

CONSIDERAZIONI SUI SUPPORTI OTTICI

Autore/i: **Daniele Mongiello, Silvio Salza**

1. Considerazioni sui supporti ottici

Le criticità maggiori per quello che riguarda la conservazione di dati su supporti ottici riguardano principalmente:

- la fase di scrittura, in cui è necessario valutare
- la qualità del supporto
- la qualità dei dispositivi di scrittura
- la fase di conservazione, in cui è necessario stabilire
- le modalità di conservazione del supporto
- la durata di vita chimica del supporto

La fase di scrittura sicuramente riveste un ruolo molto critico, in quanto è indispensabile garantire al massimo che sia possibile recuperare nel tempo i dati trascritti, eventualmente anche in presenza di alcune imperfezioni fisiche sulla superficie del supporto.

L'informazione deve essere quindi in qualche modo garantita contro gli errori. Va tenuto presente che è inevitabile che questi si verifichino già in fase di scrittura. Le cause sono molteplici e vanno da microvibrazioni del pick-up del lettore o del supporto CD in rotazione, a minime oscillazioni del fascio laser di scrittura, a microscopiche disomogeneità dello strato costituente il mezzo di scrittura su cui si incide l'informazione e quant'altro. Inoltre, ed altrettanto inevitabilmente, alcuni graffi, o semplicemente l'invecchiamento chimico dei materiali di cui è costituito il CD stesso, possono impercettibilmente disallineare o corrompere piccole porzioni della traccia a spirale su cui l'informazione viene scritta, causando in lettura l'insorgere di altri errori di ricostruzione del flusso informativo originario.

La presenza di un solo errore in un file di dati può compromettere del tutto la sua leggibilità. Nel caso di un CD dati, l'informazione scritta risulta essere correttamente leggibile anche in presenza di evidenti segni sulla superficie del supporto stesso.

Questo è possibile, nei comuni CD-Rom dati WORM (i normali CD-R non riscrivibili) ed RW, grazie all'adozione, per la codifica di sorgente, di uno schema molto complesso denominato CIRC (Cross Interleaved Reed-Solomon Code), standard internazionale IEC 908 a cui si aggiunge un'ulteriore stadio di codifica (di canale).

I diversi livelli di codifica di cui è composto lo schema, interlacciati tra loro, garantiscono un elevato livello di robustezza contro gli errori, a costo però di **un rapporto tra codifica e informazione utile di circa 3:1**.

La presenza di linee di ritardo e scrambling (due stadi di interleaving) all'interno dello schema permette uno spreading dei blocchi di bit che compongono il flusso informativo (uno "sparpagliamento") su diversi frame. Questi vengono quindi trascritti in momenti diversi sul supporto in posizioni spazialmente distribuite. La presenza di graffi o piccole impurità provoca quindi un piccolo "pacchetto" di errori contigui che in fase di decodifica viene ripartito su blocchi diversi. Questo ne permette la correzione attraverso i codici utilizzati, fino ad un limite (approssimato) di 2,5mm di area danneggiata (graffi longitudinali - concentrici, quindi sovrapposti alla traccia, di lunghezza 2,5mm). Per questo viene sempre consigliato di agire, per pulire la superficie del CD, in senso radiale, proprio per evitare segni in senso longitudinale che darebbero luogo a errori non correggibili.

I test di invecchiamento accelerato a cui sono stati sottoposti CD provenienti da molti produttori diversi indicano significative differenze nella qualità dei supporti. Se per qualcuno la durata di vita media non supera i cinque anni, per particolari supporti (comunque regolarmente in commercio per la grande distribuzione) si denota una elevata resistenza agli agenti esterni e quindi una potenziale vita "chimica" media del supporto anche di alcune decine di anni.¹

I risultati dei test di lettura effettuati successivamente alle procedure di invecchiamento indicano che masterizzazioni effettuate su supporti con dye phthalocyanine/metal-stabilized cyanine, strati riflettenti in oro e con velocità di scrittura 2X or 4X danno la possibilità di creare dischi con la possibilità, teorica, di essere leggibili anche fra un secolo. Sono raccomandati test di compatibilità per stabilire anche la potenza minima di lettura richiesta per la particolare miscela di dye-strato riflettente selezionati per supporti che si intendono destinati ad una archiviazione a lungo termine.

