

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑΤ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝΤ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Βανδώρας Μιχάλης Νικόλαος

Εισηγητής: Αναστασία Βελώνη, Καθηγήτρια

**ΑΘΗΝΑ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2017**

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

**Βανδώρας Μιχάλης Νικόλαος
Α.Μ. 36055**

Εισηγητής:

Αναστασία Βελώνη, Καθηγήτρια

Εξεταστική Επιτροπή:

Ημερομηνία εξέτασης 10/11/2017

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος,
του, με αριθμό μητρώου
..... φοιτητής/τρια του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ Συστημάτων
Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής
Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο
του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό
χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται
αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια
πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα
πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι
ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών,
ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το
Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της
Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της,
μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της
Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν
λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού
6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα
προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού
Κανονισμού.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες με την βοήθεια και υποστήριξη της καθηγήτριας Αναστασίας Βελώνη την οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα την μητέρα μου που δεν σταμάτησε να πιστεύει σε μενα όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ψηφιακών επεξεργαστών, τις διάφορες χρήσεις τους, τα είδη τους και αναλύει σε βάθος τον επεξεργαστή DSP56002

ABSTRACT

The present thesis concerns digital signal processors, their advantages and disadvantages, their use in general and focuses in the specifics of DSP56002.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ψηφιακός επεξεργαστής, φίλτρο, θόρυβος, DSPs, DSP56002

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ.....	11
Κεφάλαιο 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ DSPs	17
Κεφάλαιο 3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΣ ΥΠΟΔΙΑΣΤΟΛΗΣ	49
Κεφάλαιο 4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ...80	
Κεφάλαιο 5 ^ο Ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ DSP56002.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.

Τα σήματα τα οποία συναντούμε στην φύση δεν βρίσκονται συνήθως σε μορφή τέτοια που να επιτρέπει την άμεση εξαγωγή της επιθυμητής πληροφορίας την οποία εμπεριέχουν αφού αυτή είτε είναι αλλοιωμένη λόγω της παρουσίας θορύβου, είτε βρίσκεται σε μορφή μετασχηματισμένη λόγω φυσικών ή τεχνικών επιδράσεων.

Στόχος της Επεξεργασίας Σημάτων είναι να προτείνει τους τρόπους επικοινωνίας εκείνους, οι οποίοι όταν εφαρμοστούν στα διαθέσιμα σήματα να είναι σε θέση να απομονώσουν την επιθυμητή πληροφορία και να την παρουσιάσουν σε μορφή άμεσα αξιοποιήσιμη από τον τελικό δέκτη.

Τα περισσότερα σήματα που απαντώνται στην φύση είναι συνεχούς χρόνου και η τιμή τους κάθε χρονική στιγμή μπορεί να είναι ένας οποιοσδήποτε πραγματικός αριθμός. Τα σήματα αυτά καλούνται αναλογικά.

Από την άλλη πλευρά τα σήματα τα οποία αποτελούν αντικείμενο της ψηφιακής επεξεργασίας είναι διακριτού χρόνου και οι διαφορετικές τιμές οι οποίες μπορούν να πάρουν είναι συνάρτηση της ακρίβειας αναπαράστασης (αριθμός διαθέσιμων bit) του ψηφιακού συστήματος. Τα σήματα αυτά καλούνται ψηφιακά.

Προκειμένου να επεξεργαστούμε ένα αναλογικό σήμα με ένα ψηφιακό σύστημα πρέπει να προηγηθεί κάποιο στάδιο μετατροπής αυτού του σήματος από αναλογικό που είναι σε ψηφιακό.

Η διαδικασία που πετυχαίνει την παραπάνω μετατροπή καλείται δειγματοληψία και η μονάδα η οποία την υλοποιεί μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό (**A/D converter**).

Πρέπει να τονίσουμε εδώ, ότι ο A/D converter δεν δειγματοληπτεί απλώς το αναλογικό σήμα σε διακριτές χρονικές στιγμές, αλλά επίσης μετατρέπει την τιμή του πλάτους του σήματος στην πλησιέστερη τιμή την οποία επιτρέπει η πεπερασμένη ακρίβεια του ψηφιακού συστήματος επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή εισάγει προφανώς ένα σφάλμα αναπαράστασης το οποίο γίνεται μικρότερο όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των διαθέσιμων bits.

Στις περισσότερες εφαρμογές μετά το πέρας ή κατά την διάρκεια της επεξεργασίας ενός σήματος είναι απαραίτητη η μετατροπή του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό.

Η διαδικασία αυτή καλείται ανακατασκευή. Η μονάδα η οποία υλοποιεί την ανακατασκευή ενός αναλογικού σήματος από ένα ψηφιακό, καλείται μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό (**D/A converter**).

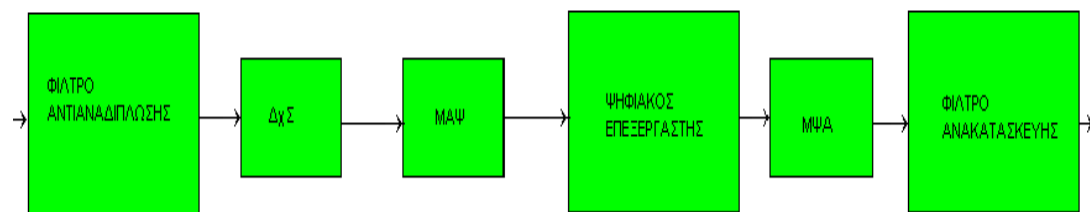
Ένα ψηφιακό σύστημα πέρα από τον A/D και D/A converters, περιλαμβάνει μερικές ακόμη μονάδες. Επειδή η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, δεν είναι δυνατό να

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

πραγματοποιηθεί στιγμιαία, στο διάστημα που διαρκεί η μετατροπή αυτή, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί σταθερή η τιμή (του σήματος) την οποία επιθυμούμε να δειγματοληψήσουμε. Η μονάδα που υλοποιεί την λειτουργία αυτή είναι η μονάδα δειγματοληψίας και συγκράτησης. Η έξοδος εξάλλου του D/A converter είναι συνήθως ένα κλιμακωτό (τμηματικά σταθερό) σήμα, με αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιου είδους εξομάλυνση από ένα φίλτρο ανακατασκευής.

Τέλος προκειμένου να αποφύγουμε το ανεπιθύμητο φαινόμενο της αναδίπλωσης συχνότητας, κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, είναι απαραίτητο να εφαρμόσουμε στο αναλογικό σήμα ένα φίλτρο αντιαναδίπλωσης.

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι βασικές μονάδες ενός ψηφιακού συστήματος επεξεργασίας αναλογικού σήματος, καθώς και η σειρά με την οποία εμφανίζονται (συγκροτούν το ψηφιακό μας σύστημα).



Σχήμα 1: Βασικά τμήματα ψηφιακής επεξεργασίας αναλογικού σήματος.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

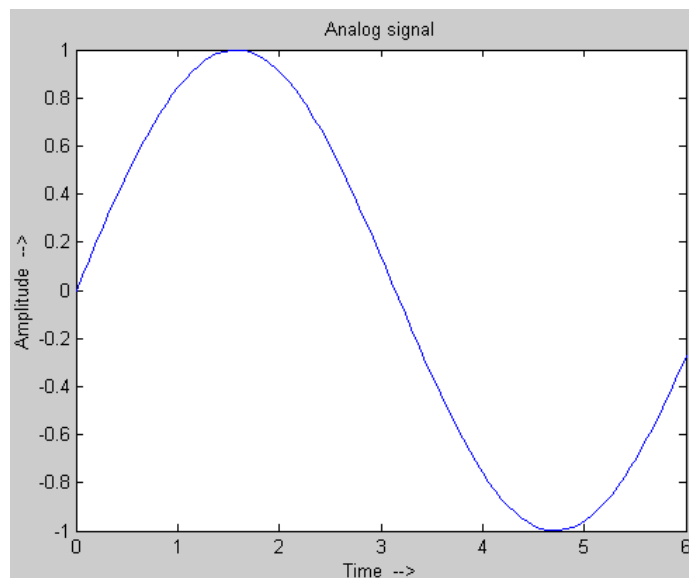
Ως σήμα ορίζουμε κάθε φυσικό μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο ή το χώρο ή με οποιαδήποτε άλλη μεταβλητή ή μεταβλητές. Για παράδειγμα μια μεταβολή ως προς το χρόνο t εκφράζεται από το σήμα $x(t) = 5t$, ενώ η μεταβολή ως προς το επίπεδο (t_1, t_2) από το σήμα $x(t_1, t_2) = 3t_1 + 2t_2$. Παραδείγματα σημάτων είναι το σήμα ομιλίας το οποίο αντιστοιχεί στις μεταβολές της ακουστικής πίεσης σε σχέση με το χρόνο και προέρχεται από τις κινήσεις των φωνητικών χορδών, το σήμα εικόνας το οποίο αντιστοιχεί στις μεταβολές της φωτεινότητας σε σχέση με τις δυο χωρικές μεταβλητές. Άλλα παραδείγματα σημάτων είναι τα σεισμικά σήματα, τα ιατρικά σήματα (καρδιογράφημα), ο ετήσιος δείκτης των τιμών καταναλωτή, ο δείκτης του ποσοστού ανεργίας ανά μήνα κλπ. Από μαθηματική άποψη ένα σήμα εκφράζεται ως συνάρτηση μιας ή περρισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών και ανάλογα με το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών τα σήματα χαρακτηρίζονται ως μονοδιάστατα (1-D), δισδιάστατα (2-D) ή πολυδιάστατα σήματα.

1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΗΜΑΤΩΝ

Τα σήματα ανάλογα με τον τύπο της μεταβλητής που αντιπροσωπεύουν κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1.3.1:Σήματα συνεχούς χρόνου ή αναλογικά σήματα

Ως σήματα **συνεχούς χρόνου** ή **αναλογικά** σήματα ορίζουμε τα σήματα των οποίων η ανεξάρτητη μεταβλητή **μεταβάλλεται** σε ένα **συνεχές** διάστημα. Στα μονοδιάστατα σήματα το **πεδίο ορισμού** του σήματος είναι το διάστημα της ευθείας των πραγματικών αριθμών. Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα αναλογικό σήμα. Επειδή η ανεξάρτητη μεταβλητή t συνήθως είναι ο χρόνος τα σήματα αυτά ονομάζονται **σήματα συνεχούς χρόνου** ή **συνεχούς μεταβλητής**:

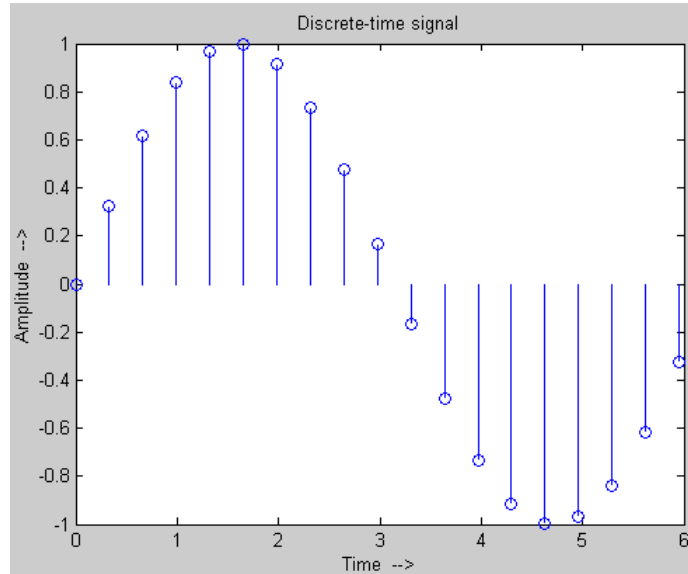


Σχήμα 2 Γραφική αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος

1.3.2:Σήματα διακριτού χρόνου

Ως σήματα **διακριτού χρόνου** ορίζουμε τα σήματα το **πεδίο ορισμού** των οποίων είναι κάποιο **διακριτό σύνολο**(πχ το σύνολο των ακεραίων αριθμών) ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή είναι δυνατόν να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται ένα σήμα διακριτού χρόνου.

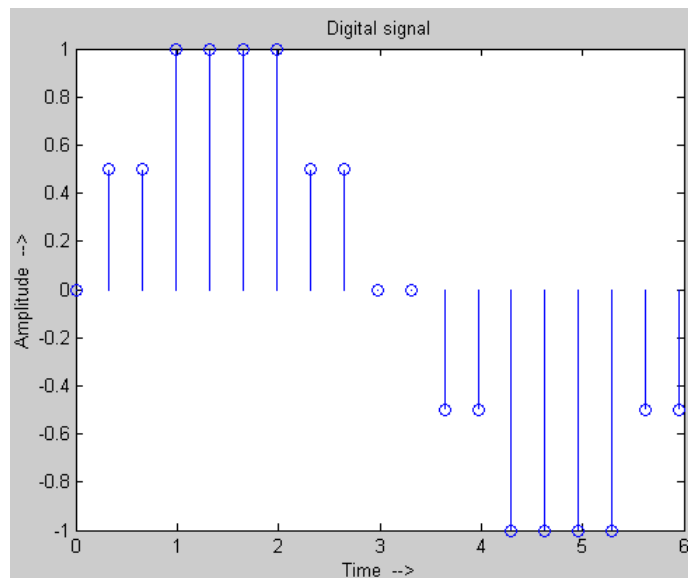
Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος



Σχήμα 3:Γραφική αναπαράσταση ενός σήματος διακριτού χρόνου

1.3.3:Ψηφιακά Σήματα

Ως **ψηφιακά σήματα** ορίζουμε τα σήματα στα οποία τόσο η **ανεξάρτητη** μεταβλητή όσο και η **εξαρτημένη** μεταβλητή μπορούν να λαμβάνουν μόνο **διακριτές** τιμές. Στο σχήμα 1.3 απεικονίζεται ένα ψηφιακό σήμα.



Σχήμα 4:Γραφική αναπαράσταση ενός ψηφιακού σήματος

1.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΗΜΑΤΩΝ

Ως **θόρυβο** στις τηλεπικοινωνίες ορίζουμε το σύνολο των **ανεπιθύμητων** πληροφοριών οι οποίες συνοδεύουν το σήμα **υποβαθμίζοντας** την ποιότητα του και προκαλώντας **προβλήματα** στην διαδικασία μετάδοσης. Η λέξη θόρυβος προκύπτει από τον **ακουστικό θόρυβο**(«φασαρία») που ακούμε κατά την διάρκεια μιας κακής μετάδοσης σήματος. Ο θόρυβος στα σήματα εμφανίζεται ως **ακουστικός θόρυβος** όταν αναπαράγεται από ένα μεγάφωνο ή σαν **παράσιτα**(«χιόνι») όταν αναπαράγεται μέσω τηλεόρασης ή βίντεο. Όσο αναφορά την επεξεργασία σήματος ο θόρυβος εμφανίζεται με την μορφή **ανεπιθύμητων** δεδομένων,δηλαδή δεδομένων που **δεν** χρησιμοποιούνται για την μετάδοση του σήματος, τα οποία προκύπτουν σαν **αποτέλεσμα** άλλων δραστηριοτήτων. Οι **δυο** κατηγορίες θορύβου που εμφανίζονται στην διαδικασία της ανίχνευση σήματος είναι ο **ηλεκτρονικός** θόρυβος και ο **θερμικός** θόρυβος. Ο ηλεκτρονικός θόρυβος εμφανίζεται στα εσωτερικά κυκλώματα του ραντάρ και προκαλείται από τις **μεταβολές** στην **τάση** του μεταδιδόμενου ρεύματος οι οποίες οφείλονται στην **κίνηση** των **ηλεκτρονίων** στους αγωγούς. Ο ηλεκτρονικός θόρυβος εμφανίζεται κατά την διάρκεια της **λήψης** του σήματος από το ραντάρ προκαλώντας **παρεμβολές** στο λαμβανόμενο σήμα. Όσο **μικρότερη** είναι η **ισχύς** του λαμβανομένου σήματος τόσο πιο **δύσκολο** είναι για το **ραντάρ** να το **ξεχωρίσει** από τον **θόρυβο**. Ο θερμικός θόρυβος θεωρείται **εξωτερικός** θόρυβος και εμφανίζεται όταν η εσωτερική **θερμοκρασία** του ραντάρ **ανεβαίνει** λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας του **περιβάλλοντος** στο οποίο λειτουργεί το ραντάρ. Αυτή η άνοδος της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται **προβλήματα** στην διάρκεια της **λήψης** του σήματος. Όσο αναφορά την **μορφή** του θορύβου η οποία εμφανίζεται στις ανιχνεύσεις μας, θα θεωρούμε ότι ο θόρυβος που εμφανίζεται στις ανιχνεύσεις μας είναι **λευκός προσθετικός Gaussian θόρυβος**. Ως **λευκό** θόρυβο ορίζουμε τον θόρυβο ο οποίος έχει την **ίδια ισχύ** σε όλα τα σημεία του και ως **Gaussian** θόρυβο ορίζουμε τον θόρυβο στον οποίο η **συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας**(probability density function) έχει **κανονική**(Gaussian) κατανομή.Τέλος το προσωνόμιο **προσθετικός** το χρησιμοποιούμε γιατί θεωρούμε ότι ο θόρυβος **προστίθεται**(«κάθεται») στα σήματα κατά την διάρκεια της μετάδοσης.

1.5 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

Η **δειγματοληψία** σήματος(signal sampling) αποτελεί τμήμα της **ψηφιακής επεξεργασίας σήματος**(digital signal processing DSP) και πιο συγκεκριμένα αποτελεί το πρώτο βημα της **μετατροπής** ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό(digital to analog conversion DAC). Ως διαδικασία η δειγματοληψία σήματος περιλαμβάνει την **επιλογή** ενός συγκεκριμένου αριθμού **δειγμάτων**(samples) από ένα αναλογικό σήμα τα οποία λαμβάνονται σε **τακτά**

χρονικά διαστήματα T . Ο χρόνος T αποτελεί την **περίοδο** της δειγματοληψίας (sampling period) με την **συχνότητα** της δειγματοληψίας, ή **ρυθμό** δειγματοληψίας (sampling rate), να δίνεται από τον τύπο:

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

Σημαντική παράμετρο όσο αναφορά την διαδικασία της δειγματοληψίας σήματος αποτελεί το θεώρημα **Nyquist-Shannon** σύμφωνα με το οποίο εάν η **συχνότητα** της δειγματοληψίας είναι **διπλάσια** της **συχνότητας** του **σήματος** τότε το αρχικό σήμα μπορεί να **ανακτηθεί** από το σήμα που έχει προκύψει από την διαδικασία της δειγματοληψίας σήματος. Ο μαθηματικός τύπος του θεωρήματος Nyquist-Shannon είναι ο εξής:

$$f_s \geq 2f \quad (1.2)$$

όπου f_s η συχνότητα δειγματοληψίας και f η συχνότητα του σήματος.

Η διαδικασία της δειγματοληψίας χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη την **κωδικοποίηση** (encoding) και την **κβαντοποίηση** (quantizing). Στο κομμάτι της κωδικοποίησης επιλέγονται οι **στάθμες** με τις οποίες θέλουμε να αντιπροσωπεύσουμε το σήμα. Αφού επιλεγθούν οι στάθμες στην συνέχεια **αντιστοιχίζεται** σε κάθε μια από αυτές μια **λέξη**. Μια λέξη μήκους n bits μπορεί να περιγράψει 2^n στάθμες, ενώ η **επιλογή** των σταθμών γίνεται ανάλογα με την **ακρίβεια** που επιθυμούμε. Στο κομμάτι της **κβαντοποίησης** βρίσκουμε την **πλησιέστερη** στάθμη κάθε τιμής που προέκυψε από την δειγματοληψία και μετά από την συγκεκριμένη διαδικασία το αρχικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό. Με την διαδικασία της κβαντοποίησης περιορίζουμε το αρχικό σύνολο τιμών σε ένα σύνολο **πεπερασμένου** αριθμού τιμών M . Η **ευκρίνεια** του σήματος καθορίζεται από τον αριθμό M ενώ οι τιμές του σήματος αναπαριστούνται από μια σειρά δυαδικών ψηφίων 0 και 1. Το μοναδικό σημαντικό **μειονέκτημα** της δειγματοληψίας είναι ότι κατά την πραγματοποίηση της **χάνονται** μερικές από τις **πληροφορίες** του σήματος. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται αναλυτικά τα στάδια που εκτελούνται κατά την διάρκεια πραγματοποίησης μιας δειγματοληψίας σήματος για την μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Έτσι λοιπόν έχουμε ένα αναλογικό σήμα το οποίο αρχικά περνάει από την φάση της κωδικοποίησης για την επιλογή των αρχικών προς μετατροπή τιμών και στην συνέχεια μέσω της διαδικασίας της κβαντοποίησης καταλήγουμε στο τελικό ψηφιακό σήμα. Θα πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι η δειγματοληψία πραγματοποιείται με **ρυθμό** τέτοιο ώστε το σήμα να μπορεί να **αναγνωριστεί** από τα δείγματα πράγμα το οποίο εξαρτάται από το **είδος** και την **μορφή** του σήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ DSPs

2.1 DSP συστήματα

Ένα σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος μπορεί να οριστεί σαν ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο κάνει χρήση ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Τα σήματα αναπαρίστανται ψηφιακά σαν ακολουθία από δείγματα. Συνήθως, τα σήματα αυτά προέρχονται από φυσικά σήματα (για παράδειγμα ηχητικά σήματα) μέσω της χρήσης ενός μετατροπέα (για παράδειγμα μικρόφωνα) καθώς και αναλογικών / ψηφιακών μετατροπέων (A/D converters). Μετά την επεξεργασία τους, τα ψηφιακά σήματα μετατρέπονται πίσω σε αναλογικά με τη χρήση ψηφιακών / αναλογικών μετατροπέων (D/A converters).

