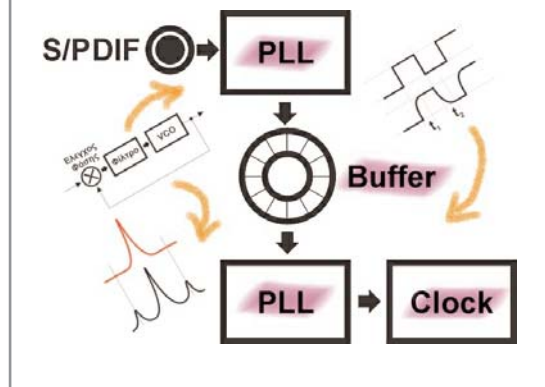


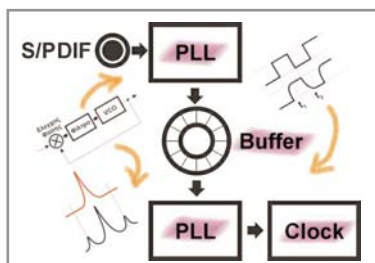
KnowHow Series

Ό,τι πρέπει να γνωρίζετε γύρω
από το Jitter για να μην
ανησυχείτε αδικώς...

Πώς ορίζεται, πού οφείλεται και
πώς αντιμετωπίζεται ένα από τα
πλέον δυσνόητα προβλήματα του
ψηφιακού audio.



Δημήτρης Σταματάκος, έκδοση 02/2007



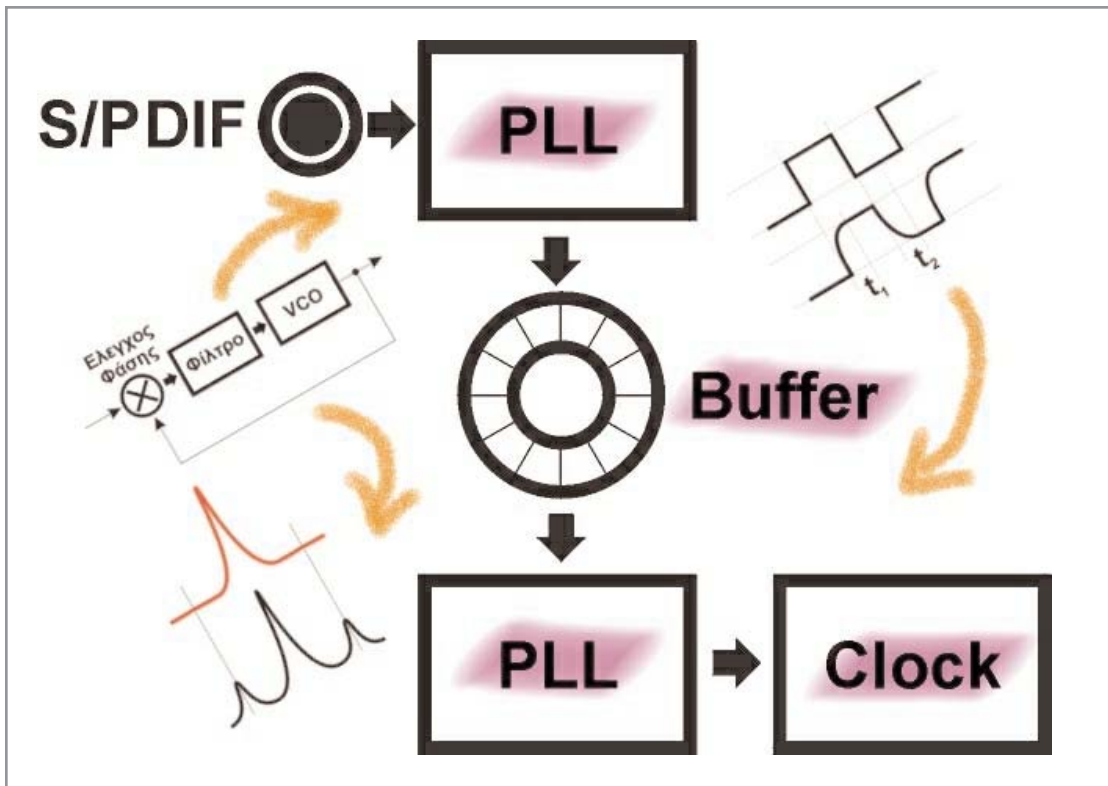
εισαγωγή

Ένα από τα πλέον ακαθόριστα προβλήματα των ψηφιακών συστημάτων, το jitter έχει την τάση να εμφανίζεται στο προσκήνιο όταν δεν μπορούμε να εξηγήσουμε κάποιο πρόβλημα βασισμένοι σε μια άλλη, περισσότερο συμβατική, αιτία. Κι όμως, η φύση του είναι απλή και η κατανόησή της εύκολη, τουλάχιστον επί της αρχής, όπως άλλωστε αρμόζει σε κάθε πραγματικά σοβαρό πρόβλημα που λύνεται δύσκολα - όταν λύνεται και απέχει, σίγουρα, πολύ από το να θεωρείται μεταφυσικό...

Ακριβώς επειδή το jitter δεν είναι πάντοτε πλήρως κατανοητό, όταν συζητούμε γι' αυτό, αποτελεί πηγή μερικών από τους πλέον διαδεδομένους μύθους, όσον αφορά τουλάχιστον το ψηφιακό audio. Ακροατές που μπορούν να «ακούσουν» το jitter, καλώδια και μαύρα κουτιά που «το διορθώνουν», ακόμη και συσκευές που εισάγουν jitter (σε συγκεκριμένες, μικρές αλλά ασαφώς καθοριζόμενες ποσότητες) επειδή κατά τους σχεδιαστές τους βελτιώνουν το ηχητικό αποτέλεσμα, συνυπάρχουν στον χώρο με λύσεις και επιλογές που επιχειρούν να λύσουν το πρόβλημα με τρόπους σαφώς πιο αποδεκτούς.

Η αλήθεια είναι ότι το jitter είναι ένα γνωστό πρόβλημα των ψηφιακών συστημάτων ήχου, η αντιμετώπιση του οποίου υπαγορεύει αρκετές από τις σχεδιαστικές λύσεις που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά συστήματα εδώ και χρόνια: Το PLL για την ανάκτηση του σήματος χρονισμού, το κεντρικό clocking των επαγγελματικών και κάποιων κορυφαίων οικιακών συστημάτων, η σύνδεση «Master-Slave» των transport με τους DACs είναι μερικές από αυτές.

Σε κάθε περίπτωση, για να εκτιμηθούν όλα αυτά θα πρέπει να γνωρίζει κανείς μερικά πράγματα γύρω από το συγκεκριμένο πρόβλημα και αυτή ακριβώς η γνωριμία επιχειρήται μέσα από τις επόμενες σελίδες.



Τί είναι το Jitter;

Ο,τι πρέπει να γνωρίζετε για να μην ανησυχείτε αδικώς...

Ίσως η μεγαλύτερη δυσκολία μας στην κατανόηση του jitter να βρίσκεται στον ίδιο τον ορισμό του. Σε αντίθεση με τα συνήθη προβλήματα των συστημάτων ήχου, τα οποία συνήθως αφορούν το ίδιο το ηχητικό σήμα, στην περίπτωση του jitter αυτό δεν ισχύει καθώς η σχέση του με το τελευταίο είναι, όπως θα δούμε, έμμεση.

Ας αρχίσουμε με τον επίσημο ορισμό: Ο διεθνής οργανισμός τηλεπικοινωνιών (ITU) περιγράφει το jitter ως «τις στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στον χρόνο». Για τους μηχανικούς τηλεπικοινωνιών η φράση αυτή λέει πολλά (και το ίδιο συμβαίνει για όλους όσοι έχουν ασχοληθεί έστω και ελάχιστα με το θέμα) αλλά σε πρώτη ανάγνωση, ο ορισμός δεν μας βοηθά και πολύ.

Ο ορισμός του Jitter - Δείγματα και μπαλάκια του τένις...

Τα πράγματα μπορούν να γίνουν περισσότερο κατανοητά, αν φανταστεί κανείς την εξής διαδικασία: Ένας παρατηρητής κάθεται απέναντι από ένα βολτόμετρο το οποίο μετρά την τάση ενός ηχητικού σήματος (όπως αυτή βγαίνει από ένα μικρόφωνο). Δίπλα στο βολτόμετρο υπάρχει ένα ακριβέστατο χρονόμετρο και δίπλα στον παρατηρητή μας υπάρχει ένα

μεγάλο καλάθι με μπαλάκια του τένις. Κάθε δευτερόλεπτο, όπως το βλέπει ο παρατηρητής μας στο χρονόμετρό του, εξετάζει το βολτόμετρο, παίρνει ένα μπαλάκι, γράφει επάνω του την τιμή της τάσης και στην συνέχεια το ρίχνει σε μία οπή στο πάτωμα. Η οπή αυτή οδηγεί σε μία ταινία μεταφοράς επάνω στην οποία τοποθετείται ένα δοχείο, για κάθε τέτοιο μπαλάκι. Η έξοδος μιας τέτοιας τρελής μηχανής, είναι διακριτά δείγματα ενός αναλογικού σήματος το πρώτο στάδιο (όπως ίσως γνωρίζετε) ενός μετατροπέα A/D. Τα προβλήματά μας ξεκινούν από την στιγμή που ο παρατηρητής μας εισάγει μία καθυστέρηση ανάμεσα στην στιγμή που πρέπει να ρίξει το μπαλάκι στο δοχείο και στην στιγμή που πραγματικά το ρίχνει. Στην ιδανική περίπτωση, η όλη διαδικασία απαιτεί ακριβώς ένα δευτερόλεπτο (όπως ορίζει το χρονόμετρο) και επομένως τα δοχεία με τα μπαλάκια επάνω στην ταινία μεταφοράς θα απέχουν ακριβώς τόσο. Στην συνήθη περίπτωση, όμως, θα υπάρχουν καθυστερήσεις ή και προπορείες (ο παρατηρητής μας μπορεί να είναι αργός ή να βιάζεται...) για διάφορους λόγους με αποτέλεσμα τα δοχεία να μην ισαπέχουν. Και στις δύο περιπτώσεις το θεωρητικό μας μέγεθος παραμένει σταθερό και είναι συχνότητα δειγματοληψίας όπως την ορίζει το χρονόμετρο, αλλά το αποτέλεσμα στην πράξη διαφορετικό: Τα δείγματά μας, δηλαδή τα δοχεία με τα

