

Come misurare le "copie digitali"?

Naturalmente non ha senso parlare di misure su CD contenenti programmi o documenti, siano essi fogli elettronici, database o altro. In questo caso infatti l'unica analisi che si può fare è quella sulla correttezza dei dati registrati ed un eventuale controllo incrociato con i file originali. Nel caso dei dischi contenenti materiale audio, parlare di misure è legittimo e anzi indispensabile. Il disco utilizzato come disco di riferimento per la copia è lo Standard Test Disc CD-1 della CBS. Questo disco contiene numerosi segnali (in particolare quelli definiti dallo standard E.I.A. Electronic Industries Association) che vengono utilizzati nei laboratori di tutto il mondo per la misura di apparecchiature digitali, in particolar modo CD Player. Le copie sono state fatte a diverse velocità sia di lettura che di scrittura secondo la tabella 1: mantenendo la velocità di scrittura pari ad 1x si è via via incrementata quella in lettura, ogni volta raddoppiandola, da 1x a 16x. Si sono fatte altre due copie con le velocità di scrittura più alte (2x e 4x) ogni volta con una velocità di lettura pari al doppio di quella in scrittura. Non si è riusciti, anche se il masterizzatore di riferimento lo avrebbe permesso, a copiare con velocità di scrittura pari a 8x.

I dischi così copiati sono stati innanzitutto confrontati tra di loro e con il disco originale, e poi "misurati" utilizzando tre lettori CD player diversi, collegati ad un analizzatore computerizzato Audio Precision System One, sia dall'uscita digitale che da quella analogica.

Il confronto bit a bit

Il segnale musicale è memorizzato in un Compact Disc seguendo una codifica piuttosto complessa, come riportano nel riquadro "La codifica del segnale audio nei sistemi CD". I programmi di masterizzazione hanno la possibilità di estrarre le tracce audio incise in un CD e convertirle in formati più adatti all'utilizzo con il computer. Questa possibilità ci è utile per capire se la fase di lettura un CD audio e successiva riscrittura su CD-ROM registrabile è affetta da errori o meno. In pratica abbiamo "estratto" i dati audio di un determinato brano sia dal disco CBS che dalle sue copie, realizzate, come già detto a velocità di lettura/scrittura differenti. Ab-

biamo confrontato i file così ottenuti ottenendo risultati interessanti. I parametri per l'estrazione dei dati audio sono stati naturalmente gli stessi per tutti i dischi. Si è dapprima estratto il primo brano del disco CBS, contenente una sinusoide registrata a 0 dB digitali, ad 1 kHz, e poi il primo brano di tutti gli altri dischi ottenuti per copia dal primo. Tutti i file ottenuti per estrazione dalle copie sono risultati identici tra loro, indipendentemente dalle velocità di lettura e scrittura. Tutti questi file erano poi apparentemente diversi dal file ottenuto per estrazione dal disco originale CBS. Da una analisi byte a byte del file corrispondente all'estrazione 1x 1x con quello estratto dal disco CBS si è visto che i due file sono invece identici, a parte una parte iniziale contenente campioni pari a zero, che nel caso del disco CBS è lunga 7255 sample, e negli altri file è invece lunga 7901 sample. Quindi **i file sono identici, a parte la presenza di una parte iniziale di campioni, posti a zero, più lunga nelle copie che nel file originale.** Tralasciando per ora questi byte iniziali posti a zero, e che quindi nulla modificano nel file originale, possiamo dire varie cose:

1 - Che il fatto che i file copiati sono tutti uguali fra loro implica che il processo di lettura e successiva scrittura dei dati audio porta sempre agli stessi risultati, e questo indipendentemente dalla velocità;

2 - Che il fatto che i vari file copiati siano tutti uguali al file originale implica che il processo di copia sia stato fatto in maniera corretta.

Quindi, per dirla in parole povere, **durante il processo di lettura/scrittura i file non vengono modificati in maniera qualitativa**, in pratica il processo di copia è completamente trasparente.