Σε κάποια συστήματα η χρήση DSPs είναι αναγκαία για τη λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα, τα modems και τα κινητά τηλέφωνα βασίζονται αποκλειστικά στη χρήση των DSPs. Σε μερικές άλλες εφαρμογές, η χρήση των DSPs δεν είναι επιτακτική αλλά προσφέρει επιπλέον δυνατότητες στον τομέα της απόδοσης και του κόστους.

2.2 Πλεονεκτήματα των DSPs

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία. Το πιο σημαντικό από τα πλεονεκτήματα είναι ότι τα ψηφιακά συστήματα μπορούν να υλοποιήσουν εφαρμογές με μικρό κόστος, κάτι που θα ήταν πολύ δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο για τα αναλογικά συστήματα. Για παράδειγμα, η σύνθεση φωνής, η αναγνώριση φωνής και τα γρήγορα modems είναι μερικές από αυτές τις εφαρμογές οι οποίες απαιτούν τον συνδυασμό της επεξεργασίας σήματος και ελέγχου και οι οποίες δεν μπορούν να υλοποιηθούν από αναλογικά συστήματα. Επιπλέον, οι ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος έχουν επιπρόσθετα πλεονεκτήματα όπως :

- Ανεξαρτησία από τις συνθήκες του περιβάλλοντος
- Ανεξαρτησία από τις ανοχές των στοιχείων
- Προβλέψιμη και επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά
- Επαναπρογραμματισμός
- Μικρό μέγεθος

2.3 Χαρακτηριστικά των DSPs

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά σε κοινά χαρακτηριστικά των ψηφιακών επεξεργαστών όπως οι αλγόριθμοι, ο ρυθμός μετάδοσης των δειγμάτων (sample rate) και ο ρυθμός ρολογιού (clock rate).

□ **Αλγόριθμοι**

Οι ψηφιακοί επεξεργαστές συχνά χαρακτηρίζονται από τους αλγόριθμους τους οποίους χρησιμοποιούν. Οι αλγόριθμοι καθορίζουν τις αριθμητικές πράξεις που θα εκτελεστούν αλλά όχι και τον τρόπο υλοποίησής τους. Μπορούν να υλοποιηθούν μέσω λογισμικού ή μέσω ενός μικροεπεξεργαστή ή προγραμματιζόμενου επεξεργαστή σήματος. Η επιλογή της υλοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για μία εφαρμογή, καθορίζεται κυρίως από την απαιτούμενη ταχύτητα και την αριθμητική ακρίβεια. Ο πίνακας 1 κατατάσσει μερικούς κοινούς DSP αλγορίθμους και μερικές από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

□ **Ρυθμοί μετάδοσης των δειγμάτων**

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των DSPs είναι ο ρυθμός μετάδοσης των δειγμάτων, δηλαδή το χρόνο που χρειάζονται τα δεδομένα να εισαχθούν, να επεξεργαστούν και να παραχθούν. Σε συνάρτηση με την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων, ο ρυθμός των δειγμάτων καθορίζει την απαιτούμενη ταχύτητα των συστημάτων. Φυσικά ένας DSP μπορεί να χρησιμοποιεί πολλαπλούς ρυθμούς δειγμάτων, οπότε πρόκειται για multirate DSP συστήματα.

Ένα παράδειγμα ενός multirate αλγορίθμου είναι μια filter bank η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που αφορούν τον ήχο, την ομιλία, την κωδικοποίηση video και την ανάλυση σήματος. Οι filter banks, τυπικά εμπεριέχουν στάδια τα οποία διαιρούν το σήμα σε υψηλές και χαμηλές αναλογίες. Ο ρυθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιείται σε μερικά συστήματα είναι τεράστιος επειδή λειτουργούν σε φυσικά σήματα, σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτά τα συστήματα η ανικανότητα να ικανοποιούν τους απαραίτητους χρόνους επεξεργασίας θεωρείται σοβαρό μειονέκτημα. Τα συστήματα αυτά συχνά χαρακτηρίζονται σαν αυστηρά συστήματα πραγματικού χρόνου.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

DSP Αλγόριθμος	Εφαρμογές
Κωδικοποίηση / Αποκωδικοποίηση ομιλίας	Κινητά τηλέφωνα, προσωπικά συστήματα επικοινωνίας, ασύρματα τηλέφωνα, υπολογιστές πολυμέσων
Αναγνώριση ομιλίας	Κινητά τηλέφωνα, προσωπικά συστήματα επικοινωνίας, ασύρματα τηλέφωνα, σταθμοί εργασίας πολυμέσων, ρομποτική, προηγμένα μέσα διασύνδεσης, αυτοκινούμενες εφαρμογές
Σύνθεση ομιλίας	Υπολογιστές πολυμέσων, ρομποτική, προηγμένα μέσα διασύνδεσης
Κωδικοποίηση/ ήχου	Αποκωδικοποίηση Consumer audio, consumer video, επαγγελματικός ήχος, ψηφιακή μετάδοση ήχου, υπολογιστές πολυμέσων
Αλγόριθμοι για modems	Κινητά τηλέφωνα, προσωπικά συστήματα επικοινωνίας, ασύρματα τηλέφωνα, ψηφιακή μετάδοση ήχου, ψηφιακή σήμανση σε καλωδιακή τηλεόραση, υπολογιστές πολυμέσων, ασύρματοι υπολογιστές, modems για φαξ/δεδομένα, συστήματα ασφαλούς επικοινωνίας
Ακύρωση θορύβου	Επαγγελματικός ήχος, βιομηχανικές εφαρμογές, προηγμένος ήχος σε μέσο μεταφοράς
Προσομοίωση Περιβάλλοντος	ακουστικής Consumer audio, επαγγελματικός ήχος, προηγμένος ήχος σε μέσο μεταφοράς, μουσική
Όραση	Ασφάλεια, υπολογιστές πολυμέσων, προηγμένα μέσα διασύνδεσης, χρήση μουσικών οργάνων, ρομποτική, navigation
Συμπίεση/Αποσυμπίεση εικόνας	Ψηφιακή φωτογραφία, ψηφιακό video, υπολογιστές πολυμέσων, video-over-voice, consumer video
Σύνθεση εικόνας	Υπολογιστές πολυμέσων, consumer video, navigation, προηγμένα μέσα διασύνδεσης
Beamforming	Navigation, medial imaging, radar/sonar, signals intelligence
Εκτίμηση φάσματος	Radar/sonar, signals intelligence, μουσική, επαγγελματικός ήχος

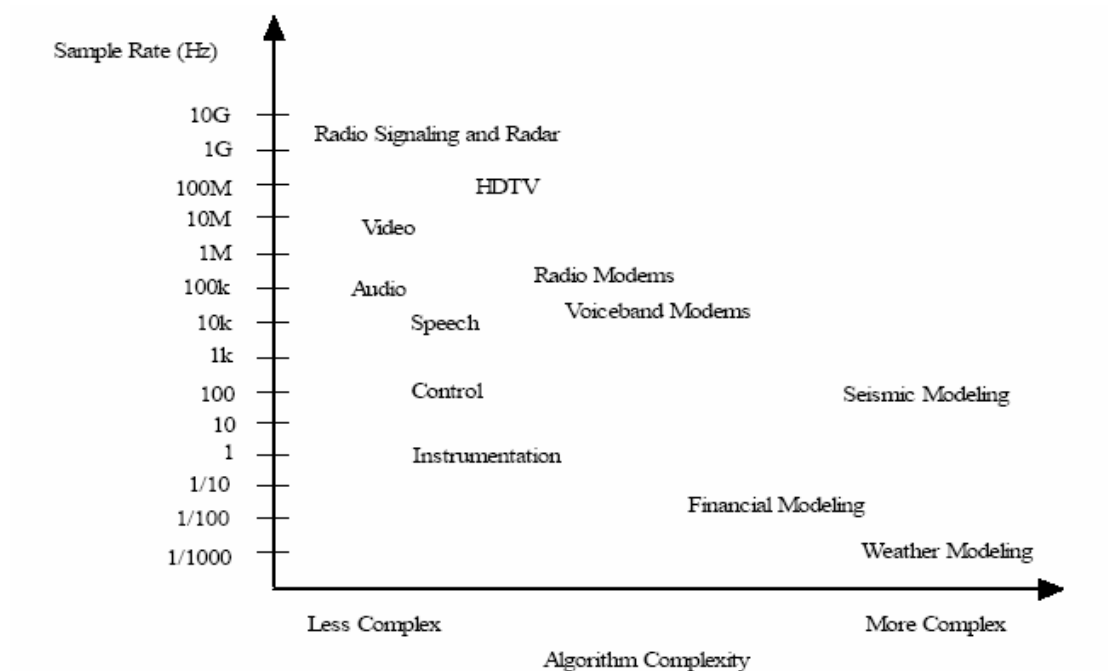
Πίνακας 1. Κοινός DSP αλγόριθμοι και τυπικές εφαρμογές.

□ Ρυθμός ρολογιού

Τα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα συχνά χαρακτηρίζονται από το ρυθμό του ρολογιού. Ο ρυθμός αυτός συχνά αναφέρεται στο ρυθμό στον οποίο το σύστημα εκτελεί τις πιο πολλές και σημαντικές λειτουργίες. Στα μαζικής παραγωγής προϊόντα, ο ρυθμός ρολογιού έχει πλέον ανέλθει στα 600 MHz. Για τους DSPs ο ρυθμός του ρολογιού είναι ένα βασικό στοιχείο που χαρακτηρίζει τον επεξεργαστή.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Η σχέση μεταξύ ρυθμού δειγμάτων και ρολογιού καθορίζει το hardware που χρειάζεται ώστε να υλοποιηθεί ένας αλγόριθμος κάποιας πολυπλοκότητας σε πραγματικό χρόνο. Όσο ο λόγος της συχνότητας δειγματοληψίας προς το ρολόι του επεξεργαστή αυξάνεται τόσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα και του hardware που απαιτείται για την υλοποίηση του αλγορίθμου.



Σχήμα 1. Αναπαράσταση του ρυθμού μετάδοσης των δειγμάτων και της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου για μια ποικιλία τάξεων των DSP εφαρμογών

2.4 Τάξεις των DSP εφαρμογών

Το πρώτο πράγμα για ένα σχεδιαστή που θα επιλέξει ένα DSP είναι να εκτιμήσει την ανάγκη για επίδοση, χαμηλό κόστος, ευκολία στην υλοποίηση, κατανάλωση ισχύος και άλλους παράγοντες. Οι πιο σημαντικές κατηγορίες εφαρμογών των DSPs φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Κατηγορία	Παράδειγμα εφαρμογής
Χαμηλού κόστους ενσωματωμένα συστήματα	Modems, pagers, κινητά τηλέφωνα, ασύρματα τηλέφωνα, ανιχνευτές ραντάρ, disk drives, automotive real-time Control
Υψηλού επιπέδου εφαρμογές	Radar, sonar, seismic imaging, speaker identification

Προσωπικοί υπολογιστές και πολυμέσα Modems, σύνθεση μουσικής, σύνθεση ομιλίας, συμπίεση και αποσυμπίεση ήχου και ομιλίας, ταχυδρομείο φωνής (voice mail)

Πίνακας 2. Παραδείγματα εφαρμογών για DSP επεξεργαστές.

2.5 Εναλλακτικές λύσεις για τους DSP επεξεργαστές

Υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές λύσεις έναντι των DSP επεξεργαστών σε έναν σχεδιαστή ο οποίος σχεδιάζει και υλοποιεί μια εφαρμογή. Στη ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε αυτές τις λύσεις.

□ Γενικής χρήσης μικροεπεξεργαστές :

Καθώς οι γενικής χρήσης μικροεπεξεργαστές καθίστανται γρηγορότεροι, γίνονται όλο και περισσότερο ικανοί για αρκετές “λιγότερο σημαντικές” DSP λειτουργίες. Παρόλο που οι γενικής χρήσης επεξεργαστές είναι γενικά πιο αργοί από τους DSPs, ειδικότερα στην αντιμετώπιση εφαρμογών πραγματικού χρόνου, αποτελούν μια πολύ καλή λύση για ορισμένες εφαρμογές. Καταρχήν, πολλές ηλεκτρονικές συσκευές έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να χρησιμοποιούν γενικής χρήσης μικροεπεξεργαστές για έλεγχο, επικοινωνία και user interface. Αν μια εφαρμογή προστεθεί σε ένα προϊόν το οποίο χρησιμοποιεί γενικής χρήσης επεξεργαστή, τότε η εφαρμογή είναι δυνατόν να ενσωματωθεί χωρίς την ανάγκη για επιπρόσθετο επεξεργαστή. Δεύτερον, τα διάφορα software development εργαλεία για τους επεξεργαστές γενικής χρήσης είναι συνήθως πιο ελκυστικά και δυνατά από αυτά των DSP επεξεργαστών. Καθώς οι εφαρμογές της επεξεργασίας σήματος πληθαίνουν, οι γενικής χρήσης επεξεργαστές έχουν αρχίσει να υιοθετούν κάποια βασικά χαρακτηριστικά των DSP επεξεργαστών για να φέρουν σε πέρας τέτοιου είδους εφαρμογές. Για παράδειγμα, η γενικής χρήσης μικροεπεξεργαστές Motorola/IBM Power PC 601, MIPS R10000, SunUltraSPARC, Hewlett-Packard PA-7100LC, Intel Pentium, AMD Athlon είναι ικανοί να εκτελούν floating-point multiply-accumulate λειτουργίες σε ένα κύκλο εντολής. Επιπρόσθετα, μερικοί από τους επεξεργαστές αυτούς έχουν ειδικές εντολές, όπως οι Pentium με τις MMX εντολές, και απευθύνονται κυρίως σε εφαρμογές πολυμέσων. Δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο αν ένας DSP ή ένας γενικής χρήσης επεξεργαστής θα δίνει πιο ελκυστική προσέγγιση για το μέλλον. Πάντως αναμένεται για αρκετά χρόνια ακόμα οι πραγματικού χρόνου εφαρμογές θα υλοποιούνται από ειδικευμένους DSP επεξεργαστές, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους και της μικρότερης κατανάλωσης ισχύος σε σχέση με τους επεξεργαστές γενικού σκοπού.

❑ **Custom hardware :**

Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους το custom hardware είναι μερικές φορές καλύτερο από την επιλογή ενός DSP επεξεργαστή. Αυτοί είναι η απόδοση και το κόστος. Σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές, το custom hardware παρέχει καλύτερη απόδοση από τους γενικής χρήσης επεξεργαστές. Επίσης έχει χαμηλότερο κόστος λόγω της εξειδίκευσής τους. Φυσικά το κόστος είναι μικρότερο όταν η ποσότητα του προϊόντος είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να γίνει η απόσβεση του μεγάλου κόστους για την υλοποίηση custom hardware. Για εφαρμογές επεξεργασίας σήματος με συχνότητα δειγματοληψίας πολύ υψηλή, το custom hardware ίσως να είναι η μοναδική λύση. Τις περισσότερες φορές το custom hardware είναι αποτελεσματικότερο από έναν DSP επεξεργαστή και αυτό γιατί η custom λύση εξειδικεύεται στην υλοποίηση μιας συγκεκριμένης εφαρμογής και τοποθετεί μόνο εκείνες τις συναρτήσεις που χρειάζονται, ενώ με τους DSP επεξεργαστές κάθε εφαρμογή χρησιμοποιεί όλες τις συναρτήσεις του επεξεργαστή ακόμα και αν χρειάζεται ένα μικρό μέρος των δυνατοτήτων του. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα του custom hardware είναι το κόστος και ο κόπος κυρίως για την σχεδίαση custom chip. Οι μορφές τέλος του custom hardware είναι πολλές και εξαρτώνται κυρίως από την εφαρμογή.

Περιφερειακά (Peripherals)

Οι περισσότεροι DSP επεξεργαστές παρέχουν ένα σύνολο από on-chip περιφερειακές συσκευές ελέγχου. Αυτό τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα έχοντας ένα ελάχιστο αριθμό από εξωτερικά κυκλώματα, που χρειάζονται για να τον υποστηρίξουν.

Σειριακές Θύρες - Serial Ports

Μια σειριακή πόρτα στέλνει και δέχεται ένα bit δεδομένων την φορά σε αντίθεση με τις παράλληλες θύρες, για τις οποίες θα μιλήσουμε παρακάτω, που στέλνουν και δέχονται δεδομένα κατά ψηφιολέξεις των 8, 16 ή 32 bits την φορά. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος οι σειριακές θύρες δεν είναι τόσο γρήγορες όσο οι παράλληλες αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν πολύ λιγότερες γραμμές σήματος.

Οι σειριακές θύρες χρησιμοποιούνται στους DSPs κυρίως για :

- αποστολή και λήψη δεδομένων από και προς A/D και D/A μετατροπείς,

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- αποστολή και λήψη δεδομένων από και προς άλλους επεξεργαστές ή συστήματα,
- επικοινωνία μεταξύ άλλων περιφερειακών ή άλλων συστημάτων.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες σειριακής επικοινωνίας : η ασύγχρονη και η σύγχρονη. Στη σύγχρονη επικοινωνία έχουμε την μετάδοση και ενός επιπλέον σήματος, αυτού του ρολογιού, το οποίο χρησιμοποιεί ο δέκτης για να δεχθεί σωστά τα δεδομένα. Σε αντίθεση, στην ασύγχρονη επικοινωνία ο δέκτης θα πρέπει μέσα από την σειρά των δεδομένων που μεταδίδονται να παράγει ένα ρολόι, που θα συγχρονίσει την αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Αυτό περιπλέκει το κύκλωμα ασύγχρονης επικοινωνίας όσο και το πρωτόκολλο που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Επίσης μειώνει την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων. Παράδειγμα ασύγχρονης επικοινωνίας είναι τα πρωτόκολλα RS-232 και RS-422. Παρόλο που υπάρχουν DSPs που παρέχουν κυκλώματα ασύγχρονης επικοινωνίας (Motorola DSP5600x) αυτοί είναι πολύ λίγοι και έτσι δεν θα επεκταθούμε περισσότερο στο θέμα αυτό. Αντίθετα, όλοι σχεδόν οι DSP επεξεργαστές παρέχουν σειριακές θύρες σύγχρονης επικοινωνίας. Παρακάτω θα αναφερθούμε σε θέματα που αφορούν τη σύγχρονη επικοινωνία.

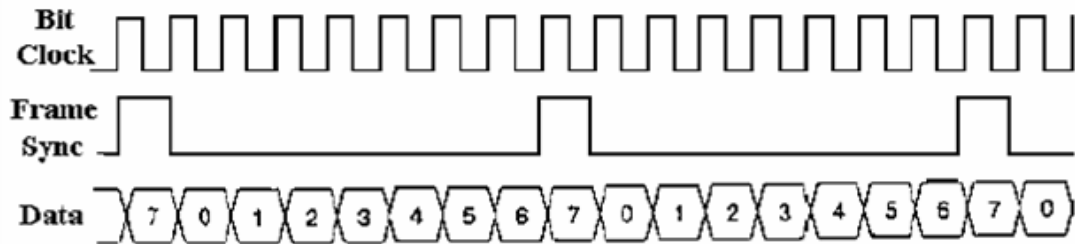
Σχέση δεδομένων και ρολογιού

Όπως αναφέραμε, στη σύγχρονη επικοινωνία ο αποστολέας στέλνει ένα σήμα clock bit, το οποίο χρησιμοποιεί το κύκλωμα λήψης για να καταλάβει πότε τα bit, που εμφανίζονται στη γραμμή είναι τα σωστά δεδομένα. Ένα παράδειγμα κυματομορφών ρολογιού και δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 2.

Όλες οι σειριακές πόρτες δέχονται ότι στη μία παρυφή του ρολογιού ο αποστολέας αλλάζει τα δεδομένα και στην άλλη τα δεδομένα είναι σταθερά. Στο παράδειγμα μας ο λήπτης διαβάζει τα σωστά δεδομένα κατά την πτώση του παλμού του ρολογιού. Σε άλλους DSPs η πολικότητα μπορεί να είναι αντίστροφη ενώ σε άλλους μπορεί να είναι προγραμματιζόμενη.

Σε ορισμένες σειριακές πόρτες η θετική τάση (3.3 ή 5V) αντιστοιχεί στην λογικά κατάσταση '1' ενώ τα 0V αντιστοιχούν σε λογικό '0'. Σε άλλες μπορεί να συμβαίνει το αντίθετο ή και οι αντιστοιχίες να είναι προγραμματιζόμενες.

Επίσης, ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η σειρά μετάδοσης των δεδομένων. Σε ορισμένες σειριακές πόρτες έχουμε την μετάδοση πρώτα του LSB της πληροφορίας ενώ σε άλλες του MSB. Ένα πλεονέκτημα των σειριακών πορτών σε σχέση με τις παράλληλες είναι ότι μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλη ποικιλία από μήκος λέξεων δεδομένων. Τυπικές τιμές είναι 8-bit και 16-bit χωρίς να αποκλείσουμε οποιεσδήποτε άλλες.