μπαλάκια του τένις, δεν ισαπέχουν στην έξοδο της μηχανής! Αν κάποιος σας καλούσε να κρίνετε την ποιότητα της μηχανής, αφού εξετάζατε την ακρίβεια του χρονομέτρου και του βολτομέτρου, και επιβεβαιώνατε ότι υπάρχουν άφθονα μπαλάκια και δοχεία, θα επικεντρώνατε την κριτική σας στον παρατηρητή: Θα λέγατε -πιθανόν- ότι δεν διατηρεί τον ρυθμό του σταθερό, στο ένα μπαλάκι ανά δευτερόλεπτο, και ότι δεν μπορείτε να είστε βέβαιος ούτε για το ποιά είναι η διακύμανση του ρυθμού αυτού. Ίσως, μάλιστα, θα είχατε υπολογίσει και την μέγιστη και ελάχιστη απόκλισή του (πόσο πιο γρήγορος ή πόσο πιο αργός ήταν κατά την περίοδο της παρατήρησης). Με απλά λόγια, θα είχατε ανακαλύψει ότι το σύστημα εισάγει Jitter!

Γιατί το Jitter είναι τελικά πρόβλημα;

Αν η μηχανή μας συσκευάζει απλώς μπαλάκια του τένις, μία απόκλιση στον ρυθμό με τον οποίο αυτά φθάνουν στον συσκευαστή, δεν θα μας πείραζε. Ωστόσο, μην ξεχνάμε ότι στην περίπτωση του ψηφιακού audio μας ενδιαφέρουν δύο πράγματα: Η τιμή κάθε δείγματος και η χρονική θέση του δείγματος αυτού σε σχέση με τα υπόλοιπα, γύρω του! Μονο με βάση τις δύο αυτές πληροφορίες, ένας μετατροπέας D/A μπορεί να ξαναδημιουργήσει το αναλογικό σήμα.

Ωστόσο, δεν υπάρχει τρόπος ο DAC μας να γνωρίζει την χρονική θέση του δείγματος, παρά μόνο να την υποθέσει: Αν έχουμε κάνει sampling στα 44.1kHz, έχουμε πάρει 44.100 δείγματα του σήματος ανα δευτερόλεπτο, δηλαδή ένα δείγμα ανά 22μS και αυτό ακριβώς θεωρεί ο μετατροπέας ότι συμβαίνει. Αν δεν συμβαίνει, απλώς αναδημιουργείται ένα αναλογικό σήμα που δεν συμπίπτει με το αρχικό.

Αυτή η αδυναμία των συστημάτων μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και του ψηφιακού σε αναλογικό να ανταλλάξουν άμεσα μεταξύ τους πληροφορίες για τον ρυθμό δημιουργίας και επεξεργασίας των δειγμάτων (δηλαδή το γεγονός ότι είναι ασύγχρονα) οφείλεται βεβαίως στο ότι μεσολαβεί μεταξύ τους ένας μεγάλος αριθμός άλλων επεξεργασιών, το μέσο αποθήκευσης (CD, CD-R/RW, DVD, SA-CD, κ.λπ) και αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα (και πιθανόν κάποια χρόνια)... Μια ψηφιακή ηχογράφηση που έγινε στις ΗΠΑ το 1990, ακούγεται σήμερα από ένα cd player στην Αθήνα, επομένως θα πρέπει με κάποιο τρόπο να ενημερώσουμε το τελευταίο για τον ρυθμό αφίξης των δειγμάτων, έστω και εμμέσως... Στις επόμενες σελίδες θα δούμε πώς γίνεται αυτό, αλλά προς το παρόν αυτό που πρέπει να γνωρίζετε είναι το εξής: Δεν μας αρκεί να λαμβάνουμε τα διαδοχικά δείγματα την σωστή χρονική στιγμή, όπως αυτή ορίζεται από τον ρυθμό δειγματοληψίας που έχουμε αρχικώς επιλέξει, αλλά επιπροσθέτως το σύστημά μας σε οποιοδήποτε σημείο του θα πρέπει «να είναι βέβαιο» για το ποιός είναι ο ρυθμός αυτός. Κάθε λάθος πληρώνεται με απόκλιση από το αρχικό σήμα.

Πόσα Είδη Jitter Υπάρχουν;

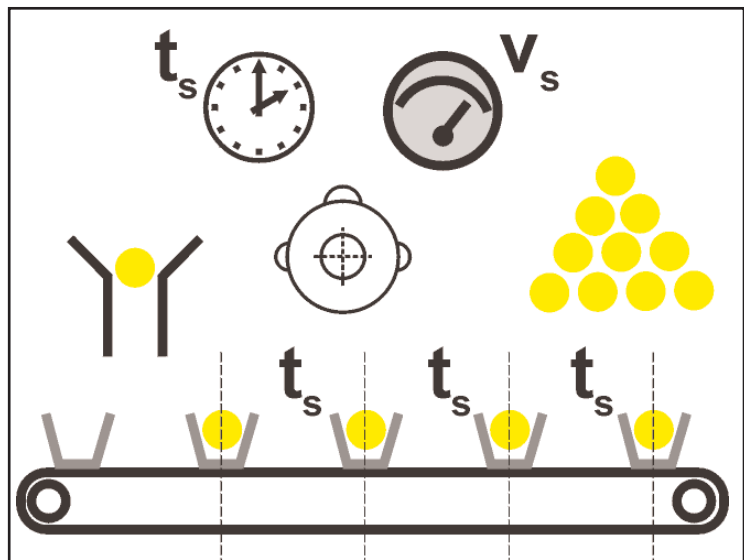
Το αρχικό μας παράδειγμα με τα μπαλάκια του τένις περιγράφει σχηματικά την πιο βασική μορφή jitter, την οποία ονομάζουμε sampling jitter. Μπορεί κανείς εύκολα να φανταστεί ότι ένα τέτοιο πρόβλημα στην αρχή μιας μακράς διαδικασίας και μάλιστα σε μια τόσο σημαντική φάση (δηλαδή κατά την δημιουργία των αρχικών δειγμάτων) αποτελεί μία κληρονομιά που δεν μπορεί κανείς να πετάξει από πάνω του εύκολα. Αυτό είναι γεγονός. Αν μία ψηφιοποίηση έχει jitter το πρόβλημα δεν λύνεται καθόλου εύκολα και σίγουρα δεν λύνεται με την προσθήκη κάποιων συσκευών στο δρόμο του σήματος. Από την άλλη πλευρά, όταν αναφερόμαστε σε jitter, και το σχετίζουμε με τα συστήματα αναπαραγωγής ήχου, σπανίως το θέμα μας είναι το sampling jitter (το οποίο άλλωστε είναι ενσωματωμένο σε κάποιο δίσκο, επομένως μπορούμε -δύσκολα- μόνο να το ακούσουμε ως κακής ποιότητας πρόγραμμα) αλλά μια άλλη μορφή του ίδιου προβλήματος που ακούει στο όνομα clock jitter.

Ας επεκτείνουμε το παράδειγμα με τα

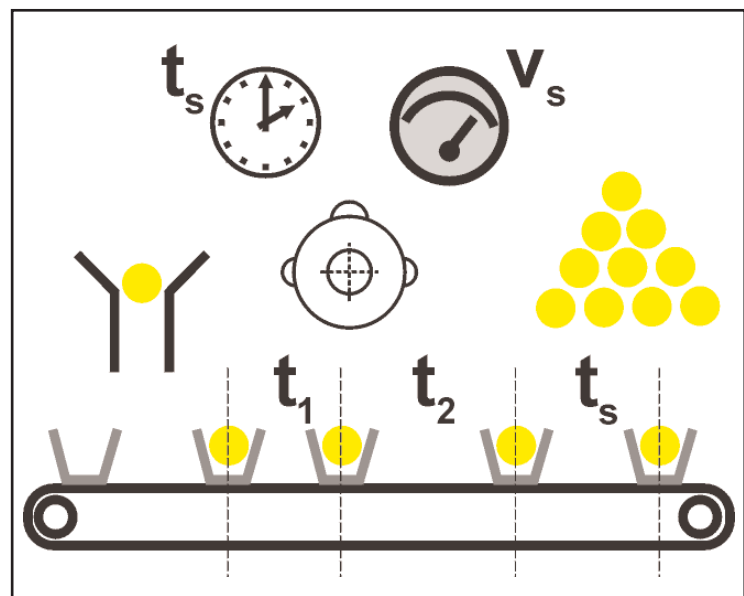
Jitter, sampling rate και μπαλάκια του τένις...

Μια τρελλή μηχανή που μπορεί να εξηγήσει πολλά...

