altro oscillatore. Per ogni armonica B_3 viene usato come somma per un oscillatore con un incremento in frequenza pari a 0 ($V_1 = 0$), che per ciò si comporta semplicemente come una unità per il *look-up* dei valori di una di funzione. Ad esempio per la seconda armonica l'uscita di questo oscillatore sarà il prodotto di V_{22} per il valore della funzione memorizzata F_2 per un'ascissa pari al valore correntemente memorizzato in B_3 (nel caso in esempio il valore in uscita dal generatore ENV).

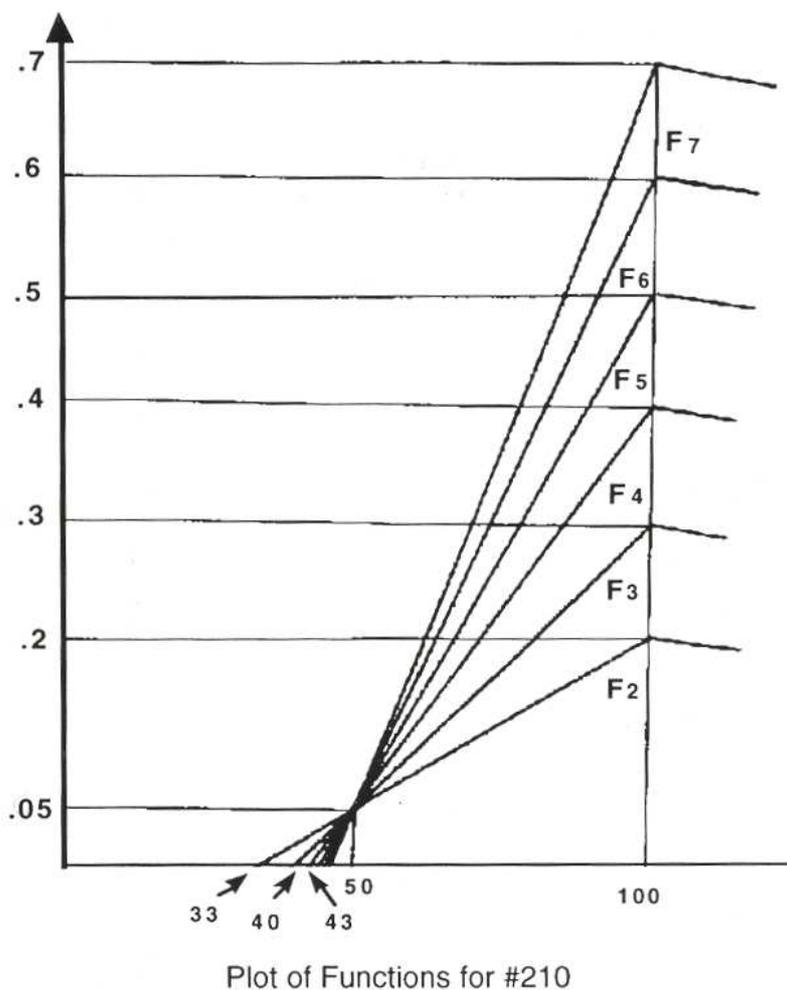
Il valore così ricavato viene memorizzato in B_4 ed utilizzato come ampiezza di ingresso per l'oscillatore che genera il contributo per la seconda armonica dove la frequenza di ingresso risulta essere il prodotto della frequenza fondamentale P_6 per la costante $V_2 = 2$. Per questo motivo il valore dell'ampiezza della seconda armonica è una funzione prescritta dell'ampiezza della prima armonica (essendo questa funzione determinata da V_{22} e da F_2).

Altri blocchi basilari simili forniscono in maniera analoga l'ampiezza di ogni armonica come una funzione prescritta dell'ampiezza della prima armonica. In questo modo lo spettro del suono dipende interamente dall'ampiezza della prima armonica.

La frequenza fondamentale in Hz è data in P_6 . I tempi di attacco e di decadimento sono dati in secondi attraverso P_7 e P_9 ; la durata D del periodo di sostegno viene calcolata come $D = P_4 - P_7 - P_9$

L'esempio comprende due sezioni che differiscono nelle costanti V_{22}, \dots, V_{28} e nelle funzioni F_2, \dots, F_7 utilizzate dallo strumento. Per questo motivo il modo in cui lo spettro dipende dall'ampiezza della prima armonica cambia fra le due sezioni, tuttavia in entrambe lo spettro mantiene una importante caratteristica dei toni degli ottoni, ossia il fatto che la proporzione di energie ad alta frequenza aumenta assieme all'intensità del suono.

Figura 16. Grafici delle funzioni per l'esempio #210



Prima sezione

Nella prima delle due sezioni le funzioni dalla F_2 alla F_7 sono come rappresentato in figura 16. Tutte le funzioni assumono il valore 0.5 per il valore di ascissa 50: quando l'ampiezza della prima armonica è pari a 50 allora l'ampiezza della seconda armonica è pari a $V_{22} * 0.05$ (in questo caso $1000 * .05 = 50$), l'ampiezza della terza armonica è $V_{23} * 0.05$ e così via. In questo modo quando P_5 vale 50 le ampiezze delle armoniche successive saranno proporzionali rispettivamente ai valori 1000, V_{22} , V_{23} , ... Quando P_5 supera il valore 50 allora a causa delle funzioni utilizzate il contributo delle armoniche numero 2, 3, ..., 7 cresce rispettivamente 2, 3, ..., 7 volte più velocemente. La saturazione (*overloading*, ovvero un'ampiezza di picco superiore a 2048) si ha quando P_5 è compreso fra 80 e 90, per questo l'intervallo utile per P_5 va da 0 a 80 (anche se il suono è sinusoidale per $P_5 < 33$).

Il primo suono è un lungo tono la cui dinamica è rappresentata dalla sequenza *sforzato*, *piano*, *crescendo* per illustrare come lo spettro si schiarisca con l'aumentare dell'ampiezza. Seguono quindi 9 suoni corti di varia ampiezza con una forte predominanza di ampiezza all'inizio del suono. Il tempo di attacco utilizzato è di 50 ms (superiore rispetto al più dei suoni di tromba reali a causa della maniera inusuale con cui entrano le armoniche).

Seconda sezione

Nella seconda sezione vengono usate funzioni F_2 e F_3 diverse e valori differenti per V_{22}, \dots, V_{27} . La sezione comprende cinque note sostenute e una nota in crescendo.

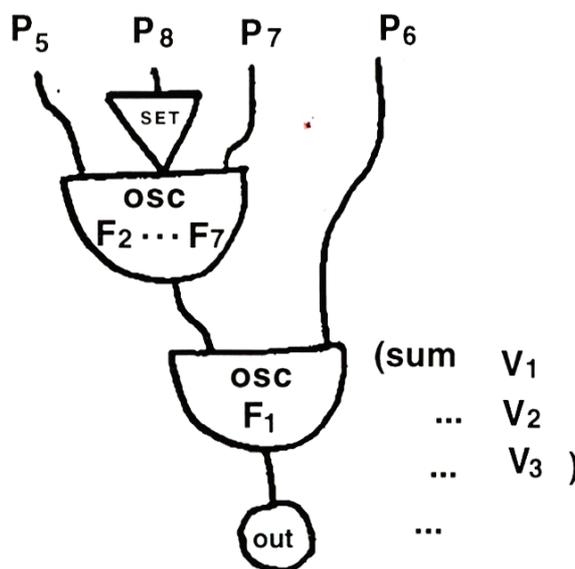
Risulta utile aggiungere allo strumento un controllo di scalatura dell'ampiezza di uscita: questo permette allo strumento di essere riprodotto da diverse voci aventi ognuna $P_5 = 80$ senza saturazione (la semplice riduzione del valore di P_5 per ogni voce cambierebbe lo spettro).

I suoni di questo esempio non vengono presentati come una buona imitazione del suono di una tromba: lo spettro non viene riprodotto accuratamente ed in particolare non esiste una *torment structure*; non ci sono abbastanza componenti e non c'è controllo in frequenza (tuttavia sia la struttura formantica che il controllo di frequenza potrebbero essere integrate in questo tipo di strumento). D'altra parte usando questo tipo di controllo dello spettro si possono ottenere dei suoni in qualche maniera evocativi degli ottoni con anche solo tre funzioni: una che controlli le armoniche 2 e 3, una seconda per le armoniche 4 e 5 e l'ultima per le armoniche 6 e 7. Oltretutto come già detto prima l'utilità di questo tipo di variazione dello spettro non è limitata all'emulazione di suoni di ottone.

#250 - Toni di strumenti ad ancia e pizzicati; Effetti corali (Traccia 6)

Questo esempio illustra come la stessa forma d'onda possa portare qualità diverse in base all'inviluppo di ampiezza. Vengono presentati dei suoni che potrebbero essere descritti come di strumento ad ancia (ad esempio come i suoni di oboe o di bombardà) oppure pizzicati (come i suoni di clavicembalo). Viene anche dato un esempio di "effetto corale".

Figura 17. Strumenti #1, #2 e #3



I diagrammi di questi strumenti sono riportati in figura 17. Forniscono una forma d'onda F_1 con un inviluppo definito dalle funzioni da F_2 a F_7 . La somma dell'oscillatore di forma d'onda viene salvata in una variabile globale in modo da consentire dei legati privi di click fra note successive.

Gli strumenti #1, #2, e #3 sono definiti rispettivamente dalle funzioni F_1, F_2 e F_3 per l'inviluppo: questi numeri di funzione tuttavia possono essere cambiati nei parametri della nota utilizzando la funzione SET. Le funzioni utilizzate forniscono attacchi e decadimenti di lunga durata (maggiori di 50 millisecondi) e passaggi legati fra note successive.

La funzione F_1 comprende 11 armoniche; questa stessa funzione viene usata nello strumento #4 (figura 18).

Prima sezione

La prima sezione riproduce un passaggio tratto da una melodia popolare della bretagna con una voce (prodotta dallo strumento #1). La scala non è in temperamento equabile; la nota iniziale è piuttosto bassa. La qualità del tono ricorda quello di uno strumento a doppia ancia.

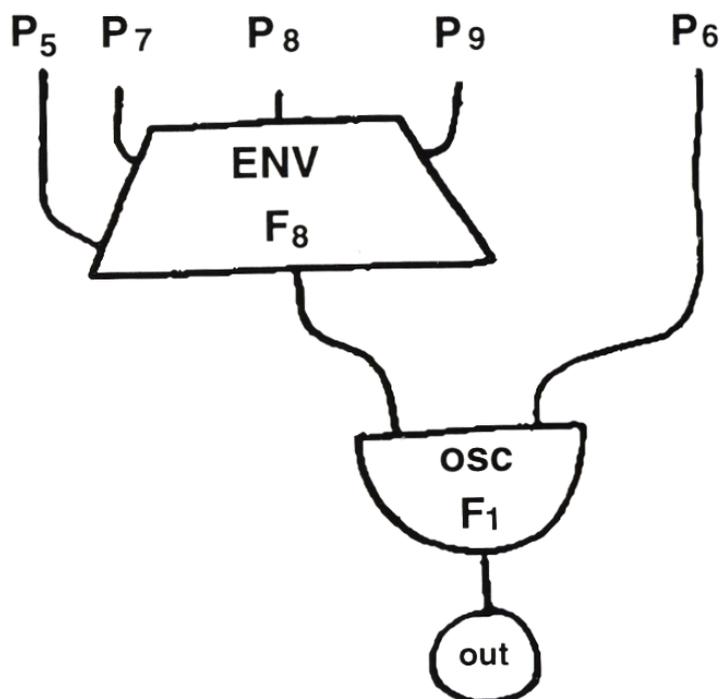
Seconda sezione

La seconda sezione riproduce una melodia simile ma con tre voci eseguite dagli strumenti dall'1 al 3. La differenza di tempo e frequenza fra le voci (fino ad una differenza in frequenza di una percentuale abbastanza alta e fino a 0.08 secondi di differenza di tempo) evoca in qualche modo il suono di un numero di suonatori (effetto corale). A partire da una voce singola le voci aggiuntive potrebbero essere calcolate in maniera automatica in maniera semplice.

Terza sezione

La terza sezione propone una melodia analoga con la stessa forma d'onda F_1 ma con un breve attacco e decadimento (esponenziali). Questa sezione fa uso dello strumento #4 il cui diagramma è riportato in figura 18. Le note di questa sezione non hanno una fase di sostenuto, hanno un attacco esponenziale della durata di 10 millisecondi corrispondente ad un attacco molto secco ed un tempo di decadimento esponenziale che varia fra 0.5 secondi e 2 secondi. La qualità del tono ricorda quella di uno strumento a corde pizzicate.