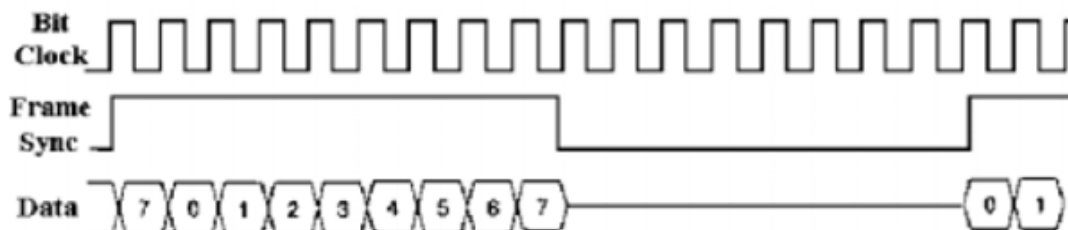


Σχήμα 2. Clock, data και bit-length frame sync σήματα

Frame Synchronization

Στην σειριακή επικοινωνία χρησιμοποιείται ένα επιπλέον σήμα μαζί με τα σήματα δεδομένων και του ρολογιού, το σήμα συγχρονισμού (frame synchronization ή frame sync). Το σήμα αυτό χρησιμοποιείται για να δείξει τη θέση του πρώτου bit μιας ψηφιολέξης στην γραμμή δεδομένων της σειριακής πόρτας. Δυο τύποι frame sync χρησιμοποιούνται περισσότερο :

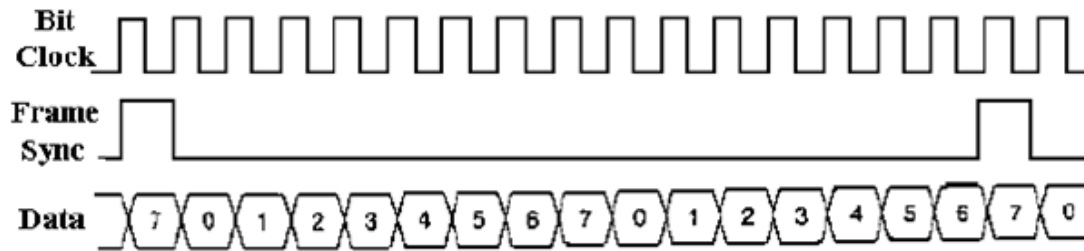
- Το bit-length frame sync (σχήμα 3), το οποίο βρίσκεται στο λογικό '1' μόνο κατά την διάρκεια ενός bit και πριν από το πρώτο bit της ψηφιολέξης των δεδομένων.
- Το word-length frame sync το οποίο βρίσκεται στο λογικό '1' κατά την διάρκεια της ψηφιολέξης των δεδομένων.



Σχήμα 3. Word-length frame sync

Πολλαπλά δεδομένα ανά frame

Πολλοί DSP με σειριακές πόρτες χειρίζονται πολλές ψηφιολέξεις ανά frame sync και όχι μόνο μία. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεταφορά δεδομένων από stereo A/D-D/A converters, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Δυο ψηφιολέξεις δεδομένων ανά frame sync

Ανεξάρτητα τμήματα αποστολής και λήψης

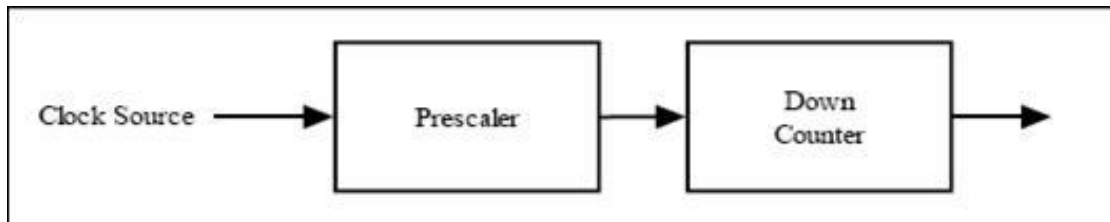
Μια σειριακή πόρτα αποτελείται, συνήθως, από το τμήμα αποστολής και το τμήμα λήψης. Σε μερικούς DSPs τα τμήματα αυτά είναι ανεξάρτητα. Σε άλλους DSPs τα τμήματα αυτά βρίσκονται μαζί στο ίδιο κύκλωμα έχοντας, συνήθως, κάποια σήματα κοινά, όπως τα σήματα clock και frame sync.

Γεννήτρια Παλμών Σειριακής Πόρτας

Όταν δύο συσκευές είναι συνδεδεμένες μέσω μιας σειριακής πόρτας τότε μια από τις δύο πρέπει να παράγει το σήμα του ρολογιού ή θα πρέπει να τροφοδοτούνται από μία εξωτερική συσκευή. Συνήθως ο αποστολέας των δεδομένων αναλαμβάνει να στείλει και το ρολόι.

Ορισμένοι DSPs περιέχουν ένα υποκύκλωμα που αναλαμβάνει να παράγει το σήμα του ρολογιού για την σειριακή επικοινωνία. Αυτό ονομάζεται σαν serial clock generator ή baud rate generator. Συνήθως ο generator παράγει τον παλμό διαιρώντας το κύριο ρολόι κατά μία τιμή. Ο έλεγχος που μπορεί να ασκήσει ο προγραμματιστής στο κύκλωμα του generator ποικίλει από επεξεργαστή σε επεξεργαστή.

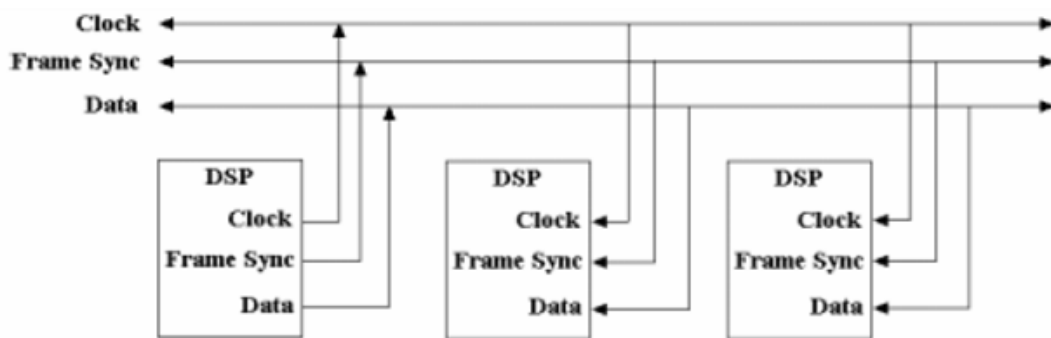
Γενικά, αποτελείται από τον prescaler και έναν προγραμματιζόμενο απαριθμητή (σχήμα 5). Ο prescaler είναι κι αυτός ένας απαριθμητής ο οποίος όμως μπορεί να διαιρέσει την συχνότητα του κυρίως ρολογιού κατά ορισμένες μόνο τιμές. Παράδειγμα στον επεξεργαστή DSP5600x μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ της “divide-by-1” και της “divide-by-8”. Αντίθετα ο απαριθμητής είναι προγραμματιζόμενος και χρησιμοποιώντας την έξοδο του prescaler σαν είσοδο απαριθμεί, προς τα κάτω, με κάθε παρυφή της εισόδου του, μέχρι να φτάσει το μηδέν. Τότε ο απαριθμητής ‘φορτώνει’ την τιμή που του έχει ορίσει ο προγραμματιστής και επαναλαμβάνει την διαδικασία. Μερικοί DSPs δεν περιλαμβάνουν το τμήμα του απαριθμητή αναγκάζοντας τον προγραμματιστή να επιλέξει μεταξύ μερικών τιμών μόνο.



Σχήμα 5. Σχηματική παράσταση ενός Serial Clock Generator

Time Division Multiplex Support

Σειριακές θύρες χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία περισσότερων από δύο επεξεργαστών. Αυτό γίνεται με πολυπλεξία στον χρόνο ή Time Division Multiplexing (TDM). Σε ένα TDM δίκτυο ο χρόνος χωρίζεται σε χρονικά τμήματα (time slots). Κατά τη διάρκεια ενός χρονικού τμήματος ο ένας επεξεργαστής στέλνει δεδομένα ενώ οι υπόλοιποι δέχονται. Στο σχήμα 6 φαίνεται ένα δίκτυο επεξεργαστών για ορισμένο time slot. Στην περίπτωση του TDM το frame sync χρησιμοποιείται για να ορίσει την αρχή μία σειράς από time slots. Ο κάθε επεξεργαστής παρακολουθεί το frame sync έτσι ώστε να γνωρίζει σε ποια χρονική στιγμή θα πρέπει να στείλει δεδομένα. Το δίκτυο απαιτεί από το επεξεργαστή να έχει τα pins εξόδου του σε high-impedance state όταν δεν στέλνει δεδομένα.

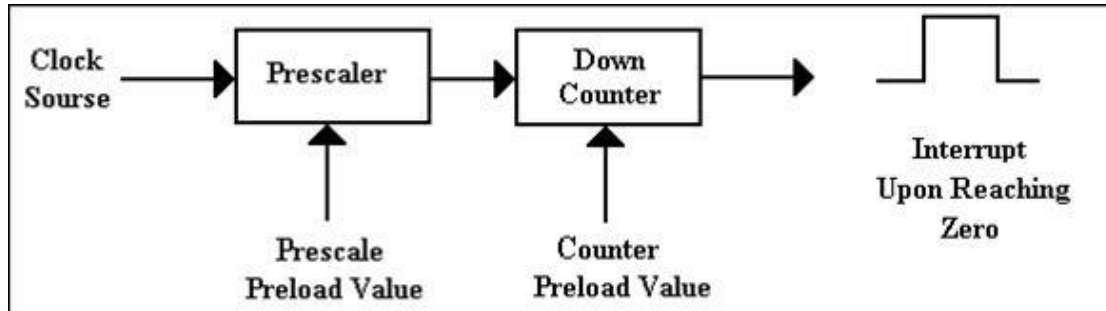


Σχήμα 6. Παράδειγμα TDM

Χρονιστές / Ρολόγια

Όλοι οι DSPs διαθέτουν χρονιστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως σαν πηγές περιοδικού σήματος για διάφορες εφαρμογές. Σαν παράδειγμα, αναφέρουμε την δυνατότητα που έχουν ορισμένοι να παρέχουν ένα pin εξόδου που δίνει ένα τετραγωνικό παλμό στην συχνότητα του ρολογιού / χρονιστή. Λόγω του ότι η συχνότητα είναι κάτω από τον έλεγχο του προγράμματος, η έξοδος μπορεί να θεωρηθεί σαν software-controlled ταλαντωτής πολύ

χρήσιμος για την κατασκευή phase-locked loops. Κατασκευαστικά, ένας χρονιστής μοιάζει με την γεννήτρια παλμών της σειριακής θύρας με την έννοια ότι έχουμε μια πηγή παλμών, έναν prescaler και έναν απαριθμητή, όπως φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 7. Σχηματική παράσταση ενός Timer

Ο σκοπός του prescaler είναι να μειώσει την συχνότητα του κυρίως ρολογιού που έρχεται σαν είσοδος έτσι ώστε ο απαριθμητής να μπορεί να απαριθμήσει μεγαλύτερες περιόδους. Αυτό το πετυχαίνει ο prescaler διαιρώντας την συχνότητα του κυρίως ρολογιού κατά ορισμένες επιλεγόμενες τιμές. Έτσι, για παράδειγμα, ο επεξεργαστής της Analog Devices ADSP-21xx χρησιμοποιεί μια 8-bit τιμή για τον καθορισμό της διαίρεσης στον prescaler δίνοντας με αυτόν τον τρόπο διαιρέσει από 1 μέχρι 256.

Ο απαριθμητής στην συνέχεια χρησιμοποιεί την έξοδο του prescaler σαν είσοδο και απαριθμεί προς τα κάτω συνήθως με κάθε παρυφή της εισόδου. Σε κάθε μηδενισμό του ο απαριθμητής προκαλεί μια εσωτερική διακοπή στον επεξεργαστή. Στην συνέχεια ο απαριθμητής ‘φορτώνει’ μια καθορισμένη από το πρόγραμμα, συνήθως, τιμή και επαναλαμβάνει την διαδικασία.

Οι περισσότεροι καταχωρητές των απαριθμητών είναι 16-bit, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο μια μεγάλη κλίμακα από συχνότητες που μπορούν να παραχθούν. Στον DSP56000 και DSP56001 της Motorola τα pins του χρονιστή είναι κοινά με αυτά της γεννήτριας παλμών της ασύγχρονης σειριακής θύρας. Έτσι ο προγραμματιστής θα πρέπει να διαλέξει συχνότητες που θα είναι συμβατές με εφαρμογές που χρησιμοποιούν τον χρονιστή και την σειριακή θύρα ταυτόχρονα.

Παράλληλες Θύρες

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η παράλληλη θύρα στέλνει και δέχεται δεδομένα κατά παράλληλο τρόπο σε μορφή ψηφιολέξεων συνήθως των 8, 16 ή 32 bits τη φορά. Η αποστολή

και λήψη των δεδομένων γίνεται πολύ γρηγορότερα από τις σειριακές θύρες αλλά χρειάζονται περισσότερες γραμμές σήματος.

Ορισμένοι DSPs χρησιμοποιούν το data bus σαν παράλληλη θύρα. Αυτό το πετυχαίνουν απεικονίζοντας I/Os σε ένα χώρο της μνήμης συστήματος. Όταν αυτή η διεύθυνση επιλεγεί (ή εκτελεστούν I/O εντολές) ειδικά σήματα ελέγχου, όπως τα strobe και handshaking pins ενεργοποιούνται και ο επεξεργαστής ανταλλάσσει δεδομένα με την εξωτερική συσκευή. Η εξωτερική συσκευή από την μεριά της παρακολουθεί τα σήματα ελέγχου και λαμβάνει ή στέλνει δεδομένα από και προς τον επεξεργαστή. Αυτή η τακτική είναι πολύ κοινή στους επεξεργαστές της TI.

Σε αντίθεση, μερικοί DSP επεξεργαστές, όπως οι DSP16xx της AT&T, παρέχουν παράλληλες θύρες, που δεν χρησιμοποιούνται σαν επέκταση του data bus, αλλά σαν ξεχωριστή συσκευή.

Bit I/O Ports

Τα Bit I/O αναφέρονται σε μια παράλληλη θύρα για I/O. Η διαφορά από την παράλληλη θύρα βρίσκεται στο γεγονός ότι δεν διαθέτουν σήματα strobe και handshake αλλά δεν υποστηρίζουν ούτε διακοπές. Στην περίπτωση των bit I/O ο επεξεργαστής θα πρέπει να ελέγχει συνεχώς τα I/O pins για να διαπιστώσει αν έχουν αλλάξει κατάσταση. Χρησιμοποιούνται κυρίως για έλεγχο αλλά και για μεταφορά δεδομένων.

Οι περισσότεροι DSPs παρέχουν ένα ή δύο bit I/O γραμμές. Σε μερικούς τα bit I/Os είναι κοινά με pins κάποιας άλλης περιφερειακής συσκευής. Για παράδειγμα στον DSP5600x της Motorola, τα bit I/Os βρίσκονται στη σειριακή θύρα. Σε μερικούς επεξεργαστές υποστηρίζονται εντολές υπό συνθήκη βασισμένες στην λογική στάθμη κάποιων I/O pins, όπως για παράδειγμα η εντολή BIO (“branch if I/O zero”) της σειράς των fixed-point επεξεργαστών της Texas Instruments.

Ορισμένοι επεξεργαστές όπως οι TMS320C14 της TI και DSP16xx της AT&T χρησιμοποιούν πολύ “έξυπνες” I/O θύρες. Οι θύρες αυτές εκτός από όσα αναφέραμε παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν αν οι είσοδοι των I/O pins ταιριάζουν με κάποιο, προκαθορισμένο προγραμματιστικά, πρότυπο (pattern). Αν ταιριάζει τότε εκτελείται μια αίτηση διακοπής στον επεξεργαστή ή θέτονται σε λογικό ‘1’ κάποια flags σε κάποιον status καταχωρητή.

Θύρα Host

Ορισμένοι DSPs παρέχουν μια ειδική θύρα, την host port, η οποία χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ του DSP επεξεργαστή και επεξεργαστών γενικού σκοπού (general purpose microprocessor) ή μικροελεγκτή (microcontroller).

Είναι συνήθως 8 ή 16-bit διάλογοι διπλής κατεύθυνσης δεδομένων που χρησιμεύουν στην μεταφορά δεδομένων μεταξύ DSP επεξεργαστή και του host επεξεργαστή. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο host επεξεργαστής χρησιμοποιεί την host port για τον έλεγχο του DSP ή ακόμα για την 'φόρτωση' του προγράμματος εκκίνησης του DSP (bootstrap loading).

Host ports προσφέρουν όλοι οι επεξεργαστές της Motorola, οι τελευταίοι fixed-point επεξεργαστές της Texas Instruments και μερικοί της Analog Devices.

Communication Ports

Μία θύρα επικοινωνίας ή communication port είναι μια ειδική θύρα που χρησιμοποιείται για ενδο-επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστών του ίδιου τύπου. Γενικά, δεν παρέχονται ειδικές συναρτήσεις για έλεγχο των DSPs αφού αυτές βρίσκονται στις παράλληλες θύρες.

Οι πιο γνωστοί επεξεργαστές που παρέχουν communication port είναι ο TMS320C4x (8-bit μήκος) της Texas Instruments και ο ADSP-2106x (4-bit μήκος) της Analog Devices.

On-chip A/D και D/A Μετατροπείς

Οι περισσότεροι DSP επεξεργαστές είναι αφιερωμένοι σε εφαρμογές ήχου, ειδικά σε ομιλία, όπως ψηφιακά τηλέφωνα ή αυτόματοι τηλεφωνητές. Για τον λόγο αυτό είναι εφοδιασμένοι με on-chip A/D-D/A μετατροπείς (converters) ή απο-κωδικοποιητές (codec).

Οι μετατροπείς αυτοί χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιότητες όπως είναι οι εξής :

- ❑ Μήκος λέξεων σε bits των δειγμάτων. Τυπική τιμή είναι 16-bits
- ❑ Συχνότητα δειγματοληψίας. Οι περισσότεροι codecs προσφέρουν συχνότητες δειγματοληψίας από 8 ksamples/sec μέχρι και 50 ksamples/sec.
- ❑ Signal-to-noise-plus-distortion ratio. Είναι ο αριθμός της ισχύς του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και παραμόρφωσης που εισάγει ο codec και δίνει την ποιότητα του codec. Τυπική τιμή είναι 65 dBs.
- ❑ Πλήθος καναλιών αναλογικών εισόδων. Πολλοί codecs παρέχουν έναν αναλογικό πολυπλέκτη που επιτρέπει στον DSP να εναλλάσσεται μεταξύ δύο off-chip αναλογικές συσκευές κάτω από τον έλεγχο του προγράμματος.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- ❑ Προγραμματιζόμενη ενίσχυση εξόδου. Γενικά οι codecs παρέχουν προγραμματιζόμενη ενίσχυση εξόδου αλλά η κλίμακα και το βήμα ποικίλουν από επεξεργαστή σε επεξεργαστή.
- ❑ Analog power-down. Είναι η δυνατότητα του επεξεργαστή να μπορεί να ρίξει την κατανάλωση των αναλογικών κυκλωμάτων όταν αυτά δεν χρησιμοποιούνται.

Οι επεξεργαστές DSP561xx της Motorola και ADSP-21msp5x της Analog Devices είναι γνωστοί για την δυνατότητα να παρέχουν on-chip A/D & D/A codecs.

Εξωτερικά Interrupts

Οι περισσότεροι DSPs παρέχουν γραμμές εισόδου για εξωτερικές διακοπές (interrupts).

Είναι pins που χρησιμοποιεί μια εξωτερική συσκευή για να δημιουργήσει μια αίτηση για διακοπή στον επεξεργαστή. Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- ❑ Edge-triggered, όπου έχουμε διακοπή στην άνοδο ή κάθοδο του παλμού διακοπής και
- ❑ Level-triggered, όπου έχουμε διακοπή όταν η λογική στάθμη του σήματος διακοπής είναι '1' ή '0'.

Το είδος της διακοπής που χρησιμοποιείται ποικίλει από επεξεργαστή σε επεξεργαστή, ενώ σε ορισμένους επεξεργαστές μπορούμε να καθορίσουμε το είδος διακοπής προγραμματιστικά. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται η edge-triggered μια και η level-triggered είναι δύσκολο να χειριστεί.

Οι γραμμές για εξωτερικές διακοπές που προσφέρουν οι επεξεργαστές ποικίλουν, αλλά κυμαίνονται μεταξύ μίας και τεσσάρων. Στην περίπτωση όμως των DSP-cores έχουμε πολύ μεγαλύτερο αριθμό τέτοιων γραμμών σε σχέση με τις ολοκληρωμένες λύσεις των DSP επεξεργαστών. Αυτό γιατί οι DSP-cores δεν έχουν on-chip περιφερειακές μονάδες, οι οποίες μπορεί να δεσμεύουν γραμμές διακοπών για την σύνδεση τους με το DSP-core.

Εκσφαλμάτωση

Η εκσφαλμάτωση, δηλαδή η διόρθωση των λαθών ενός προγράμματος (debugging), είναι ένα από τα πιο δύσκολα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, ειδικά όταν πρόκειται για ολοκληρωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου, όπου η πρόσβαση στα επιμέρους στοιχεία

είναι περιορισμένη. Σαν αποτέλεσμα, τα χαρακτηριστικά του DSP επεξεργαστή που διευκολύνουν την εκσφαλμάτωση, έχουν γίνει πολύ σημαντικά με την αύξηση της πολυπλοκότητας.

Μια από τις πιο σημαντικές καινοτομίες στο χώρο αυτό είναι η scan-based in-circuit emulation (ICE), η οποία συνδυάζει κύκλωμα εκσφαλμάτωσης πάνω στον επεξεργαστή, με διατιθέμενα pins ώστε να επιτρέπεται η εκσφαλμάτωση της λειτουργίας του DSP. Η scan-based εκσφαλμάτωση έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής τα τελευταία χρόνια στους DSPs, παρόλο που υπάρχουν στο προσκήνιο και άλλες μέθοδοι για το σκοπό αυτό.