2. Appunti sulla composizione

Un CD-R, tipicamente, (i CD-RW usano una tecnologia diversa, detta a cambiamento di fase. Invece di creare "bolle" e deformazioni nello pellicola di smalto di registrazione, viene fatto variare lo stato del materiale da cristallino ad amorfo e viceversa. Quindi i polimeri usati sono diversi) si compone di diversi strati:

- strato protettivo (opzionale)
- Uno strato di lacca di protezione, trattata con raggi ultravioletti
- Il Dye, uno strato di polimero organico, dal colore tipico, che è la parte su cui si incide
- Uno strato riflettente
- Un substrato di policarbonato costituito dal supporto di plastica trasparente

I punti distintivi sono principalmente la lacca, i polimeri e lo strato riflettente.

Le **lacche protettive** sono fatte di diversi materiali e dipendono molto dallo specifico vendor (Imation-ForceField, Sony-HardCoating, ecc.). Sono stati fatti grandi progressi per quanto riguarda i materiali utilizzati, soprattutto con l'arrivo del Blu-Ray e il suo rivale HD, in cui grandezza dei pit e della spirale (sono ca50GB di dati sul supporto) esigono una superficie del supporto in ottime condizioni..

I **dye** contengono una componente organica (bruciata nei CD-R o modificata chimicamente nei CD-RW dal riscaldamento (ca250C) provocato dal laser in fase di scrittura), l'elemento che è maggiormente soggetto a degradazione nel tempo. I tipi di degradazione causata dal tempo sono principalmente tre:

- Si attenua il contrasto tra pit e land, che causa problemi di interpretazione.
- Cambia il forma dei pit e land, che diventano più piccoli o più lunghi, causando bitter
- La deformazione del dye causa l'avvicinamento di due tracce vicine, causando interferenza di cross-talk

Le tipologie di dye sono principalmente tre, con differenze di costi trascurabili. I più utilizzati per i CD-R sono fondamentalmente 3:

- **Cyanine:** (il dye più vecchio in ordine cronologico, patented dalla Taiyo Yuden) Sopporta bene l'effetto luci artificiali ma degrada più rapidamente degli altri se sottoposto a stress di temperatura/umidità.
 - **Metal-stabilized canine:** leggermente più stabile del substrato in Canine.

¹ [J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **109**, 517-524 (2004)]

- **Phtalocyanine:** (colore blu scuro, patented by Mitsui) indicato nei test come il più resistente e chimicamente stabile dopo le procedure di invecchiamento accelerato, sia per stress di temperatura sia per effetti della luce artificiale. Leggermente più costoso degli altri
- **Azo-Cyanine:** (colore blu) I meno stabili. Usato molto soprattutto nei DVD.

Nel tempo tuttavia le differenze tra diversi dye nei test controllati si sono assottigliate.

Gli **strati riflettenti** tipicamente usati sono

- **Argento:** soggetto al problema dell'ossidazione. L'alta riflettività garantisce anche alte velocità di registrazione.
- **Leghe d'argento:** soggetto al problema dell'ossidazione
- **Oro:** costoso. Indicato nei test come il migliore a lungo termine. La riflettività più bassa impone limiti sulla velocità di masterizzazione. Sono riportati minori problemi di compatibilità con alcuni lettori (principalmente con lettori piuttosto vecchi, con laser di potenze troppo piccole)

Solo ultimamente alcuni grandi vendor internazionali si sono sensibilizzati al problema di offrire al mercato dei supporti specifici di alta qualità per archiviazione a lungo termine. Sono presenti linee con materiale riflettente Oro, lacche speciali e substrato HQ-Phtalocy o simili da (presentati al CEBit 2006 da Verbatim ,Memorex e altri....).

Indubbiamente, in tutti i test controllati, si riscontra un minore incremento del tasso BLER di errore, e conseguentemente di errori E1e2, nei supporti con metallizzazioni in oro. La degradazione avviene sia per imperfezioni dello strato di lacca protettiva che portano a contatto lo strato con ossidi o solfati, ma anche per prodotti chimici della degradazione dello strato sottostante. L'oro, ovviamente più costoso e ultimamente presente commercialmente in alcune linee di prodotti targati come "high-quality" o "archiving", è meno sensibile a processi di ossidazione, garantendo quindi una durabilità maggiore, almeno nei test controllati. Tuttavia, le leghe d'argento garantiscono una riflettività maggiore, quindi una maggiore velocità di lettura.