Figura 18. Diagramma dello strumento #4

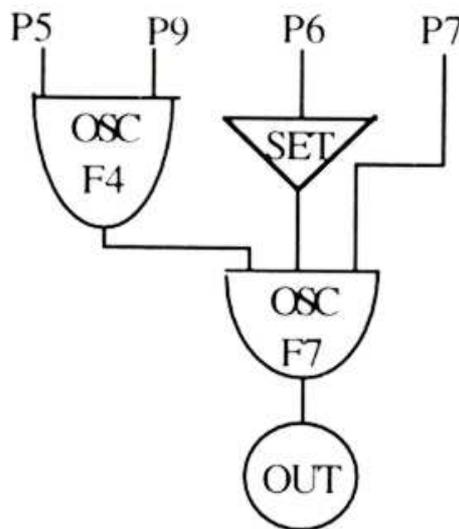


Esperimenti sui tipi di involuppo

#300 - Esperimenti di decadimento lineare ed esponenziale (Traccia 7)

Questo esempio mette a confronto diversi tipi di decadimenti. Il diagramma dello strumento #1 è riportato in figura 19.

Figura 19. Strumento #1

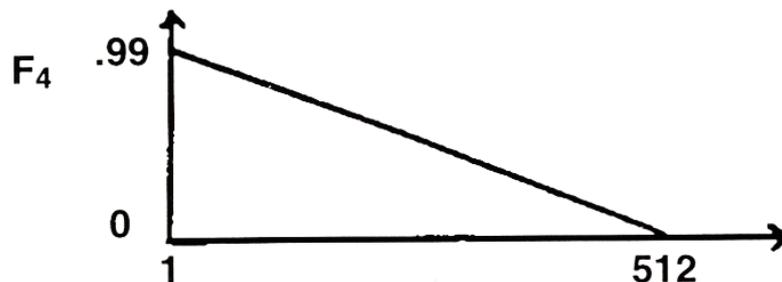


Tutti e quattro gli strumenti sono simili e differiscono soltanto per il numero di funzione, controllato da P_6 .

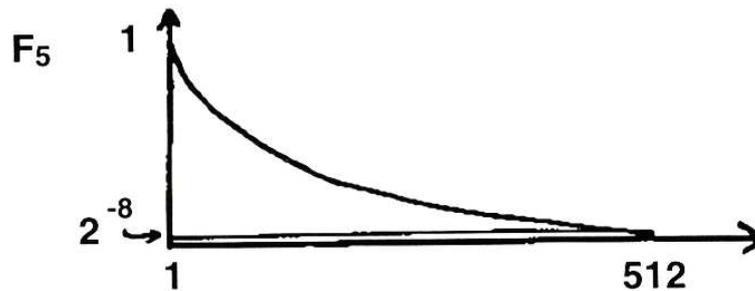
Prima sezione

La prima sezione mette a confronto il decadimento lineare con quello esponenziale. Il decadimento lineare è controllato dalla funzione F_4 :

Figura 20. Andamento di F_4 (decadimento lineare)



Il decadimento esponenziale è invece controllato da F_5 :

Figura 21. Andamento di F_5 (decadimento esponenziale)

172.2

Vengono riprodotte quattro note:

- **nota 1:** decadimento lineare, durata 2 secondi
- **nota 2:** decadimento esponenziale, durata 2 secondi
- **nota 3:** decadimento lineare, durata 2 secondi
- **nota 4:** decadimento esponenziale, durata 4 secondi

Il decadimento lineare sembra decrescere lentamente e poi scompare improvvisamente; il decadimento esponenziale è più equilibrato e dà un'impressione di risonanza. L'inizio di una nota che decade linearmente è comparabile con l'inizio di una nota con decadimento esponenziale di maggior durata.

Nota: $2^{-8} = \frac{1}{256}$. Per ottenere un decadimento esponenziale non troncato si deve fare in modo che la funzione di controllo dell'ampiezza decada fino ad un valore finale non più grande dell'inverso della massima ampiezza usata, dal momento che quando l'ampiezza è più piccola del valore minimo di un sample il suono si perde nel rumore di quantizzazione (ad esempio: se l'ampiezza massima è 1500 si dovrebbe disporre di una funzione che decada fino al valore $2^{-11} = \frac{1}{2048}$).

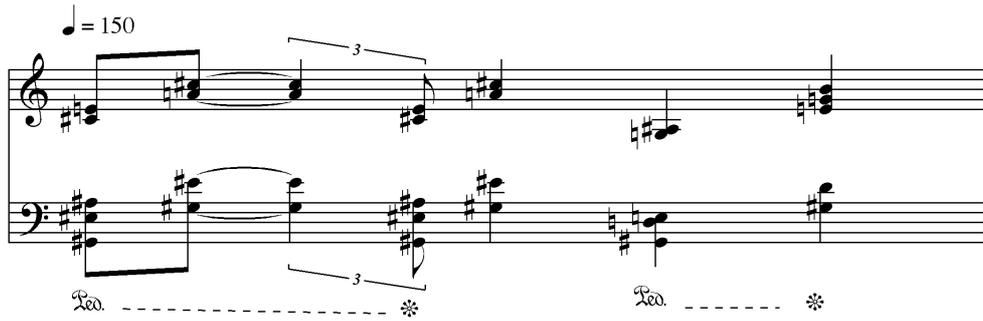
Le altre note che seguono consistono di tre forme d'onda F_6 , F_7 e F_8 che decadono a velocità differenti nel seguente ordine:

- **nota 5:** tutte e tre le forme d'onda alla stessa frequenza di 440 Hz , decadimento più lungo per la componente con meno contenuto di alte frequenze (una situazione "naturale" dato che le alte frequenze decadono per prime nei suoni di pianoforte, di campane, ...)
- **nota 6:** come in precedenza tranne che per il fatto che le componenti hanno frequenze lievemente diverse l'una dall'altra (443, 440, 441) per causare battimenti simili a quelli dovuti all'inarmonicità (o ad una cattiva accordatura) nei suoni di pianoforte
- **nota 7:** tutte e tre le forme d'onda alla stessa frequenza di 440 Hz , con la situazione innaturale di avere un decadimento più lento per le componenti con più energie alle alte frequenze
- **nota 8:** come in precedenza ma con le frequenze delle componenti pari a 443, 440, 441 Hz
- **nota 9:** come la nota 5
- **nota 10:** come in precedenza ma con differenze accentuate fra le frequenze delle componenti (448, 444, 440).

#301 - Passaggio con suoni di pianoforte (Traccia 8)

Questo esempio esegue la melodia di figura 22 con un suono che ricorda quello di un pianoforte.

Figura 22. Passaggio eseguito dallo strumento #1



Per questo esempio vengono distinti quattro tipi di note trattati differently:

1 - Note basse e brevi suonate con lo strumento #1 (durata ≤ 0.2 s, frequenza ≤ 250 Hz)

L'ampiezza è controllata da F_3 (figura 23)

Figura 23. Andamento della funzione di inviluppo d'ampiezza F_3

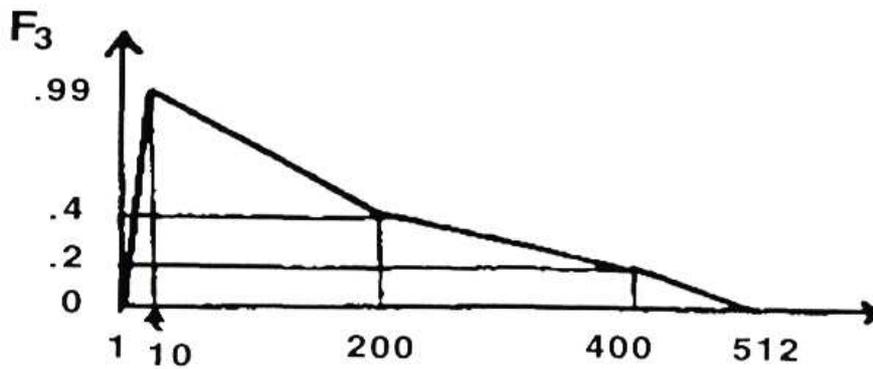
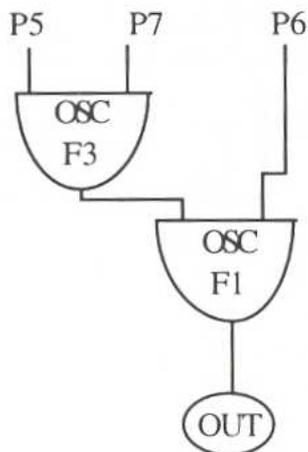


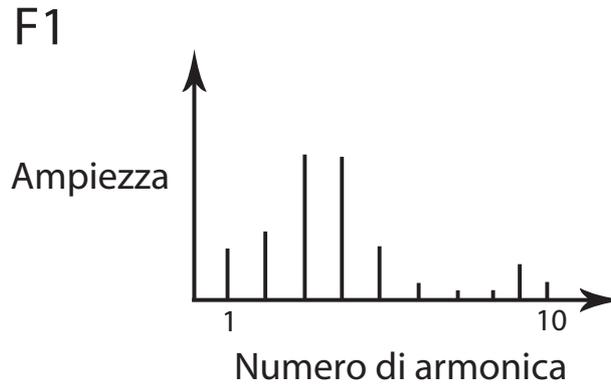
Figura 24. Diagramma dello strumento #1



Per una durata più piccola di circa 0.2 s, questa funzione fornirà un attacco secco; il decadimento è formato da tre porzioni lineari: le prime due approssimano una forma

esponenziale, la terza cerca di imitare l'effetto di uno smorzatore. La forma d'onda è data da F_1 la quale è costituita da 10 armoniche.

Figura 25. Ampieze delle armoniche di F_1

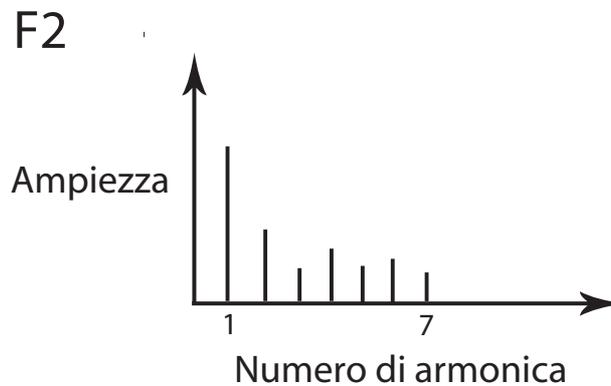


Con un *sampling-rate* di 10 *KHz*, tutte le armoniche verranno udite senza *foldover* fino ad una frequenza fondamentale di circa 400 *Hz*.

2 - Note brevi e corte eseguite con lo strumento #2 (durata ≤ 0.2 s, frequenza ≥ 250 Hz)

Questo strumento è simile allo strumento #1 tranne che per il fatto che la forma d'onda è data da F_2 che è costituita da solo 7 armoniche (figura 26).

Figura 26. Ampieze delle armoniche di F_2



3 - Note lunghe e basse eseguite con lo strumento #3 (durata ≥ 2 s, frequenza ≥ 250 Hz)

Questo strumento è simile allo strumento #1 anche se qui l'ampiezza è controllata da F_4 .

Figura 27. Andamento di F_4



F_4 decade esponenzialmente da 1 a $2^{-6} = \frac{1}{64}$. Per questo motivo la durata della nota corrisponde a $\frac{6}{10}$ del “tempo di riverberazione” (il tempo necessario al livello per diminuire di 60 dB). In questo esempio le note “lunghe” durano circa fra 0.4 e 0.8 secondi e questo corrisponderebbe ad un “tempo di riverberazione” nell’ordine di 1 secondo, più breve di quello di un vero pianoforte (attorno ad 1 s a 2000 Hz, circa 10 s a 200 Hz; comunque sia nei pianoforti la velocità di decadimento iniziale è maggiore e perciò la discrepanza non è così ampia come sembrerebbe da questi dati).

4 - note lunghe e alte suonate con lo strumento #4 (durata ≥ 0.2 s, frequenza ≥ 250 Hz)

Questo strumento è simile allo strumento #3 ma la forma d’onda è data da F_2 come nello strumento #2.