Scan based debugging/emulation facility

Η scan-based emulation χρησιμοποιεί έναν μικρό αριθμό ακροδεκτών (όχι περισσότεροι από 4) και κυκλώματα πάνω στον επεξεργαστή για την in-circuit εκσφαλμάτωση. Συνήθως, τα scan-based interfaces συνδέονται με έναν υπολογιστή (PC ή σταθμό εργασίας) με μια ειδική κάρτα. Το software εκσφαλμάτωσης που εκτελείται στον προσωπικό υπολογιστή ή στο σταθμό εργασίας επιτρέπει στο χρήστη να κατεβάζει προγράμματα, να εξετάζει και να μεταβάλλει τις τιμές των καταχωρητών και της μνήμης, να θέτει και να εκκαθαρίζει τα σημεία διακοπής των διαδικασιών (set and clear breakpoints), και γενικά να επεμβαίνει στη λειτουργία του DSP.

Επιπλέον με τη χρήση scan-based εξομοίωσης δεν απαιτείται η αντικατάσταση του DSP επεξεργαστή από έναν εξομοιωτή (emulator) και το επιπρόσθετο με αυτόν hardware. Απλά, η κάρτα του PC που κάνει το debugging, συνδέεται μέσω ειδικής σύνδεσης (connector) απευθείας πάνω στο σύστημα, με αποτέλεσμα την καταστολή φυσικών και ηλεκτρικών προβλημάτων.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της scan-based εκσφαλμάτωσης είναι ότι το on-chip debugging κύκλωμα, παρέχει ορατότητα σε τμήματα της λειτουργίας του επεξεργαστή, κάτι που δεν είναι διαθέσιμο με τις συμβατικές pot-based τεχνικές. Για παράδειγμα, το scan-based κύκλωμα της Motorola επιτρέπει στο χρήστη να ελέγχει τα περιεχόμενα του pipeline του επεξεργαστή, μετά τη χρήση breakpoint.

2.6 Ισχύς, χρονισμός, και χαρακτηριστικά των DSPs

Κατανάλωση Ισχύος και Διαχείριση

Ο αριθμός των εφαρμογών για φορητά μηχανήματα με DSPs έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια. Οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος στις μέρες μας απαντώνται σε φορητές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές και οι συσκευές ήχου.

Όλες αυτές οι εφαρμογές τροφοδοτούνται από μπαταρία, της οποίας ο χρόνος ζωής διαφέρει για κάθε συσκευή. Σαν αποτέλεσμα, οι σχεδιαστές αναζητούν συνεχώς τρόπους για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος. Οι προμηθευτές των επεξεργαστών έχουν ανταποκριθεί στην πρόκληση της μείωσης της κατανάλωσης ισχύος με διάφορους τρόπους. Καταρχήν, σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές των DSPs, εισήγαγαν τους DSPs χαμηλής τάσης (low-voltage DSPs), ικανούς για λειτουργία στα 3.0 ή 3.3 Volt. Επιπλέον, πολλοί κατασκευαστές πρόσθεσαν κάποια χαρακτηριστικά διαχείρισης της ισχύος, τα οποία μειώνουν την κατανάλωση ισχύος μέσω του software ή του hardware. Και οι δύο αυτές προσεγγίσεις εξετάζονται στη συνέχεια.

Λειτουργία χαμηλής τάσης (low-voltage operation)

Ένα από τα πρώτα βήματα που έκαναν οι σχεδιαστές των DSP επεξεργαστών για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος, ήταν να μειώσουν την απαιτούμενη τροφοδοσία τάσης του επεξεργαστή. Ουσιαστικά, όλοι οι DSP επεξεργαστές που υπάρχουν σήμερα είναι κατασκευασμένοι χρησιμοποιώντας CMOS τεχνολογία (complementary metal oxide semiconductor), στην οποία η κατανάλωση ισχύος είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης. Οπότε για να μειωθεί η ισχύς θα πρέπει να μειωθεί η τάσης τροφοδοσίας.

Οι περισσότεροι DSP κατασκευαστές σήμερα προσφέρουν DSPs οι οποίοι χρησιμοποιούν ονομαστική τιμή τάσης τροφοδοσίας 3.3 V (τυπικά three-volt parts), η οποία μειώνει την κατανάλωση ισχύος περίπου κατά 56%, αναφορικά με τον ίδιο επεξεργαστή ο οποίος λειτουργεί στα 5.0 V. Μερικοί από τους επεξεργαστές χαμηλής τάσης (όπως αυτοί της AT&T και μερικοί της Texas Instruments) μπορούν να λειτουργήσουν με ονομαστική τιμή τάσης στα 3.0 V, μειώνοντας ακόμα περισσότερο την κατανάλωση ισχύος. Ας σημειώσουμε εδώ ότι χρησιμοποιούμε την λέξη «ονομαστική» (nominal) όταν αναφερόμαστε στην τροφοδοσία τάσης των DSP επεξεργαστών. Τυπικά, τα ηλεκτρικά στοιχεία όπως αυτά των DSP επεξεργαστών μπορούν να λειτουργήσουν μεταξύ κάποιων τιμών (συνήθως $\pm 10\%$) της τάσης τροφοδοσίας τους. Επομένως, μια ονομαστική συσκευή 3.3 V μπορεί στην πραγματικότητα να λειτουργήσει με τροφοδοσία τάσης από 3.0 V έως 3.6 V. Ομοίως, μια ονομαστική συσκευή 3.0 V μπορεί στην πραγματικότητα να λειτουργήσει με τροφοδοσία τάσης από 2.7 V έως 3.3 V. Στην προσπάθεια να κερδίσουν αγοραστικό πλεονέκτημα έναντι άλλων, κάποιοι προμηθευτές DSP επεξεργαστών, δηλώνουν ως ονομαστική τιμή την ελάχιστη τιμή τάσης τροφοδοσίας που μπορεί να λειτουργήσει ο επεξεργαστής. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση : αν κάποιο κομμάτι περιγράφεται ότι λειτουργεί στα 3.0 V, σημαίνει ότι η ονομαστική του τιμή είναι 3.0 V ή 3.3 V. Στη συνέχεια της αναφοράς μας, χρησιμοποιούμε ονομαστικές τιμές τάσης για κάθε περίπτωση.

Σε μερικές περιπτώσεις, οι DSP επεξεργαστές είναι στην πραγματικότητα κομμάτια 5.0 V, τα οποία είναι ικανά να λειτουργήσουν σε χαμηλότερη τάση. Σε αυτές τις περιπτώσεις η συχνότητα του ρολογιού του συστήματος πρέπει να ελαττωθεί έτσι ώστε να επιτρέπονται λειτουργίες σε χαμηλότερη τάση. Επίσης, οι κατασκευαστές των DSP ξεκίνησαν να εισάγουν «πραγματικές» εκδόσεις 3.0 V των επεξεργαστών τους, οι οποίοι είναι ικανοί να λειτουργήσουν σε πλήρη ταχύτητα στα 3.0 V ή 3.3 V.

Οι DSP επεξεργαστές που είναι διαθέσιμοι για λειτουργίες χαμηλής τάσης είναι οι AT&T DSP16xx και DSP32xx οικογένειες, οι Analog Devices ADSP-2103, ADSP-2173, ADSP-2183 και ADSP-2106x, οι DSP Group PipeDSPCore και OakDSPCore, ο IBM MDSP2780, οι Motorola DSP56L002 και DSP563xx, οι NEC μ PD77015, μ PD77017, και μ PD77018, ο SGS-Thomson D950-CORE και οι Texas Instruments TMS320LC3x, TMS320LC5x, TMS320VC54x, και TMS320C80.

Χαρακτηριστικά διαχείρισης της ισχύος

Επιπρόσθετα με τις λειτουργίες χαμηλής τάσης, πολλοί επεξεργαστές ενσωματώνουν χαρακτηριστικά διαχείρισης της ισχύος (power management features). Τα χαρακτηριστικά αυτά παρέχουν έλεγχο πάνω στη συχνότητα του ρολογιού του επεξεργαστή ή πάνω στο κομμάτι του επεξεργαστή το οποίο θα λάβει το σήμα του ρολογιού. Οι προσεγγίσεις αυτές λειτουργούν για δύο λόγους. Πρώτον, ένα CMOS κύκλωμα καταναλώνει ενέργεια με ρυθμό που είναι γραμμικά ανάλογο με τη συχνότητα του ρολογιού του. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα αυτή, τόσο μεγαλύτερη ισχύ καταναλώνει η συσκευή αυτή. Δεύτερον, όσο περισσότερα μέρη του ολοκληρωμένου είναι ενεργά, τόσο μεγαλύτερη ισχύ καταναλώνει η συσκευή. Επομένως, η μείωση του ρυθμού του ρολογιού ή ο περιορισμός των τμημάτων που δέχεται το ρολόι, μειώνει την κατανάλωση ισχύος.

□ Καταστάσεις ύπνου και αδράνειας (sleep and idle modes).

Οι καταστάσεις sleep (ή idle) τυπικά κλείνουν το ρολόι του επεξεργαστή σε όλα σχεδόν τα τμήματα του επεξεργαστή για να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος. Ενώ είναι αδρανής, ο επεξεργαστής δεν λειτουργεί. Απλά παραμένει αδρανής, περιμένοντας κάποιο γεγονός το οποίο θα τον επαναφέρει σε λειτουργία. Στις περισσότερες περιπτώσεις το γεγονός αυτό μπορεί να είναι κάποια διακοπή (interrupt). Αν η διακοπή αυτή προέρχεται από on-chip περιφερειακά, αυτό σημαίνει ότι τα περιφερειακά αυτά είναι ενεργά και δέχονται σήμα από το ρολόι, αυξάνοντας την κατανάλωση ισχύος. Ως αποτέλεσμα, κάποιοι επεξεργαστές έχουν δύο καταστάσεις αδράνειας : μία κατά την οποία τα on-chip περιφερειακά είναι ενεργά (και επομένως μπορούν να διακόψουν και να ενεργοποιήσουν τον επεξεργαστή) και μία κατά την

οποία τα on-chip περιφερειακά είναι απενεργοποιημένα. Στη δεύτερη περίπτωση, μόνο μία εξωτερική διακοπή (προερχόμενη από ένα ή δύο I/O pins) μπορεί να «ξυπνήσει» τον επεξεργαστή. Στην πραγματικότητα, κάποιοι DSPs μπορούν να επανέλθουν από μια τέτοια κατάσταση μόνο μέσω του σήματος επανεκκίνησης (reset pin).

Οι καταστάσεις αδράνειας συνήθως εισάγονται με την εκτέλεση μιας εντολής IDLE, ή τοποθετώντας ένα bit σε κάποιο καταχωρητή ελέγχου. Κάποιοι επεξεργαστές επίσης παρέχουν pins τα οποία μία εξωτερική συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει για να θέσει τον επεξεργαστή σε μείωση της ισχύος. Επεξεργαστές οι οποίοι έχουν pins μείωσης της ισχύος μπορούν επίσης να παρέχουν ένα pin αναγνώρισης αυτής της μείωσης στο εξωτερικό κύκλωμα ότι ο επεξεργαστής έχει εισέλθει σε κατάσταση αδράνειας.

Η ενεργοποίηση από την λανθάνουσα κατάσταση μπορεί να είναι πρόβλημα σε κάποιες εφαρμογές, αφού ουσιαστικά αναφερόμαστε στο χρόνο που απαιτεί ο επεξεργαστής για να εξέλθει από μια αδρανή κατάσταση και να αποκτήσει κανονική λειτουργία. Σε περιπτώσεις τις οποίες ο επεξεργαστής χρησιμοποιεί εξωτερικό ρολόι ως το κύριο ρολόι σήματος, η λειτουργία ενεργοποίησης χρειάζεται συνήθως ένα ή δύο κύκλους εντολών. Ένας επεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιον εσωτερικό ταλαντωτή σε συνδυασμό με έναν εξωτερικό κρύσταλλο για να παράγει το σήμα του ρολογιού. Σ' αυτή την περίπτωση, αν η αδρανής κατάσταση ενεργοποιήσει τον εσωτερικό ταλαντωτή, τότε μπορεί να χρειαστούν χιλιάδες (ή δεκάδες χιλιάδων) κύκλοι εντολών μέχρι να σταθεροποιηθεί ο ταλαντωτής. Ένα παρόμοιο πρόβλημα προκύπτει και με τις PLL (phase-locked loop) on-chip γεννήτριες : το κλείσιμο του PLL ελαττώνει την κατανάλωση ισχύος, αλλά το PLL μπορεί να χρειαστεί αρκετό χρόνο για να συγχρονιστεί όταν είναι απενεργοποιημένο.

Σε μια ακόμα προσπάθεια για να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος, κάποιοι επεξεργαστές (για παράδειγμα ο ADSP-2171 της Analog Devices και οι TMS320LC31 και TMS320C32 της Texas Instruments) παρέχουν καταστάσεις χαμηλού ρυθμού ρολογιού. Οι καταστάσεις αυτές ελαττώνουν την ισχύ, μειώνοντας την ταχύτητα του ρολογιού πριν να επέλθει αδράνεια στο σύστημα, από την άλλη όμως αυξάνουν τον χρόνο ενεργοποίησης.

□ Έλεγχος της συχνότητας του ρολογιού.

Πολλές εφαρμογές δεν απαιτούν την πλήρη ταχύτητα εκτέλεσης του επεξεργαστή για όλες τις φορές. Για παράδειγμα, τα ψηφιακά ασύρματα τηλέφωνα ξοδεύουν την περισσότερη ώρα τους σε κατάσταση αδράνειας. Ακόμα και όταν είναι σε λειτουργία, μπορεί να χρειάζονται πλήρη επεξεργαστική ισχύ μόνο όταν η μία από τις δύο πλευρές μιλάει και όχι κατά τη διάρκεια των παύσεων.

Για να εκμεταλλευτούν αυτή την παρατήρηση, κάποιοι κατασκευαστές των DSPs επιτρέπουν στον προγραμματιστή κάποιου είδους software έλεγχο πάνω στο κεντρικό ρολόι

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

του επεξεργαστή. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα συμβιβασμό μεταξύ λειτουργίας πλήρους ισχύος και αδρανούς καταστάσεως, εφόσον ο DSP ακόμα εκτελεί λειτουργίες και καταναλώνει ισχύ, σε μειωμένο ρυθμό.

Οι δύο πιο συνηθισμένοι μηχανισμοί ελέγχου του ρολογιού είναι οι διαιρέτες ρολογιού (clock dividers) και οι πηγές χαμηλού ρυθμού ρολογιού (low-speed clock sources). Ένας διαιρέτης ρολογιού επιτρέπει την ελάττωση του ρυθμού του συστήματος με κάποιο προγραμματιζόμενο παράγοντα, γεγονός το οποίο ελαττώνει το ρυθμό εκτέλεσης του επεξεργαστή και την κατανάλωση ισχύος. Για παράδειγμα, η οικογένειες DSP5600x και DSP56166 της Motorola παρέχουν διαιρέτες ρολογιού των τεσσάρων - bit έτσι ώστε να επιτρέπεται η διαίρεση της συχνότητας του κεντρικού ρολογιού σε μία από δεκαέξι τιμές που κυμαίνονται από 1 έως 65,536 σε δυνάμεις του 2. Ομοίως, ο πυρήνας της DSP Group's PINE (PineDSPCore and OakDSPCore) ενσωματώνει ένα παρόμοιο κύκλωμα διαίρεσης της συχνότητας του ρολογιού. Οι οικογένειες επεξεργαστών TMS320LC31 και TMS320C32 της Texas Instruments έχουν μια LOPOWER εντολή η οποία μειώνει τη συχνότητα του ρολογιού κατά 16 φορές.

Κάποιοι επεξεργαστές (για παράδειγμα κάποια μέλη της AT&T DSP16xx οικογένειας) χρησιμοποιούν χαμηλής ταχύτητας on-chip ταλαντωτές στη θέση του κύριου ρολογιού. Αν και αυτή η μέθοδος δεν είναι τόσο ευέλικτη όπως η χρήση των διαιρετών της συχνότητας του ρολογιού, παρόλα αυτά, είναι ικανοποιητική σε πολλές εφαρμογές.

Περιφερειακά και έλεγχος I/O.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όσο περισσότερα κυκλώματα CMOS τροφοδοτούνται από σήμα ρολογιού, τόσο μεγαλύτερη ισχύ καταναλώνει το ολοκληρωμένο. Επειδή σε πολλές εφαρμογές δεν γίνεται πλήρης χρήση (ή πλήρη ταυτόχρονη χρήση) όλων των on-chip περιφερειακών, σχεδόν όλοι οι DSPs παρέχουν τρόπους για να απενεργοποιούν τα περιφερειακά που δεν χρησιμοποιούνται.

Επιπρόσθετα, τα αναλογικά μέρη κάποιων περιφερειακών, όπως οι on-chip A/D και D/A μετατροπείς, μπορεί να καταναλώνουν ισχύ ακόμα και όταν το ψηφιακό τους μέρος δεν δέχεται ρολόι. Για να αποφευχθεί αυτό, κάποιοι DSPs έχουν ειδικές καταστάσεις μείωσης της ισχύος για το αναλογικό του κυκλώματος. Επεξεργαστές με αυτή τη δυνατότητα παρουσιάζουν οι οικογένειες της Analog Devices ADSP-21msp5x και της Motorola DSP561xx.

Απενεργοποίηση των αχρησιμοποίητων εξωτερικών ακίδων (pins.)

Ένας αριθμός DSP ολοκληρωμένων παρέχουν ένα εξωτερικό pin ρολογιού. Το pin αυτό παρέχει ένα τετραγωνικό παλμό στη συχνότητα του κεντρικού ρολογιού του επεξεργαστή (ή μια συχνότητα πλησίον αυτής, για παράδειγμα το μισό της συχνότητας του κεντρικού ρολογιού) και έχει σκοπό να παρέχει ένα συγχρονισμένο σήμα με αυτό του κεντρικού ρολογιού για χρήση από κάποιο εξωτερικό κύκλωμα.

Κάποιοι DSP επεξεργαστές μπορούν επιλεκτικά να απενεργοποιήσουν το εξωτερικό αυτό pin. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση της ισχύος που καταναλώνει ο επεξεργαστής. Μάλιστα το ποσοστό της ισχύος που κερδίζεται εξαρτάται από τη χωρητικότητα του φορτίου εξόδου του clock pin. Επιπλέον, η απενεργοποίηση του εξωτερικού pin, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που δημιουργείται από τον DSP. Παραδείγματα επεξεργαστών οι οποίοι μπορούν να απενεργοποιούν τις γραμμές εξωτερικού ρολογιού είναι οι οικογένειες της Motorola DSP5600x και DSP56166 και η οικογένεια DSP16xx της AT&T.

Θέματα χρονισμού (Clocking)

Οι DSPs, όπως όλα τα ασύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα, χρησιμοποιούν ρολόι για να συγχρονίζουν τις λειτουργίες τους. Το σήμα του ρολογιού είναι ένας τετραγωνικός παλμός γνωστής συχνότητας. Η άνοδος ή η πτώση αυτού του παλμού χρησιμεύει στο συγχρονισμό των λειτουργιών του επεξεργαστή.

Το σήμα με τη μέγιστη συχνότητα του ρολογιού που βρίσκεται στον επεξεργαστή, ονομάζεται 'κύριο ρολόι' (master clock). Τυπικά οι επεξεργαστές DSP έχουν master clock σε περιοχές συχνοτήτων από 10 μέχρι 100MHz. Συνήθως, όλες οι άλλες χαμηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στον επεξεργαστή, λαμβάνονται από το master clock. Σε μερικούς επεξεργαστές, η συχνότητα του κυρίως ρολογιού, μπορεί να είναι η ίδια με το ρυθμό εκτέλεσης εντολών. Τέτοιου τύπου επεξεργαστές ονομάζονται 1X clock. Σε άλλους επεξεργαστές, το κυρίως ρολόι, μπορεί να είναι δύο ή τέσσερις φορές υψηλότερο από το ρυθμό εκτέλεσης εντολών. Έτσι, πολλαπλοί κύκλοι ρολογιού απαιτούνται για κάθε κύκλο εντολής. Αυτοί οι επεξεργαστές, λέγεται ότι έχουν 2X ή 4X clock. Έτσι, η συχνότητα ρολογιού δεν είναι ίδια με το ρυθμό εκτέλεσης εντολών (MIPS). Για να αποφύγουμε μπερδέματα, όταν αναφερόμαστε σε clock rate θα εννοούμε συχνότητα input clock, ενώ σε διαφορετική περίπτωση, θα αναφερόμαστε σε MIPS.

Το κύριο ρολόι ενός επεξεργαστή τυπικά έρχεται από ένα εξωτερικό σήμα ρολογιού, ή παράγεται από εξωτερικό κρύσταλλο. Εάν χρησιμοποιήσουμε εξωτερικό κρύσταλλο, ο επεξεργαστής DSP θα πρέπει να τροφοδοτεί έναν ταλαντωτή on chip, ο οποίος θα κάνει τον κρύσταλλο να ταλαντώνει. Οι DSP επεξεργαστές, που δεν έχουν ενσωματωμένο ταλαντωτή, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν ένα εξωτερικά παραγόμενο σήμα. Εάν αυτό διατίθεται στην

επιθυμητή συχνότητα, τότε δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα. Αλλιώς θα πρέπει να παραχθεί εξωτερικά το σήμα χρησιμοποιώντας εξωτερικό ταλαντωτή, διαδικασία σχετικά φτηνή που οδηγεί σε οικονομία χώρου και κατανάλωσης.

Μεγάλος αριθμός από DSP επεξεργαστές σήμερα, έχουν ενσωματωμένους συνθετές συχνοτήτων (frequency synthesizer). Λέγονται και βρόχοι κλειδωμένης φάσης (phase loop locked PLL), και παράγουν υψηλής ταχύτητας συχνότητα κύριου ρολογιού, από σήμα εισόδου μικρότερης συχνότητας. Σε μερικούς επεξεργαστές, όπως ο ADSP-2171 της Analog Devices και ορισμένα μέλη της οικογένειας TMS320C5x της Texas Instruments, η συχνότητα εισόδου πρέπει να είναι το μισό της απαιτούμενης συχνότητας ρολογιού. Τα ολοκληρωμένα αυτά έχουν ενσωματωμένους διπλασιαστές συχνότητας (clock doublers). Άλλοι επεξεργαστές είναι πιο 'ευέλικτοι' σε συχνότητες εισόδου. Παράδειγμα, ο TMS320C541 της Texas Instruments, διαθέτει PLL που παράγει σήμα ρολογιού με συχνότητα εισόδου 1/3, 1/2, 2/3, 1 ή 2 φορές επιθυμητό ρυθμό εκτέλεσης εντολών.