Ενας παρατηρητής κάθεται απέναντι από ένα βολτόμετρο το οποίο μετρά την τάση ενός ηχητικού σήματος (όπως αυτή βγαίνει από ένα μικρόφωνο). Δίπλα στο βολτόμετρο υπάρχει ένα ακριβέστατο χρονόμετρο και δίπλα στον παρατηρητή μας υπάρχει ένα μεγάλο καλάθι με μπαλάκια του τένις. Κάθε δευτερόλεπτο, όπως το βλέπει ο παρατηρητής μας στο χρονόμετρό του, εξετάζει το βολτόμετρο, παίρνει ένα μπαλάκι, γράφει επάνω του την τιμή της τάσης και στην συνέχεια το ρίχνει σε μία οπή στο πάτωμα. Η οπή αυτή οδηγεί σε μία ταινία μεταφοράς επάνω στην οποία τοποθετείται ένα δοχείο, για κάθε τέτοιο μπαλάκι.



Το παράδειγμα με τις μπάλες του τένις: Αν ο παρατηρητής της τρελής μηχανής κάνει καλά τη δουλειά του, τότε τα δοχεία που περιέχουν τα μπαλάκια θα ισαπέχουν...



... ενώ αν καθυστερεί ή είναι πιο γρήγορος από όσο πρέπει, τότε τα δοχεία δεν θα ισαπέχουν. Επειδή τα συστήματα που έπονται χρησιμοποιούν τον ρυθμό με τον οποίο κυκλοφορούν τα δοχεία ως ένδειξη για τον ρυθμό με τον οποίο λαμβάνονται τα δείγματα, αυτό το φαινόμενο, που το ονομάζουμε jitter, δημιουργεί προβλήματα.

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ JITTER;

μπαλάκια του τένις: Αφού το σήμα ψηφιοποιηθεί, μπορούμε και πάλι να το δούμε ως μία σειρά από δοχεία με μπαλάκια κάθε ένα από τα οποία φέρει μια τιμή σε ψηφιακή μορφή. Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει sampling jitter, τα δοχεία αυτά απέχουν μεταξύ τους κατά το χρονικό διάστημα που επιβάλει το sampling rate και βρίσκονται τοποθετημένα μέσα στον ψηφιακό δίσκο. Οποιαδήποτε επεξεργασία πραγματοποιήσουμε στα μπαλάκια αυτά και στον όρο «επεξεργασία» περιλαμβάνονται η ανάγνωση του δίσκου, η χρήση επεξεργαστών που «τρέχουν» ψηφιακά φίλτρα και βεβαίως οι ίδιοι οι DACs, οφείλουμε να μην διαταράζουμε την σχετική θέση των δοχείων επειδή αυτά αποτελούν την μοναδική σταθερά χρονισμού του συστήματός μας. Με άλλα λόγια και παραμένοντας στο επίπεδο του παραδείγματος, ο DAC παρατηρεί τον ρυθμό με τον οποίο κινούνται τα δοχεία και από αυτόν συμπεραίνει την χρονική θέση των δειγμάτων αδιαφορώντας για το τι έχει συμβεί πραγματικά στην αρχική ψηφιοποίηση! Αν αυτή η περιγραφή φέρνει στο μυαλό σας την εικόνα ενός ρυθμικού συστήματος, στο οποίο όλα συμβαίνουν σε συγκεκριμένες, διακριτές μεταξύ τους, στιγμές έχετε μπει στην ουσία το πράγματος: Τα πάντα μέσα σε μία ψηφιακή συσκευή συμβαίνουν κάτω από έναν συγκεκριμένο ρυθμό ο οποίος -

συνήθως- είναι πολλαπλάσιος του sampling rate ώστε να υποστηρίζονται και περισσότερες της μιας διαδικασίες ανά δείγμα, όταν είναι απαραίτητο. Αυτό που είναι πάντως σημαντικό είναι η ύπαρξη ενός συγκεκριμένου ρυθμού. Γεγονός που μας φέρνει κοντά στην ιδέα του «Clock».

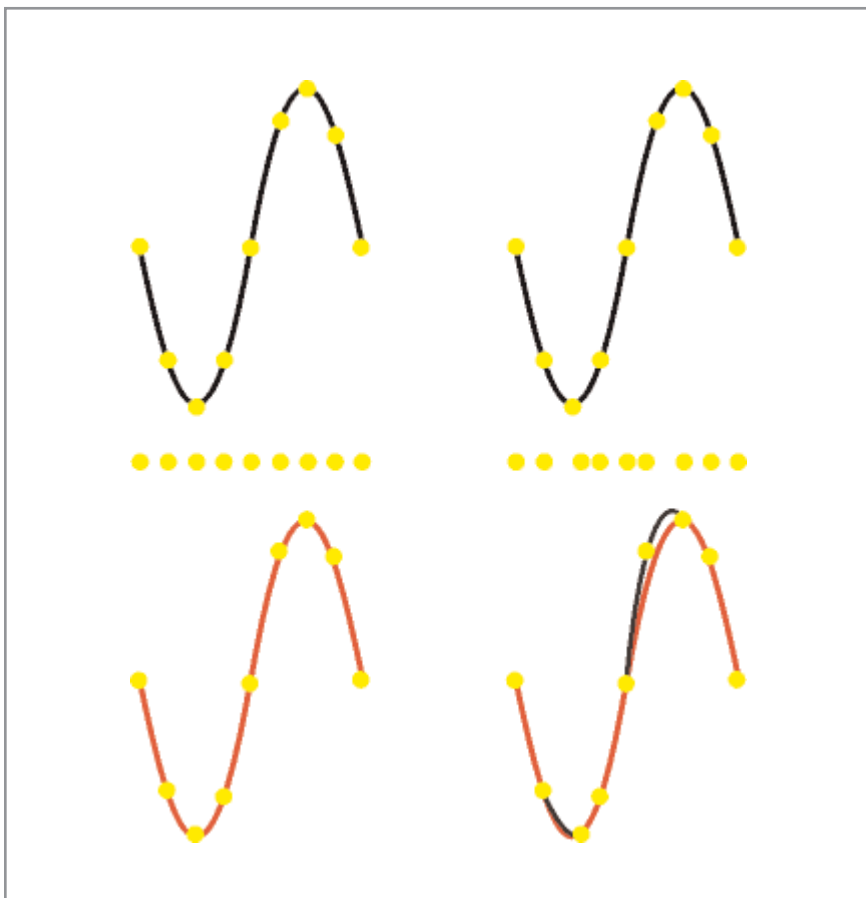
Τί είναι το Clock;

Στην ελληνική γλώσσα ο όρος αυτός, όταν αναφερόμαστε σε κυκλώματα, μπορεί να αποδοθεί ως «χρονισμός» και το αντίστοιχο σήμα ως «σήμα χρονισμού» ή και ως «βάση χρόνου». Το σήμα χρονισμού είναι συνήθως τετραγωνικό με την διάρκεια του χρόνου «on» και του χρόνου «off» να είναι ίσες. Τα χαρακτηριστικά που προτίσως μας ενδιαφέρουν είναι η συχνότητά του και η σταθερότητά του. Οσον αφορά το πρώτο, ήδη θα έχετε διαισθανθεί ότι ο χρονισμός των κυκλωμάτων σε μία συσκευή ψηφιακού audio έχει συχνότητα που είναι συνάρτηση του sampling rate. Οσον αφορά το δεύτερο, την σταθερότητα δηλαδή, θα θέλαμε να είναι το καλύτερο δυνατόν, με δεδομένες τις τεχνικές μας δυνατότητες και το κόστος. Ένα κύκλωμα που παράγει τετραγωνικό σήμα μιας συγκεκριμένης συχνότητας δεν είναι δύσκολο να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί, το πρόβλημά μας όμως στο ψηφιακό audio είναι ότι είναι

ασύγχρονο: Από την στιγμή που δεν έχουμε στη διάθεσή μας το σήμα χρονισμού του μετατροπέα A/D δεν μπορούμε να ξεκινήσουμε ένα κύκλωμα clock την στιγμή που πρέπει ώστε να συγχρονιστεί με το σήμα μας. Φανταστείτε ότι έχετε στη διάθεσή σας έναν τέλειο δίσκο με sampling rate 44.1kHz και έναν τέλειο ταλαντωτή, επίσης στα 44.1kHz. Πώς θα τον ξεκινήσετε όταν πρέπει; Πώς θα εξασφαλίσετε ότι ποτέ (μα ποτέ) δεν θα υπάρχει η παραμικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο σημάτων; Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να περιλάβουμε πληροφορίες χρονισμού μέσα στο ίδιο το σήμα που βρίσκεται στο δίσκο και με κάποιο τρόπο να τις ανακτούμε κατά την ανάγνωση του δίσκου ή μετά την μεταφορά του από κάποιο πρωτόκολλο (π.χ. μέσω S/PDIF). Στα χαρτιά, αυτό γίνεται εύκολα. Στην πράξη όμως υπάρχουν δυσκολίες. Οποιαδήποτε απόκλιση του σήματος από το ιδανικό, μεταφράζεται στην πραγματικότητα σε αλλοίωση της μορφής του και στην περίπτωση του σήματος χρονισμού αυτό είναι πολύ σοβαρό: Το σήμα αυτό φέρει την πληροφορία στις κάθετες πλευρές του, με άλλα λόγια ο ρυθμός δίνεται μέσω των μεταβάσεων από το «On» στο «Off» (δηλαδή την χαμηλή και την υψηλή τάση) και αντίστροφα. Αν αυτές οι πλευρές γίνουν ασαφείς, ή «αργές» (δηλαδή με μεγάλη κλίση) ο χρονισμός μας θα έχει πρόβλημα και το πρόβλημα αυτό έχει ένα γνωστό -πλέον- όνομα: Jitter, και μάλιστα στην πιο γνωστή μορφή του, το clock jitter.