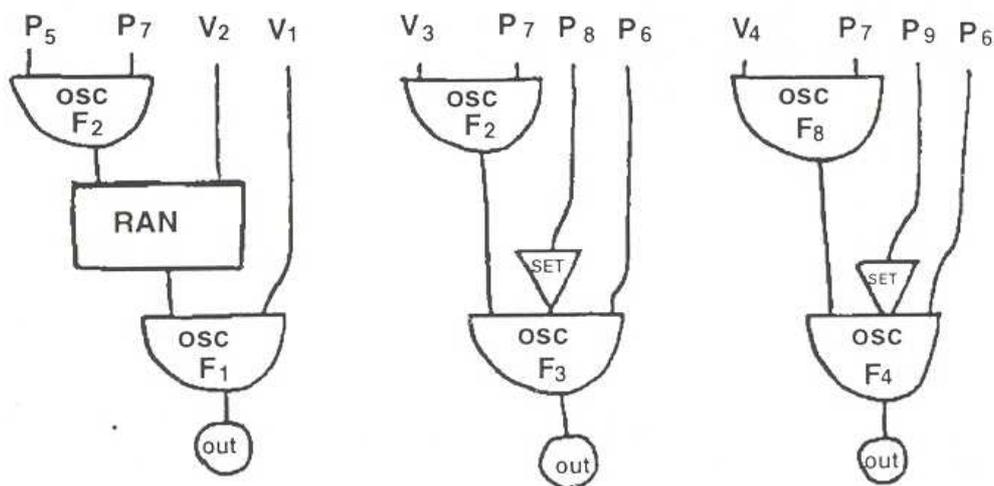
Suoni percussivi

#400 - Suoni percussivi e di rullante (Traccia 9)

Questo esempio propone alcuni suoni percussivi che ricordano un tamburo (sia con che senza il rumore della rete). La prima e la terza sezione sono eseguite ad una frequenza di campionamento di 20 KHz mentre la seconda sezione è eseguita ad una frequenza di campionamento di 5 KHz.

Lo strumento #1, il cui diagramma è rappresentato nella figura 28, è utilizzato per generare questi suoni percussivi (verrà anche usato nel seguente esempio #410).

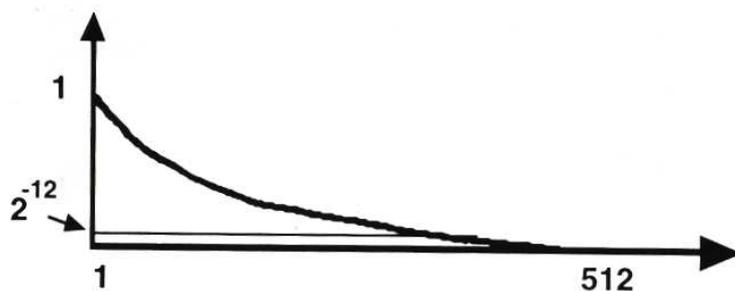
Figura 28. Diagramma dello strumento #1



Questo strumento propone un suono che è la somma di una banda di frequenza, di una sinusoide e di uno spettro inarmonico.

La banda di frequenza è generata tramite una modulazione aleatoria di ampiezza di una sinusoide F_1 . La frequenza centrale è determinata da V_1 , la metà della larghezza di banda da V_2 . L'involuppo è dato dalla funzione F_2 la quale decade esponenzialmente da 1 a 2^{-12} .

Figura 29. Funzione di inviluppo esponenziale decrescente in F_2



F_4 è una senoide (è la decima armonica della frequenza fondamentale specificata da P_6). Perciò se P_6 vale 20 la frequenza effettiva di questa onda sinusoidale sarà 200 Hz . L'involuppo è dato dalla funzione F_8 che decade esponenzialmente da 1 a 2^{-8} .

Lo spettro "inarmónico" è di fatto una approssimazione di un vero spettro inarmónico ed è ottenuto riproducendo una forma d'onda che contiene solo armoniche di ordine elevato ad una velocità molto bassa. F_3 comprende le armoniche di frequenza 410, 16, 22 e 23 Hz : in questo modo con una frequenza fondamentale di 20 (specificata in P_6) questa darà risultato a componenti di frequenza 200, 320, 440 e 460 Hz . L'involuppo in ampiezza è controllato da F_2 .

Le ampiezze della banda di rumore, dell'onda sinusoidale e dello spettro inarmónico sono date rispettivamente da P_5 , V_3 e V_4 .

Prima sezione

La prima sezione propone la sequenza ritmica di figura 30 riproducendola con un effetto come di rullante ottenuto con una banda di rumore centrata su 4000 Hz e di ampiezza di banda pari a 3000 Hz . La componente sinusoidale ha una frequenza di 200 Hz .

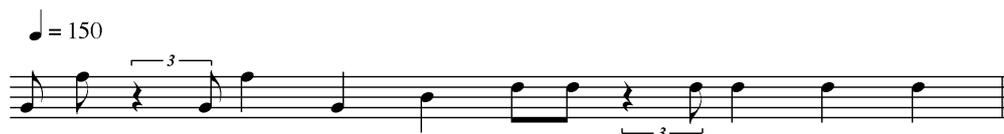
Figura 30. Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (con "maglia del rullante")



Seconda sezione

La seconda sezione propone la sequenza ritmica di figura 31 eseguendola "senza la maglia del rullante": non è presente la banda di rumore ($P_5 = 0$). Le quattro altezze delle componenti corrispondono alle frequenze fondamentali di 120, 140, 150 e 160 Hz .

Figura 31. Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (senza "maglia del rullante")



Terza sezione

La terza sezione propone la seguente sequenza eseguita ancora con il rullante:

Figura 32. Sequenza ritmica riprodotta dallo strumento percussivo (di nuovo con "maglia del rullante")

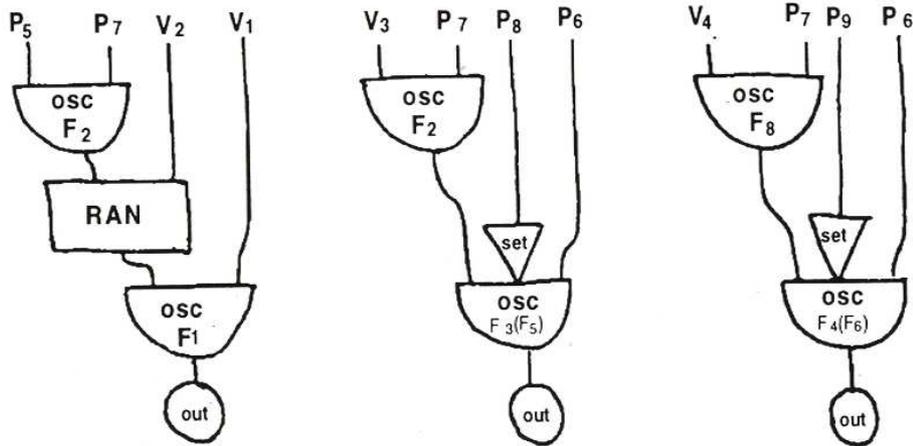


#410 - Suoni percussivi e di campana (Traccia 10)

Questo esempio propone alcuni altri suoni percussivi. Le prime due sezioni sono riprodotte con una frequenza di campionamento di 5 KHz e sono state generate alla frequenza di campionamento di 10 KHz : in questo modo per queste due sezioni le durate sono raddoppiate e le frequenze sono la metà di quelle specificate nella *score*. Le ultime due sezioni, le quali propongono due suoni simili a quelli di una campana, sono riprodotte ad una frequenza di campionamento di 10 KHz e le frequenze e durate specifiche sono come specificato nella *score*.

Lo strumento #1, il cui diagramma è riportato in figura 33, è utilizzato per generare i suoni percussivi delle prime due sezioni.

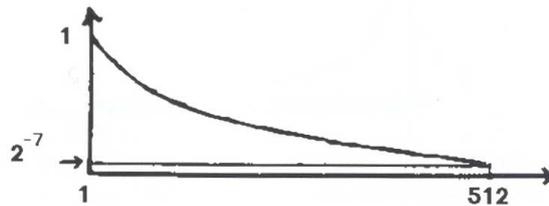
Figura 33. Diagramma dello strumento #1 utilizzato nelle prime due sezioni



Questo strumento produce un suono che è la somma di una banda di frequenza e di uno spettro inarmonico. Questo suono decade esponenzialmente.

La banda di frequenza è generata attraverso una modulazione aleatoria dell'ampiezza di una sinusoide F_1 . La frequenza centrale è data da V_1 e la metà della larghezza di banda da V_2 ¹. L'involuppo di ampiezza è controllato dalla funzione F_2 la quale decade esponenzialmente da 1 fino a 2^{-7} .

Figura 34. Decadimento esponenziale di F_2



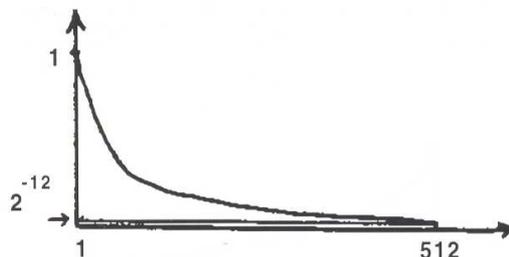
Lo spettro "inarmonico" è di fatto in origine armonico: l'approssimazione di uno spettro inarmonico è ottenuta riproducendo ad una velocità molto bassa un'onda contenente solo armoniche di ordine alto. Ad esempio quello che chiameremo spettro 1 è generato da onde periodiche comprendenti le armoniche numero 10, 16, 22, 23, 25, 29 e 32: alla frequenza 10 (specificata da P_6) questo originerà le componenti di frequenza 100, 160,

1

I valori delle variabili V_1 e V_2 corrispondono ad una frequenza centrale e ad una larghezza di banda rispettivamente di 1000 Hz e 800 Hz ad una frequenza di campionamento di 10 KHz , per questo nell'esempio sonoro, registrato ad una frequenza di campionamento di 5 KHz questi due valori sono 500 Hz e 400 Hz .

220, 230, 250, 290 e 320 Hz . Lo spettro 1 è qui ottenuto dalla somma fra la funzione F_3 , comprendente le armoniche numero 10, 16, 22 e 23, e la funzione F_4 , comprendente le armoniche numero 25, 29 e 32. L'involuppo di F_3 è controllato da F_2 , mentre l'involuppo di F_4 è controllato da F_8 (figura 35): questo assicura un decadimento più rapido delle componenti di frequenza più alta.

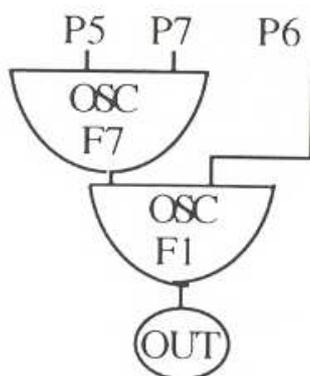
Figura 35. Decadimento esponenziale di F_8



Per mezzo di P_7 e di P_9 le funzioni F_3 e F_4 possono essere cambiate in altre funzioni. Qui oltre allo spettro di tipo 1, un'approssimazione dello spettro di una membrana vibrante, è stata sperimentata l'aggiunta di uno spettro che approssima quello di un oggetto metallico percosso: lo chiameremo spettro 2. Questo spettro è ottenuto sommando alla funzione F_5 la funzione F_6 aventi rispettivamente le armoniche 16, 20, 22, 34, 38 e 47 e le armoniche 50, 53, 65, 70, 75, 77 e 100.

Lo strumento #2, il cui diagramma è riportato in figura 36, è utilizzato per generare le componenti in frequenza in relazione inarmonica come di un suono di campana. La forma d'onda F_1 è una sinusoide. La funzione F_7 che controlla l'involuppo decade esponenzialmente da 1 a 2^{-7} . La componente di frequenza più bassa è specificata nella score mentre il parametro P_6 specifica il rapporto fra la frequenza di una componente e la frequenza della componente più bassa: le frequenze successive alla più bassa sono ottenute moltiplicando questa per P_6 (ad esempio per avere componenti in relazione armonica P_6 dovrebbe valere 1, 2, 3 ...).

Figura 36. Diagramma dello strumento #2



Prima sezione

La prima sezione comprende tre suoni che durano 0.8, 2, and 4 secondi eseguiti con lo strumento #1, prima con lo spettro 1 e quindi con lo spettro 2, con una frequenza fondamentale di 50 Hz .

Seconda sezione

La seconda sezione contiene tre suoni della durata di 18, 2, e 4 secondi eseguiti con lo strumento #1 e con lo spettro 2, con una frequenza fondamentale di 150 Hz .

Terza sezione

La terza sezione propone un suono come di campana eseguendolo con lo strumento #2. Questo suono è costituito da 7 componenti di frequenza proporzionali ai valori 1, 2, 2.4, 3, 4.5, 5.33 e 6 e ognuna ha diversi tempi di decadimento. La componente più bassa ha una frequenza di 329 Hz.

Quarta sezione

La quarta sezione propone un suono come di campana eseguendolo con lo strumento #2, utilizzando solo 4 componenti frequenziali.

#411 - Analogo a #410 (Traccia 11)

Questo esempio propone ancora altri suoni percussivi prodotti con gli stessi strumenti e funzioni dell'esempio #410. Qui la frequenza di campionamento usata per la riproduzione del suono è di 10 KHz.