Esiste un numero ristretto di aziende produttrici di supporti ottici rispetto all'effettiva offerta di mercato. Sono in commercio cioè con marchi diversi CD di uno stesso produttore, dunque dalle stesse caratteristiche ma magari con packaging diverso. Esistono ricerche di mercato (basate su test che coinvolgono alcune centinaia di CD per volta) che, per agevolare una scelta mirata del tipo di supporto da acquisire, danno una valutazione della qualità dei supporti prodotti dai singoli produttori ed indicano il brand finale con cui il prodotto viene venduto.

Fabbriche più comuni per CD di qualità:

CD Manufacturer	CD Brand
Mitsui Chemicals	HP, Mitsui, Philips & Sony
Taiyo Yuden Company Limited	Taiyo Yuden, 3M, Sony, Philips, Boeder & Imation
TDK Corporation	3M, Pioneer, TDK & Yamaha
Kodak Japan Limited	BASF & Kodak
Pioneer Video Corporation	Pioneer
Ricoh Company	KAO & Ricoh

Fabbriche più comuni per CD di media qualità:

CD Manufacturer	CD Brand
Mitsubishi Chemicals Corporation	Sony, Traxdata & Verbatim
Hitachi Maxell, Ltd.	KingTech & Maxell
Fuji Photo Film, Ltd.	FujiFilm

Fabbriche più comuni per CD economici:

CD Manufacturer	CD Brand
Princo Corporation	BTC, Princo & KingTech
Gigastorage Corporation	Gigastorage
Lead Data Inc.	Lead Data, Lenco & Targa
Fornet International Pte Ltd.	Fornet & Magnex
Ritek Co.	Arita, BASF, Dysan, FujiFilm, Hi-Space, Intenso, JTEC, Memorex, MegaData, , MMore, Onkyo, Philips, Pony, Ricoh, Rimax, Samsung, Targa, TDK, Traxdata, Waitec & War
CMC Magnetics Corporation	BASF, CMC & Imation

Circa il 95% dei CD in circolazione privi di brand provengono dai produttori di quest'ultima tabella.

3. Valutazione della qualità

Fin dalla sua fondazione nel settembre 2005, all'interno dell'OSTA è presente una struttura apposite denominata Optical Disc Archival Testing (ODAT) Committee per la definizione di standard di test per supporti di alta qualità destinati all'archival. Il lavoro è fatto in congiunzione con i maggiori produttori internazionale Fuji, Imation, MAM-A Inc., Maxell, Memorex, Panasonic (Matsushita Electric), Ricoh, Sony, TDK, Toshiba, and Verbatim.

I test comunemente eseguiti prevedono una fase invecchiamento accelerato secondo una metodologia detta di Arrhenius². Si compone fondamentalmente di una "camera climatica" in cui i CD vengono sottoposti, per periodi variabili tra le 200 e le 4000 ore a temperature e umidità molto elevate.

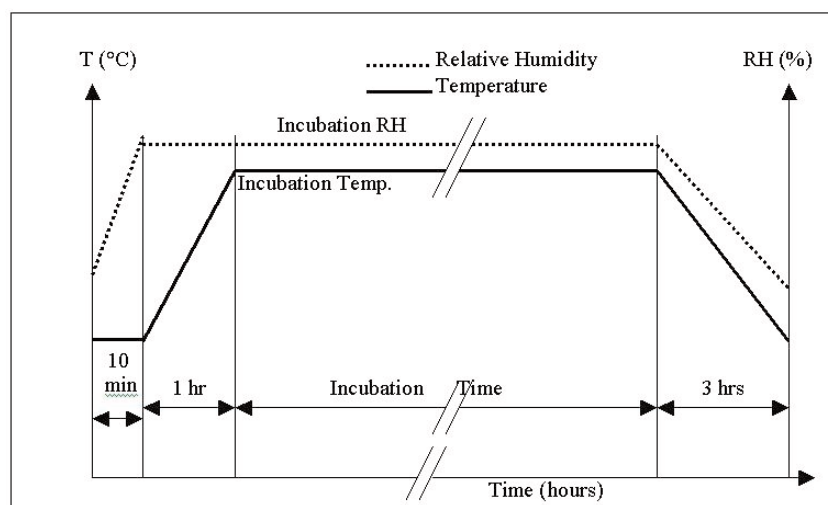


Figura 1 Esempio di ciclo di invecchiamento

² ANSI/NAPM IT9.21

E' quantificabile una corrispondenza tra i parametri imposti, uniti alla durata di esposizione, e l'invecchiamento, in termini di effetto chimico risultante, per simulare tempi di conservazione del supporto di 5, 10 o anche di 50 anni.