Από τις περιγραφές είναι πιθανόν να έχετε υποθέσει ότι έχουμε δύο ειδών clock jitter. Το επαγόμενο λόγω θορύβου (induced jitter) και το επαγόμενο λόγω μεταφοράς (transmission line induced jitter). Στην πραγματικότητα τα είδη είναι τρία, αλλά ας δούμε κατ' αρχήν τα δύο πρώτα. Το jitter λόγω θορύβου είναι το πλέον συνηθισμένο και εμφανίζεται μέσα σε όλες τις ψηφιακές συσκευές. Οι μηχανισμοί ανάγνωσης των δίσκων, τα τροφοδοτικά και το ίδιο το δίκτυο τροφοδοσίας της πόλης έχουν θορύβους οι οποίοι επιδρούν αρνητικά στις επιδόσεις των ψηφιακών κυκλωμάτων. Κάθε φορά που ένα τρανσπόρτ κινείται για να κάνει tracking ή για να εστιάσει σε έναν σκεβρωμένο δίσκο, δημιουργεί αιχμές στα κυκλώματα τροφοδοσίας που με την σειρά τους επιδρούν στα ψηφιακά κυκλώματα αλλάζοντας τις θέσεις των κυματομορφών τους στιγμιαία. Αυτός, ίσως, είναι ένας λόγος που έχει νόημα ένα «καλό» τρανσπόρτ ή ένα clamp που πιέζει τον δίσκο.

Στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε μία ολοκληρωμένη συσκευή, δηλαδή σε ένα player που περιλαμβάνει μηχανισμό ανάγνωσης, ψηφιακό τμήμα και DAC σε ένα περίβλημα, αυτό το είδος jitter είναι το μόνο που μας απασχολεί, επειδή αυτές

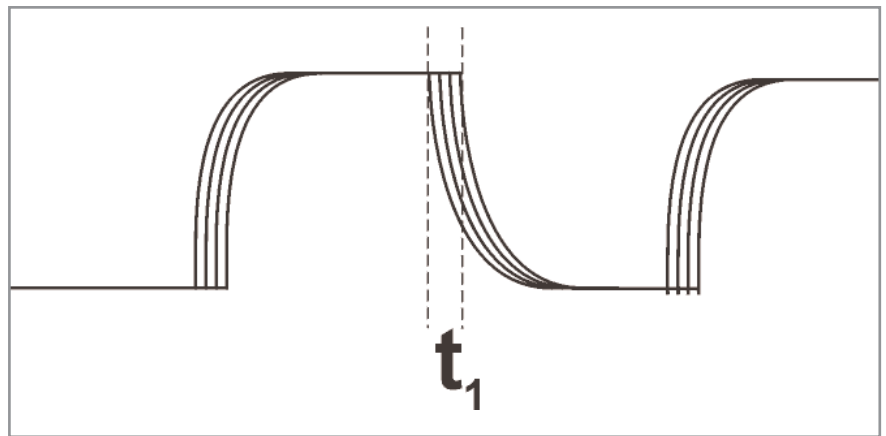


Αν υποθέσουμε ότι τα δείγματα (κίτρινες μπάλες) που λαμβάνονται από αυτό το ημίτονο επαρκούν για την αναδημιουργία του, τότε η λανθασμένη χρονική σχέση τους (δεξιά) καταλήγει στην δημιουργία ενός ημιτονοειδούς σήματος που μοιάζει αλλά δεν είναι ίδιο με το πρωτότυπο.

οι συσκευές έχουν μόνο ένα κύκλωμα χρονισμού που θα πρέπει να συγχρονίσουμε με το σήμα από τον δίσκο και δεν υπάρχει κάποιο πρωτόκολλο μεταφοράς του ψηφιακού σήματος που συνθέτει (ξανά) το σήμα χρονισμού με τις πληροφορίες audio. Αυτό είναι και ένα πολύ σοβαρό επιχείρημα για πολλούς σχεδιαστές που δεν συμπαθούν τα διαχωρισμένα ψηφιακά συστήματα (transpot/dacs). Αν ωστόσο αναφερόμαστε σε ένα αρθρωτό σύστημα, αποτελούμενο από διάφορες συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κάποιας γραμμής (συνήθως S/PDIF ή AES/EBU) τότε το πράγμα εξελίσσεται αλλιώς. Έχουμε να αντιμετωπίσουμε το δεύτερο είδος jitter, το «επαγόμενο λόγω μεταφοράς».

Η αρχική εντύπωση είναι, ίσως, ότι και εδώ το επαγόμενο λόγω μεταφοράς jitter οφείλεται σε εξωτερικούς θορύβους με μηχανισμό παρόμοιο με αυτόν που περιγράψαμε παραπάνω. Ωστόσο δεν είναι έτσι. Το πιο σοβαρό πρόβλημα εδώ είναι πρόβλημα απόκρισης συχνότητας της ίδιας της γραμμής: Πολύ απλά, ενώ τα σήματά μας πρέπει να έχουν τετραγωνική μορφή, δηλαδή να έχουν κάθετα μέτωπα και εξαιρετικά χαμηλούς (θεωρητικώς μηδενικούς) χρόνους ανόδου και πτώσης, η πραγματικότητα είναι πολύ πιο θλιβερή. Οι αντίστοιχες κυματομορφές έχουν τα γνωστά χαρακτηριστικά του πεπερασμένου εύρους συχνοτήτων (όπου τα τετράγωνα παύουν να είναι τετράγωνα) και οι πολύτιμες μεταβάσεις μας (από το On στο Off) αρχίζουν να γίνονται καμπύλες και ασαφείς. Από την άλλη, γίνεται απολύτως σαφές ότι τέτοια σήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως clock εκτός αν είμαστε έτοιμοι να ανεχτούμε σημαντικά ποσοστά jitter, επειδή το σύστημα μας δεν μπορεί να είναι βέβαιο πότε ακριβώς το clock μεταβαίνει από την μία κατάσταση στην άλλη ή -ακόμη χειρότερα- άλλοτε είναι βέβαιο και άλλοτε όχι. Το πρόβλημα υπάρχει τόσο στις ηλεκτρικές γραμμές όσο και στις οπτικές. Οι δεύτερες δεν έχουν, βεβαίως, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή έχουν όμως κάποια πεπερασμένα χαρακτηριστικά μεταφοράς του φωτός (τα οποία μάλιστα μπορεί και να μεταβάλλονται ανάλογα με την καμπυλότητα της γραμμής) και απώλειες στα σημεία σύνδεσής τους.

Σχετικό με το jitter λόγω γραμμής μεταφοράς (και του πεπερασμένου εύρους της) είναι και ένα τρίτο είδος που θα μας απασχολήσει: Από την στιγμή που οι μεταβάσεις από το On στο Off δεν είναι ακαριαίες αλλά απαιτούν χρόνο, οι τάσεις οι οποίες δημιουργούνται στην γραμμή μεταφοράς (δηλαδή η προσέγγιση του λογικού «1» και του λογικού «0») δεν είναι ίδιες αλλά είναι συνάρτηση του ίδιου του σήματος: Όσο αυτό παραμένει στο «1» τόσο περισσότερο χρόνο δίδεται στην γραμμή μεταφοράς να προσαρμοστεί και να φτάσει στην σωστή τάση ενώ μία πολύ



Οποιοδήποτε πρόβλημα επαγόμενου θορύβου στο εσωτερικό μιας συσκευής επιδρά αρνητικά στα ψηφιακά κυκλώματα και δημιουργεί μία περιοχή αβεβαιότητας για το πού βρίσκεται το σήμα χρονισμού (t_1). Αυτό ακριβώς το διάγραμμα είναι ο ορισμός του jitter.

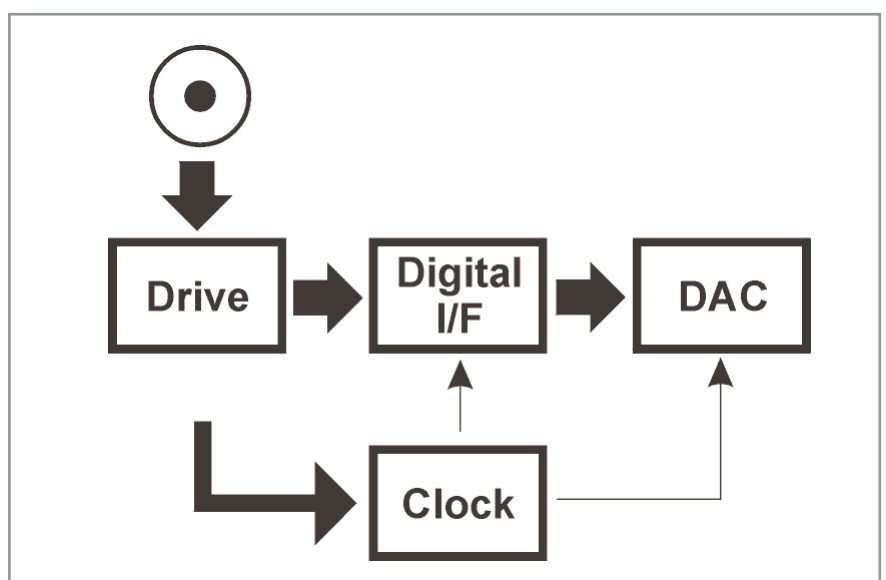
γρήγορη διαδοχή «0» και «1» σημαίνει ότι οι μέσες τάσεις που θα αναπτύξει η γραμμή μεταφοράς θα είναι χαμηλότερες (επειδή θα έχει μικρότερο χρόνο να προσαρμοστεί). Τί σημαίνει αυτό; Κάτι πολύ σοβαρό! Οτι υπάρχει και ένα είδος jitter το οποίο εξαρτάται από το ίδιο το σήμα. Το ονομάζουμε, πολύ λογικά, data dependent jitter.