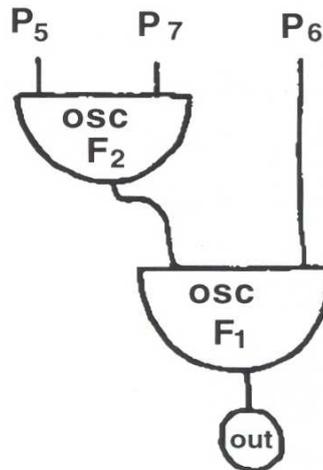
Sezioni (da 1 a 7)

- sezione 1: 6 suoni di altezza crescente eseguiti con lo strumento #1 e utilizzando lo spettro 1
- sezione 2: simile alla sezione 1 ma viene usato lo spettro 2
- sezione 3: 3 suoni di durata crescente e di altezza decrescente con lo spettro 1
- sezione 4: simile alla sezione 3 ma viene usato lo spettro 2
- sezioni 5, 6 e 7: in queste sezioni sono proposti 4 suoni di campana riprodotti con lo strumento #2.

#420 - Suoni di Gong (Traccia 12)

Questo esempio propone suoni percussivi che ricordano i suoni di gong. Per ogni componente frequenziale viene attivata una nota e tutte le componenti sono generate dallo strumento #1, rappresentato in figura 37.

Figura 37. Diagramma dello strumento #1



La forma d'onda F_1 è una sinusoide. La funzione F_2 controlla l'involuppo di ampiezza e decade esponenzialmente da 1 a 2^{-7} . La frequenza del suono è data da P_6 , l'ampiezza

iniziale da P_5 e la durata del decadimento è data da P_4^2 . Le frequenze delle varie componenti non sono in relazione armonica fra di loro.

Nel primo suono tutte le componenti frequenziali decadono sincronicamente e lo spettro perciò non cambia. L'effetto risultante fa venire in mente il suono di una campanella elettronica.

Nel secondo suono le stesse componenti frequenziali di sopra hanno un tempo di decadimento che è approssimativamente inversamente proporzionale alle rispettive frequenze delle componenti (anche se questa regola non viene seguita rigorosamente, questo per dare origine a forme più intricate di decadimento). Questo suono ha più vitalità e naturalezza rispetto al primo suono.

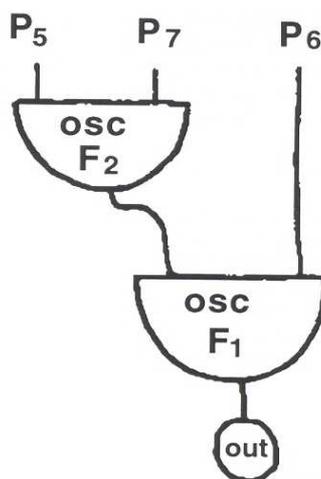
L'altro suono che segue consta di diverse componenti frequenziali con decadimenti non sincroni.

Seguono poi quattro suoni dello stesso tipo parzialmente sovrapposti l'uno con l'altro; i battimenti delle componenti vicine conferiscono un po' di calore al suono.

#430 - Tre approssimazioni successive di un suono di Campana (Traccia 13)

Questo esempio contiene tre approssimazioni successive di un suono di campana. Per ogni componente frequenziale viene attivata una nota e tutte le componenti sono generate dallo strumento #1, rappresentato in figura 38.

Figura 38. Diagramma dello strumento #1



La forma d'onda F_1 è una sinusoidale. La funzione F_2 controlla l'involuppo di ampiezza e decade esponenzialmente da 1 a 2^{-10} . La frequenza del suono è data da P_6 , l'ampiezza iniziale da P_5 e la durata del decadimento è data da P_7 ($P(7) = P(4)$).

Le frequenze delle componenti non formano una serie armonica, tuttavia non sono arbitrariamente inarmoniche. Nei suoni di campana più genuini si cercano di approssimare le seguenti proporzioni per le prime 5 componenti: 0.5, 1, 1.2, 1.5 e 2 (corrispondenti ad esempio alla seguente successione ascendente di note: Sol, Sol, Sib, Re, Sol: queste note sono chiamate rispettivamente *hum note*, *fondamentale*, *terza minore*, *quinta* e *nominale*). Qui i rapporti fra le componenti in frequenza sono i seguenti: 0.56, 0.92, 1.19, 1.71, 2, 2.74, 3, 3.76 e 4.07.

Nel primo suono tutte queste componenti frequenziali decadono sincronicamente. Questo origina un suono innaturale.

2

Questo esempio è stato calcolato utilizzando una frequenza di campionamento pari a 20 KHz, tuttavia l'esempio sonoro viene riprodotto ad una frequenza di campionamento di 5 KHz. Perciò le durate effettive dei suoni corrispondono a 4 volte il valore indicato da P_4 nella *score* e le frequenze effettive ad $\frac{1}{4}$ del valore indicato da P_5 .

Nel secondo suono le componenti hanno n tempo di decadimento che è approssimativamente inversamente proporzionale alle loro rispettive frequenze (sebbene questa regola venga violata in un caso dove una componente inferiore decade più rapidemente: questo da origine ad un leggero sbalzo poco dopo l'inizio del suono). Il suono appare più naturale ma tuttavia ancora un po' spento.

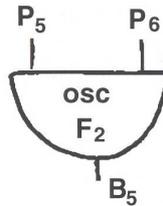
Nel terzo suono ognuna delle parziali più basse viene divisa in sue parziali con frequenze lievemente diverse (224 Hz e 225 Hz, 368 Hz e 369.7 Hz). Questo causa dei battimenti che aggiungono un po' di vitalità e di calore al suono. Risulta verosimile che nelle campane reali le parziali siano divise in due componenti ravvicinate a causa di lievi scostamenti da una perfetta simmetria rotazionale.

#440 - Percussioni ad altezza variabile (Traccia 14)

Questo esempio propone alcuni suoni simili a quelli percussivi con una frequenza variabile (è anche presente un suono non simile ad un suono percussivo).

I suoni sono generati dallo strumento #3 che fa uso, fra i suoi valori di ingresso, anche dell'uscita dello strumento #2. Lo strumento #2, rappresentato in figura 39, è uno strumento degenere utilizzato per effettuare cambiamenti di altezza. L'uscita sarà contenuta in B₅.

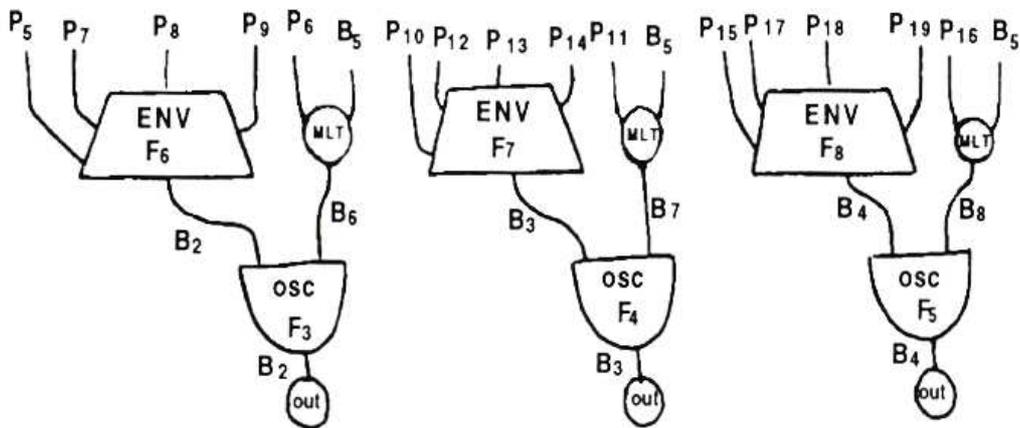
Figura 39. Lo strumento (degenere) #2



La funzione F₂ controlla l'evoluzione dell'altezza del suono. P₆ fornisce la durata del ciclo di frequenza, durata che per tutti i suoni di questo esempio coincide con la durata della nota. P₅ vale 1.

Lo strumento #3 consta di 3 oscillatori in parallelo dotati di controlli di inviluppo (ENV) indipendenti come viene mostrato in figura 40.

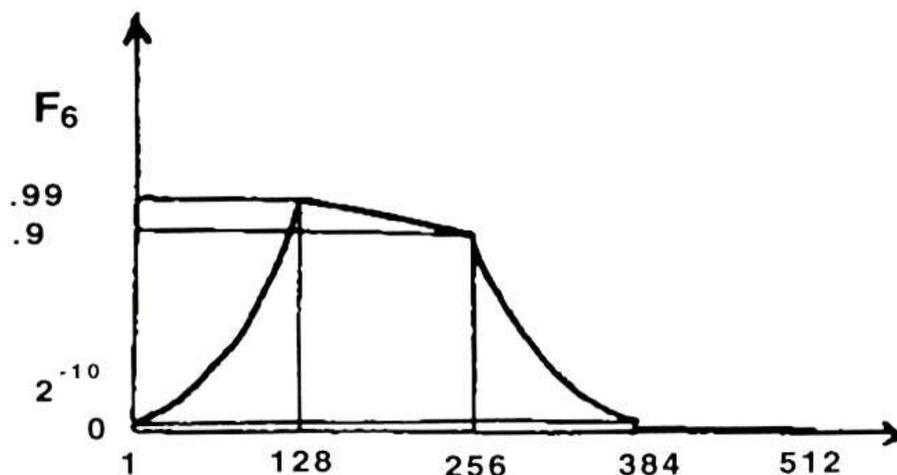
Figura 40. Strumento #3



Uno di questi oscillatori genera una fondamentale la cui frequenza massima è di 160 Hz (F₃ è una sinusoide). L'ampiezza è controllata da F₆ (rappresentata in figura 41). In tutti gli esempi qui proposti (a parte l'ultima nota) il tempo di attacco è di 10 ms o di 30 ms (si noti che non si tratta di un attacco lineare, altrimenti questi tempi

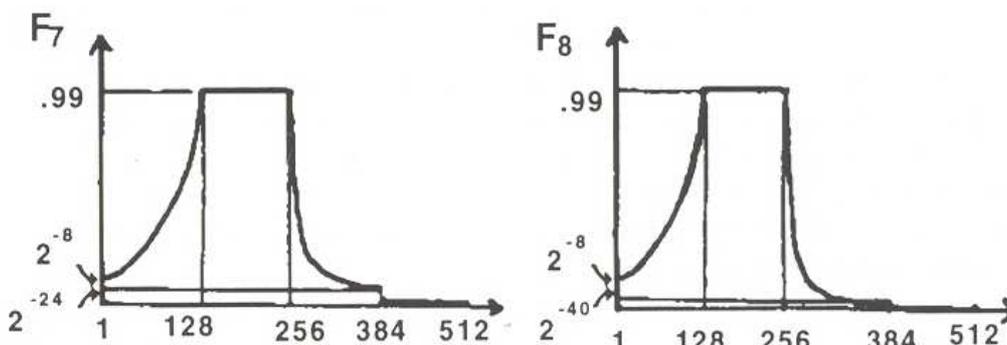
dovrebbero essere inferiori), la fase “stazionaria” dura altrettanto 10 ms o di 30 ms e la durata del decadimento è circa di 1.6 secondi.

Figura 41. Andamento di F_6



Gli altri due oscillatori riproducono le forme d'onda F_4 e F_5 le quali contengono armoniche di ordine superiore di una fondamentale bassa, questo per imitare un insieme di parziali inarmoniche. (F_4 comprende le armoniche numero 3, 4, 5 e 6: con $P_{11} = 75$ questo oscillatore darà origine a frequenze di 225, 300, 375 e 450 Hz; in maniera analoga F_5 contiene le armoniche numero 8, 9, 10, 11, 12, 15, 17 e 18 con $P_{16} = 61$, il che porta ad avere frequenze fra 500 e 1100 Hz). Le ampiezze sono controllate rispettivamente dalle funzioni F_7 e da F_8 (figura ??) le quali forniscono un decadimento veloce per le onde F_4 e F_5 (in questo esempio circa 0.6 s e 0.3 s per decadere ad un millesimo dell'ampiezza iniziale fatta eccezione per l'ultima nota).

Figura 42. Funzioni di controllo dell'ampiezza



Prima sezione

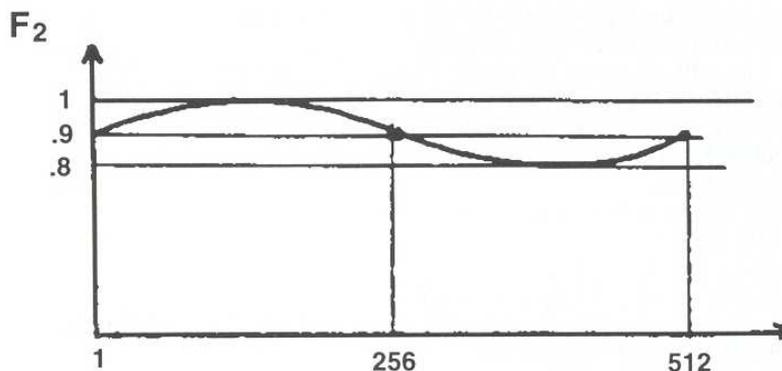
La prima sezione riproduce due note con altezza costante; la seconda nota ha una fase di attacco più lunga ed ha una durata di 30 ms dello stato “stazionario” della fondamentale.