Μερικοί επεξεργαστές διαθέτουν εξαιρετικά εύκαμπτες γεννήτριες ρολογιού. Για παράδειγμα, σε μερικά μέλη της σειράς DSP5600x, DSP561xx, της Motorola, ο συνθέτης συχνότητας μπορεί να παράγει υψηλής ταχύτητας συχνότητα κύριου ρολογιού, χρησιμοποιώντας πολύ χαμηλή συχνότητα εισόδου. Παράδειγμα ο συνθέτης συχνότητας του επεξεργαστή DSP560002 μπορεί να παράγει 40MHz από μόλις 10kHz συχνότητα εισόδου. Οι ενσωματωμένοι συνθέτες, όχι μόνο απλοποιούν τη σχεδίαση και υποβιβάζουν το κόστος, αλλά μειώνουν επιπλέον και την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση που παράγεται από σήματα υψηλής συχνότητας.

2.7 Κόστος και Συσκευασία

Ανάλογα με την εφαρμογή, η σημασία της τιμής του επεξεργαστή DSP μπορεί να ποικίλλει από σχετικά σημαντική, έως κρίσιμα σημαντική. Σε μερικές εφαρμογές, οι DSP κοστίζουν ένα μικρό μέρος του κόστους του συνολικού συστήματος, ενώ σε άλλες, ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους της συσκευής. Σε μερικές εφαρμογές, όπως σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά ή στη βιομηχανία των προσωπικών υπολογιστών (PC), η έντονη αγοραστικότητα ρίχνει το κόστος.

Στην ενότητα αυτή δίνουμε παραδείγματα κόστους αρκετών επεξεργαστών, και περιγράφουμε τα είδη των συσκευασιών (IC packages), με τα οποία αυτοί διατίθενται.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Ο πίνακας 3 δείχνει τιμές για πλήθος αγοράς 1000 επεξεργαστών. Οι τιμές είναι του Ιουνίου του 1995. Οι επεξεργαστές που επελέγησαν είναι οι ελάχιστοι από την κάθε οικογένεια. Από τον πίνακα είναι φανερό ότι οι τιμές των DSP μεταβάλλονται από \$6 (για τον TMS320C16 της Texas Instruments) σε \$450 (για τον πολυεπεξεργαστή TMS320C80). Ο ρυθμός εκτέλεσης εντολών ποικίλλει από 8.8MIPS (στον TMS320C16) μέχρι 70 MIPS (στον AT&T DSP1627). Τόσο η απόδοση, όσο και η τιμή, μεταβάλλονται σε μεγάλο εύρος. Γενικά, οι floating-point επεξεργαστές είναι ακριβότεροι από τους fixed-point, όμως η χαμηλή τιμή της σειράς TMS320C31 της Texas, έχει γίνει αφορμή να ευρύνεται η χρήση floating-point, έναντι των fixed-point. Πρέπει να σχολιάσουμε αρκετά πράγματα σχετικά με τις τιμές που σημειώνονται στον πίνακα 3. Καταρχήν, οι τιμές που φαίνονται είναι για ποσότητα 1000 τεμαχίων. Για ακόμη μεγαλύτερες ποσότητες, οι τιμές μειώνονται και άλλο. Επίσης, με την πάροδο του χρόνου, οι τιμές χαμηλώνουν. Έτσι οι τιμές που αναφέρονται στον πίνακα, χρησιμεύουν περισσότερο για σύγκριση. Τέλος, επιπρόσθετα με όσα αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, μπορεί να είναι διαθέσιμα άλλα μέλη οικογενειών και άλλοι τύποι πακεταρίσματος, οι τιμές των οποίων μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από αυτές που αναφέρονται στον πίνακα. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα διατίθενται σε διαφορετικές συσκευασίες. Τα χαρακτηριστικά συσκευασίας για μερικά ολοκληρωμένα αναφέρονται στον πίνακα 4. Η συσκευασία παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή του ολοκληρωμένου. Έτσι, ο TMS320C30 επεξεργαστής, σε συσκευασία PGA κοστίζει διπλάσια από τη συσκευασία σε PQFP.

Γενικά η PQFP συσκευασία είναι η φτηνότερη, για ολοκληρωμένα με μεγάλο αριθμό ακίδων. Η CQFP συσκευασία είναι η πιο ακριβή από την πλαστική, αλλά μπορεί και αποχρετεύει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας. Οι συσκευασίες PLCC, DIP είναι ακριβές, αλλά είναι κατάλληλες για ολοκληρωμένα με μικρό αριθμό ακίδων.

Λεπτομέρειες Κατασκευής

Αν και συνήθως είναι δευτερεύουσας σημασίας, οι πληροφορίες σχετικά με τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες των DSP, μπορούν να μας δώσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την αποτίμηση των DSP επεξεργαστών. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά, τα οποία χαρακτηρίζουν τη διαδικασία της κατασκευής για ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα, είναι το feature size, και η τάση λειτουργίας (operating voltage). Σε αυτό το κεφάλαιο ασχολούμαστε με αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς και με άλλα που σχετίζονται με τη διαδικασία της κατασκευής.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Κατασκευαστής	Επεξεργαστής	Ταχύτητα (MIPS)	Τιμή (Τεμάχια. 1000)	Pin Count & Package
Analog Devices	ADSP-2171	33.3	\$38,00	128 PQFP
	ADSP-21062	40.0	\$249,00	240 PQFP
AT&T	DSP1627	70.0	\$49,80	100 PQFP
	DSP3207	20.0	\$60,00	132 PQFP
Motorola	DSP56002	40.0	\$38,20	144 TQFP
	DSP56166	30.0	\$35,89	112 TQFP
	DSP96002	20.0	\$156,9	223 PGA
NEC	μPD77015	33.3	\$17,23	100 TQFP
Texas Instruments	TMS320C16	8.8	\$6,06	64 PQFP
	TMS320C25	12.5	\$12,30	80 PQFP
	TMS320C209	28.6	\$14,00	80 PQFP
	TMS320C31	25.0	\$54,10	132 PQFP
	TMS320C44	30.0	\$158,40	304 PQFP
	TMS320C52	50.0	\$22,80	100 PQFP
	TMS320C541	50.0	\$43,95	100 PQFP
	TMS320C80	50.0	\$450,00	305 PQFP
Zoran	ZR38001	33.3	\$42,00	128 PQFP

Πίνακας 3. Αντιπροσωπευτικές τιμές 1000 δειγμάτων DSPs.

Package	Description	Comments
BGA	Ball Grid Array	Similar to PGA, but for surface mount; expensive; used for high-pin-count devices
BQFP	Bumpered Quad Flat Pack	PQFP with nubs (“bumpers”) on corners
CQFP	Ceramic Quad Flat Pack	Better heat dissipation than PQFP
DIP	Dual In-Line Package	Inexpensive; Usable up to about 40 pins
MQFP	Metal Quad Flat Pack	Better heat dissipation than PQFP
PGA	Plastic Grid Array	Usually most expensive; not surface mount
PLCC	Plastic Leaded Carrier Chip	Inexpensive; usable up to about 68

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

		pins
PQFP	Plastic Quad Flat Pack	Inexpensive; most popular
SQFP	Shrunken Quad Flat Pack	Another name for TQFP
TQFP	Thin Quad Flat Pack	Thinner version of PQFP

Πίνακας 4. Διαδεδομένες IC συσκευασίες.

Μέγεθος Χαρακτηριστικών (feature size)

Το μέγεθος των χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται σαν μια γενική ένδειξη της πυκνότητας μιας διαδικασίας κατασκευής ολοκληρωμένων. Συνήθως αναφέρεται στο ελάχιστο μέγεθος ενός συγκεκριμένου τύπου στοιχείου πυριτίου (feature). Συγκεκριμένα, αναφέρεται στο ελάχιστο μήκος του καναλιού ή της ενεργού περιοχής ενός MOS τρανζίστορ. Τα μεγέθη των άλλων δομών πάνω στο ολοκληρωμένο είναι συνήθως ανάλογα του ελάχιστου μήκους καναλιού του τρανζίστορ. Οι διαδικασίες κατασκευής που χρησιμοποιούνται ευρύτερα σήμερα, έχουν μέγεθος χαρακτηριστικών της τάξης των 0.6 ή 0.8 μm , ενώ κάποιες κατασκευαστές παρέχουν διαδικασίες κατασκευής της τάξης των 0.5 μm .

Μικρότερο μέγεθος χαρακτηριστικών (feature size) σημαίνει μικρότερη περιοχή ολοκληρωμένου, η οποία με τη σειρά της μεταφράζεται σε καλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Το χαμηλότερο κόστος κατασκευής είναι εφικτό, γιατί μπορούν να κατασκευαστούν περισσότερα ολοκληρωμένα χρησιμοποιώντας ένα απλό *wafer* (δίσκος πυριτίου ολοκληρωμένου) συγκεκριμένου μεγέθους. (Πάνω σε ένα *wafer* μπορούν να κατασκευαστούν πολλά ολοκληρωμένα και στη συνέχεια να διαχωριστούν και να τοποθετηθούν σε ξεχωριστά πακέτα.) Για να βελτιώσουμε τις επιδόσεις χρησιμοποιούμε γρηγορότερα τρανζίστορ, μικρότερες καλωδιώσεις και μικρότερη χωρητικότητα, η οποία προκύπτει από τη μείωση του μεγέθους των συσκευών που υπάρχουν στο ολοκληρωμένο.

Βεβαίως, η απόδοση και η τιμή πώλησης ενός επεξεργαστή καθορίζονται από τον κατασκευαστή, επομένως ο σχεδιαστής του συστήματος δε χρειάζεται να γνωρίζει τις λεπτομέρειες της διαδικασίας κατασκευής. Οι κατασκευαστές συνήθως δημιουργούν βελτιωμένες εκδόσεις κάποιων επεξεργαστών μετατρέποντας τη διαδικασία κατασκευής. Αναλύοντας την επίδοση και το κόστος ενός επεξεργαστή ο οποίος χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη διαδικασία κατασκευής και έχοντας υπόψη μας την τεχνολογία κατασκευής που χρησιμοποιείται, μπορούμε να καταλάβουμε την απαίτηση για γρηγορότερες και φθηνότερες εκδόσεις αυτού του επεξεργαστή. Για παράδειγμα, αν ένας συγκεκριμένος επεξεργαστής είναι μόνο πολύ γρήγορος και κατασκευασμένος με μια παλαιότερη

διαδικασία, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να γίνουν βελτιώσεις στον τρόπο παρασκευής του επεξεργαστή.

Τάση Λειτουργίας

Μέχρι πρόσφατα, όλοι οι DSP επεξεργαστές χρησιμοποιούσαν ως τάση λειτουργίας τα 5 V, η οποία είναι η πιο συνηθισμένη τάση τροφοδοσίας για τα ψηφιακά κυκλώματα. Τα τελευταία χρόνια, οι κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ειδικότερα οι κατασκευαστές DSP επεξεργαστών, άρχισαν να παράγουν στοιχεία τα οποία λειτουργούν με τάση τροφοδοσίας περίπου στα 3 V. Επειδή η κατανάλωση ισχύος των MOS κυκλωμάτων είναι ακριβώς ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας, η μείωση της τάσης τροφοδοσίας από τα 5 V στα 3.3 V έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κατανάλωσης ισχύος κατά 56%. Ειδικότερα στις μικρές τροφοδοτούμενες από μπαταρία συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, η μείωση της τάσης τροφοδοσίας επιφέρει τεράστια διαφορά για τους σχεδιαστές παραγωγής. Ελάττωση της κατανάλωσης ισχύος σε ένα DSP επεξεργαστή, αυτομάτως σημαίνει αύξηση του χρόνου λειτουργίας με μια συγκεκριμένη μπαταρία, αφού ο DSP είναι συνήθως ένας από τους πιο σημαντικούς καταναλωτές ισχύος σε αυτά τα συστήματα.

Μέγεθος Επιφάνειας

Ένα ακόμα φυσικό χαρακτηριστικό με μεγάλη σημασία είναι το μέγεθος επιφάνειας του επεξεργαστή (die size). Το μέγεθος της επιφάνειας, είναι το πραγματικό μέγεθος του chip πυριτίου το οποίο περιέχει την κυκλωματική διάταξη του επεξεργαστή. Τα chip με μεγαλύτερα μεγέθη επιφάνειας είναι πιο ακριβά για να κατασκευαστούν και μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερα και πιο ακριβά πακέτα συσκευασίας.

Τα μεγέθη επιφάνειας συνήθως καθορίζονται σε mm², παρά το γεγονός ότι για ιστορικούς λόγους μερικές φορές αναφέρονται σε τετραγωνικά *mils*. Το 1 mil είναι το ένα χιλιοστό μιας ίντσας, ή περίπου 0.25 mm. Το τυπικό μέγεθος ενός DSP επεξεργαστή κυμαίνεται από 7 επί 7 mm έως 15 επί 15 mm. Για έναν DSP πυρήνα ο οποίος χρησιμοποιείται ως βασική μονάδα σε ένα συνηθισμένο ASIC, το μέγεθος της επιφάνειας έχει σημαντική επίδραση στο ολικό μέγεθος του ASIC. Ή, αν το δούμε από άλλη σκοπιά, αν το ολικό μέγεθος του ASIC πρέπει να περιοριστεί (για να επιτευχθεί ο στόχος του κόστους κατασκευής), τότε το μέγεθος επιφάνειας του πυρήνα υπαγορεύει πόση περιοχή πυριτίου στο chip έχει περισσέψει για τα συνηθισμένα χαρακτηριστικά. Το μέγεθος των DSP πυρήνων κυμαίνεται από 3.9 mm² (για το Clarkspur Design CD2400 σε τεχνολογία 0.8 μm CMOS) έως 10 mm² (για το SGS - Thomson D950-CORE σε τεχνολογία 0.5 μm CMOS).

Επιλογή της αρχιτεκτονικής του επεξεργαστή

Αν και εκ πρώτης όψεως οι αρχιτεκτονικές των επεξεργαστών δε φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά, με μια πιο επισταμένη ματιά διαπιστώνει κανείς η αρχιτεκτονική και οι διαφοροποιήσεις της, σχετίζονται με σημαντικά χαρακτηριστικά των DSPs. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η ευκολία ανάπτυξης και προγραμματισμού, η δομή του chip και τα επίπεδα ολοκλήρωσης που προσφέρει. Εστιάζοντας σε αυτές τις παραμέτρους είναι πιο εύκολο να κατανοήσει κανείς τις διαφορές ανάμεσα στους DSPs.

Η εκτίμηση μιας αρχιτεκτονικής συναρτάται πάντα με τις ανάγκες και τα όρια της εφαρμογής που πρόκειται να υλοποιηθεί. Αν πρωταρχικό ρόλο παίζει το να κυκλοφορήσει ένας DSP γρήγορα στην αγορά, συνίσταται η επιλογή ενός floating-point επεξεργαστή, προκειμένου να σχεδιαστεί σε σύντομο χρονικό διάστημα το software. Αν όμως ο παράγοντας του κόστους κριθεί σημαντικότερος, τότε λογικά θα προταθούν οικονομικότερες λύσεις με τίμημα τις επιδόσεις και τη λειτουργικότητα. Αν περισσότερο πάλι ενδιαφέρει η κατανάλωση ενέργειας, επιλέγεται ένας DSP χαμηλής τροφοδοσίας που εξυπηρετεί αποκλειστικά τη συγκεκριμένη εφαρμογή και μόνο αυτή. Αυτά είναι τα σημαντικότερα κριτήρια και το ζητούμενο είναι η επίτευξη του βέλτιστου συνδυασμού σε σχέση πάντα με τις προδιαγραφές.

Κάθε αρχιτεκτονική έχει τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της, και υπερέχει έναντι των υπολοίπων αρχιτεκτονικών μόνο σε συγκεκριμένα σημεία. Ένα τέτοιο είναι για παράδειγμα η ταχύτητα λειτουργίας. Ακόμα και με συγκρίσιμους κύκλους εντολής, η ταχύτητα από μοντέλο σε μοντέλο μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Δεν είναι τόσο απλό να διακρίνει κανείς τις πραγματικές διαφορές στη λειτουργία των διάφορων DSPs. Μέτρα σύγκρισης όπως τα MIPS (millions instructions per second) και MFLOPS (millions of floating-point operations per second), είναι στην πραγματικότητα πλασματικά και δεν αποτυπώνουν αντικειμενικά τη διαφορά στον τρόπο λειτουργίας, κατά τη διάρκεια ενός απλού κύκλου εντολής. Αν και κάποιες διαδικασίες / λειτουργίες αναφοράς (benchmarks), αν υλοποιηθούν σωστά δίνουν σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα, μ'όλα ταύτα δεν αποτελούν πανάκεια και καλό θα ήταν τα αποτελέσματά τους να μη γίνονται a priori δεκτά. Θα πρέπει να γνωρίζουμε με λεπτομέρεια το τι ακριβώς μετράει το κάθε benchmark και με ποιον τρόπο, ώστε να μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε ως μέτρο σύγκρισης.

Επιπρόσθετα ο σχεδιαστής δεν πρέπει να ξεχνά, ότι στοιχεία των DSPs όπως τα πακέτα ανάπτυξης και προγραμματισμού ή οι λειτουργίες εισόδων και εξόδων, δεν μπορούν να συνυπολογιστούν κατά τη χρήση των benchmarks. Επομένως οφείλει κανείς πριν καταλήξει σε κάποιον επεξεργαστή, να λαμβάνει υπόψη του τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του.

2.8 Σύγχρονες τάσεις στους DSPs

Πριν από 20 περίπου χρόνια φτιάχτηκαν οι πρώτοι DSPs από μηχανικούς που ασχολούνταν μέχρι τότε με την επεξεργασία σήματος και όχι με την τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών. Η δημιουργία των DSPs αυτών είχε να κάνει όχι τόσο με την εξειδίκευση των επεξεργαστών γενικού σκοπού, όσο με την ανάπτυξη και την εξέλιξη των ειδικής λειτουργίας επεξεργαστών σήματος.

Παραδόξως από τότε λίγα έχουν αλλάξει στη φιλοσοφία σχεδιασμού των DSPs. Ο DSP16xx της AT&T λόγω χάρη, φανερώνει ξεκάθαρα την προέλευσή του : η αρχιτεκτονική του ανεπαίσθητα διαφέρει από τον πρόγονό του DSP1 που φτιάχτηκε το 1979. Παρόμοια είναι και η περίπτωση των TMS320C5x και TMS32010 της Texas Instruments. Παρά το ότι τα τελευταία 15 χρόνια έγιναν πολλές βελτιώσεις στην αρχιτεκτονική των DSPs, η μόνη ουσιαστική εξέλιξη είναι η δημιουργία των floating-point επεξεργαστών. Μέχρι τις μέρες μας το υψηλό κόστος των floating-point DSPs καθιστά ανέφικτη την ευρεία εφαρμογή τους στα embedded συστήματα, τα οποία παραδοσιακά είναι το προπύργιο των fixed-point DSPs. Η πρόβλεψη για το άμεσο μέλλον είναι ότι η οικογένεια των floating-point επεξεργαστών θα γίνει οικονομικά πιο προσεγγίσιμη, αλλά οι fixed-point επεξεργαστές θα εξακολουθήσουν να κατέχουν τη μερίδα του λέοντος στην αγορά.

Πάντως παρά τις φαινομενικές ομοιότητες των προγενέστερων μοντέλων με τα νέα, δεν παύουν να υπάρχουν και τα νέα στοιχεία που διαφοροποιούν λιγότερο ή περισσότερο τις αρχιτεκτονικές. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Greencore της Infinite Solutions, του οποίου η φιλοσοφία ξεφεύγει αρκετά από τις παραδοσιακές κατευθύνσεις. Στο μέλλον προβλέπονται περαιτέρω εξελίξεις στην αρχιτεκτονική των DSPs, που θα σχετίζονται με τις τεχνολογίες RISC (μικρότερο και πιο ευέλικτο set εντολών) και VLIW (μεγάλο μήκος λέξης εντολής) ή και συνδυασμούς τους.

Προκλήσεις της αγοράς

Παραδοσιακά οι DSPs έβρισκαν και βρίσκουν εφαρμογή στο πεδίο των embedded συστημάτων. Τα modems ήταν για παράδειγμα, από τις πρώτες εφαρμογές των DSPs και σήμερα εξακολουθούν να αποτελούν μια από τις βασικότερες. Οι επεξεργαστές χρησιμοποιήθηκαν ακόμα στις περιοχές της μουσικής τεχνολογίας, της σύνθεσης φωνής και του ελέγχου με σερβομηχανισμούς. Τελευταία χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές συμπίεσης φωνής. Η εφαρμογή τους σε αυτό το πεδίο έχει ιδιαίτερη σημασία στις μέρες μας, που τα σύγχρονα standards ασύρματης επικοινωνίας είναι πολύ πιο απαιτητικά από τα παλαιότερα και ως εκ τούτου η χρησιμοποίηση των DSPs καθίσταται επιτακτική.

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η αγορά των embedded συστημάτων, οι κατασκευαστές πρέπει να αποφύγουν την πρόκληση να εφοδιάζουν τους επεξεργαστές τους με επιπρόσθετα χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Και τούτο διότι για τον καταναλωτή προέχει η διατήρηση του χαμηλού κόστους και η μικρή κατανάλωση ενέργειας.