Από όλα τα παραπάνω πρέπει να έχει γίνει σαφές ότι το jitter δεν μπορεί να αποφευχθεί επειδή αποτελεί εγγενές πρόβλημα σχεδόν σε κάθε μηχανισμό που μετέχει σε ένα ψηφιακό σύστημα. Ανάλογα με την ποιότητα των επιμέρους τμημάτων, μπορούμε να έχουμε περισσότερο, πολύ περισσότερο ή λιγότερο jitter αλλά δεν μπορούμε να έχουμε μηδενικό. Η αβεβαιότητα όσον αφορά την χρονική θέση των δειγμάτων μας (και επομένως του clock) θα υπάρχει πάντα. Ευτυχώς, όπως θα δούμε, έχουμε την τεχνική δυνατότητα να απαλασσόμαστε σε μεγάλο ποσοστό από αυτό με απλούς ή περισσότερο πολύπλοκους τρόπους. Αρχικώς, όμως, αξίζει να απαντήσουμε στο εξής ερώτημα: Πώς μπορούμε να μετρήσουμε ή/και να

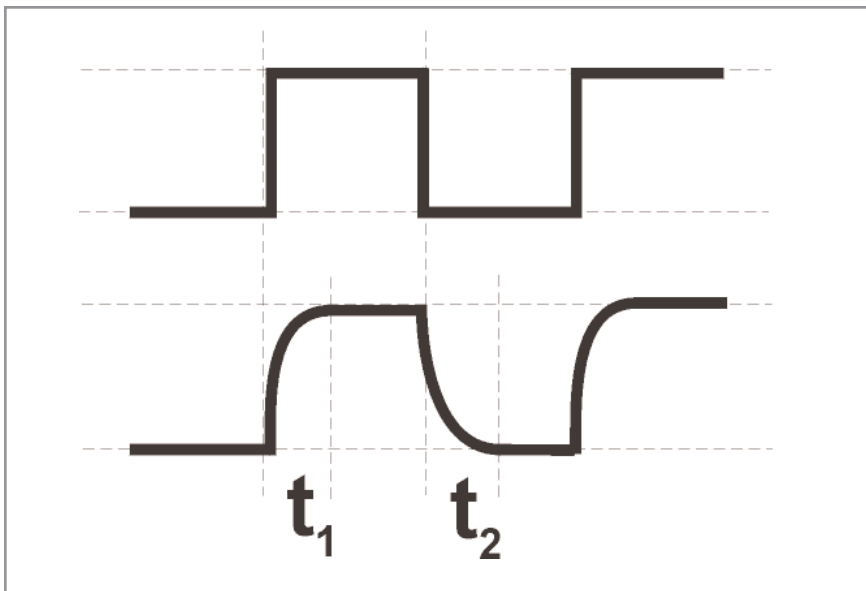
ακούσουμε το jitter; Και αν συμφωνήσουμε (που λέει ο λόγος) ότι το ακούσαμε, πώς μπορούμε να το μειώσουμε;

Μπορούμε να μετρήσουμε, να ακούσουμε και να μειώσουμε το Jitter;

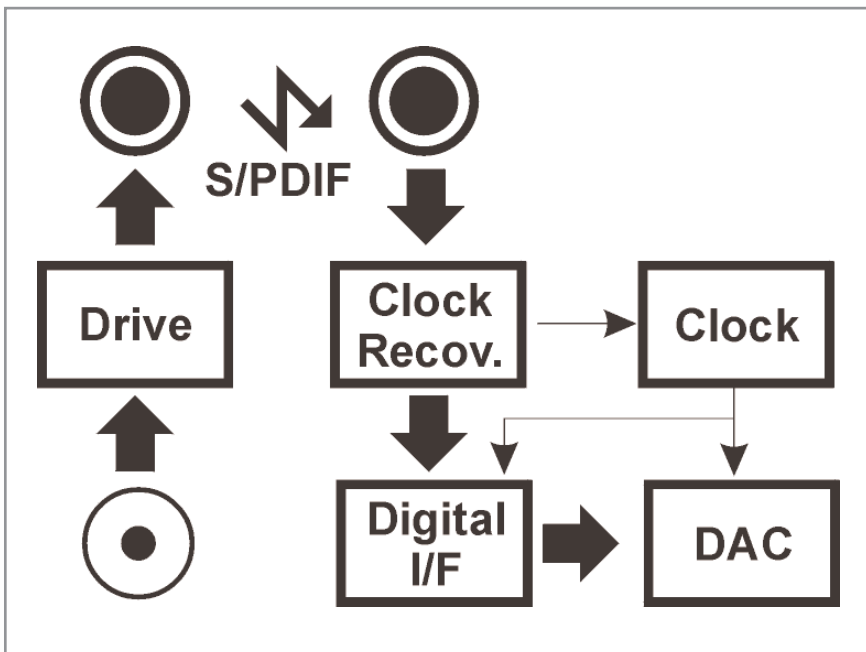
Ας ξεκινήσουμε με μια βασική παρατήρηση: Το jitter, δεν φαίνεται να έχει μία συγκεκριμένη ηχητική υπογραφή την οποία να μπορούμε με άνεση και πέραν πάσης αμφιβολίας να αναγνωρίσουμε ακούγοντας ένα πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τα τεχνουργήματα των codes που πραγματοποιούν απωλεστική συμπίεση. Αυτό σημαίνει, ότι αν κάποιος κάθεται μισό λεπτό απέναντι από δύο ηχεία και διατυπώνει το συμπέρασμα ότι «το σύστημα έχει jitter» ανήκει πιθανόν σε μία από τις τρεις κατηγορίες: Είτε είναι ο μηχανικός ήχος του συγκεκριμένου δίσκου (ή/και ο σχεδιαστής του συγκεκριμένου ψηφιακού συστήματος), είτε είναι ένας εξαιρετικά προικισμένος



Η κλασική δομή μίας ψηφιακής συσκευής: Το clock εξάγεται και χρησιμοποιείται για να συγχρονίσει όλα τα ψηφιακά της τμήματα.



Μία γραμμή μεταφοράς ψηφιακού σήματος έχει περιορισμένο εύρος. Το αποτέλεσμα είναι να παραμορφώνονται οι παλμοί. Σε αντίθεση με το πρότυπο (επάνω) το πραγματικό σήμα απαιτεί έναν πεπερασμένο χρόνο για να φθάσει στις προβλεπόμενες τιμές, t_1 για την τιμή «high» και t_2 για την τιμή «low». Αυτό εκτός των άλλων, δημιουργεί και jitter που εξαρτάται από την ίδια την μορφή του σήματος.



Συχνά, το ψηφιακό σήμα μεταφέρεται από την μια συσκευή στην άλλη με κάποια γραμμή μεταφοράς, για παράδειγμα S/PDIF ή AES/EBU. Η συσκευή που βρίσκεται στο τέλος της γραμμής αυτής θα πρέπει να εξάγει από το σήμα το clock για να λειτουργήσει σωστά.

ακροατής, είτε -τέλος- είναι ένας ακόμη ημιπαράφων ξερόλας που καλά θα κάνετε να μην κάνετε και πολύ παρέα... Επίσης, η μέτρηση του jitter γίνεται δύσκολα αν θέλουμε να είμαστε ακριβείς, να προσδιορίσουμε δηλαδή μία συγκεκριμένη τιμή σε χρόνο (ή μία περιοχή τιμών, ή μία μέση τιμή). Γνωρίζουμε όμως, ότι το jitter διαμορφώνει το σήμα μας, κάτι που μπορεί να φανεί σε μετρήσεις που περιλαμβάνουν FFT ενός καθαρού ημιτόνου. Μία τέτοια μέτρηση θα περιλαμβάνει την θεμελιώδη συχνότητα η οποία περιβάλλεται από ένα φάσμα θορύβου σε πολύ χαμηλότερη στάθμη. Αν όλες οι υπόλοιπες συνθήκες ήταν ιδανικές,

θα βλέπαμε δύο αιχμές εκατέρωθεν της θεμελιώδους συχνότητας οι οποίες θα οφείλονταν στο jitter και θα εξηγούσαν επαρκώς την θεωρία της διαμόρφωσης. Στην πράξη βεβαίως, είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε τέτοιου είδους μορφές σε ένα διάγραμμα, πολύ δε περισσότερο να αποφασίσουμε ότι αυτό που παρατηρούμε οφείλεται ειδικά σε κάποιο από τα είδη του jitter που αναφέραμε και όχι σε κάποιο άλλο χαρακτηριστικό του κυκλώματος ή σε συνδυασμό όλων των ειδών jitter ή ακόμη σε έναν συνδυασμό όλων των προβλημάτων του συστήματος (κάτι που είναι και το συνηθέστερο...). Πάντως η φασματική μορφή του jitter, όταν μπορούμε να την δούμε, θυμίζει

πολύ κάτι γνωστό: Την διαμόρφωση που προκαλούσαν οι στιγμιαίες αλλαγές στον ρυθμό περιστροφής των αναλογικών συστημάτων (βινυλίου και κασετών) -το παλιό wow&flutter!

Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και όσον αφορά στις ακροάσεις. Ερευνες γύρω από το θέμα έχουν δείξει ότι, πράγματι, το jitter μπορεί να προκαλέσει ακουστά αποτελέσματα, αλλά κατέληξαν στο συμπέρασμα αυτό χρησιμοποιώντας ειδικά set-up όπου το jitter, η μορφή του και το μέγεθός του ελέγχονται, κάτι που δεν είναι δυνατόν να γίνει στην πράξη με ψηφιακές συσκευές καθημερινής χρήσης. Επομένως θα πρέπει να είναι κανείς πολύ προσεκτικός όταν διατυπώνει τέτοιου είδους συμπεράσματα.