Seconda sezione

La seconda sezione è simile alla prima ma l'altezza sale di una terza minore dall'inizio alla fine di ognuna delle note.

Terza sezione

Simile alla prima ma per ogni nota l'altezza prima sale e poi scende dato che la frequenza è controllata dalla funzione F_2 , riportata in figura 43.

Figura 43. La funzione F_2 di controllo della frequenza

Quarta sezione

Simile alla prima sezione ma l'altezza scende di una terza minore dall'inizio alla fine di ognuna delle note.

Quinta sezione

Quest'ultima sezione propone una nota generata con lo stesso strumento ma utilizzando parametri molto diversi dai precedenti, in particolare viene usato un tempo di attacco di 0.9 secondi per l'onda generata tramite F_5 ed un tempo di attacco che occupa praticamente l'intera durata della nota (2 secondi) per l'onda generata tramite F_4 . Questo semplicemente per mostrare quanto facilmente uno strumento generato al computer e progettato per uno scopo particolare possa essere usato per ottenere suoni di tipo diverso.

#490 - Esempio di missaggio (Traccia 15)

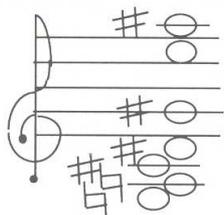
Questo esempio presenta un frammento musicale che è stato ottenuto tramite il missaggio da suoni degli esempi #200, #301, #400, #410 e di tre altri esempi.

Tre dei suoni originali (estratti dagli esempi #200 e #410) sono stati sottoposti a trasposizione cambiandone la velocità di riproduzione prima del missaggio; gli altri non hanno subito modificazioni elettroacustiche (a parte il controllo dell'ampiezza del segnale miscelato). Si è reso necessario eseguire un po' di operazioni di taglio del nastro per poter estrarre suoni singoli dagli esempi #200 e #410 e poterli disporre al tempo voluto. Nella figura 44 viene dato un diagramma della parte iniziale del missaggio.

Come si potrà ascoltare la sincronizzazione non è cattiva; disponendo di registratori a nastro di buona qualità appare il più delle volte semplice ottenere una sincronizzazione soddisfacente per durate da 30 secondi fino ad 1 minuto. Assieme a questo si dovrebbe notare che spesso le velocità dei registratori a nastro calano sostanzialmente per via dei cambiamenti nella tensione del nastro quando ci si avvicina alla fine della bobina (questo comportamento è stato studiato da F. Harvey e J. McLean).

Vengono qui brevemente descritte i tre suoni generati appositamente per questo esempio che si aggiungono a quelli provenienti dagli esempi precedenti:

1. un *cluster* di sinusoidi costituito dal seguente accordo musicale:

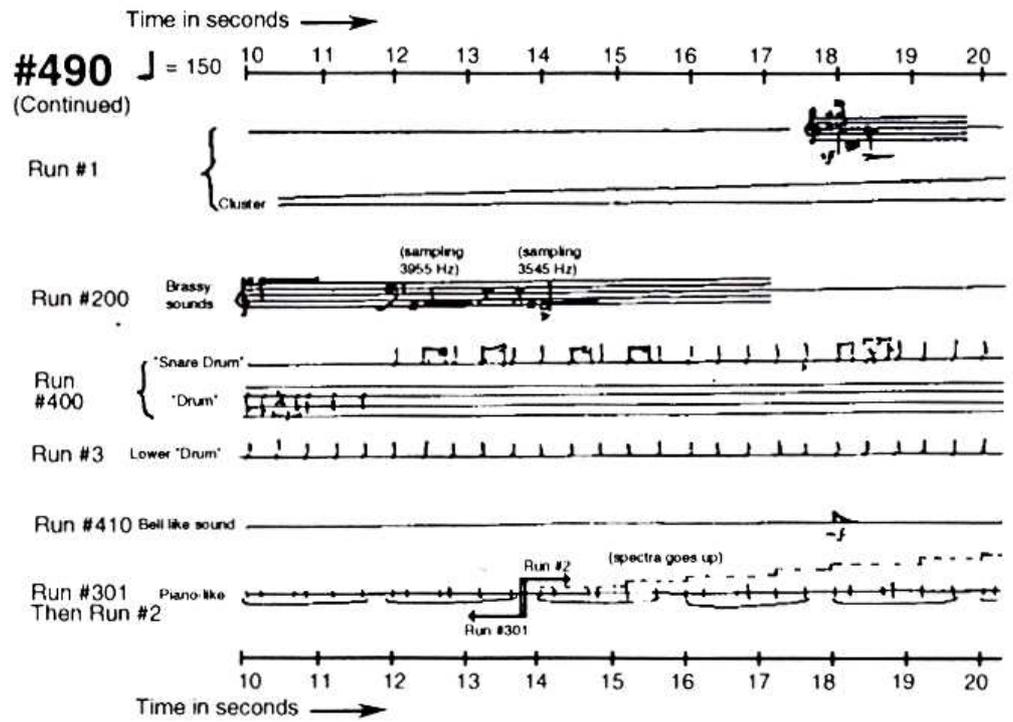
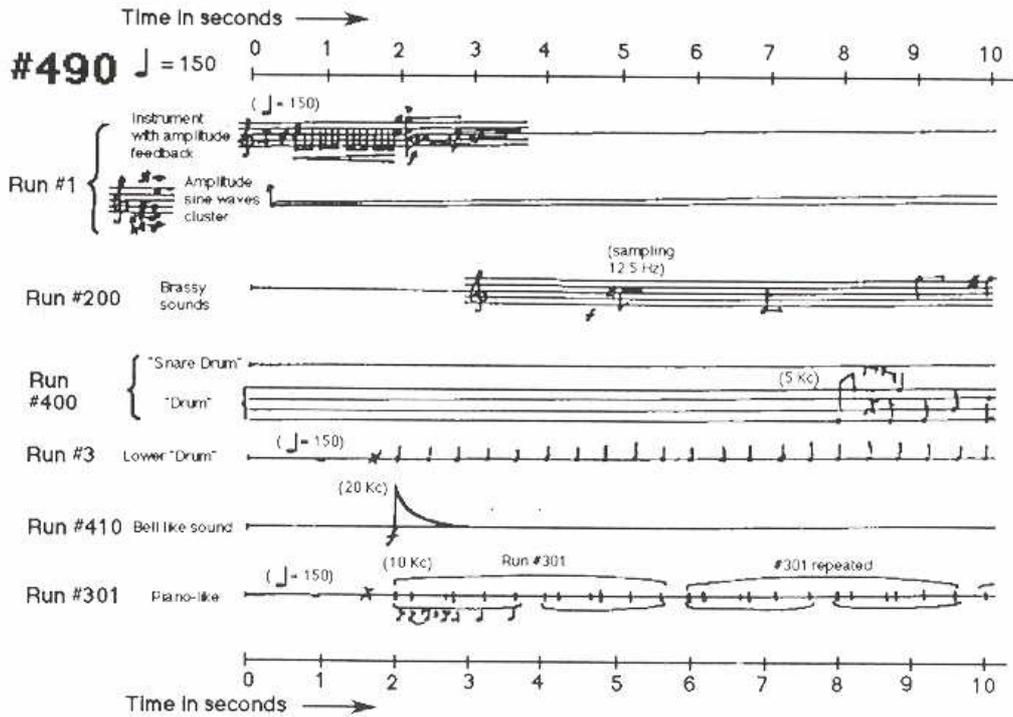


assieme a due brevi episodi eseguiti da un semplice strumento dotato di *feedback*

(si veda l'esempio #510), e così fatto:



Figura 44. Diagramma della parte iniziale del missaggio



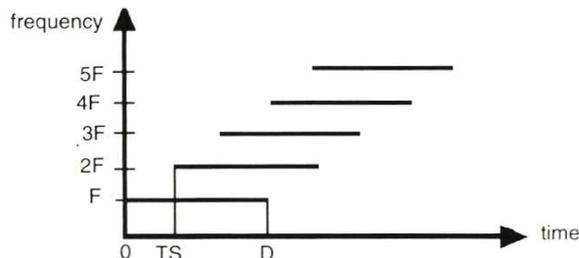
Altri esperimenti di sintesi

#500 - Analisi spettrale di un accordo (Traccia 16)

Questa sintesi presenta quella che potrebbe essere chiamata “analisi spettrale di un accordo”: per ogni nota dell'accordo vengono introdotte gradualmente armoniche successive. L'esempio è stereofonico con una frequenza di campionamento di 20 KHz per ognuno dei canali; dato che si è voluto che il suono terminasse sulla nota fondamentale dell'accordo la sintesi originaria è stata registrata al contrario.

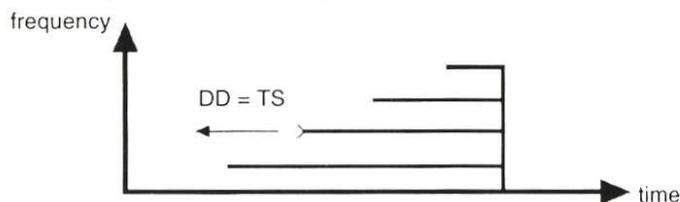
Le note dell'accordo sono state generate per mezzo di una sotto routine compositiva (chiamata PLF_3) che opera su di una quantità a piacere di note nella score e genera per ognuna di esse una successione di N armoniche che compaiono dopo un tempo nTS dall'inizio della nota di partenza, dove n è il numero dell'armonica e TS è un intervallo di tempo fissato. Per ogni nota originaria di frequenza F la sotto routine aggiunge quindi le note di frequenza $2F, 3F, \dots, (N+1)F$. Tramite un altro parametro è possibile incrementare o decrementare l'ampiezza da un'armonica alla successiva; se questo parametro è nullo l'ampiezza (espressa dal parametro P_5) rimane invariata per ogni armonica. Riguardo infine la durata delle armoniche calcolate questa è collegata alla durata D della nota fondamentale dalla differenza $D - DD$. Se $DD = 0$ le note calcolate avranno la stessa durata della fondamentale come rappresentato nel grafico di figura 45.

Figura 45. note calcolate per $DD = 0$ e $N = 4$



In questo caso la durata totale del suono è data dal valore $D + N TS$. Se invece $DD = TS$, avremo la conformazione di figura 46.

Figura 46. Conformazione dell'accordo generato per $DD = TS$



In questo caso la durata totale della nota è pari a D . Si deve aver cura di evitare durate negative ($D - DD < 0$) per $DD > 0$. (DD può anche essere negativo nel caso si desiderino armoniche che più a lungo della fondamentale).

Nell'esempio #500 la sotto routine compositiva è applicata alle note dell'accordo riportato in figura 47.

Figura 47. Accordo originario usato come ingresso della sotto routine compositiva

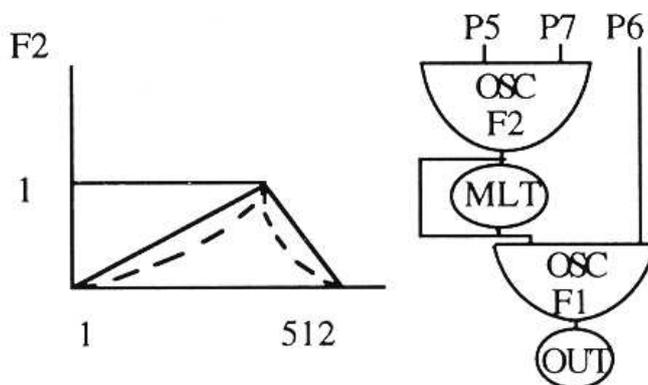


La sotto routine compositiva viene applicata su ognuna delle tre coppie di note segnate in figura.

Vengono generate:

- gruppo 1: 4 armoniche
- gruppo 2: 8 armoniche
- gruppo 3: 10 armoniche

la durata complessiva di ogni gruppo elaborato è la stessa. Tutte le note sono riprodotte attraverso lo strumento #1 o lo strumento #2 che sono identici e sono assegnati rispettivamente al canale sinistro e al canale destro. Il diagramma dello strumento #1 è riportato in figura 48. F_1 è una senoide. Questo strumento utilizza un attacco e un decadimento parabolici dal momento che F_2 è un attacco-decadimento lineare e che l'uscita di questo valore viene moltiplicata per sè stessa (elevamento al quadrato) prima di essere usato come valore di controllo dell'ampiezza; in questo modo si ottiene la curva parabolica rappresentata in figura 48.