Στον αντίποδα του παραπάνω, οι κατασκευαστές δεν πρέπει να αγνοούν το γεγονός ότι οι DSPs χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, η κάθε μια από τις οποίες έχει ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Κάποιοι κατασκευαστές προκειμένου να ανταποκριθούν στο παραπάνω, δημιούργησαν DSPs που βασίζονται στον ίδιο βασικό πυρήνα και με κατάλληλες επεμβάσεις αναπροσαρμόζουν τη λειτουργία τους. Άλλοι πάλι συνοδεύουν τον επεξεργαστή με ξεχωριστές διατάξεις που επιτελούν τις διάφορες ειδικές λειτουργίες. Άλλοι πάλι παρέχουν το βασικό πυρήνα με βάση τον οποίο ο σχεδιαστής μπορεί να δημιουργήσει το τελικό ολοκληρωμένο, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους σκοπούς της κάθε ASIC διάταξης. Καθώς ο κύριος πυρήνας του επεξεργαστή παραμένει ο ίδιος, τόσο ο κατασκευαστής όσο και ο χρήστης μπορούν να βελτιστοποιήσουν τα διάφορα εργαλεία προγραμματισμού και ανάπτυξης και να εκμεταλλευτούν στο μέγιστο βαθμό τις δυνατότητες του κάθε DSP.

Μια άλλη εξέλιξη στο χώρο των DSPs, προέρχεται από την ανάγκη της αγοράς για μικρή κατανάλωση ενέργειας. Κι αυτό γιατί όλο και περισσότερες φορητές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες, περιέχουν DSPs. Ήδη πολλοί επεξεργαστές λειτουργούν στα 3,3 ή και στα 3 Volts και αναμένεται στο μέλλον περαιτέρω μείωση της τάσης τροφοδοσίας, με παράλληλη ενσωμάτωση στους DSPs τεχνικών ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας.

Ανταγωνισμός

Ένα βασικό στοιχείο ανταγωνισμού για τους DSPs ήταν πάντοτε το είδος των κυκλωμάτων που χρησιμοποιούσαν, αν δηλαδή θα ήταν αναλογικά, ψηφιακά ή συνδυασμός και των δύο. Για να ανταποκριθούν οι κατασκευαστές επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους σε ζητήματα όπως η ταχύτητα λειτουργίας και το χαμηλό κόστος, υποβαθμίζοντας την ίδια στιγμή άλλα όπως οι διασυνδέσεις I/O και η μνήμη. Δεδομένου ότι ο ανταγωνισμός αφορά την κυκλωματική υλοποίηση, θεωρείται εκ των προτέρων ότι ο επεξεργαστής θα προγραμματίζεται σε assembly, αφού έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση.

Δεδομένης της επικράτησης των embedded συστημάτων, ενδεχομένως θα προέκυπτε και ένα νέο στοιχείο ανταγωνισμού, αυτό του υψηλού βαθμού σύνθεσης και ολοκλήρωσης στις ASIC εφαρμογές. Σε γενικές γραμμές ένα σχεδιαστικό εργαλείο (π.χ το DSPstation της Mentor Graphics), θα μπορούσε να υποκαταστήσει τον επεξεργαστή με πολυμορφικές ρυθμιζόμενες διατάξεις, αφού θα παρείχε στο σχεδιαστή ένα αμεσότατο πρόγραμμα διασύνδεσης και επικοινωνίας. Το παραπάνω στοιχείο ανταγωνισμού όμως δεν υφίσταται

στην πράξη, αφενός επειδή προέκυψαν καθοριστικά τεχνικά προβλήματα (τα εναλλακτικά εργαλεία σύνθεσης δουλεύουν μόνο σ'ένα μικρό πεδίο εφαρμογών) και αφετέρου επειδή οι ρυθμιζόμενες διατάξεις κοστίζουν πολύ ακριβότερα από τους DSPs, λόγω της μαζικής παραγωγής των τελευταίων.

Υποστηρίζεται από μερικούς ότι οι υψηλής λειτουργικότητας μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού, μπορεί να ανταγωνιστούν τους DSPs. Κάτι τέτοιο όμως μάλλον δεν ισχύει για τα embedded συστήματα, με μόνη εξαίρεση ίσως εκείνα που χρησιμοποιούν floating-point επεξεργαστές. Παρά το ότι πολλοί μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού διαθέτουν χαρακτηριστικά που συνήθως απαντώνται στους DSPs (π.χ γρήγορους πολλαπλασιαστές), η εφαρμογή τους σε embedded συστήματα είναι οικονομικά ασύμφορη. Το υψηλό κόστος τους οφείλεται στα πρόσθετα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι τα σύνθετα κυκλώματα floating-point αριθμητικής με προηγμένη διαχείριση των exceptions (εξαιρέσεων), η διαχείριση μνήμης cache, και τα κυκλώματα εικονικής μνήμης. Τέτοια χαρακτηριστικά όμως δεν είναι απαραίτητα στις embedded εφαρμογές.

Σε μερικές περιπτώσεις όμως ο DSP αντικαθίσταται τελικά από μικροεπεξεργαστή γενικού σκοπού, ειδικά όταν προϋπάρχει στην αγορά διάταξη που χρησιμοποιεί έναν τέτοιου τύπου επεξεργαστή. Για παράδειγμα οι εφαρμογές της Intel περιλαμβάνουν λειτουργίες πολυμέσων (συμπίεση φωνής, σύνθεση μουσικής), οι οποίες υλοποιούνται με προγράμματα που τρέχουν στη CPU ενός PC. Σε μια τέτοια περίπτωση η παρουσία του DSP είναι περιττή. Επί του παρόντος οι επεξεργαστές γενικού σκοπού χρησιμοποιούνται σε λειτουργίες επεξεργασίας σήματος μικρής απόδοσης, με τίμημα την αδυναμία παράλληλης υλοποίησης άλλων λειτουργιών. Κάποιοι αναμένουν ότι η τεχνολογική εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών θα υπερκεράσει την αδυναμία αυτή, από την άλλη όμως και οι αυξανόμενες απαιτήσεις, στον τομέα των επικοινωνιών λόγω χάρη, δημιουργούν την ανάγκη χρήσης επιπλέον κυκλωμάτων.

Τέλος όταν γίνονται συγκρίσεις των DSPs με εναλλακτικά προϊόντα όπως π.χ με επεξεργαστές γενικής χρήσης, πρέπει να γίνονται στην ίδια βάση και με τα ίδια κριτήρια. Θα ήταν π.χ άτοπο να συγκρίνουμε έναν προηγμένο μικροεπεξεργαστή που πρόκειται να κυκλοφορήσει σε δύο χρόνια, με έναν DSP που κυκλοφορεί ήδη στις μέρες μας. Μια σύγκριση ενός πανάκριβου μικροεπεξεργαστή μ'ένα φτηνό DSP, ή μια σύγκριση μεταξύ επεξεργαστών διαφορετικής κατανάλωσης ενέργειας, θα ήταν επίσης ατυχής. Στις μέρες μας και εφόσον ληφθούν υπόψη όλα τα προηγούμενα, οι DSPs αποδεικνύονται οι αδιαμφισβήτητοι νικητές στον τομέα των embedded εφαρμογών.

Τεχνικές προκλήσεις

Γενικά η περιοχή του software μπορεί να θεωρηθεί το αδύνατο σημείο των DSP επεξεργαστών. Αυτό αφορά τόσο στα εργαλεία προγραμματισμού και ανάπτυξης, όσο και στις βιβλιοθήκες συναρτήσεων και εφαρμογών.

Τα περισσότερα πακέτα εργαλείων που συνοδεύουν έναν DSP ανήκουν στον ίδιο τον κατασκευαστή, και λίγα μόνο σε ανεξάρτητους προμηθευτές. Παραδοσιακά περιέχουν το συμβολομεταφραστή (assembler), το πρόγραμμα σύνδεσης (linker) και τον εξομοιωτή (simulator). Οι δυνατότητές τους και τα χαρακτηριστικά τους λίγο διαφέρουν από τα αντίστοιχα της δεκαετίας του '70 και αυτό που προσφέρουν είναι η επίπονη βήμα προς βήμα επιτήρηση της λειτουργίας

Στις μέρες μας η έλλειψη πιο λειτουργικού και πιο φιλικού περιβάλλοντος προγραμματισμού σε assembly φαντάζει παράδοξη, δεδομένου ότι η χρήση της γλώσσας αυτής είναι πλέον καθιερωμένη. Η πρόκληση αναπόφευκτα έγκειται στη δημιουργία πιο λειτουργικού και παραγωγικού debugging. Για το χρήστη θα ήταν πολύ προτιμότερο το συμβολικό debugging, η γραφική απεικόνιση των δεδομένων, ο δομημένος προγραμματισμός, η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του profiling, η δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων στη σειρά των εντολών έπειτα από μια διαδικασία pipeline και η δυνατότητα εκτίμησης της κατανάλωσης. Επίσης ουσιαστικής σημασίας για την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του χρόνου σε μια νέα εφαρμογή ή στην επέκταση μιας παλιάς, είναι η αναβάθμιση των βιβλιοθηκών συναρτήσεων και εφαρμογών.

Οι μεταγλωττιστές της C, παρά το ότι προσφέρονται από τους περισσότερους κατασκευαστές DSPs, εξυπηρετούν πιο πολύ τις ανάγκες της διαφήμισης παρά χρησιμοποιούνται από τους χρήστες στην πράξη. Μπορεί οι compilers αυτοί να είναι βελτιωμένοι σε σχέση με το παρελθόν, γεγονός όμως παραμένει ότι οι πιο πολλοί χρήστες δε χρησιμοποιούν τη C για να προγραμματίσουν έναν επεξεργαστή. Η επιμονή στον παράγοντα του κόστους συχνά δικαιολογεί το βήμα προς βήμα έλεγχο προκειμένου να γίνει η βελτιστοποίηση. Θεωρείται ότι μελλοντικά θα καθιερωθεί η χρήση των μεταγλωττιστών, αλλά για τη βελτίωσή τους απαιτείται σημαντική προσπάθεια από μέρους των κατασκευαστών των εργαλείων ανάπτυξης.

Η τεχνολογία των πυρήνων DSP χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές, ώστε τα προϊόντα τους να καταστούν περισσότερο ευέλικτα και λειτουργικά. Οι δυνατότητες προσαρμογής και επέκτασης του πυρήνα, σήμερα καθορίζονται από τους κατασκευαστές των DSPs, η πραγματική όμως έκρηξη της τεχνολογίας αυτής θα έρθει όταν οι ίδιοι οι σχεδιαστές των συστημάτων αρχίσουν να ορίζουν τους τρόπους και τα όρια προσαρμογής των DSPs. Για την ώρα πάντως δεν υπάρχουν τα κατάλληλα εργαλεία που να επιτρέπουν την επέκταση και την προσαρμογή της λειτουργίας ενός επεξεργαστή ανάλογα με τις συνθήκες. Κάποιοι

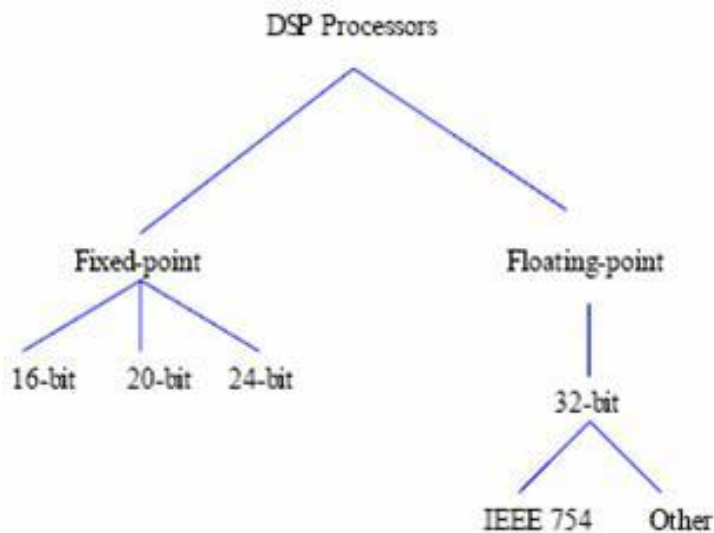
κατασκευαστές όπως η Texas instruments, πειραματίζονται σε αυτήν την κατεύθυνση και σε συνεργασία με δημιουργούς σχεδιαστικών εργαλείων, προσπαθούν να φτιάξουν πολυλειτουργικά μοντέλα επεξεργασίας για τους πυρήνες των DSPs. Απομένει όμως ακόμα πολύς δρόμος.

Οι DSPs στα επόμενα χρόνια τείνουν να γίνουν όλο και πιο απαραίτητοι στη λειτουργία μιας ευρείας γκάμας ηλεκτρονικών προϊόντων, παρόμοια με ότι συνέβη τις τελευταίες τρεις δεκαετίες με τους μικροεπεξεργαστές και τους μικροελεγχτές. Το εύρος των εφαρμογών και οι απαιτήσεις σε λειτουργικότητα, χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ενέργειας, οδηγούν αλματωδώς στην εισαγωγή καινοτομιών και στο σχεδιασμό εξειδικευμένων αρχιτεκτονικών. Αυτή η εξειδίκευση είναι ταυτόχρονα πλεονέκτημα και μειονέκτημα για τους DSPs, καθώς τους κατατάσσει μεταξύ των ASIC εφαρμογών και των μικροεπεξεργαστών γενικού σκοπού, με κριτήριο την απόδοση και την πολυπλοκότητα στην ανάπτυξη software και hardware. Και παρά το γεγονός ότι οι DSPs απειλούνται σε κάποιες εφαρμογές από τις εναλλακτικές τεχνολογίες, θεωρείται πως θα παραμείνουν και στο μέλλον ο βέλτιστος τρόπος προσέγγισης εφαρμογών που σχετίζονται με τηλεπικοινωνίες και πολυμέσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΣ ΥΠΟΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

DSP αριθμητική

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την καταλληλότητα των DSP επεξεργαστών για μια δοσμένη εφαρμογή είναι ο τύπος της αριθμητικής αναπαράστασης που χρησιμοποιούν οι επεξεργαστές. Οι αριθμητικές αναπαραστάσεις που είναι συνηθισμένες στους εμπορικούς DSP επεξεργαστές δείχνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1. Αριθμητικές αναπαραστάσεις για τους DSP επεξεργαστές.

Fixed-point εναντίον floating-point

Οι DSP επεξεργαστές πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν fixed-point αριθμητική για τον λόγο ότι η υλοποίηση της αριθμητικής σταθερής υποδιαστολής απαιτεί απλούστερο υλικό (hardware) σε σχέση με την αριθμητική της αναπαράστασης κινητής υποδιαστολής. Ακόμα όμως και στην σημερινή εποχή, όπου τα επίπεδα ολοκλήρωσης είναι πολύ υψηλότερα, οι επεξεργαστές σταθερής υποδιαστολής κυριαρχούν σε σχέση με αυτούς της κινητής υποδιαστολής, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους καθώς και της μικρότερης κατανάλωσης ισχύος.

Στους fixed-point επεξεργαστές, οι αριθμοί παριστάνονται είτε σαν ακέραιοι (integer representation) είτε σαν κλασματικοί μεταξύ -1 και 1 (fractional representation). Το πεδίο

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

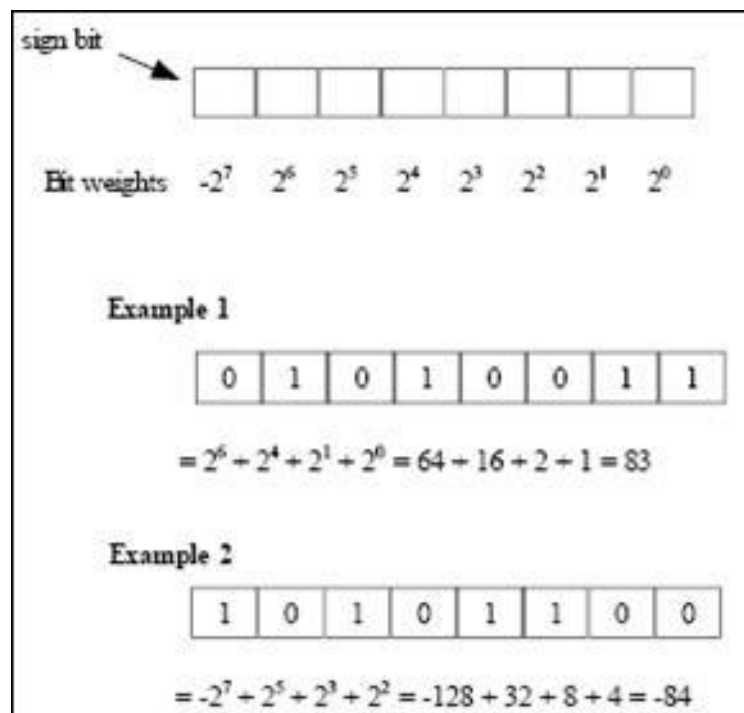
των αριθμών που μπορούν να παρασταθούν χρησιμοποιώντας N-bit ακέραιους αριθμούς σε συμπλήρωμα ως προς δύο είναι :

$$-2^{N-1} \leq I \leq 2^{N-1} - 1, \text{ όπου } I \text{ είναι ο ακέραιος αριθμός}$$

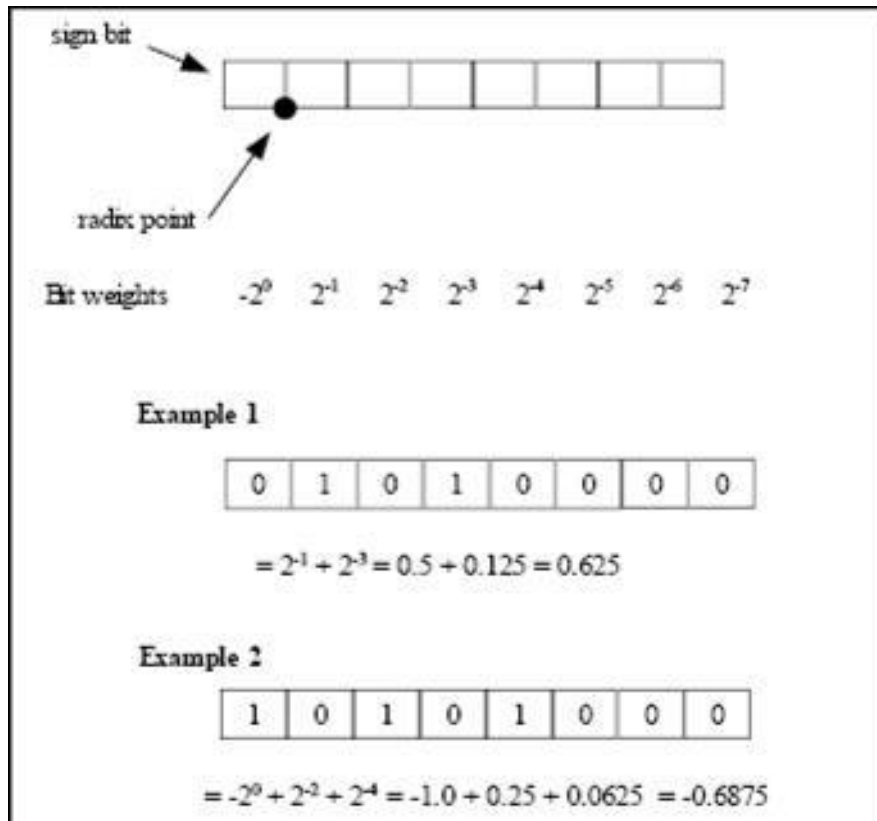
Το πεδίο των αριθμών που μπορούν να παρασταθούν χρησιμοποιώντας N-bit κλασματικούς αριθμούς σε συμπλήρωμα ως προς δύο είναι :

$$-1.0 \leq F \leq 1 - 2^{-N}, \text{ όπου } F \text{ είναι ο κλασματικός αριθμός}$$

Οι αλγόριθμοι και το hardware για τις δύο αναπαραστάσεις είναι κοινά, η μόνη διαφορά έχει να κάνει με το πώς διαχειρίζονται τα αποτελέσματα του πολλαπλασιασμού. Στην πράξη, οι περισσότεροι DSP επεξεργαστές υποστηρίζουν και την integer και την floating-point αναπαράσταση. Η πρώτη αναπαράσταση χρησιμοποιείται κυρίως σε αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος ενώ η δεύτερη σε λειτουργίες ελέγχου, υπολογισμούς διευθύνσεων. Τα σχήματα 2 και 3 απεικονίζουν τις δύο αυτές αναπαραστάσεις που αναφέρθηκαν.