Αυτό, ωστόσο, που μπορεί να γίνει, με δεδομένο ότι ο μηχανισμός και τα είδη του jitter είναι γνωστά, είναι να λαμβάνονται τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα για να ελαχιστοποιείται η επίδρασή του. Μερικά από αυτά είναι:

Η χρήση καλής ποιότητας μηχανισμών ανάγνωσης και εγγραφής οπτικών δίσκων (αυτό ισχύει ιδιαίτερα για όσους χρησιμοποιούν οδηγούς δίσκων σε PCs). Εξασφάλιση σωστής τροφοδοσίας στις ψηφιακές συσκευές (και επιλογή συσκευών με καλά τροφοδοτικά). Αποφυγή συστημάτων χαμηλού κόστους τα οποία προβλέπουν μεταφορά του ψηφιακού σήματος με γραμμές S/PDIF (ή άλλες).

Σωστή αξιολόγηση των λύσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση του σήματος χρονισμού τόσο σε συστήματα transport/dac όσο και σε συστήματα που υποστηρίζουν ψηφιακές εγγραφές (CD Recorders, DAT-Recorders, κ.λπ.). Χρήση σωστών γραμμών μεταφοράς του ψηφιακού σήματος (κάθε καλώδιο με RCA στις άκρες δεν κάνει για μεταφορά S/PDIF!), προσεκτική διεύθεση των πλαστικών οπτικών ινών (ώστε να μην διατηρούν μικρές ακτίνες καμπυλότητας και να μην εξασκούν δυνάμεις στα βύσματά τους βγάζοντάς τα από την ιδανική φωτοστεγή θέση), και χρήση γραμμών AES/EBU ή AES-3 όταν είναι δυνατόν (επειδή είναι καλύτερα θωρακισμένες).

Anti-Jitters, Clocks, κ.λπ...

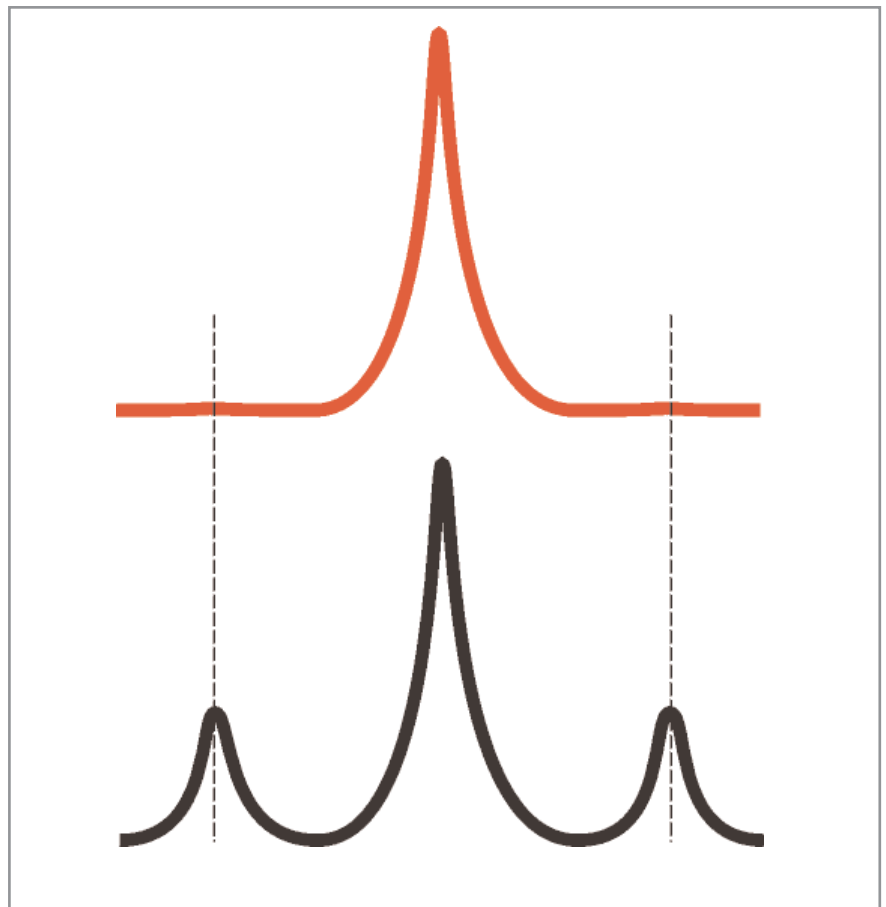
Ενα ενδιαφέρον θέμα, τέλος, είναι η αποτελεσματικότητα μιας σειράς αξεσουάρ που σχετίζονται με το jitter και το clocking γενικότερα. Ξεκινώντας από την θέση ότι όλα τα σχετικά προϊόντα λειτουργούν όπως προβλέπεται (τηρούν δηλαδή τις υποσχέσεις που δίνει ο κατασκευαστής τους όσον αφορά τα βασικά τους χαρακτηριστικά και δεν αποτελούν απλές προσπάθειες εξαπάτησης) η επίδρασή τους στο αποτέλεσμα θα πρέπει να κρίνεται κατά περίπτωση. Για παράδειγμα μια συσκευή anti-jitter μπορεί να βελτιώσει ένα σύστημα, υπό την προϋπόθεση ότι το σημαντικότερο ποσοστό του jitter είναι

επαγόμενο λόγω θορύβου (συνήθως στο transport) και ότι οι γραμμές μεταφοράς και το DAC που ακολουθούν μετά από αυτό, δεν εισάγουν σημαντικά ποσοστά των άλλων δύο κατηγοριών. Ομοίως, ένα καλύτερο κύκλωμα clock (μαζί με ό,τι άλλο θα δούμε ότι χρειάζεται -σε αυτά που ακολουθούν) θα βελτιώσει τις επιδόσεις ενός συστήματος, υπό την προϋπόθεση ότι αυτό που θα αντικαταστήσει είναι πραγματικά χειρότερο! Το πρόβλημα επομένως μετατίθεται στην εκτίμηση της ποιότητας του υφιστάμενου κυκλώματος και της πραγματικής φύσης του προβλήματος. Από την άλλη πλευρά, ακόμη και αν διαθέτετε ένα κορυφαίο σύστημα με ελάχιστο jitter (αυτό σημαίνει τιμές στην περιοχή των 100pS, δηλαδή αποκλίσεις στην περιοχή του 0.00000001 του δευτερολέπτου για να εξηγηθούμε...) και το τροφοδοτείτε με εγγραφόμενους δίσκους των οποίων το sampling jitter είναι της τάξης των nS -δηλαδή χίλιες φορές μεγαλύτερο- δεν πρέπει να περιμένετε και... θαύματα.

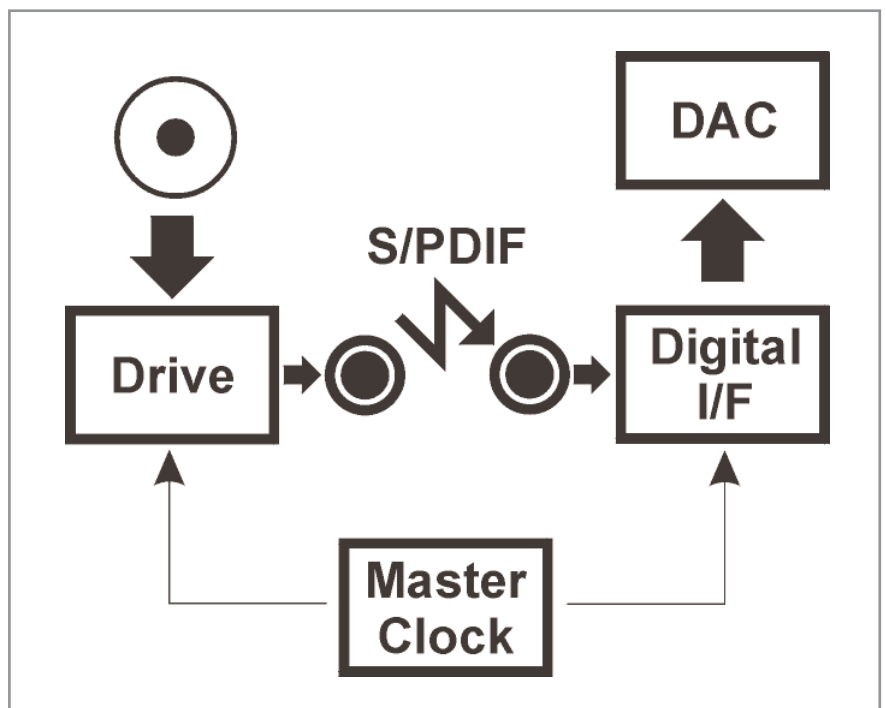
Ίσως το πλέον ενδιαφέρον και, όχι τυχαία, πανάκριβο θέμα στην υπόθεση των αξεσουάρ αυτής της κατηγορίας είναι τα λεγόμενα super-clocks. Αυτά είναι εξωτερικές συσκευές οι οποίες χρονίζουν ένα ολόκληρο σύστημα κεντρικά. Αντικαθιστούν δηλαδή τους εσωτερικούς μηχανισμούς ανάκτησης του clock από το σήμα καθώς αυτό οδεύει από συσκευή σε συσκευή. Η ιδέα αυτή είναι δανεισμένη από την τακτική του επαγγελματικού ψηφιακού audio όπου η χρήση διαφορετικών clock απογορεύεται δια ροπάλου. Κάθε στούντιο που σέβεται τον εαυτό του διαθέτει ένα κεντρικό clock επάνω το οποίο συγχρονίζονται όλες οι ψηφιακές του συσκευές. Η αξία του κεντρικού clocking είναι προφανής αλλά αποκτά μεγάλη σημασία αν έχετε άνω της μιας συσκευές που μπορεί να συγχρονιστούν κεντρικά, έχουν δηλαδή αντίστοιχες εισόδους clocking. Σε αντίθετη περίπτωση το super-clock εκφυλίζεται σε ένα απλό αξεσουάρ που πρέπει να κριθεί κατά περίπτωση, όπως και τα υπόλοιπα. Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η χρήση μίας ξεχωριστής γραμμής μεταφοράς του clock, από μια συσκευή την οποία ονομάζουμε συμβατικά Master στις υπόλοιπες τις οποίες ονομάζουμε Slave. Ο χρονισμός με το μοντέλο Master/Slave συναντάται σε κορυφαία audiophile συστήματα και σε πολλές επαγγελματικές συσκευές. Χρησιμοποιήστε τον όποτε είναι διαθέσιμος (προσοχή στα καλώδια που θα χρησιμοποιήσετε!).