Figura 48. Andamento di F_2 e del suo quadrato (curva tratteggiata); diagramma dello strumento #1 (#2)

#501 - Come #500 ma con un differente involuppo temporale (Traccia 17)

Questo esempio è simile al #500: sono state generate le stesse armoniche dallo stesso accordo. La differenza nel tipo timbro è dovuta alla differenza nell'involuppo di ogni componente: invece di un attacco e di un decadimento parabolici e gradualmente ogni armonica (dell'esempio riprodotto al contrario) ha un attacco istantaneo ed un decadimento esponenziale.

#502 - Missaggio partendo da #500 (Traccia 18)

Questo suono è il risultato del missaggio dell'esempio #500 con sè stesso a velocità differenti. Le velocità sono state cambiate in modo che il suono originario sia riprodotto

simultaneamente a frequenze di campionamento di 40 KHz, 20 KHz e 10 KHz. (Questa sintesi, ancora in stereofonia, viene di nuovo presentata a rovescio). Si applicano qui le osservazioni menzionate nell'esempio #512.

#503 - Missaggio partendo da #501 (Traccia 19)

Questo suono è il risultato del missaggio dell'esempio #501 con sè stesso a velocità differenti. Le velocità sono state cambiate in modo che il suono originario sia riprodotto simultaneamente a frequenze di campionamento di 40 KHz, 20 KHz e 10 KHz.

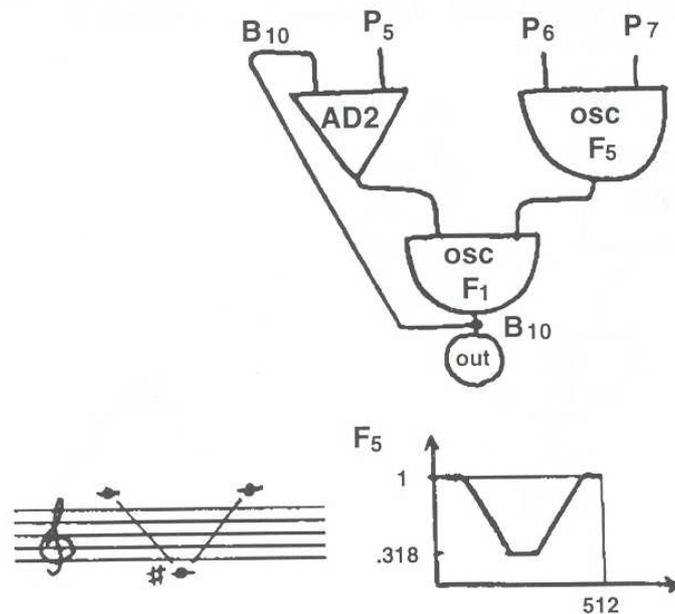
#510 - Glissandi di sirene (Traccia 20)

Questa sintesi presenta un po' di glissandi con suoni simili a quelli di sirena.

Strumento #1

Questo strumento (figura 49) fornisce un suono di frequenza variabile. L'onda è una senoide con *feedback* (un processo suggerito da A. Layzer). L'oscillatore che controlla la frequenza ha un ciclo di 8 secondi (valore definito in P₇) e viene ripetuto 3 volte.

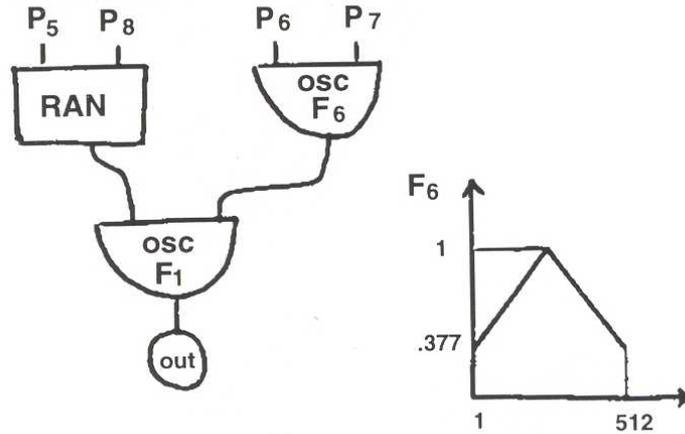
Figura 49. Strumento #1



Strumento #2

Questo strumento (figura 50) genera una banda di rumore con una frequenza centrale variabile. Il valore della mezza ampiezza di banda è dato dal parametro P₈. Il ciclo della funzione (F₆) di controllo della frequenza dura 6 secondi (periodo determinato da P₇).

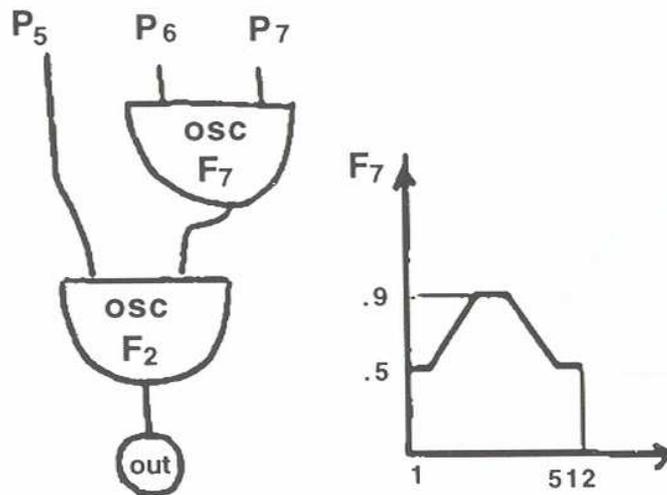
Figura 50. Strumento #2



Strumento #3

Questo strumento (figura 51) presenta un'onda con frequenzavariabile. Il ciclo della funzione (F₇) di controllo della frequenza dura 12 secondi (durata controllata da P₇). La forma d'onda restituita dalla funzione memorizzata F₂ è sì periodica ma simula la somma di parziali in relazione inarmonica: la frequenza fondamentale è di 20 Hz e l'onda consta solamente delle armoniche numero 21, 29 e 39: in questo modo sono presenti le frequenze 420 Hz, 580 Hz e 780 Hz.

Figura 51. Diagramma dello strumento #3

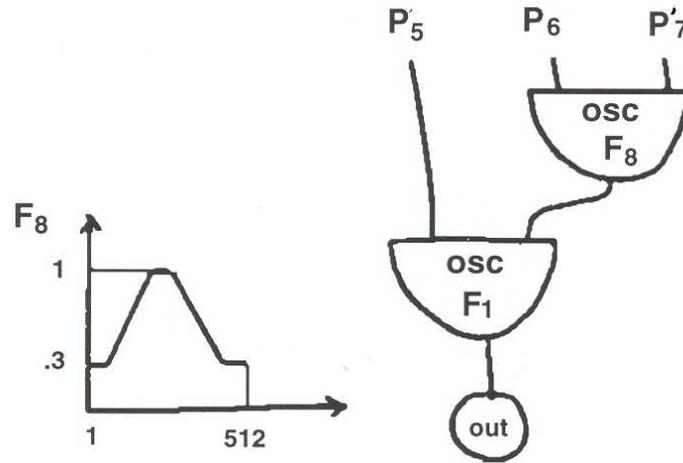


F₂ è una funzione con valori che variano drasticamente l'uno dall'altro: per minimizzare il rumore dovuto all'errore di arrotondamento per la sintesi del suono è stato utilizzato un oscillatore interpolato (chiamato IOS). Si tratta di una versione dell'oscillatore che interpola il valore fra due campioni vicini ogni volta che la somma degli incrementi usata per accedere ai valori della tabella non ha valore intero.

Strumento #4

Lo strumento #4 genera una sinusoide con frequenza variabile.

Figura 52. Diagramma dello strumento #4



Nota: In questo strumento la velocità a cui vengono lette le funzioni di controllo della frequenza è determinata dal parametro P_7 calcolato come $P_7 = \frac{F}{P_7}$: questa frequenza è svincolata dalla durata della nota e la funzione di controllo della frequenza viene letta più volte lungo la durata della nota.

#511 - Glissandi, in particolare con differenza costante di frequenza fra le voci (Traccia 21)

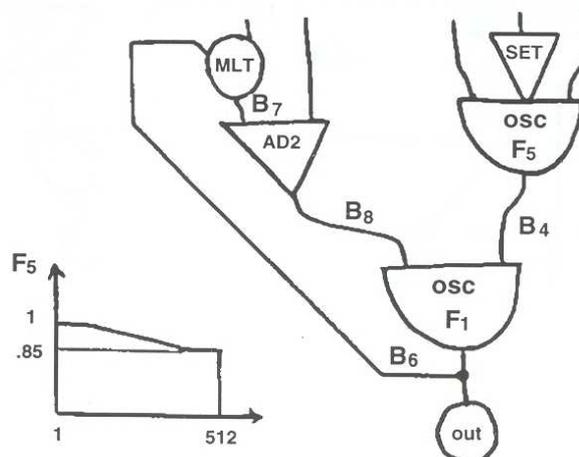
Questa sintesi propone un po' di glissandi simultanei eseguiti a velocità doppia (frequenza di campionamento di 20 KHz anziché 10 KHz).

Prima sezione

Strumento #1

Questo strumento fornisce un suono variabile in frequenza. L'onda è una sinusoidale con *feedback* (processo suggerito da A. Layzer). L'oscillatore che controlla la frequenza ha un ciclo della durata di 4.5 secondi che viene ripetuto per 4 volte.

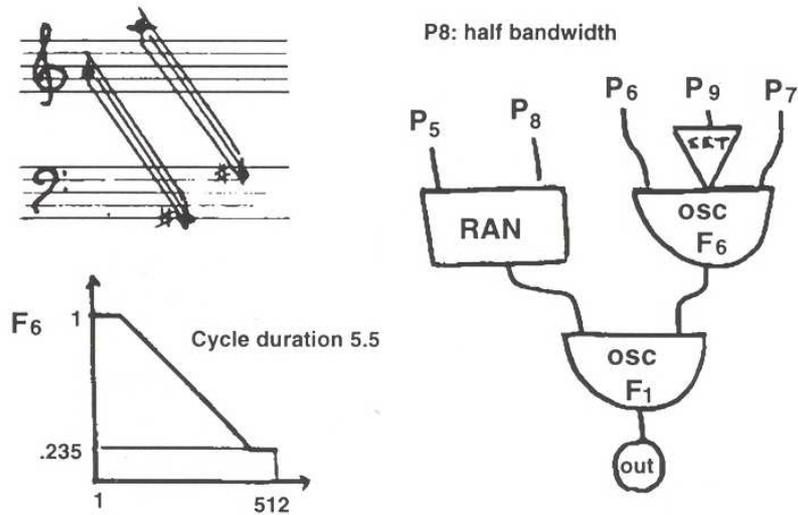
Figura 53. Strumento #1



Strumento #2

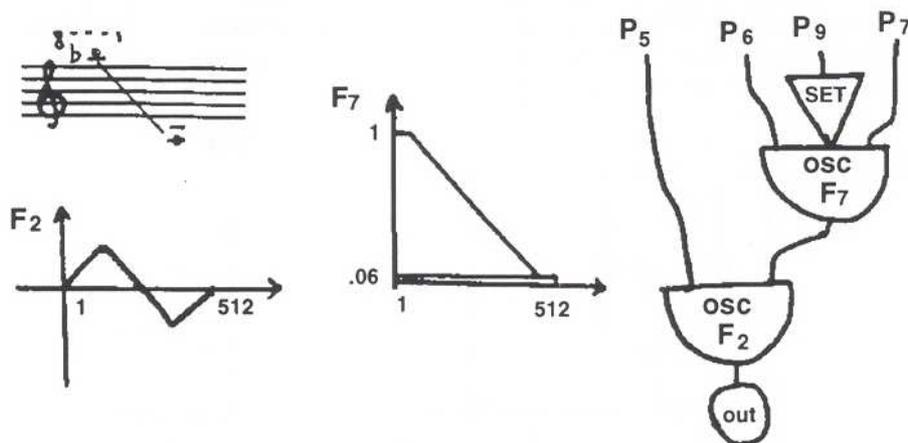
Questo strumento produce una banda di rumore con frequenza centrale variabile.