Le misure elettriche

Le misure da noi scelte sono state due: la risposta in frequenza e la distorsione armonica ai bassi livelli. La risposta in frequenza viene rilevata misurando l'uscita (in questo caso analogica) del

CD player mentre riproduce la traccia 11 del disco CBS, contenente una sweepata logaritmica da 5 Hz a 22 kHz. In pratica all'uscita del CD player troviamo un segnale sinusoidale la cui frequenza varia nel tempo, dalle frequenze più basse. Se il livello di questo segnale rimane costante la risposta è piatta. Questa misura è la meno significativa, per quello che vogliamo andare a scoprire; c'è da aspettarsi che la risposta in frequenza non venga modificata nei passaggi di copia, anche se quest'ultima fosse fatta in maniera non corretta. Gli eventuali errori presenti nel file infatti porterebbero solamente o ad una correzione effettuata con il metodo della correzione degli errori, oppure, nei casi più gravi, ad un'interpolazione da parte dei circuiti di estrazione e conversione del CD player, con successiva nascita di distorsione.

La misura di distorsione armonica si ottiene facendo riprodurre al CD player una sinusoide ad 1 kHz di livello molto basso: -70 dB rispetto allo 0 dB digitale. L'accuratezza della conversione si manifesta con un grafico il più possibile pulito, con assenza di prodotti di distorsione e tappeto di rumore basso. Questa misura è quella, tra le misure tradizionali, che più si adatta a mostrare differenze, se ci sono, tra un disco copiato ed il suo originale. Tutte le alterazioni che potrebbero aversi (perdita di campioni, o solo di bit, perdita del sincronismo tra i dati, interpolazioni ed intervento dei circuiti di correzione degli errori) si manifesterebbero infatti sotto forma di distorsione. La misura da noi effettuata tende a rivelare proprio la distorsione ai livelli più bassi del segnale. Nella pagina a lato sono riportati tutti i grafici da noi rilevati. Ogni colonna si riferisce ad un CD player diverso: abbiamo utilizzato un sistema bitstream di prima generazione e due sistemi multibit di recentissima co-

Tabella 1

Combinazioni velocità di lettura/scrittura delle copie

Velocità di Lettura	Velocità di scrittura		
	1x	2x	4x
1x	X		
2x	X		
4x	X	X	
8x	X		X
16x	X		

La codifica del segnale audio nei sistemi CD

Come tutti sapranno il segnale digitale contenente campioni audio (per intenderci quello che si presenta all'ingresso del convertitore D/A digitale/analogico di un CD player) è costituito da una successione di campioni a 16 bit, acquisiti con frequenza di campionamento di 44.100 Hz, con i due canali stereofonici sincronizzati tra loro e interallacciati (per primo viene il canale sinistro). Tale segnale, per essere registrato su un CD deve essere codificato. La codifica consente di rilevare e correggere gli errori che si verificano durante la riproduzione e varia in funzione del supporto utilizzato e del modo in cui il segnale viene riprodotto e registrato. Si avranno codifiche diverse quindi per i sistemi CD, DAT o DBS (Digital Broadcasting Satellite).

La codifica adottata per la registrazione su CD è molto complessa; in pratica si hanno tre blocchi funzionali distinti.

La **codifica** vera e propria consiste in un'aggiunta al segnale originale di un certo numero di bit che consentono la sincronizzazione tra i vari campioni, la rilevazione e correzione degli errori, e contengono delle informazioni accessorie.

L'**interleaving** consiste in un rimescolamento dei dati in maniera da separare nel tempo i campioni adiacenti. In questo modo se durante la lettura si "perdono" alcuni bit consecutivi, questo non comporta la perdita di grandi porzioni del segnale, ma solamente di campioni isolati in mezzo ad altri che invece sono corretti. Il filtro presente all'uscita del convertitore D/A è capace di correggere automaticamente i dati mancanti con una interpolazione.

La **modulazione** consente di eliminare dal segnale eventuali componenti continue. Questo fa sì che il clock del segnale sia ricavabile dal segnale stesso.