Esistono diversi studi, quasi tutti americani, il primo dei quali è databile intorno al 1996³:

- Library of Congress (2004) ha pubblicato uno studio basato sia su supporti sottoposti a invecchiamento accelerato che test di supporti dopo invecchiamento naturale di sette anni.
- Valutazioni in corso presso il NIST⁴ americano mirano a costruire una tabella che dia una stima di massima della durata media di vita in base al tipo di substrato chimico utilizzato

L'apparato standard-de-facto utilizzato per test ufficiali (tanto al NIST quanto presso la Sony o la Memorex) è il CATS Cd-Analyzer, della AudioDev Inc., una ditta Malmo, Svezia. La meccanica del lettore è Philips⁵ e consente di eseguire controlli raffinati di qualsiasi tipo, dallo stato fisico del supporto al tasso di errore rilevato.

Ne possiede in dotazione uno il CFLR di Roma che sta eseguendo test di invecchiamento. Nessun dato disponibile .

Esistono tool freeware ma anche tool built-in nei più comuni software di masterizzazione che permettono di eseguire controlli di qualità sia dell'apparato di lettura (creando un cd con pattern di dati di test particolari. Registrando successivamente eventuali errori come jitter, andamento velocità lineare costante (CLV), radiale costante (CRV), risposta alla calibrazione del laser, ecc. si può dare un punteggio di qualità all'apparato) che, soprattutto, del disco inserito.

Anche in questo caso è possibile realizzare test sul supporto vuoto (valutazione della qualità dello spirale di registrazione, lettura dei dati ATIP, ecc.), con dati di test o su dati registrati precedentemente.

Le valutazioni in genere fornite contengono valori che fanno riferimento ad alcuni parametri medi ed alla tipologia specifica di errori riscontrati in fase di lettura. Alcuni sono correggibili, altri no, a seconda del livello di codifica in cui si sono verificati. E' importante valutare il tipo e la gravità degli errori riscontrati per capire lo stato di salute del supporto.

Ci sono circa 50 parametri indicativi dello stato di qualità di un CD. I più significativi includono:

- **E11 ed E21:** Errori al secondo misurati relativi rispettivamente ad un singolo simbolo o due simboli consecutivi, correggibili dal primo stadio di decodifica (C1).
- **E31:** Errori al secondo misurati non correggibili al primo stadio di codifica (C1). Vengono marcati e passati per la correzione al livello C2.
- **E12:** Errori al secondo misurati relativi ad un singolo simbolo, correggibili dal secondo stadio di decodifica (C2). Alti valori di E12 non sono ancora significativi dato che l'interleaving dallo stadio precedente può alterare la distribuzione degli errori, raggruppandoli in burst di 30 che rimangono ancora correggibili a questo livello.
- **E22:** Errori al secondo misurati relativi due simboli, ancora correggibili dal secondo stadio di decodifica (C2). Un valore di E22 diverso da 0 indica la presenza di errori consistenti e distribuiti e va considerato come la soglia limite prima di compromettere la leggibilità.
- **E32:** Errori non più correggibili. Alcuni dati sono corrotti. Al primo errore di questo tipo il NIST, nei suoi test, considera il CD come deteriorato e non più leggibile.
- **I3-I11:** numero che indica il livello di riflettività misurato sugli intervalli I3 ed I11 (vedi dopo codifica EFM). Il valore di riferimento, solitamente normalizzato tra 0 e 1, è, in accordo con le

³ ANSI NPM IT9.21-1996 Life Expectancy of Compact Discs (CD-ROM) -- Method for Estimating, Based on Effects of Temperature and Relative Humidity. Similar reports were produced for Magneto-Optical (MO) Discs and CD-R media

⁴ NIST Special Publication 500-200

⁵ Philips CDM4 Optical Drive, appositamente reingegnerizzata

specifiche *(Oranage Book e Philips) di 0,35. Può essere riferito a differenti zone del disco in un'analisi a settori.