Figura 54. Strumento #2

**Strumento #3**

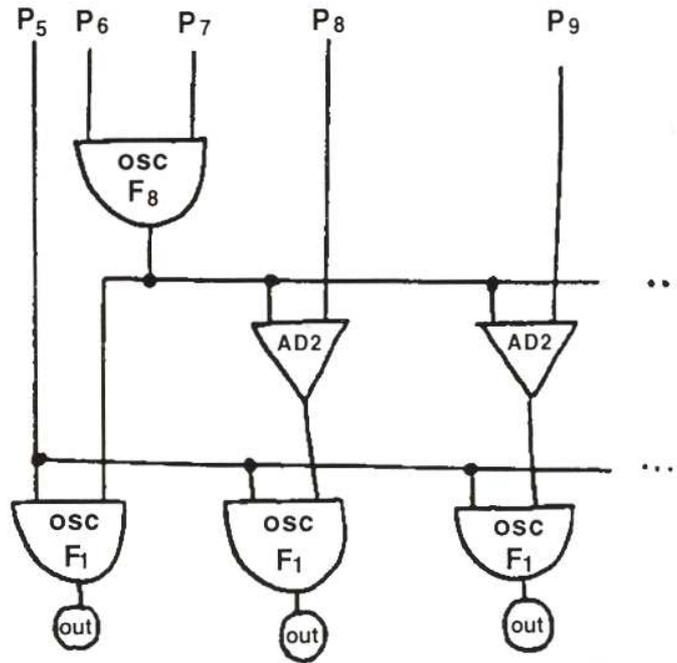
Questo strumento produce una forma d'onda triangolare di frequenza variabile.

Figura 55. Strumento #3

**Seconda sezione****Strumento #4**

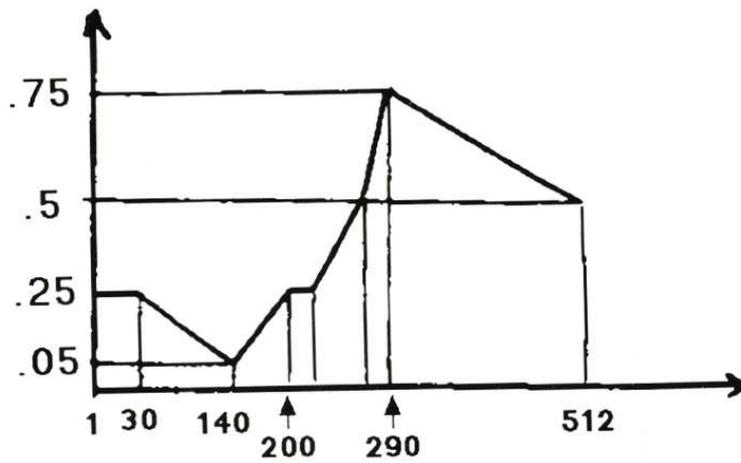
Questo strumento produce un glissando di sei voci "parallele" aventi una distanza costante in frequenza (invece di un rapporto costante di frequenza che darebbe un'intervallo musicale costante). Una cosa del genere fu fatta per la prima volta da J. Clough.

Figura 56. Strumento #4



Qui il glissando è relativamente stretto. I parametri P₆, P₈, P₉, P₁₀, P₁₁, P₁₂ corrispondono all'accordo iniziale riportato in figura 57.

Figura 57. Andamento della funzione di controllo della frequenza F₈



#512 - Missaggio partendo dai suoni dell'esempio #511 (Traccia 22)

Questo esempio presenta suoni ottenuti effettuando un missaggio dal suono della seconda sezione dell'esempio #511 (glissandi con differenza di frequenza costante fra le voci).

Il suono originamente sintetizzato ha semplicemente subito trasposizioni in altezza per mezzo del cambiamento della velocità di lettura prima del missaggio. Ciò che cambia da un suono all'altro di questo esempio sono sia le regioni frequenziali dei suoni (bassa, media, alta) e la densità del missaggio, cioè il numero di suoni originali sovrapposti. Il passaggio più denso ha una densità di missaggio pari a 36 e dal momento che il suono originale è costituito da 6 voci il suono risultante comprende fino a 6×36 voci (216 voci).

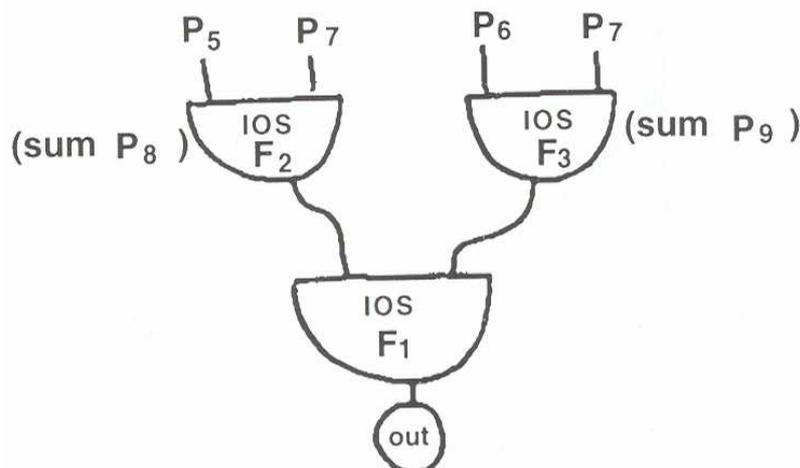
Uso di procedimenti analogici in sostituzione a quelli digitali Teoricamente i suoni di questo esempio avrebbero potuto essere ottenuti direttamente dal calcolatore senza nessun tipo di trattamento postumo poiché le manipolazioni sonore eseguibili elettroacusticamente (missaggio, trasposizione) sono semplici da realizzare con MUSIC V. Tutta via questo procedimento analogico ha consentito di produrre texture sonore complesse risparmiando contemporaneamente tempo di calcolo. È anche molto probabile che in una sintesi al calcolatore che comprenda un numero così grande di voci la qualità sonora sia molto scarsa dato che sono disponibili solo pochi campioni per la definizione di ogni voce. Oltretutto il procedimento analogico consente di controllare il bilanciamento in ampiezza fra le varie componenti miscelate. Peraltro è anche vero che questo tipo di procedimento è soggetto agli inconvenienti ben noti riguardanti l'accumulazione di rumore di fondo ed i problemi di sincronizzazione (si veda l'esempio #490).

#513 - Frammento di glissando infinito (Traccia 23)

Questo esempio presenta un po' più di un'ottava di un "glissando infinito" che potrebbe essere fatto continuare indefinitamente poiché esso torna alla situazione di partenza dopo la "discesa" di un'ottava (si vedano a tal proposito [5] e [6]).

Il suono che effettua il glissando è costituito da 10 componenti, tutte generate dallo strumento #1 (figura 58).

Figura 58. Glissando infinito - strumento #1



La funzione F_1 è una sinusoide.

La funzione F_3 (figura 59) controlla la frequenza delle componenti. Decresce esponenzialmente da 1 a 2^{-10} (10 ottave sotto). Per ogni componente la somma iniziale è specificata in P_9 ; il valore di questa somma vale $511 \frac{n-1}{10}$ per ogni n -esima componente.

Poiché P_6 (che definisce la massima frequenza) ha lo stesso valore 3900 per tutte le componenti queste sono inizialmente separate l'una dall'altra da un'ottava. La durata del ciclo di controllo della frequenza è determinato da P_7 ed è 120 secondi: questo significa che ogni componente scende di un'ottava dopo $\frac{120}{10} s = 12 s$. Le componenti rimangono sempre a un'ottava l'una dall'altra. Dopo la discesa di un'ottava la componente più alta diventa la più bassa.

La funzione F_4 (figura 60) controlla l'ampiezza delle componenti. Si tratta di una curva a campana ottenuta sommando una costante ad una porzione di sinusoidale, considerando una scala delle ordinate in dB. Per ogni componente la somma iniziale è specificata in P_8 : i valori di queste somme sono gli stessi di quelli specificati per P_9 e la durata del ciclo di controllo dell'ampiezza è la stessa di quella del ciclo di controllo delle frequenze. Quindi dato che le componenti di ampiezza sono lette alla stessa velocità di lettura della curva di controllo della frequenza l'effetto risultante è che le componenti alle estremità dello spettro (quelle più alte e quelle più basse) risultano essere fortemente attenuate. Dopo la discesa di un'ottava la struttura del suono torna ad essere la stessa dell'istante iniziale (al di là di errori dovuti alla definizione imprecisa di valori di incremento piccoli che causano una durata del ciclo diversa da quella attesa, il che potrebbe essere un problema serio per computer con una dimensione della *word* inferiore a 36 bit).

Figura 59. Andamento della funzione F_3 (controllo dell'altezza delle componenti)

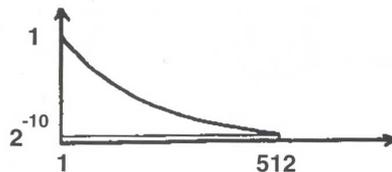
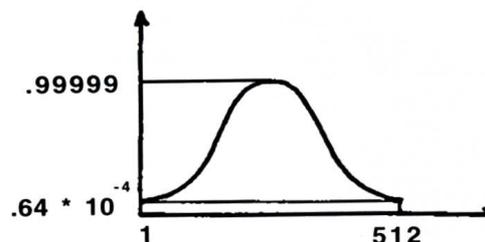


Figura 60. Andamento della funzione F_4 (controllo dell'ampiezza delle componenti)



Per i tre oscillatori dello strumento sono stati utilizzati degli oscillatori interpolanti (IOS). Questo accorgimento fa sì che si possa ottenere un glissando in frequenza veramente continuo nel tempo (non quantizzato); in maniera analoga si ottiene anche un cambiamento dell'ampiezza graduale. Questo tipo di oscillatore è anche preferibile per l'oscillatore di forma d'onda. In questo caso infatti, come in altre situazioni dove si effettua un glissando o un'altra modulazione della frequenza, gli errori di arrotondamento comportati da un oscillatore non interpolante ([2], p.134) sono particolarmente riconoscibili poiché il corrispondente rumore aumenta o diminuisce, diminuendo quando la frequenza è tale che la somma degli incrementi di lettura (l'ascissa) è prossima ad un valore intero.

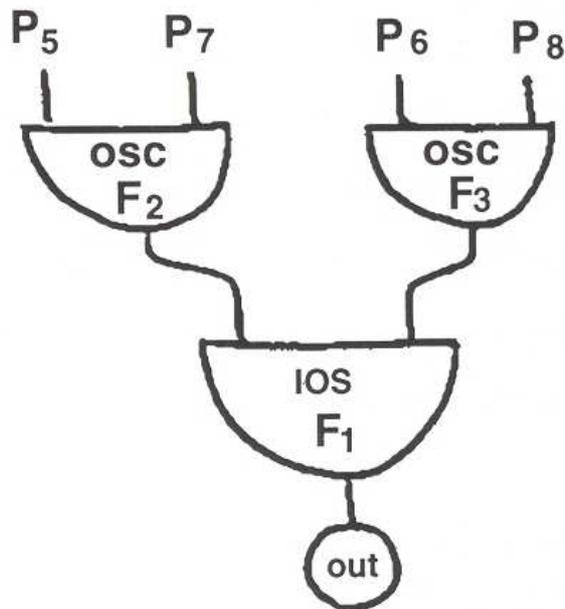
Per ottenere glissandi che discendono in maniera continua si potrebbe calcolare un'intera discesa di varie ottave; sarebbe meno dispendioso calcolare un ciclo (cioè un'ottava) ed utilizzare il calcolatore per concatenare il suono così calcolato il numero di volte desiderato. Tuttavia a causa degli errori sopra menzionati si deve prestare molta cura ai campioni e si deve scegliere di effettuare la concatenazione in un punto che non causi una discontinuità apprezzabile né di frequenza, né di ampiezza e neppure di forma d'onda.

#514 - Un suono la cui altezza va simultaneamente sia verso l'alto che verso il basso (Traccia 24)

Questo esempio è collegato all'esempio #513, tuttavia in questo caso mentre le frequenze componenti scendono il baricentro della distribuzione delle frequenze sale (invece di rimanere pressochè costante come nell'esempio #513). In questo modo il suono scende di 3 ottave mentre diviene più acuto e penetrante e finisce per terminare molto più in alto rispetto al suo inizio.

Lo strumento di base, riportato in figura 61, è simile a quello usato nell'esempio #513 tranne che per il fatto che qui lo strumento è costituito da 5 di tali unità ognuna delle quali fornisce una componente di frequenza. In questo modo nella *score* sono richiesti solo due eventi *nota* per ottenere le 10 componenti del suono. Le funzioni F_1 , F_2 , e F_3 sono le stesse usate nell'esempio #513. Anche le somme iniziali sono definite nello stesso modo.