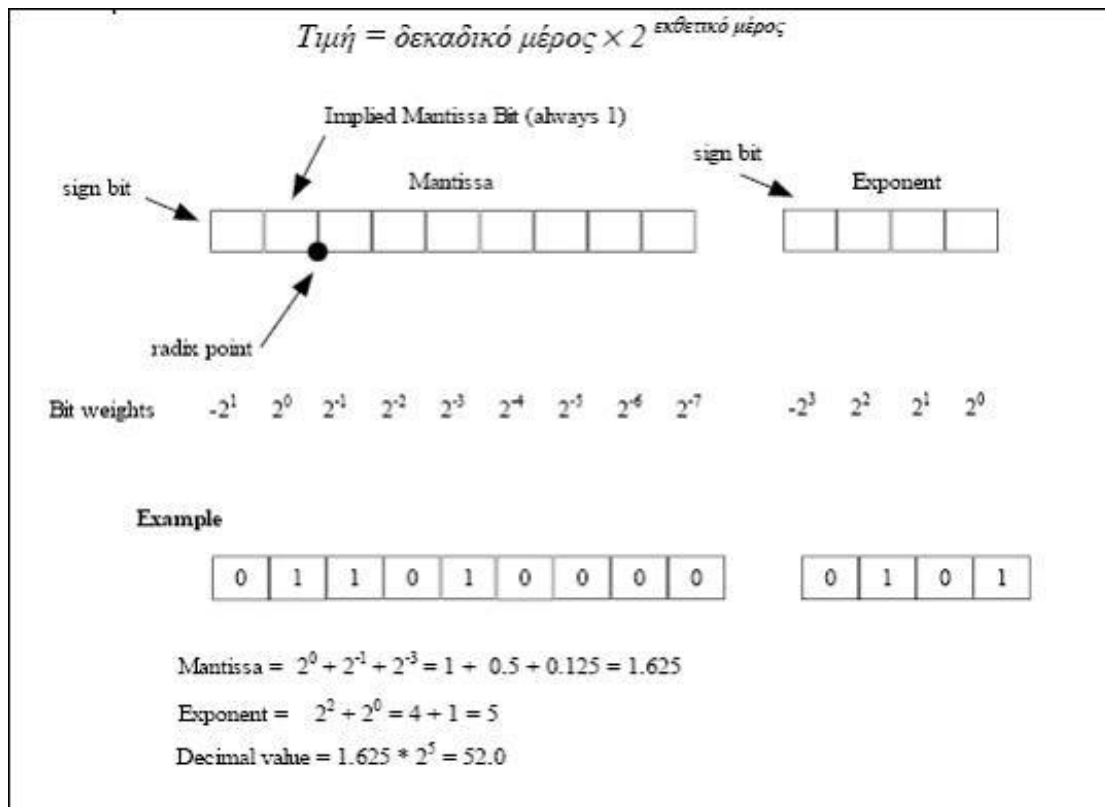


Σχήμα 2. Ακέραιη αναπαράσταση σε συμπλήρωμα ως προς 2.



Σχήμα 3. Κλασματική αναπαράσταση σε συμπλήρωμα ως προς 2.

Η δεύτερη κατηγορία των DSP επεξεργαστών χρησιμοποιεί αριθμητική floating-point, στην οποία οι αριθμοί παριστάνονται από το συνδυασμό δεκαδικού και εκθετικού μέρους. Αυτό απεικονίζεται καθαρά στο σχήμα 4. Το δεκαδικό μέρος (mantissa) είναι ένας προσημασμένος αριθμός με τιμές ανάμεσα στο 1 ως 2 και -1 ως -2 και ένα implied bit. Το εκθετικό μέρος (exponent) είναι ένας ακέραιος αριθμός ο οποίος παριστάνει τις θέσεις της υποδιαστολής -για τον floating-point αριθμό- που θα πρέπει να μετατοπιστεί δεξιά ή αριστερά ώστε να παρασταθεί σωστά ο αριθμός. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στην floating-point αναπαράσταση είναι :



Σχήμα 4. Floating-point αναπαράσταση σε συμπλήρωμα ως προς 2.

Το σχήμα 4 απεικονίζει την floating-point αναπαράσταση. Γενικότερα οι floating-point επεξεργαστές υποστηρίζουν και fixed-point διατάξεις. Η floating-point αναπαράσταση είναι πιο ευέλικτη και πιο γενική από τη fixed-point. Επιπλέον, τα συστήματα με floating-point αριθμητική προσφέρουν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος και σε πολλές περιπτώσεις καλύτερη ακρίβεια. Σαν δυναμικό εύρος ορίζεται ο λόγος ανάμεσα στη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή :

$$\text{Δυναμικό εύρος} = 20 \log_{10}(\text{μέγιστη τιμή} / \text{ελάχιστη τιμή})$$

Ο ορισμός της ακρίβειας βασίζεται στο σφάλμα κβάντισης. Το σφάλμα κβάντισης είναι το αριθμητικό λάθος που προκύπτει όταν γίνεται η μετατροπή ενός αριθμού σε ένα πιο μικρό, όπως για παράδειγμα η στρογγυλοποίηση του 1,325 σε 1,33. Όσο πιο μεγάλο το σφάλμα αυτό, τόσο πιο μικρή ακρίβεια διαθέτουμε. Γενικά λοιπόν η μέγιστη ακρίβεια δίνεται από τον τύπο :

$$\text{Μέγιστη ακρίβεια (bits)} = \log_2(|\text{μέγιστη τιμή}| / |\text{μέγιστο σφάλμα κβάντισης}|)$$

Για έναν 16-bit κλασματικό αριθμό η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να λάβει είναι -1.

Όταν στρογγυλοποιείται ο αριθμός, το μέγιστο σφάλμα κβάντισης είναι 2^{-16} . Αν χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω τύπος βρίσκεται ακρίβεια 16 bits, δηλαδή για fixed-point αριθμούς η μέγιστη ακρίβεια είναι ίση με τον αριθμό των bits που χρησιμοποιείται.

Συνεπώς, σκόπιμο κρίνεται κάθε φορά η κλιμάκωση (scaling) του σήματος, να γίνεται με μεγάλη προσοχή γιατί η παραμικρή απώλεια σε bits έχει σαν αποτέλεσμα απώλεια σε ακρίβεια. Όσο αφορά τώρα την ακρίβεια που πετυχαίνουμε χρησιμοποιώντας floating-point αριθμούς, θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτή καθορίζεται από τα bits του δεκαδικού μέρους συμπεριλαμβανομένου και του implied bit το οποίο είναι πάντα '1'. Έτσι, οι floating-point επεξεργαστές διατηρούν πολύ καλή ακρίβεια χωρίς επιπλέον προσπάθεια από τη μεριά του προγραμματιστή.

Στην πράξη, οι floating-point επεξεργαστές χρησιμοποιούν λέξεις (words) 32-bit με 24-bit δεκαδικό και 8-bit εκθετικό μέρος, ενώ οι fixed-point επεξεργαστές συνήθως χρησιμοποιούν λέξεις των 16-bit. Η διαφορά στη δυναμική περιοχή που επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιηθεί floating-point αριθμητική είναι εμφανής στο επόμενο παράδειγμα. Ένας 32-bit fixed-point αριθμός έχει δυναμική περιοχή 187 dB ενώ ένας floating-point των 32-bit έχει 1535 dB. Στις διάφορες εφαρμογές, η δυναμική περιοχή μεταφράζεται σε μια ποικιλία από πλάτη σημάτων τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν, διατηρώντας παράλληλα την υψηλή πιστότητα. Διαφορετικές εφαρμογές απαιτούν διαφορετικές δυναμικές περιοχές. Στις τηλεπικοινωνίες 50 dB είναι συνήθως αρκετά. Για υψηλής πιστότητας audio εφαρμογές, χρειάζονται περίπου 90 dB. Επιπλέον, η έξτρα δυναμική περιοχή διευκολύνει και τον προγραμματιστή αφού δεν χρειάζεται πια να ανησυχεί για την σωστή κλιμάκωση των σημάτων.

Οι floating-point DSP επεξεργαστές είναι γενικά πιο ακριβοί από τους fixed-point αλλά πιο εύκολο να προγραμματιστούν. Το αυξημένο κόστος οφείλεται κυρίως στην πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων για την υλοποίηση της αριθμητικής. Επιπλέον, η χρήση μεγαλύτερων λέξεων στους floating-point επεξεργαστές συχνά σημαίνει χρήση εξωτερικών διαύλων και μνήμης, αυξάνοντας έτσι το κόστος τους. Η ευκολία που προσφέρουν οι επεξεργαστές αυτοί είναι ότι ο προγραμματιστής δεν χρειάζεται να προσέχει για τη δυναμική περιοχή και την ακρίβεια. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι fixed-point επεξεργαστές επειδή προτεραιότητα έχει το χαμηλό κόστος. Στις εφαρμογές τέλος που είναι λιγότερο ευαίσθητες στο κόστος ή έχουν εξαιρετικά υψηλές απαιτήσεις σε δυναμική περιοχή και ακρίβεια, οι floating-point επεξεργαστές προτιμούνται.

Native data word width

Το native data word width του επεξεργαστή, είναι το εύρος των δεδομένων τα οποία διαχειρίζονται οι δίαυλοι (buses) καθώς και ο δίαυλος δεδομένων του επεξεργαστή, σε ένα μονό κύκλο εντολής. Όλοι οι κοινοί floating-point DSP επεξεργαστές χρησιμοποιούν 32-bit native data word width. Για τους fixed-point DSP επεξεργαστές, τα πιο κοινά μεγέθη των λέξεων είναι 16-bits. Οι επεξεργαστές DSP5600x και DSP563xx της Motorola χρησιμοποιούν 24-bit λέξεις ενώ ο ZR3800x της Zoran χρησιμοποιεί 20-bit λέξεις. Το

μέγεθος της λέξης θα πρέπει να τονιστεί ότι παίζει σημαντικό ρόλο στο κόστος του επεξεργαστή καθώς και στον αριθμό των pins και της εξωτερικής μνήμης που χρειάζεται να διασυνδεθεί με τον DSP.

Συνεπώς, οι σχεδιαστές προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν το μικρότερο μέγεθος λέξης που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής προς υλοποίηση. Όσο αφορά τώρα την επιλογή ανάμεσα στα fixed-point και floating-point ολοκληρωμένα, γίνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στο μέγεθος της λέξης και την πολυπλοκότητα της σχεδίασης.

Εκτεταμένη ακρίβεια

Εκτεταμένη ακρίβεια (extended precision) σημαίνει χρήση αναπαράστασης δεδομένων, η οποία παρέχει καλύτερη ακρίβεια από ότι προσφέρει το native data format του επεξεργαστή. Η εκτεταμένη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Αρχικά, πολλοί fixed-point και floating-point επεξεργαστές παρέχουν ενσωματωμένη υποστήριξη για εκτεταμένη ακρίβεια, για λειτουργίες που γίνονται μέσα στο data path. Αυτό σημαίνει ότι ένα μεγάλο μέρος των αριθμητικών πράξεων μεταφέρονται αποκλειστικά στο data path του επεξεργαστή, χωρίς τη μεταφορά ενδιάμεσων αποτελεσμάτων στη μνήμη.

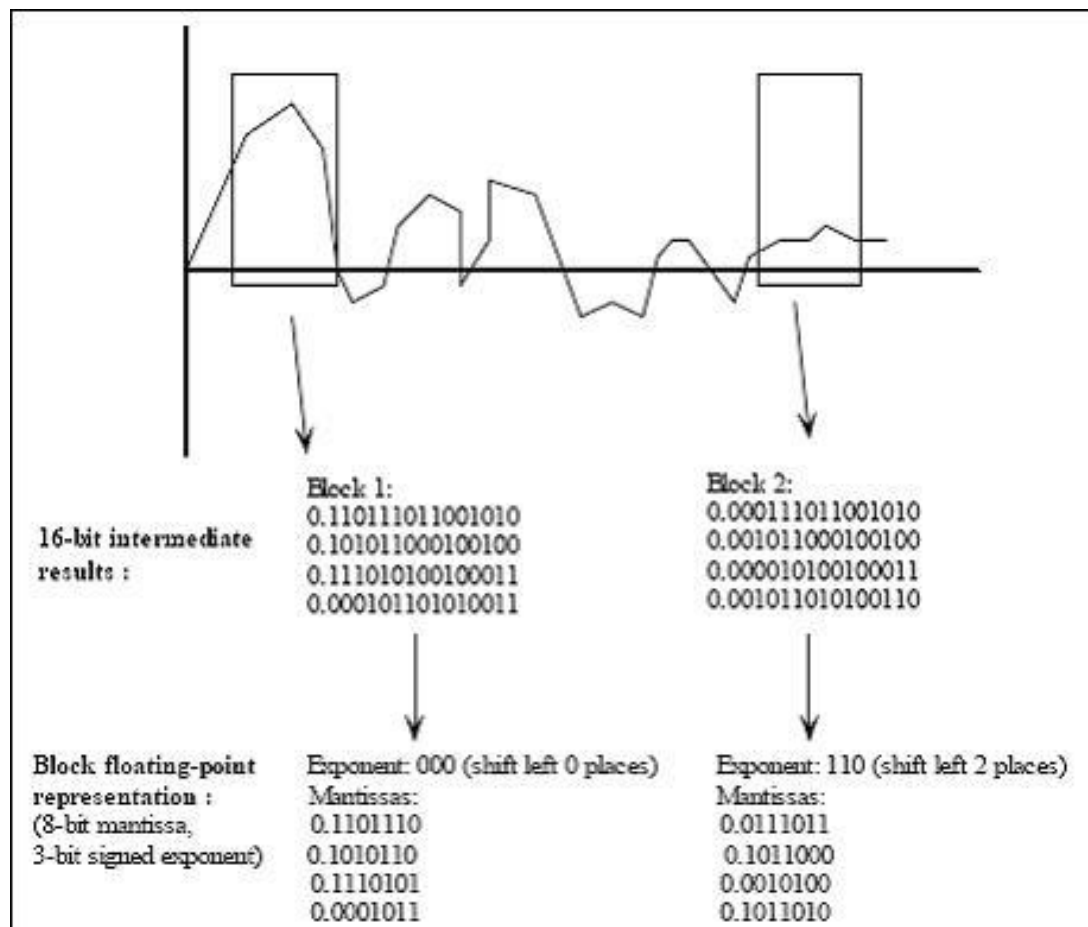
Δεύτερον, είναι πιθανό να υλοποιηθεί αριθμητική πολλαπλής ακρίβειας (multiprecision arithmetic) κατασκευάζοντας μεγαλύτερες λέξεις μέσα από σειρές από native data words. Για παράδειγμα, με ένα 16-bit επεξεργαστή, ο προγραμματιστής μπορεί να σχηματίσει 32-bit λέξεις από ένα ζευγάρι 16-bit. Επιπλέον, ο προγραμματιστής μπορεί να υλοποιήσει αριθμητική πολλαπλής ακρίβειας χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ακολουθία των εντολών μονής ακρίβειας (single precision). Φυσικά, επειδή κάθε λειτουργία πολλαπλής ακρίβειας απαιτεί μια σειρά από εντολές μονής ακρίβειας, συνεπάγεται ότι η αριθμητική πολλαπλής ακρίβειας είναι πιο αργή. Παρόλα αυτά, μερικοί επεξεργαστές παρέχουν χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την αριθμητική πολλαπλής ακρίβειας. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης του κρατούμενου από μια πρόσθεση μονής ακρίβειας, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος σε μια διαδοχική πρόσθεση καθώς και τη δυνατότητα διαχείρισης των τελεστών του πολλαπλασιασμού.

Εξομοίωση της floating-point αριθμητικής και block floating-point

Ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί fixed-point επεξεργαστής, είναι δυνατό να επιτευχθεί αυξημένη ακρίβεια και δυναμική περιοχή χρησιμοποιώντας ρουτίνες οι οποίες εξομοιώνουν τη συμπεριφορά των floating-point λειτουργιών. Για αυτό το λόγο ορισμένοι κατασκευαστές επεξεργαστών παρέχουν μια βιβλιοθήκη τέτοιων ρουτινών. Αν αυτή δεν είναι διαθέσιμη, η συγγραφή των ρουτινών ανατίθεται στον προγραμματιστή.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Μια άλλη μέθοδος για να επιτευχθεί καλή ακρίβεια και αυξημένη δυναμική περιοχή είναι η block floating-point αναπαράσταση. Με αυτή την αναπαράσταση μια ομάδα αριθμών με διαφορετικά δεκαδικά μέρη αλλά με ένα κοινό εκθετικό, συμπεριφέρονται σαν μπλοκ δεδομένων. Έτσι αντί να αποθηκεύεται το εκθετικό μέσα σε κάθε λέξη (data word), όπως γίνεται σε κάθε επεξεργαστή γενικής χρήσης, το κοινό εκθετικό αποθηκεύεται στη δικιά του ξεχωριστή λέξη. Για παράδειγμα, ένα μπλοκ από οχτώ τιμές που έχει κοινό εκθετικό θα αποθηκευτεί σε μια ξεχωριστή λέξη. Σε αυτή την περίπτωση η αποθήκευση ενός μπλοκ οχτώ τιμών απαιτεί εννέα περιοχές μνήμης, οχτώ για το δεκαδικό μέρος και μια για το εκθετικό. Η block floating-point αναπαράσταση χρησιμοποιείται κυρίως για την καλύτερη ακρίβεια και δυναμική περιοχή σε σχέση με τη διάταξη των native fixed-point δεδομένων. Με τη block floating-point αναπαράσταση, το εκθετικό τυπικά καθορίζεται από το στοιχείο με το μεγαλύτερο πλάτος. Αν ένα δοσμένο μπλοκ από δεδομένα περιέχει μικρές τιμές, τότε οι τιμές αυτές είναι δυνατόν να μετατοπιστούν αριστερά αρκετές θέσεις ώστε να προκύψει ένα μεγάλο αρνητικό εκθετικό. Αν ένα μπλοκ περιέχει μεγάλες τιμές, τότε αυτές μετατοπίζονται αριστερά λίγες θέσεις ή και καθόλου για να προκύψει ένα μικρό αρνητικό εκθετικό (ή μηδέν). Το σχήμα 5 απεικονίζει την block floating-point αναπαράσταση.

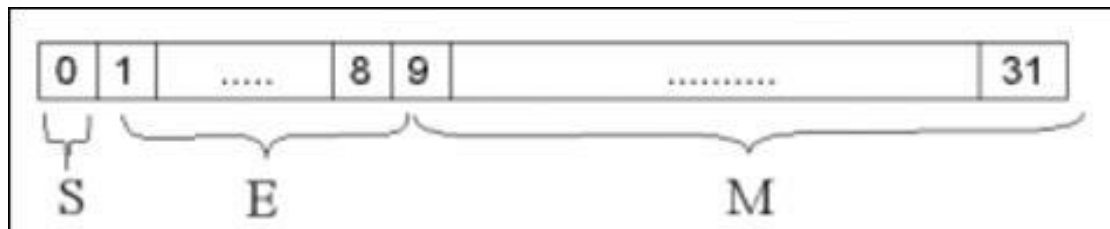


Σχήμα 5. Block floating-point αναπαράσταση.

Η μετατροπή ανάμεσα στη native fixed-point διάταξη και στη block floating-point, εκτελείται εξ'ολοκλήρου μέσω λογισμικού από τον προγραμματιστή. Μερικοί επεξεργαστές έχουν ειδικά hardware χαρακτηριστικά για να μπορούν να υποστηρίξουν block floating-point διατάξεις. Το πιο συνηθισμένο από τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται είναι η εντολή «ανίχνευσης του εκθετικού». Η εντολή αυτή υπολογίζει την ολίσθηση που χρειάζεται για την μετατροπή ενός ενδιαμέσου αποτελέσματος υψηλής ακρίβειας (για παράδειγμα μια τιμή στον συσσωρευτή) σε block floating-point format.

IEEE-754 floating-point

Το 1985 η IEEE εξέδωσε ένα πρότυπο, το 754, το οποίο καθορίζει διατάξεις για αναπαράσταση floating-point αριθμών καθώς και ορισμένους κανόνες για floating-point αριθμητική. Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν για παράδειγμα τους αλγόριθμους στρογγυλοποίησης καθώς και κάποιες ειδικές περιπτώσεις όπως η υπερχειλίση. Η τιμή που μπορεί να λάβει ένας floating-point αριθμός είναι : $n = (-1)^S \cdot 2^{E-127} \cdot M$, όπου S είναι το sign-bit, E είναι τα bits του εκθετικού μέρους και M είναι τα bits του δεκαδικού μέρους.



Σχήμα 6. IEEE-754 floating-point αναπαράσταση.

Μερικοί επεξεργαστές, ανάμεσά τους και ο Motorola DSP96002 υποστηρίζουν hardware για αριθμητική floating-point αριθμών μονής ακρίβειας όπως αυτό καθορίζεται από το IEEE-754.

Μερικοί άλλοι επεξεργαστές, όπως για παράδειγμα ο AT&T DSP32xx, δεν χρησιμοποιεί άμεσα το IEEE-754 αλλά υποστηρίζει ένα ειδικό hardware για γρήγορη μετατροπή στο πρότυπο IEEE-754. Η hardware υποστήριξη για την μετατροπή των αριθμών είναι σημαντική για λειτουργίες για τις οποίες είναι αναγκαία η διασύνδεση DSPs που χρησιμοποιούν IEEE-754 με άλλους που δεν έχουν τέτοια δυνατότητα. Αν δεν υπάρχει αυτό το hardware τότε οι

DSP επεξεργαστές χρησιμοποιούν ειδικές ρουτίνες για την μετατροπή των αριθμών στο IEEE-754 πρότυπο.

Σχέση μεταξύ μεγέθους λέξης και μεγέθους εντολής

Στους περισσότερους επεξεργαστές, το μέγεθος της λέξης των δεδομένων και το μέγεθος της εντολής είναι ίδιο. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει με όλους. Ο επεξεργαστής της Analog Devices ADSP-21xx για παράδειγμα καθώς και ο IBM MDSP2780, χρησιμοποιούν 16-bit λέξη δεδομένων (data word) και 24-bit λέξη εντολής (instruction word). Οι επεξεργαστές με ανόμοιες λέξεις υστερούν ως προς το γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος της μνήμης προγράμματος δεν χρησιμοποιείται με αποτέλεσμα να ανεβαίνει το κόστος ολόκληρου του συστήματος.

DSP data path

Το data path ενός DSP επεξεργαστή είναι το κομμάτι στο οποίο συντελούνται οι ζωτικές αριθμητικές διεργασίες των σημάτων. Τα data paths των DSP επεξεργαστών είναι ειδικευμένα ώστε να επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση σε λειτουργίες, όπως οι multiply accumulate. Οι δυνατότητες του data path μαζί με την αρχιτεκτονική στις μνήμες είναι δύο χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους DSP επεξεργαστές. Τα data paths για τους floating-point επεξεργαστές είναι σημαντικά διαφορετικά από αυτά των fixed-point επεξεργαστών. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει αναλυτική αναφορά και για τα δύο είδη data paths.