- **BLER:** Block Error Rate è il numero che indica il tasso al secondo (generalmente 1sec o 10sec) di blocchi di dati (da 2352Byte), in cui si è riscontrata la presenza di almeno un errore nei dati (E11 + E21 + E31). E' in genere possibile un BLER massimo di 220errori/secondo, mantenendo ancora il supporto leggibile, in qualsiasi settore del disco.
- **Jitter:** Si misura statisticamente come la deviazione standard del valore misurato dello scostamento del clock inciso sulla traccia disco (in corrispondenza degli intervalli 3T e 11T) rispetto al riferimento locale, misurato su tutta la superficie. Un jitter pari a 0 o comunque molto basso è, assieme al BLER, un buon indicatore della qualità complessiva del disco, dato che quantifica la capacità del dye di mantenere nel tempo i "fori" (land e pits) ben definiti e permettere quindi una corretta lettura
- **BERL-** Grandezza media errori a burst (Byte)
- **CRC** – del 33-esimo byte aggiunto al frame2 (subcode-channel)

4. Codifica nel formato CDR

CIRC si compone di un codice di Reed-Solomon, con 4 simboli di parità (Error Detection 3, Error Correction 2) codificato a sua volta da un secondo codice di Reed-Solomon, anch'esso con distanza minima 5 (analogo al precedente).

All'output di questo modulo viene aggiunto un codice ciclico di controllo (CRC) basato su simboli interalciati su diversi blocchi (Sub-Code symbol, periodici di 8 blocchi); ancora, il risultato viene a sua volta codificato da secondo doppio codice di Reed-Solomon, entrambi con distanza minima 3. In totale, l'informazione viene codificata con cinque codici combinati tra loro in cascata.

A questa si aggiunge infine la codifica di canale che definisce il formato fisico in cui l'informazione è effettivamente scritta sul CD. La codifica è realizzata tramite un codice EFM (Eight-to-Fourteen), che si basa su un dizionario di 256 parole a 14bit che mappa le corrispondenze tra le parole di 8bit (l'informazione utile) e parole di 14bit (l'informazione codificata).

Lo schema completo e:

P-ParityRS3(Q-ParityRS3(CRC(CIRC+EFM)))