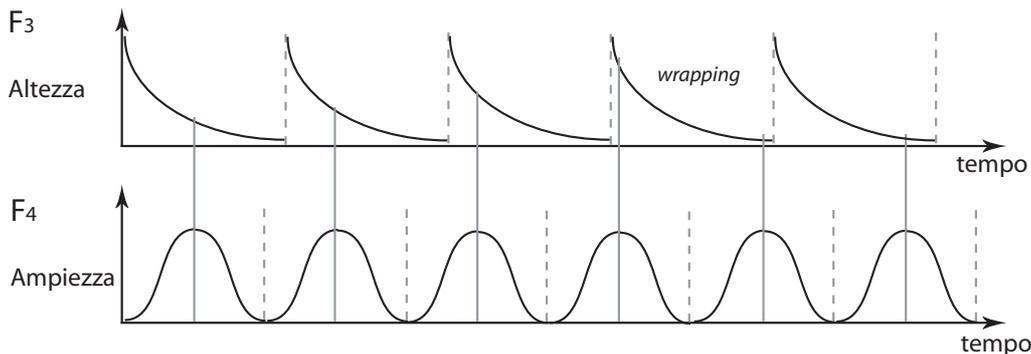
Figura 61. Diagramma dello strumento di base



Mentre le frequenze componenti scendono l'involuppo spettrale sale a causa della durata dell'intero ciclo di controllo della frequenza (data da $P_8 = 30$ secondi) che è più lungo della durata dell'intero ciclo di controllo dell'ampiezza (data da $P_7 = 30$ secondi).

Questo comportamento può essere più facile da capire se si esamina ciò che accadrebbe alla configurazione spettrale iniziale dell'esempio #513 nel caso che l'incremento di lettura della funzione di controllo dell'ampiezza fosse più grande dell'incremento di lettura della tabella di controllo della frequenza (figura 62).

Figura 62. Avvicinamento dei valori di F_3 e F_4 nel caso di un incremento di lettura della funzione F_4 maggiore (F_4 risulta "compressa" nel tempo)



Se in questa situazione venisse effettuata la sintesi di più glissandi consecutivi per un tempo complessivo maggiore questo sfalsamento di lettura causerebbe una traslazione della configurazione spettrale sempre più verso le alte frequenze fino ad "andare a capo" (*wrapping*) alle frequenze più basse per ricominciare poi l'ascesa.

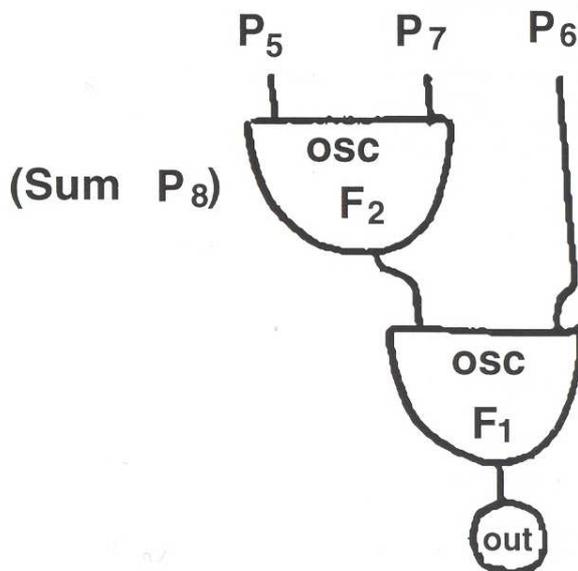
#515 - Traslazione di involuppo per Suoni con componenti in relazione di ottava (Traccia 25)

Questo esempio presenta dei suoni il cui timbro diviene più chiaro (o più scuro) con continuità, senza un salto di ottava, mentre la loro tonalità rimane costante (in questo caso si tratta di un Si). Questo effetto viene ottenuto utilizzando componenti in relazione di ottava aventi frequenza fissa e il cui involuppo spettrale viene traslato come nell'esempio #514.

Strumento #1

Lo strumento #1 è usato per generare ognuna delle 8 componenti dei suoni. La frequenza della componente è data dal parametro P_6 . Tutte le componenti sono fra loro in relazione di ottava. Per ogni componente la somma iniziale è specificata in P_8 . Il valore di questa somma vale $511 \frac{n-1}{8}$ per ogni n -esima componente. Ogni suono dura 5 secondi, meno della durata di un intero ciclo della funzione di controllo dell'ampiezza.

Figura 63. Strumento #1



Prima sezione

Nella prima sezione la funzione F_2 è una curva a campana a picco singolo con una differenza di 84 dB fra il valore di picco ed i valori dei due estremi orizzontali.

Seconda sezione

Nella seconda sezione la funzione F_2 è una curva a campana a picco singolo con una differenza di 42 dB fra il valore di picco ed i valori dei due estremi orizzontali.

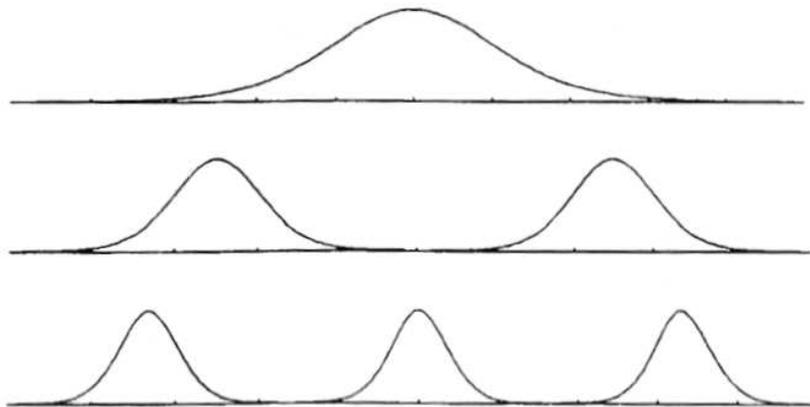
Terza sezione

Nella terza sezione la funzione F_2 è una curva a campana a doppio picco (da cui la ripetizione del suono).

Quarta sezione

Nella quarta sezione la funzione F_2 è una curva a campana a triplo picco.

Figura 64. Curve a campana con singolo, doppio e triplo picco



#516 - Traslazione di inviluppo di componenti armoniche e inarmoniche (Traccia 26)

Questo esempio presenta suoni a spettro variabile; la variazione di spettro viene ottenuta traslando (come nell'esempio #514) l'involuppo spettrale di componenti di frequenza fissata.

Lo strumento utilizzato è lo stesso dell'esempio #515, tuttavia vengono utilizzate 10 componenti frequenziali anziché 8 e queste non sono in relazione di ottava fra loro.

Sezioni da 1 a 3

Nelle prime tre sezioni le componenti frequenziali formano una serie armonica:

- sezione 1: la funzione F_2 è una curva a campana a picco singolo con una differenza di 42 dB fra il valore di picco ed i valori dei due estremi orizzontali.
- sezione 2: la funzione F_2 è una curva a campana a doppio picco
- sezione 3: la funzione F_2 è una curva a campana a triplo picco

Sezioni da 3 a 6

Nelle ultime tre sezioni le componenti frequenziali non sono in relazione armonica fra di loro:

- sezione 4: F_2 come nella sezione 1
- sezione 5: F_2 come nella sezione 2
- sezione 6: F_2 come nella sezione 3

#517 - Missaggio da #510 a #516 (Traccia 27)

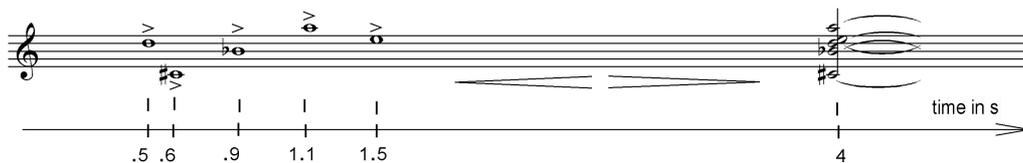
Questo esempio presenta un frammento ottenuto attraverso il missaggio di porzioni sonore provenienti dagli esempi #510, #511 e dal #513 al #516 oltre che da un paio di sintesi analoghe.

I suoni originali sono solo stati sottoposti ad una trasposizione di altezza per mezzo del cambiamento della velocità di lettura del nastro prima del missaggio tranne che nel caso del suono analogo a quello presentato nell'esempio #514: a questo è stato aggiunto artificialmente un riverbero per mezzo di un riverberatore a piastre metalliche EMT; una riverberazione simile si sarebbe potuta ottenere per mezzo del calcolatore. Le considerazioni fatte per l'esempio #512 si applicano anche a questo esempio.

#550 - Accordo ottenuto con modulazione ad anello con risonanza di Gong (Traccia 28)

Questo esempio rappresenta un tentativo di prolungare l'armonia in un timbro: un accordo, eseguito con un timbro generato in una maniera simile alla modulazione ad anello, viene imitato da un suono simile ad un o di gong le cui componenti sono le fondamentali dell'accordo. L'ultimo suono viene percepito come un'unica entità sonora piuttosto che come accordo e comunque il tipo di tono è chiaramente correlato all'armonia dell'accordo. Il passaggio eseguito è riportato in figura 65:

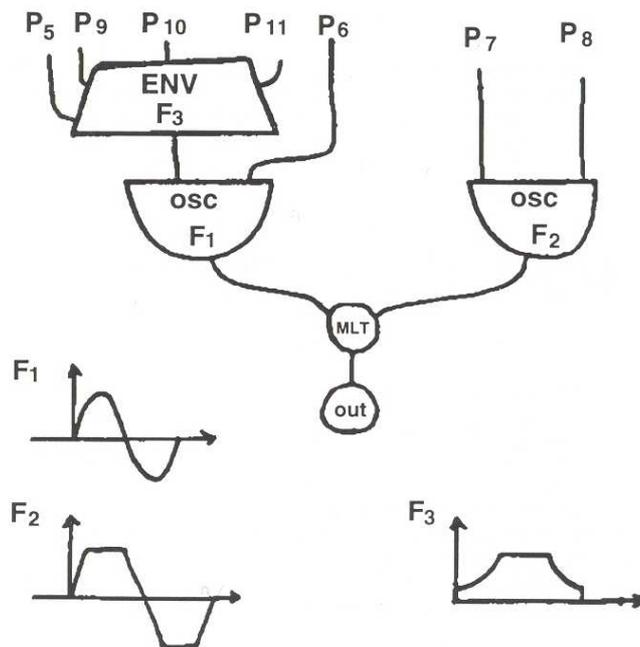
Figura 65. Prolungamento di un'armonia in un timbro: passaggio musicale



Strumento #1

Lo strumento #1 (figura 66) è utilizzato per generare le note dell'accordo con un metodo simile a quello della modulazione ad anello attraverso la moltiplicazione dell'uscita di un oscillatore sinusoidale con quella di un oscillatore ad onda quadra. Si devono utilizzare dei valori bassi per P_5 e per P_7 dato che l'ampiezza massima risultante sarà nell'ordine di $P_5 \times P_7$. La frequenza predominante di una nota riprodotta con questo strumento è pari alla differenza fra i valori di frequenza specificati in P_6 e P_8 . La funzione F_3 controlla l'involuppo della componente sinusoidale da cui deriva l'involuppo della nota; allo stesso tempo questa modulazione produce cambiamenti spettrali. Le note dell'accordo sono prima eseguite con un breve attacco percussivo (10 ms), quindi con un involuppo di tipo crescente-decrescente.

Figura 66. Strumento #1



Strumento 2

Lo strumento #2, utilizzato per il suono di gong è simile allo strumento #1 dell'esempio #420: viene usato un evento nota per ogni componente frequenziale; la forma d'onda è una sinusoida; ogni componente decade esponenzialmente ad una propria specifica velocità. Come precedentemente detto le frequenze delle componenti sono uguali alle note del precedente accordo musicale.

Bibliografia

- [1] M. V. Mathews. “*The Digital Computer as a Musical Instrument*” *Science*, 142 (1963) pp.553-557
- [2] M. V. Mathews. “*The Technology of Computer Music*” M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969
- [3] M. V. Mathews, J. R. Pierce, & N. Guttman. “*Musical Sounds from Digital Computers*”, *Gravesaner Blatter* 23/24 (1962) p. 109
- [4] J. C. Risset & M. V. Mathews. “*Analysis of Instrument Tones*”, *Physics Today*, 22, No. 2 (Feb. 1969) pp.23-30
- [5] R. N. Shepard. “*Circularity in Judgments of Relative Pitch*”, *J.Acoust. Soc.Am.*, 36 (1964) pp.2346-2353
- [6] J. C. Risset. “*Pitch Control and Pitch Paradoxes Demonstrated with Computer-Synthesized Sound*”, *J.Acoust. Soc.Am.*, 46 (P₁.1) (1969) p.88 (abstract only)
- [7] M. V. Mathews. “*The Computer Music Record Supplement*”, *Gray. Blatter* 26 (1965) p. 117
- [8] J. C. Tenney. “*The Physical Correlates of Timbre*” *Gray. Blatter* 26 (1965) pp.106-109
- [9] J. R. Pierce, M. V. Mathews, & J. C. Risset. “*Further Experiments on the Use of the Computer in Connection with Music*”, *Gray. Blatter* 27/28 (1965) pp.92-97
- [10] J. C. Risset and M. V. Mathews, *Physics Today*, Febbraio 1969