Η ανάκτηση του σήματος χρονισμού (clock recovery) και το PLL

Η λογική λέει ότι αν έχετε φτάσει μέχρι αυτό το σημείο του κειμένου θα έχετε - σχεδόν- απογοητευθεί. Από τις



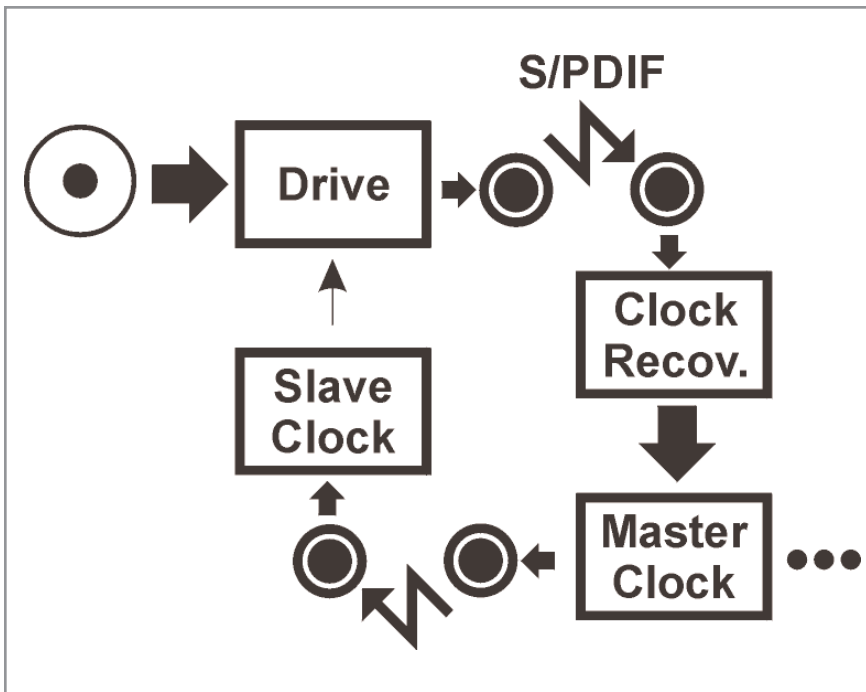
Το jitter διαμορφώνει το ηχητικό σήμα. Εντελώς σχηματικά, ένας καθαρός τόνος το φάσμα του οποίου εμφανίζεται επάνω (κόκκινο) θα αποκτήσει δύο πλευρικά φάσματα (sidebands) που οφείλονται στην διαμόρφωση αυτή. Στην πράξη, βεβαίως, τα πράγματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα.



Τα σοβαρά επαγγελματικά συστήματα (και κάποια consumer) χρησιμοποιούν ένα κεντρικό, εξωτερικό clock επάνω στο οποίο «δένονται» όλες οι υπόλοιπες ψηφιακές συσκευές.

περιγραφές, μπορεί κανείς να αντιληφθεί ότι το jitter δεν αποφεύγεται, είμαστε μάλιστα τυχεροί αν δεν περιλαμβάνεται και στον ίδιο τον δίσκο, λόγω μιας μέτρησης διαδικασίας ψηφιοποίησης. Υπάρχουν,

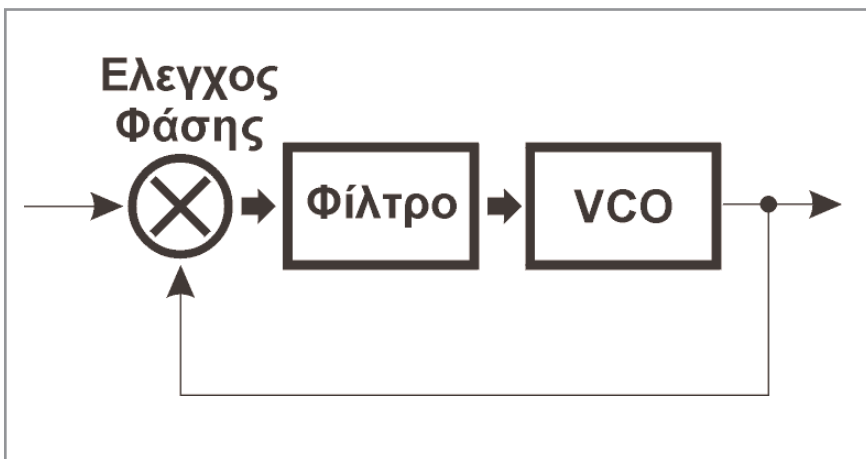
επίσης, τριών ειδών jitter τα οποία μετέχουν ταυτόχρονα και σε άγνωστους σε εμάς συνδυασμούς σε ένα τελικό αποτέλεσμα: Τα σημεία του ψηφιακού σήματος που χρησιμοποιούμε για να



Μια εναλλακτική εκδοχή του κεντρικού clock είναι το μοντέλο Master/Slave. Εδώ, μία συσκευή συγχρονίζει όλες τις υπόλοιπες μέσω μιας ξεχωριστής γραμμής μεταφοράς του clock.



Το πρώτο στάδιο κάθε ψηφιακού interface είναι ένα PLL το οποίο πραγματοποιεί clock recovery, ανακτά δηλαδή την πληροφορία χρονισμού από το ψηφιακό σήμα.



Απλό διάγραμμα βαθμίδων του PLL.

συγχρονίσουμε τα επιμέρους τμήματα ενός ψηφιακού συστήματος αναπαραγωγής είναι ασαφώς κατανοητά χρονικά. Είναι αλήθεια ότι αν βασιστούμε στο ψηφιακό σήμα, ως έχει, για τον συγχρονισμό του συστήματος, το αποτέλεσμα θα είναι μάλλον αρνητικό (δηλαδή, δεν θα δουλεύει τίποτε). Στην πράξη, όμως, έχουμε στην διάθεσή μας μία σειρά από τεχνικές που μας επιτρέπουν όχι να «εξάγουμε» το clock από ένα

παραμορφωμένο σήμα αλλά να το ξαναδημιουργήσουμε. Οι τεχνικές αυτές είναι γνωστές ως clock recovery και παρά το γεγονός ότι θα τις συναντήσετε με διάφορες ονομασίες και περιγραφές (περισσότερο ή λιγότερο προσγειωμένες και ακριβείς...) είναι στην πράξη, τρεις: Το PLL, το διπλό PLL και το διπλό PLL με μνήμη απομόνωσης (memory buffer), υποβοηθούμενες ενίοτε από μία τοπολογία που ονομάζεται VCXO. Ακόμη και αν έχετε στην διάθεσή σας ένα πανάκριβο

(και εξαιρετικά αποτελεσματικό) σύστημα, οι πιθανότητες είναι στο εσωτερικό του να κρύβεται κάτι από όλα αυτά.

Το PLL (Phase Locked Loop): Η ιστορία του διπλού εκκρεμούς...

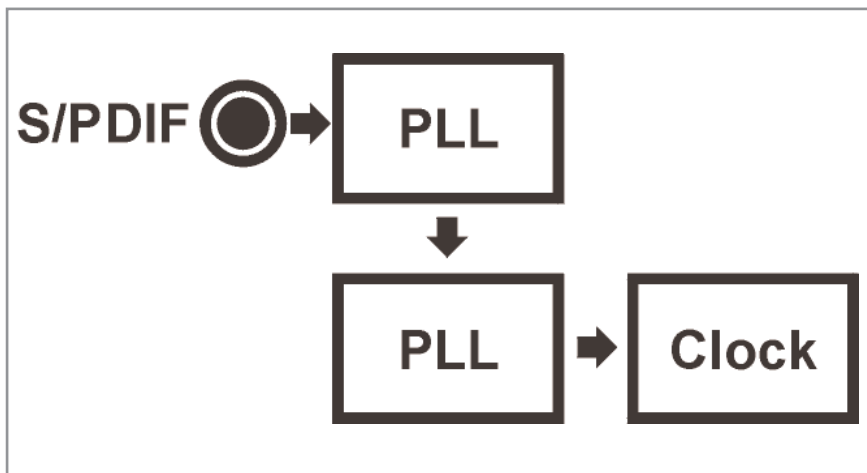
Ως ιδέα, το PLL έχει τις ρίζες του στο 1665, όταν ο Ολλανδός Christiaan Huygens (προφέρεται Χόιγκενς), ο οποίος μεταξύ άλλων κατασκεύασε και τα πρώτα ρολόγια με εκκρεμές, παρατήρησε ότι δύο από τα εκκρεμή του, που βρίσκονταν σε γειτονία, έτειναν να συγχρονισθούν σε αντίθεση φάσης, ακόμη και όταν επενέβη και άλλαξε την κίνηση ενός εκ των δύο. Πολύ αργότερα αποδείχθηκε ότι αυτό οφείλεται σε μηχανική ενέργεια που μεταβιβάζεται από το ένα εκκρεμές στο άλλο, όταν βρίσκονται κοντά, μέσα από διάφορες οδούς. Το θέμα δεν είχε άμεση σχέση με τα ηλεκτρονικά έδωσε όμως την ιδέα συγχρονισμού δυο ηλεκτρικών ταλαντωτών και αποτέλεσε έναν πολύ μακρινό πρόγονο του ομόδυνου ραδιοφωνικού δέκτη ο οποίος ήταν και η πρώτη συσκευή που χρησιμοποίησε το κύκλωμα που σήμερα ονομάζεται PLL. Η ομάδα των βρετανών ερευνητών που παρουσίασε τον εν λόγω δέκτη, το 1932, ήθελε ένα κύκλωμα που να εξασφαλίζει το «κλειδωμά» ενός ταλαντωτή που βρισκόταν μέσα στην συσκευή με την φέρουσα συχνότητα ενός ραδιοφωνικού σταθμού ώστε να μην υπάρχει ολίσθηση (λόγω διάφορων ατελειών του κυκλώματος που τότε δεν ήταν και λίγες). Ο Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης, όπως ονομάζεται το PLL στα ελληνικά, κάνει ακριβώς αυτό: Παρακαλουθεί ένα σήμα και ελέγχει έναν ταλαντωτή μεταβλητής συχνότητας, την έξοδο του οποίου συγκρίνει με το σήμα στην είσοδο. Στην φάση ισορροπίας του PLL, τα δύο σήματα (εισόδου και εξόδου) βρίσκονται σε συγχρονισμό (δηλαδή σε φάση) και αν υπάρξει κάποια ολίσθηση τότε το PLL εφαρμόζει ένα σήμα ελέγχου που μεταβάλλει την συχνότητα εξόδου έτσι ώστε να υπάρξει και πάλι συγχρονισμός (το σήμα ελέγχου είναι συνήθως μια τάση, γι αυτό και ο ταλαντωτής του PLL είναι ελεγχόμενος από τάση, VCO-Voltage Controlled Oscillator). Ο τρόπος με τον οποίο ελέγχεται η συχνότητα εξόδου εξαρτάται από τις επιλογές μας: Αυτό μπορεί να γίνεται πολύ γρήγορα ή πολύ αργά, ανάλογα με το τί θέλουμε να επιτύχουμε.