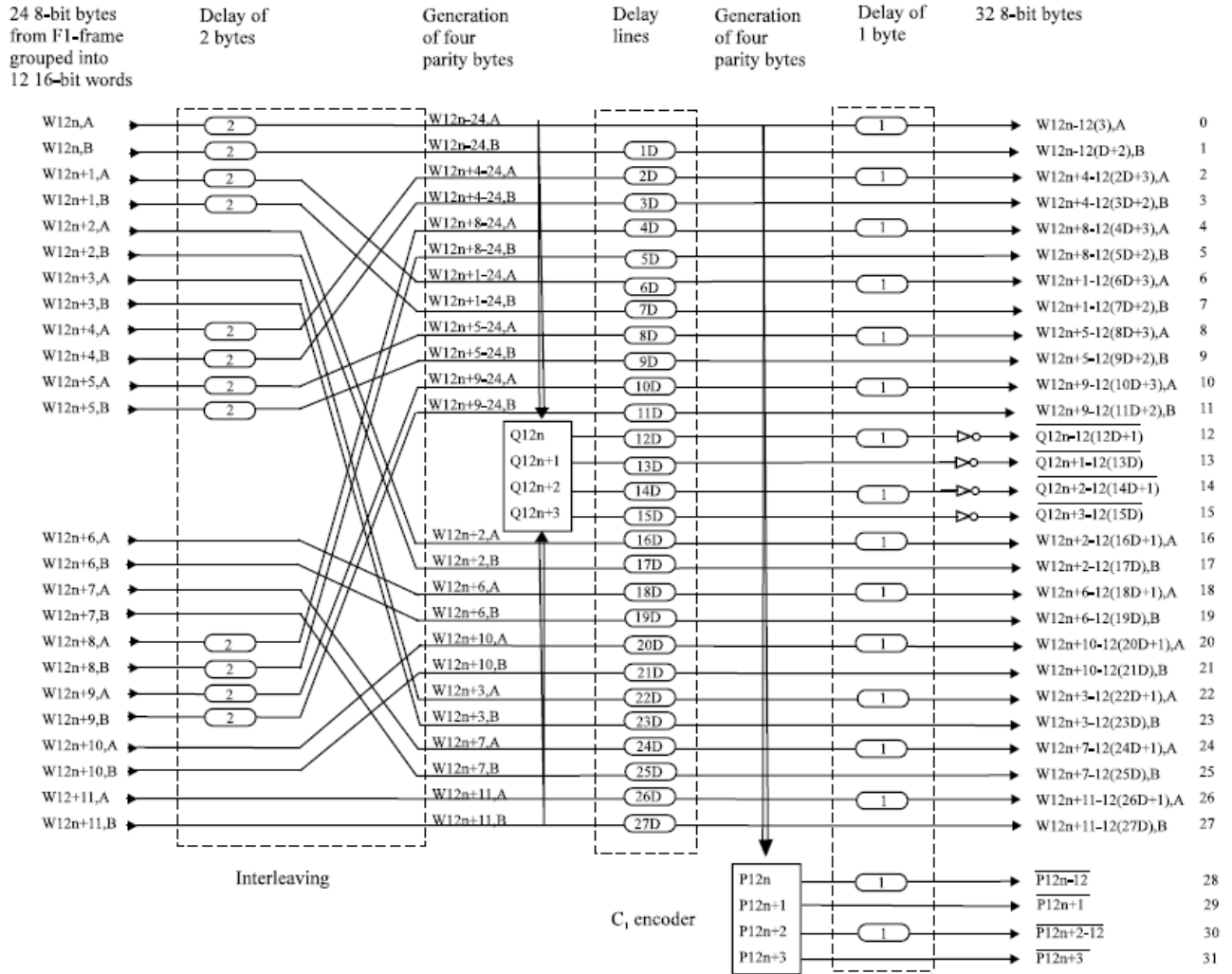


Figure 1 Codificatore CIRC

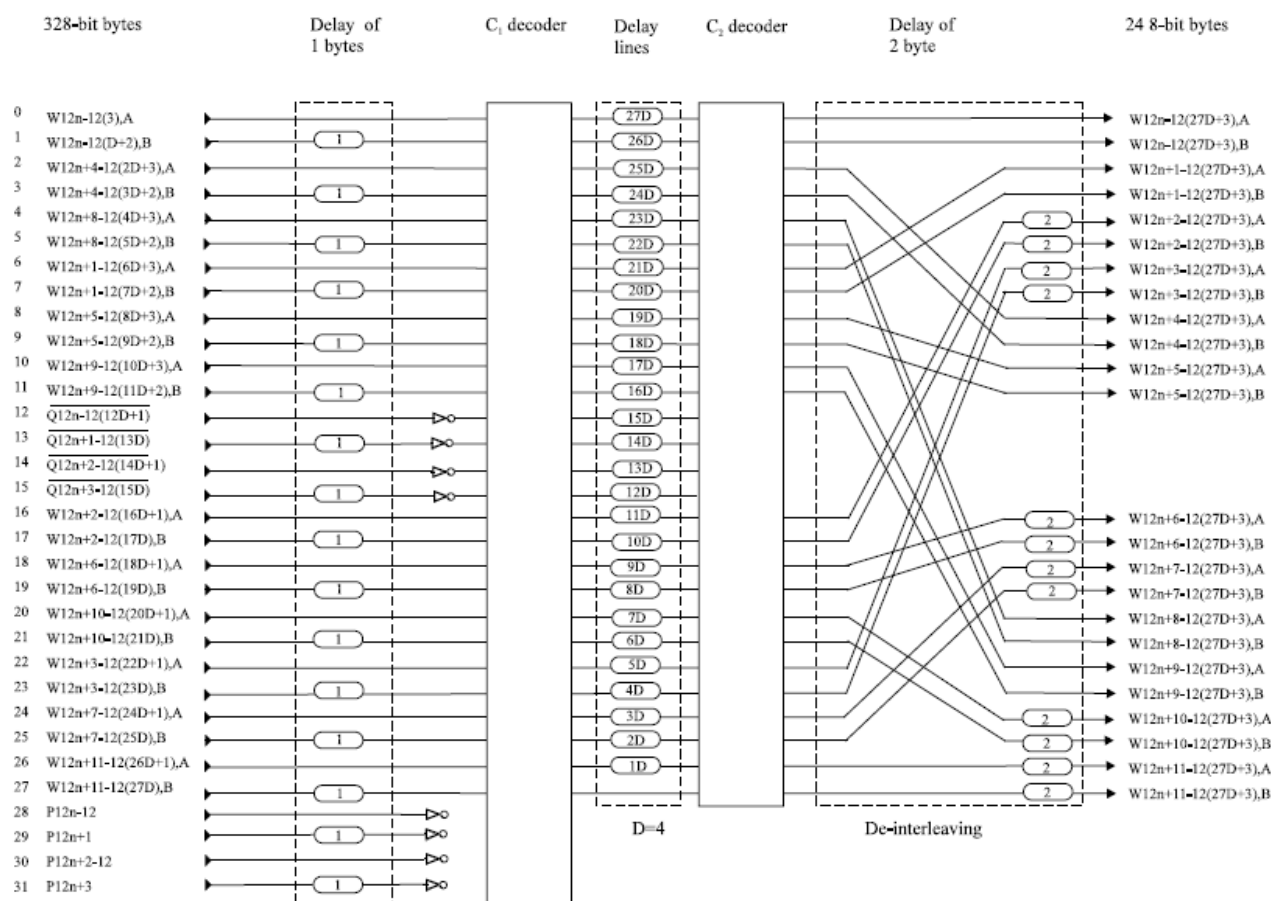


Figure 2 Decodificatore CIRC

5. La codifica CIRC

- Primo livello C2 -**Reed Solomon** (28,24B – I dati sono solo questi!)
 - Dato che, in decodifica, i dati a questo livello sono “sequenziali”, ovvero già ricomposti nella sequenza corretta, in letteratura e sul web diverse fonti citano la correzione di errori a questo livello come dedita principalmente, oltre che a correggere bit errati segnalati dai livelli superiori, alla correzione di errori fisici (streaming dei dati dal masterizzatore al pickup, jittering)
 - E11-E21-E31 Errori rilevati in lettura al livello c1 (esterno) del decoder: E11 ed E21 correggibili tramite RS – E31 non correggibile a questo livello
- Interleaving spread su 109 frames⁶
- Secondo livello C1 - **Reed Solomon** (32,28)
 - Dopo il primo livello di interleaving gli errori in burst correggibili in decodifica dovuti ad es.ad imperfezioni della superficie (graffi, sporcizia) sono 436B, cioè un graffio “teorico” di 2,5mm
 - E12-E22 Errori rilevati al livello c2 (interno) del decoder: correggibili tramite RS –
 - E32 - errori non corretti (non correggibili) dopo il secondo livello di RS (non c’è nessun match tra dizionario e word decodificata). I test condotti al NIST considerano un CD-ROM dati non valido al primo errore di questo tipo. Tuttavia anche secondo