La prima fase è quella di codifica ed interleaving, svolta da un circuito denominato CIRC (Cross Interleave Reed-Solomon Code). Ogni parola di 16 bit, contenente il generico sample audio, viene dapprima divisa in due "simboli" da 8 bit. Questi simboli vengono poi elaborati dal codificatore CIRC a gruppi di 24. In pratica i 24 simboli vengono prima rimescolati (nel circuito denominato C2 Scramble) quindi inviati al primo dei due codificatori Reed-Solomon, che da questi ne calcola altri 4, per la rilevazione e correzione degli errori. I 28 simboli così ottenuti vengono sottoposti ad un interleaving ed entrano in un secondo codificatore che ricava altri 4 simboli. A questo punto i simboli dispari vengono ritardati di un simbolo ed inoltre gli 8 simboli di verifica e correzione vengono negati. Al termine di questa lunga e laboriosa codifica abbiamo quindi 32 simboli. Viene ora aggiunto un ulteriore simbolo detto di subcode, che contiene informazioni accessorie, ed i 33 simboli vengono inviati al modulatore EFM (Eight to Fourteen Modulation, modulazione da otto a quattordici). In base ad una determinata tabella ciascun simbolo ad 8 bit viene modificato in un simbolo a 14 bit. La corrispondenza tra ogni simbolo ad 8 bit ed il corrispondente simbolo a 14 bit viene scelta in modo che gli "1" risultino separati tra di loro da un numero di zeri compreso tra due e dieci. Affinché sia mantenuta questa regola anche tra un simbolo e l'altro tra due simboli vengono inseriti tre bit, detti di "merging". Al tutto viene inoltre aggiunto un gruppo di 24 bit per la sincronizzazione. A questo punto abbiamo ottenuto un "frame" composto da 33 simboli da 14 bit, un "syncro" da 24 bit e 34 "merge" da 3 bit, per un totale di 588 bit, che corrispondono a 192 bit di segnale audio, come riportato nel disegno C. I frame vengono quindi scritti, in maniera seriale si intende, sul CD, in blocchi di 2352 byte, e cioè in blocchi di 32 frame.

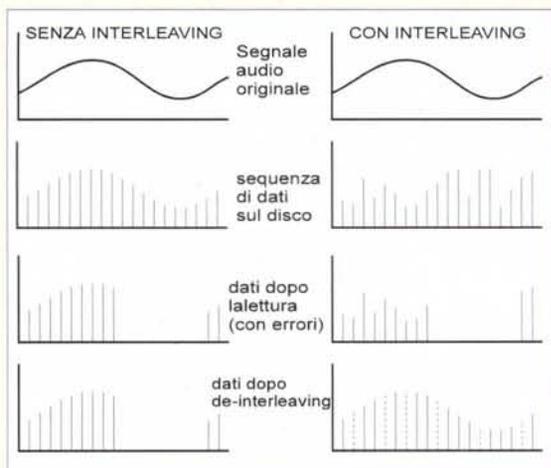


Figura A - L'interleaving disperde i dati di campioni adiacenti ed evita così la perdita di larghe fette di segnale nel caso di errore di lettura.

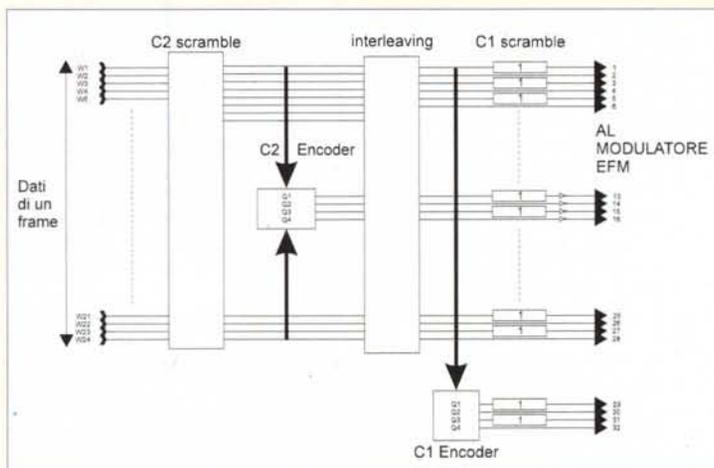
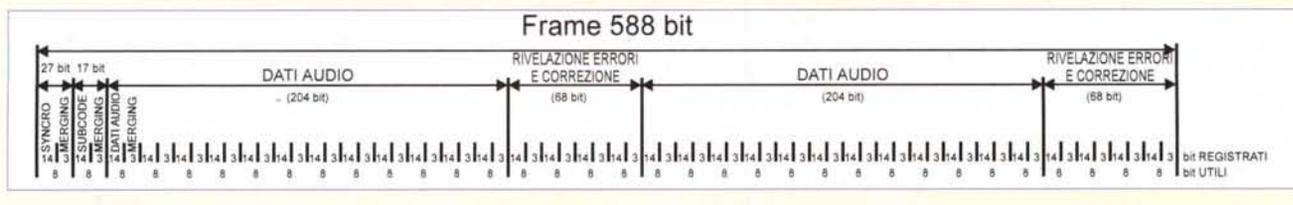


Figura B - Schema a blocchi di un codificatore CIRC.