Στην περίπτωση του clock στα ψηφιακά συστήματα audio, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να επιτύχουμε συγχρονισμό του τοπικού κυκλώματος χρονισμού με τις πληροφορίες που περιέχονται στο σήμα (και είναι -αν θυμάστε- αγρίως παραμορφωμένες!) αλλά ταυτόχρονα μία σχετική αδράνεια στις διακυμάνσεις λόγω jitter, κάτι που επιτυγχάνεται με ένα «αργό» PLL. Τα κυκλώματα κλειδωμένης φάσης είναι

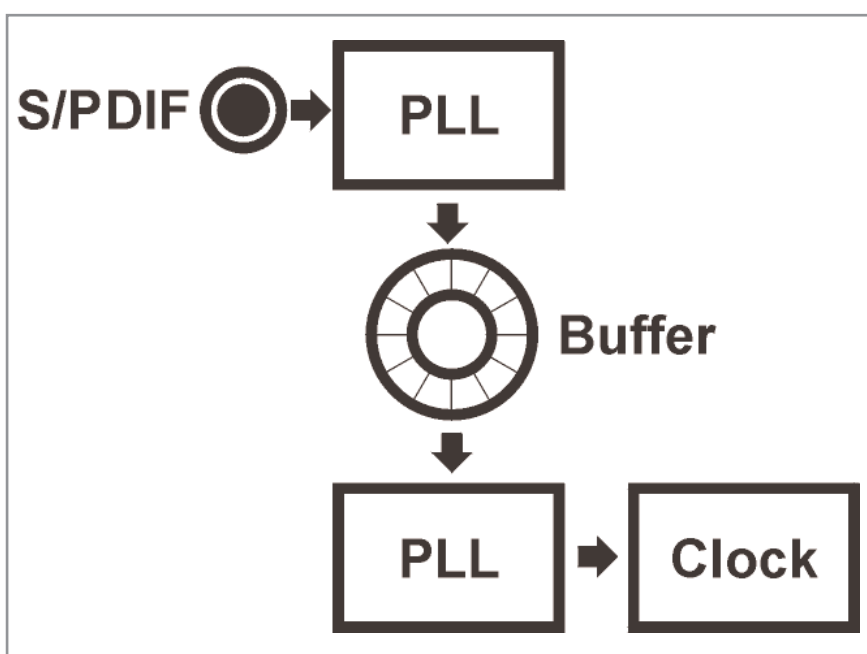
Βασικά δομικά στοιχεία κάθε ψηφιακού interface που σέβεται τον εαυτό του. Μάλιστα στο σημείο αυτό (του PLL δηλαδή) γίνεται ένα ακόμη παιχνίδι όσον αφορά στο clock recovery: Αντί το κύκλωμα να παρακολουθεί το ίδιο το σήμα για να εξάγει το clock (θυμάστε; Υπάρχει ένα jitter που εξαρτάται από την μορφή του σήματος και θα θέλαμε να το αποφύγουμε!) παρακολουθεί τις διακοπές που εισάγονται ανάμεσα στις λέξεις που περιγράφουν τα δεδομένα για κάθε κανάλι, οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε διάρκεια (επομένως η γραμμή μεταφοράς μας συμπεριφέρεται καλύτερα στιγμιαία!). Η τεχνική εμφανίζεται με διάφορα ονόματα αλλά η κλασική της ονομασία είναι preamble clock recovery (και, με βάση κάποιες πηγές, αποδίδεται στον Ed Meitner της EMM Labs).

Τελειώσαμε με το jitter; Οχι βέβαια! Η έξοδος του PLL έχει κι αυτή ένα ποσοστό διακύμανσης (μην ξεχνάτε ότι παρακολουθεί την είσοδο, έστω και με αδράνεια) αλλά πολύ μικρότερο. Το αν αυτό είναι αποδεκτό, εξαρτάται από το επίπεδο της συσκευής και το ποσοστό του συνολικού κόστους που μπορεί να δαπανηθεί σε αυτό το σημείο. Αν τα λογιστικά μάς το επιτρέπουν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα δεύτερο PLL το οποίο θα χρησιμοποιεί ως είσοδο, την έξοδο του πρώτου, για να δημιουργήσει ένα clock με ακόμη μικρότερη διακύμανση. Και το επόμενο βήμα (όταν ο οικονομικός διευθυντής βρίσκεται σε διακοπές κάπου στο νότιο ημισφαίριο...) θα είναι να παρεμβάλουμε μία μνήμη ανάμεσα στα δύο PLL η οποία θα τροφοδοτείται από την έξοδο τους πρώτου

και θα τροφοδοτεί την είσοδο του δεύτερου. Η χωρητικότητα της μνήμης αυτής καθορίζει «πόσο χαμηλά μπορεί να κατέβει» το σύστημά μας στην καταστολή του jitter. Όσο μεγαλύτερη, τόσο πιο αργές μεταβολές του χρονισμού μπορεί να διορθωθούν, επειδή μπορούν να αποθηκευθούν μεγαλύτερα μέρη του σήματος. Τέλος, η ποιότητα του ταλαντωτή που χρησιμοποιείται σε κάθε PLL είναι σημαντική. Η καλύτερη επιλογή εδώ είναι οι VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillators) οι οποίοι χρησιμοποιούν έναν κρύσταλλο για τον καθορισμό της βασικής τους συχνότητας με πολύ μεγάλη ακρίβεια (αν θέλει κάποιος να είναι παρανοικά ακριβής, μπορεί να βάλει τον κρύσταλλο και σε ειδικό φούρνο, για να διατηρεί σταθερή την θερμοκρασία του... μια επιλογή που χρησιμοποιείται σε συσκευές μεγάλης ακρίβειας όπως είναι τα όργανα μετρήσεων). Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ένας τέτοιος, κρυσταλλικά ελεγχόμενος ταλαντωτής δεν μπορεί να παρακολουθήσει μεγάλες αλλαγές συχνότητας επομένως χρειάζεται ένας κρύσταλλος για κάθε sampling rate στο οποίο θα κλειδώνει το PLL και για τον λόγο αυτό τέτοιου είδους λύσεις συναντώνται μόνο σε σχετικώς ακριβά συστήματα.



Clock με διπλό PLL: Το πρώτο στάδιο ανακτά το clock από το ψηφιακό σήμα και το δεύτερο στάδιο σταθεροποιεί ακόμη περισσότερο το σήμα χρονισμού.



Clock recovery με διπλό PLL και μνήμη απομόνωσης. Η μνήμη είναι συνήθως FIFO (First In, First Out) και επιτρέπει την διόρθωση jitter με μεγάλη χρονική διακύμανση.

Για περισσότερο διάβασμα:

1. Digital Audio Design Seminar, Robert Watson, Richard Kulavic, Burr-Brown
2. Towards Common Specifications for Digital Audio Interface Jitter, Julian Dunn et al,
3. The Diagnosis and Solution of Jitter-Related problems in Digital Audio Systems, Julian Dunn, Ian Dennis, AES Preprint, 96th Convention, 1994
4. Jitter: Specification and Assessment in Digital Audio Equipment, Julian Dunn, AES Preprint, 93rd Convention, 1992
5. Jitter in Clock Sources, Joe Adler, <http://www.vectron.com/>
6. Timing Errors and Jitter, Mike Story, dCS White Paper 10/1998
7. DIGITabilis crash course on digital audio interfaces, <http://www.tnt-audio.com/>
8. Discrete-Time Signal Processing, Oppenheim/Schafer, Prentice Hall, 1989
9. Convergence in Broadcastand Communications Media, Watkinson, Focal Press, 2001

avmentor

URL: <http://www.avmentor.gr>, ©Ακραίεξ Εκδόσεις 2007