⁶ (dalla teoria dei codici, aggiungendo ad un codice lineare a blocchi un interleaving di profondità t si ottiene un codice (nt,kt) con dist. hamming=bt. In pratica si ottiene una migliore distribuzione temporale della ridondanza a spese del ritardo temporale necessario per l’elaborazione.)

ISO10149, vi è un ulteriore livello di correzione d'errore: il cosiddetto Layer3, formato da quei 304 bytes non utilizzati per i dati (infatti che i CD-Audio utilizzano per i dati tutti i 2352 bytes presenti in un blocco, mentre i CD-ROM ne usano solo 2048). Ovviamente è indice di uno stato critico del supporto.

- Interleaving spread su 109 frames

6. Codifica EFM

La codifica EFM fa corrispondere alle 256 combinazioni di possibili byte-word, 256 delle 16384 possibili word di 14-bit.

Le word da 14 bit vengono selezionate in modo che ci siano sequenze di 0 o di 1 consecutive mai minori di 3 bit e mai maggiori di 11.

Perché EFM?

Va considerato il fatto che il clock dell'apparato di lettura soffre delle limitazioni solite: jitter, skew.. Considerando che un pit, su CD, è di circa 300nm, occorrerebbe un clock accuratissimo per far sincronizzare alla velocità di rotazione, che è oltretutto variabile, il convertitore Ott/El per l'elettronica di lettura.