Figura C - Struttura del Frame nel sistema CD.



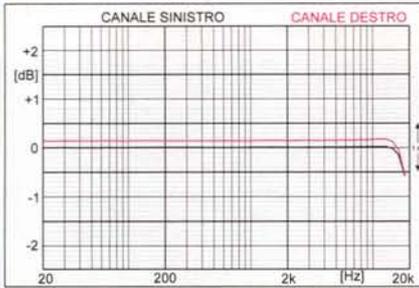
struzione, appartenenti quindi alla ultimissima generazione, uno molto economico e l'altro più costoso. Il primo grafico si riferisce alla risposta in frequenza, rilevata misurando il segnale dall'uscita analogica. Come si vede i grafici sono identici tra le velocità, a conferma di quello che avevamo detto prima, e cioè che la misu-

ra non è significativa. Questo significa che **la copia di CD audio non comporta alterazioni nella risposta in frequenza del segnale**. I grafici successivi si riferiscono alla misura di distorsione ai bassi livelli effettuata uscendo dall'uscita analogica del sistema, questo perché sono i circuiti di conversione i più sensibili

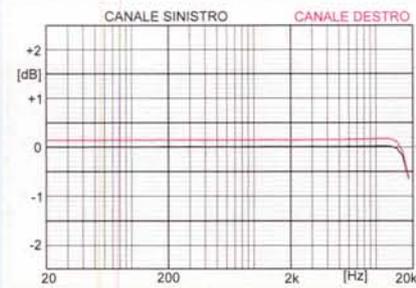
ad eventuali alterazioni del segnale. Come si vede però i grafici (partendo dal secondo in alto e procedendo verso il basso, si hanno situazioni sempre virtualmente "peggiori" riguardo a velocità di copia e sistema scelto) sono praticamente identici tra di loro, a parità di apparecchio utilizzato per la prova. Questo signi-

Risposta in frequenza

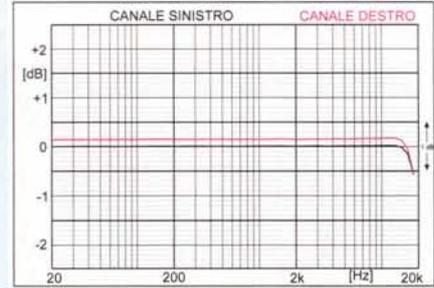
R 1 - W 1



R 16 - W 1

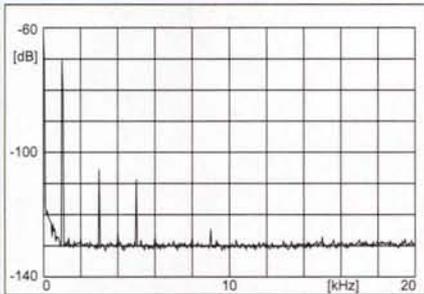


R 8 - W 4



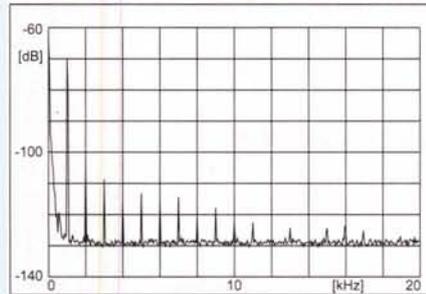
Letture bitstream

Distorsione armonica R 1 - W 1



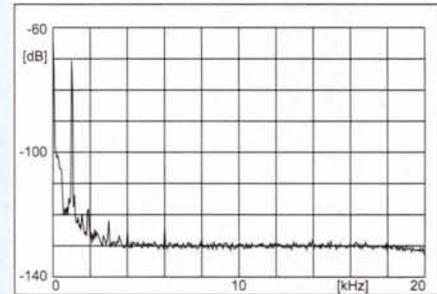
Letture multibit 1

Distorsione armonica R 1 - W 1

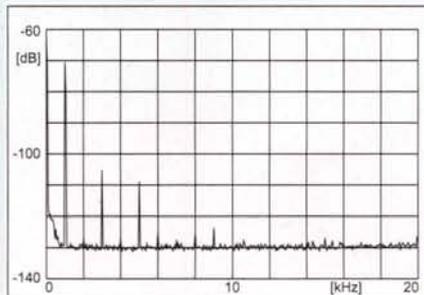


Letture multibit 2

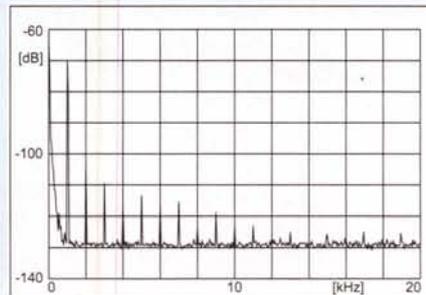
Distorsione armonica R 1 - W 1



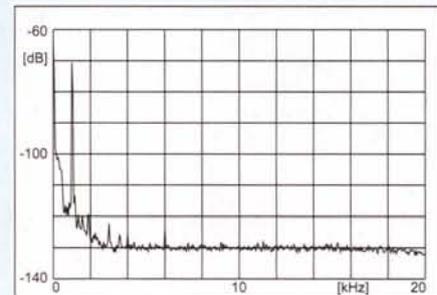
Distorsione armonica R 16 - W 1



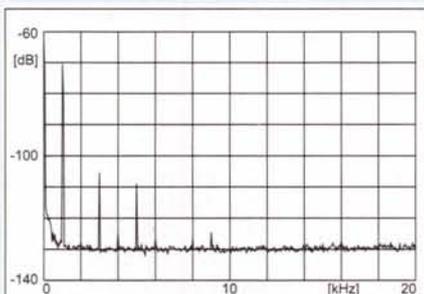
Distorsione armonica R 16 - W 1



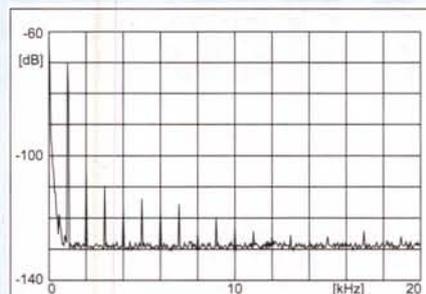
Distorsione armonica R 16 - W 1



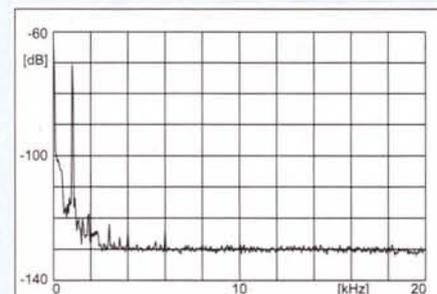
Distorsione armonica R 8 - W 4



Distorsione armonica R 8 - W 4



Distorsione armonica R 8 - W 4



fica che **la copia di un CD audio non comporta modifiche nella distorsione armonica del segnale.**

Conclusioni

Abbiamo capito che la copia di CD audio permette di creare CD perfettamente identici agli originali, che la copia non introduce alterazioni nella risposta in frequenza e non introduce distorsioni, né udibili né tantomeno misurabili. Possia-

mo dormire sonni tranquilli? Certamente no: come si spiega infatti che le "identiche" copie digitali di CD suonano in maniera diversa (attenzione, non meglio o peggio, ma in maniera diversa) dall'originale? La risposta non è nel processo di copia, che viene svolto, come abbiamo visto, in maniera corretta; il problema non è nei dati registrati sul CD-ROM, che sono i dati giusti, ma nella maniera in cui sono registrati. In pratica le eventuali differenze che si avvertono durante l'ascolto sono più da ricercarsi in problemi lega-

ti al corretto riconoscimento dei dati da parte del pick-up laser del CD player piuttosto che nella struttura e nella bontà dei dati registrati. Chiaramente l'argomento non si esaurisce qui. Nei prossimi numeri proseguiremo a sviscerare questo interessante argomento andando ad analizzare la cosa che appare più importante per la risoluzione del problema della copia digitale: il supporto, con prove e misure dei dischi CD-ROM registrabili e r-registrabili.

P. F.

MB