Quindi le limitazioni imposte servono per due ragioni:

- Il limite minimo viene imposto per far in modo che l'apparato di conversione A/D e l'elettronica di lettura sia sempre in grado, dal punto di vista temporale, di distinguere una transizione land-pit (ca ricordato che la lettura di bit 0-1 è collegata ad una transizione "cronometrata" land-pit o viceversa.)
- Il limite massimo viene imposto per resettare spesso il timer e risincronizzarlo correttamente

7. Errori

Gli errori si possono presentare in burst o come eventi casuali singoli.

La letteratura (ancora piuttosto scarsa e a livello sperimentale-ufficioso) riporta pareri controversi sulla possibilità di ricondurre le singole tipologie di errore a specifiche cause. Ovviamente è indicativo di un generale degrado del supporto l'innalzamento dei tassi di errore, anche se ancora corretti dal sistema di decodifica.

In conclusione è necessario puntualizzare che il miglior sistema di individuazione degli errori, sia per i CD-DA che per i CD-ROM è e resta il jitter.

Tornando al livello della semplice lettura è importante aver presente che quel che conta sono le transizioni tra pits e lands: solo una transizione (sia essa tra pit e land o land e pit) equivale ad un 1. Quindi una deviazione (anticipo o ritardo) nel tempo di lettura della transizione può generare un errore, e lo genera sicuramente se il ritardo è di 115 nanosecondi. Inoltre qualsiasi tipo di difetto su un CD aumenta il jitter (è fisicamente impossibile ottenere un jitter pari a 0), il che significa che il jitter è a tutti gli effetti il miglior metodo di misurazione della bontà di un CD.

Il solo problema è che la misurazione del jitter richiede l'impiego di un oscilloscopio. Infatti il jitter può essere misurato guardando il segnale HF (alta frequenza) generato dal pick-up del lettore CD, che rappresenta l'intensità della luce riflessa dalla superficie del CD. In pratica il jitter, essendo una questione di tempo, può essere rappresentato da una forma d'onda su un piano cartesiano, ma il solo modo di ottenere quella forma d'onda è di mettere tra il fotodiodo che capta la luce riflessa ed il demodulatore di segnale che "interpreta" quella quantità di luce uno strumento in grado di analizzare gli

intervalli di tempo, e cioè proprio un oscilloscopio. Il che non significa che misurare gli errori C1 e C2 sia inutile, ma solo che si tratta di un metodo impreciso rispetto alla misurazione del jitter, che, in quest'ambito, è estrapolato dalla sua sede naturale (l'audio) per essere utilizzato come metodo di verifica di un CD.

Quindi, considerando che il segnale dati è codificato EFM, il jitter è profilabile (il CATS lo fa) sulle specifiche transizioni tra diverse word (ad es. 3T-3T, 3T-4T, ecc.) con specifico tasso di occorrenza.

8. ApparatI test

L'apparato, standard de-facto, per il testing della qualità di supporti ottici, siano essi già scritti o meno, è il CATS della svedese Audio-Dev (www.audiodev.com).

L'ottica di questi apparati è philips (CDM4 single beam) coadiuvata da soluzioni specifiche per il bilanciamento, la calibrazione del laser e con firmware apposito.

I parametri di misura sono

- Geometrici: eccentricità, geometria circolare
- Fisici :
 - Pre scrittura: omogeneità del dye, riflettanza del land
 - Con dati test: vengono forzate pattern di transizione pit-land e misurata jitter,bler
 - Post-scrittura: vengono valuati gli errori descritti e11,e21,ecc, gli i11,i31 dovuti alla differenza picco-picco tra i livelli di segnale ricevuto rispetto al valore atteso, ecc.
 - Jitter sui dati scritti, con dettaglio eventuale del jitter medio per le specifiche transizioni.

oltre agli errori rilevati dai codificatori interni e di settore, anche di natura fisica: Geometria, simmetria, riflettanza, errori di modulazioni e timing picco-picco (tra word EFM 3T (min)– 11T(max))

Per l'invecchiamento artificiale dei supporti vengono utilizzati i metodi di arrhenius o di Eyiring. Il NIST ha condotto test estensivi (NIST Special Publication 500-200) sull'invecchiamento artificiale, dando alcuni primi risultati comparativi sulle caratteristiche di longevità dei differenti tipi di substrato e sul tipo di degradazione che subiscono gli strati di metallizzazione.