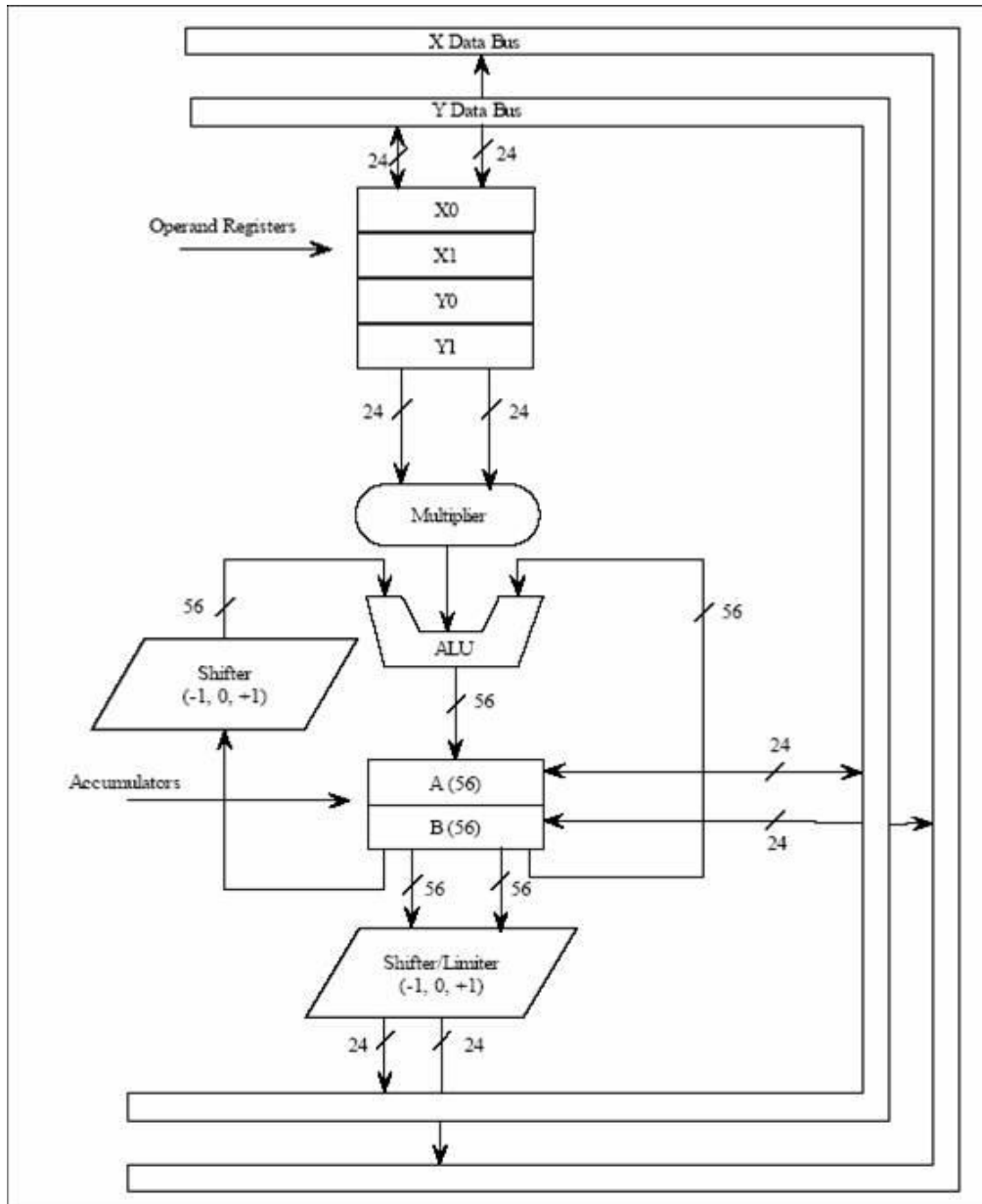
Fixed-point data path

Τα data paths των fixed-point επεξεργαστών ενσωματώνουν τα επόμενα τμήματα :

- Πολλαπλασιαστής (-ες).
- Αριθμητικές και λογικές μονάδες (ALUs).
- Ολισθητές (shifters).
- Καταχωρητές (registers).
- Συσσωρευτές (accumulators).
- Άλλες εξειδικευμένες μονάδες, όπως μονάδες γένεσης διευθύνσεων.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Το σχήμα 7 απεικονίζει ένα τυπικό fixed-point data path από τον 24-bit επεξεργαστή της Motorola DSP5600x. Το data path των DSP επεξεργαστών δεν χρησιμοποιείται για υπολογισμούς διευθύνσεων μνήμης. Ωστόσο, κάποιοι fixed-point επεξεργαστές παρέχουν έξτρα hardware για τον υπολογισμό αυτό. Το μεγάλο πεδίο των τρόπων διευθυνσιοδότησης (addressing modes) των DSP επεξεργαστών είναι ένα από τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους DSP επεξεργαστές από άλλους επεξεργαστές, όπως οι RISC (Reduced Instruction Set Computer) επεξεργαστές.



Σχήμα 7. Το data path του 24-bit επεξεργαστή της Motorola DSP5600x.

Πολλαπλασιαστής

Η παρουσία ενός πολλαπλασιαστή ενός κύκλου, είναι κεντρικό σημείο για τον προσδιορισμό ενός επεξεργαστή ψηφιακού σήματος. Ο πολλαπλασιασμός είναι μια βασική λειτουργία σε όλους τους DSP επεξεργαστές. Σε πολλές εφαρμογές υπολογίζεται ότι οι μισές σχεδόν πράξεις που εκτελούνται από τον επεξεργαστή περιλαμβάνουν πολλαπλασιασμό. Έτσι, όλοι σχεδόν οι επεξεργαστές περιέχουν ένα πολλαπλασιαστή ο οποίος είναι σε θέση να πολλαπλασιάσει δύο native size τελεστές σε ένα μόνο κύκλο εντολής. Επομένως γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι απαραίτητη η υλοποίηση μιας γρήγορης δομής πολλαπλασιαστή, όπως για παράδειγμα array ή Booth πολλαπλασιαστές. Στις επόμενες παραγράφους θα ακολουθήσει μια αναφορά στις δομές πολλαπλασιαστών τόσο για προσημασμένους όσο και για μη προσημασμένους αριθμούς σταθερής υποδιαστολής.

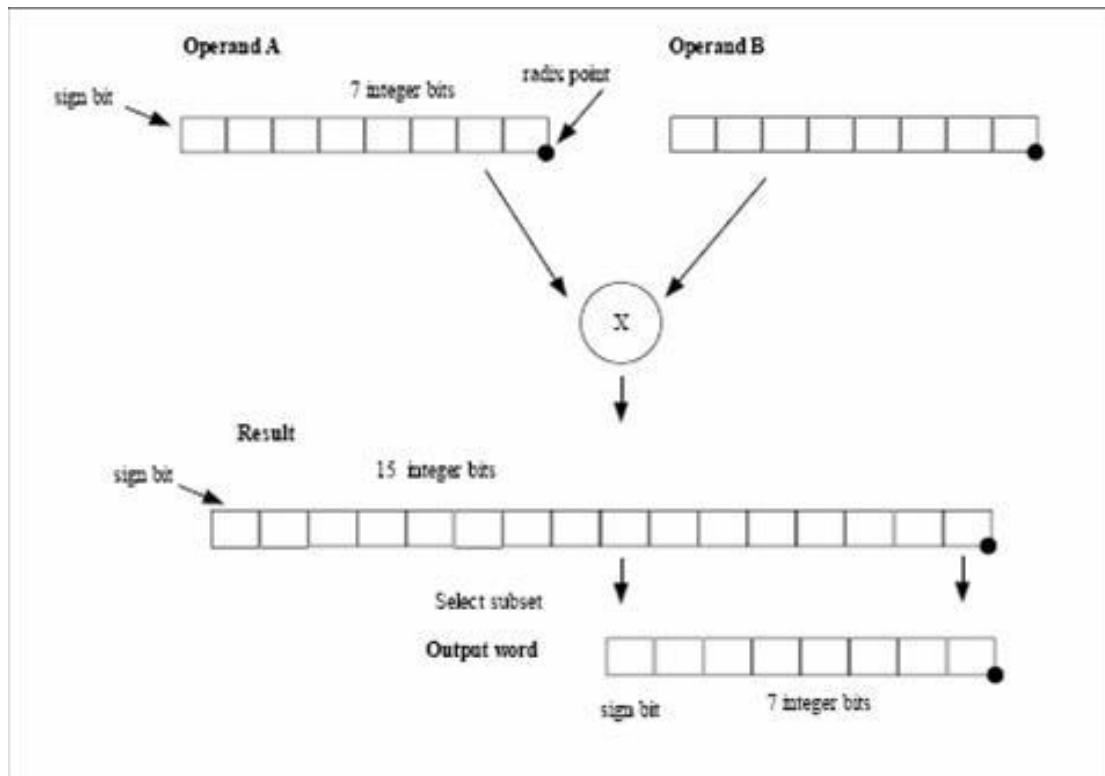
Πολλαπλασιασμός σε DSP επεξεργαστή

Ενώ όλοι οι DSP επεξεργαστές είναι εφοδιασμένοι με ένα πολλαπλασιαστή και παράγουν ένα νέο αποτέλεσμα σε κάθε κύκλο εντολής, το εσωτερικό pipelining του πολλαπλασιαστή μπορεί να οδηγήσει σε μια καθυστέρηση μεγαλύτερη από ένα κύκλο, από τη στιγμή που θα μπουν οι είσοδοι στον πολλαπλασιαστή μέχρι τη στιγμή που θα βγει το αποτέλεσμα. Η καθυστέρηση αυτή ονομάζεται latency. Ενώ οι pipelined πολλαπλασιαστές παράγουν ένα νέο αποτέλεσμα κάθε κύκλο ρολογιού, επιτυγχάνουν την απόδοση αυτή μόνο όταν χρησιμοποιούνται μακριές σειρές από λειτουργίες πολλαπλασιασμού. Αν μια μόνο λειτουργία πολλαπλασιασμού εκτελεσθεί και ακολουθηθεί από άλλου είδους πράξεις, ένας ή περισσότεροι κύκλοι πρέπει να δαπανηθούν ώστε να βγει το αποτέλεσμα.

Σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. Motorola DSP5600x), ο πολλαπλασιαστής είναι συνδεδεμένος με αθροιστή έτσι ώστε να παράγουν την multiplier-accumulator μονάδα. Σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. AT&T DSP16xx), ο πολλαπλασιαστής είναι ξεχωριστός. Η έξοδος του αποθηκεύεται σε ένα καταχωρητή αποτελέσματος (product register) και στη συνέχεια στέλνεται σε ένα αθροιστή για accumulation. Αν ο πολλαπλασιαστής και ο αθροιστής είναι ξεχωριστοί, τότε το αποτέλεσμα της multiply-accumulate διαδικασίας καθυστερεί για ένα κύκλο εντολής.

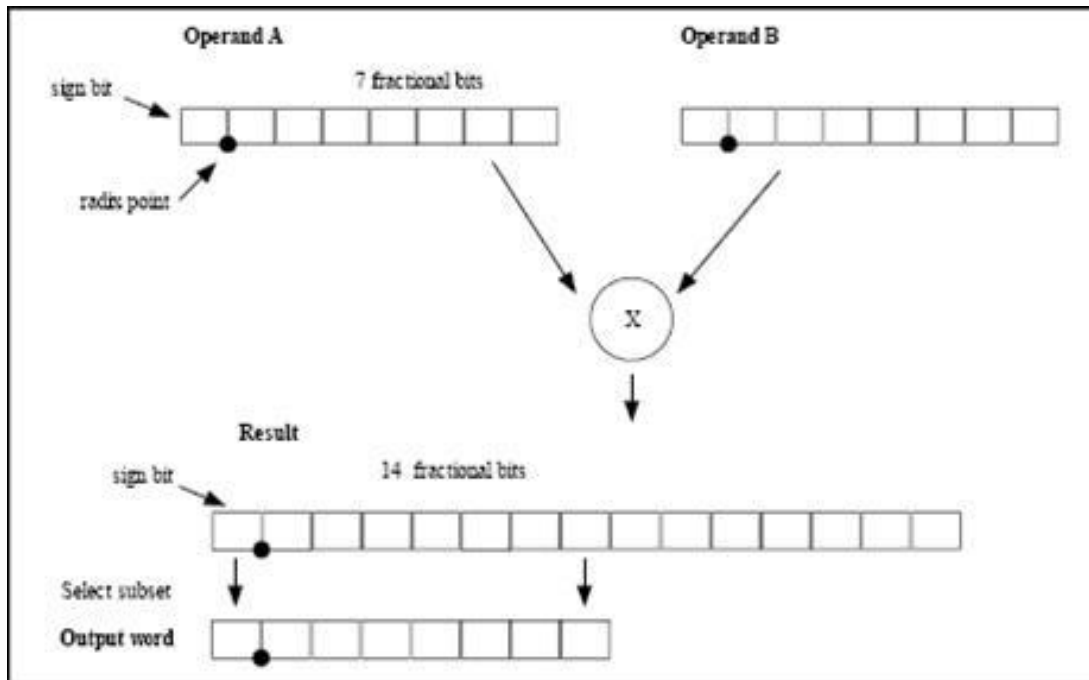
Μια άλλη διαφορά ανάμεσα στους fixed-point πολλαπλασιαστές είναι το μέγεθος του αποτελέσματος σε σχέση με το μέγεθος των τελεστών. Γενικά, όταν πολλαπλασιάζονται δύο n-bit fixed-point αριθμοί, το αποτέλεσμα θα απαιτεί 2n bits για να παρασταθεί σωστά. Για αυτό το λόγο, οι περισσότεροι fixed-point επεξεργαστές παράγουν ένα αποτέλεσμα το οποίο είναι διπλάσιο σε μέγεθος από αυτό των εισόδων. Παρόλα αυτά, για λόγους οικονομίας και ταχύτητας, κάποιοι fixed-point επεξεργαστές χρησιμοποιούν πολλαπλασιαστές οι οποίοι

παράγουν μικρότερα αποτελέσματα και προφανώς λανθασμένα. Για παράδειγμα, ο επεξεργαστής της Zilog Z893xx, δέχεται 16-bits ως τελεστές και βγάζει προς τα έξω ένα 24-bit αριθμό. Επιπλέον, τις περισσότερες φορές δεν είναι αναγκαία η ανάκτηση του μεγαλύτερου αποτελέσματος. Για πρακτικούς κυρίως σκοπούς λοιπόν, ο προγραμματιστής επιλέγει συνήθως ένα subset των bits του αποτελέσματος που θα περάσει στον επόμενο υπολογισμό. Μπορεί επίσης το αποτέλεσμα να περάσει ολόκληρο στον accumulator και κατόπιν να μειωθεί πριν περάσει στον επόμενο υπολογισμό. Υποθέτοντας λοιπόν ότι το μέγιστο πλάτος του αποτελέσματος δεν θα διατηρηθεί, ο προγραμματιστής θα πρέπει αν διαλέξει ποια ποσότητα θα κρατήσει. Η επιλογή συνήθως γίνεται έτσι ώστε η υποδιαστολή του subset που επιλέχθηκε να βρίσκεται στο ίδιο σημείο με την υποδιαστολή των fixed-point τελεστών. Αυτό επιτρέπει στο αποτέλεσμα που επιλέχθηκε να διαχειριστεί σαν ένας νέος τελεστής ο οποίος θα τροφοδοτήσει ένα επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται καθαρά η διαδικασία που αναφέρθηκε. Αν χρησιμοποιηθεί αριθμητική ακεραίων (integer arithmetic), τότε το πλήρες αποτέλεσμα είναι επίσης ακέραιος αριθμός και ο προγραμματιστής τυπικά διατηρεί τα λιγότερο σημαντικά ψηφία του αποτελέσματος. Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος των τελεστών πρέπει να περιοριστεί από τον προγραμματιστή ώστε το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού να ταιριάζει απόλυτα στο κάτω μισό του αποτελέσματος του πολλαπλασιαστή. Όταν κάτι τέτοιο συμβεί, τα $N/2 + 1$ περισσότερο σημαντικά ψηφία του N bits αποτελέσματος είναι όλα ίσα με την τιμή του bit προσήμου. Έτσι δεν χάνεται πληροφορία όταν τα $N/2$ bits αγνοηθούν (αφήνοντας ένα bit προσήμου στο τελικό αποτέλεσμα).



Σχήμα 8. Πολλαπλασιασμός δύο ακεραίων fixed-point αριθμών.

Αν χρησιμοποιηθεί κλασματική αριθμητική (fractional arithmetic), τότε το πλήρες αποτέλεσμα έχει το διπλάσιο αριθμό bits δεξιά της υποδιαστολής από τους τελεστές και ο προγραμματιστής αγνοεί τα μισά λιγότερο σημαντικά από αυτά, κάνοντας στρογγυλοποίηση. Μια κοινή βελτιστοποίηση που χρησιμοποιείται στους fixed-point πολλαπλασιασμούς είναι η εμπόδιση ενός από τους τελεστές να πάρει μέγιστη αρνητική τιμή (NMAX). Αν αυτό συμβεί, το μέγεθος του πλήρους αποτελέσματος μειώνεται κατά ένα, δηλαδή γίνεται $2n-1$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9, όταν χρησιμοποιείται κλασματική αριθμητική, η βελτιστοποίηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα μια έξοδο η οποία περιέχει ένα bit προσήμου και καθόλου bits αριστερά της υποδιαστολής. Αυτό επιτρέπει στον προγραμματιστή να επιλέξει ένα υποσύνολο από το πλήρες αποτέλεσμα το οποίο έχει την ίδια μορφή με τους τελεστές εισόδου.



Σχήμα 9. Πολλαπλασιασμός δύο κλασματικών fixed-point αριθμών.

Οι fixed-point DSP επεξεργαστές συχνά χρησιμοποιούν ειδικό hardware το οποίο βοηθά τον προγραμματιστή να διαλέξει σωστά το subset των εξόδων του πολλαπλασιαστή. Ένα κοινό χαρακτηριστικό είναι να αντιμετωπίζεται ο $2n$ -bit καταχωρητής ή accumulator που κρατά το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού, σαν 2 ξεχωριστοί n -bit addressable καταχωρητές. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η εισαγωγή μιας αυτόματης μετατόπισης προς τα αριστερά κατά 1 bit μετά τον πολλαπλασιασμό. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται η βελτιστοποίηση του αριθμού των bits σε κλασματική αριθμητική, αυτή η αριστερή μετατόπιση, παρατάσσει την έξοδο του πολλαπλασιαστή έτσι ώστε το επιθυμητό subset του πλήρους αποτελέσματος να ταιριάζει απόλυτα στο πάνω μισό του καταχωρητή.

Καταχωρητές συσσώρευσης

Οι καταχωρητές συσσώρευσης (accumulators registers) αποθηκεύουν τα προσωρινά και τελικά αποτελέσματα των multiply-accumulate και άλλων αριθμητικών λειτουργιών. Οι περισσότεροι DSP επεξεργαστές παρέχουν δύο ή περισσότερους accumulators. Άλλοι έχουν μόνο ένα accumulator, κάτι το οποίο είναι μειονέκτημα, ιδίως όταν πρέπει να φορτώνονται και να αποθηκεύονται σε αυτόν γρήγορα, τα αποτελέσματα της αριθμητικής και λογικής μονάδας.

Ιδανικά, το μέγεθος του accumulator πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος της εξόδου του πολλαπλασιαστή κατά αρκετά bits. Τα επιπλέον bits λέγονται guard bits και

επιτρέπουν στον προγραμματιστή να αποθηκεύει δεδομένα στον accumulator χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερχειλίσης και χωρίς να χρειάζεται η κλιμάκωση προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση. Ένας accumulator με n guard bits παρέχει τη δυνατότητα σε 2^n τιμές να αποθηκευτούν. Μερικοί επεξεργαστές παρέχουν είτε τέσσερα είτε οχτώ guard bits. Για παράδειγμα, ο AT&T DSP16xx παρέχει τέσσερα guard bits ενώ ο Analog Devices ADSP-21xx παρέχει οχτώ. Ένας επεξεργαστής ο οποίος δεν έχει guard bits, πρέπει πριν να μπουν τα προσωρινά αποτελέσματα ή τα σήματα εισόδου στον accumulator, να κλιμακωθούν ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα υπερχειλίσης. Η κλιμάκωση αυτή γίνεται συνήθως με δεξιά ολίσθηση του αποτελέσματος του πολλαπλασιαστή κατά μερικά bits. Για παράδειγμα ο επεξεργαστής της Texas Instruments TMS320C2x και TMS320C5x επιτρέπουν στον καταχωρητή αποτελέσματος (product register) να ολισθήσει δεξιά, αυτόματα, κατά έξι bits.

Οποσδήποτε η κλιμάκωση, όπως έχει αναφερθεί, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας. Όταν χρησιμοποιούνται κλασματικοί αριθμοί, τότε το περισσότερο σημαντικό μισό του accumulator κρατείται μετά από μια σειρά από multiply-accumulate διαδικασίες. Στην περίπτωση αυτή, η απώλεια της ακρίβειας λόγω της κλιμάκωσης, δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό γίνεται επειδή το σφάλμα κβάντισης εξαιτίας της κλιμάκωσης περιέχεται στο κάτω μισό του accumulator που απορρίφθηκε. Τα guard bits παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία από τη κλιμάκωση του αποτελέσματος, επειδή επιτρέπουν την μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε βήμα. Μερικοί επεξεργαστές όπως ο Texas Instruments TMS320C1x δεν χρησιμοποιούν ούτε guard bits ούτε την ικανότητα να κλιμακώσουν αποτελεσματικά τα δεδομένα του καταχωρητή. Έτσι για να αποφευχθεί η υπερχειλίση θα πρέπει να κλιμακωθούν τα δεδομένα στις εισόδους του πολλαπλασιαστή, κάτι που μειώνει αισθητά την ακρίβεια.

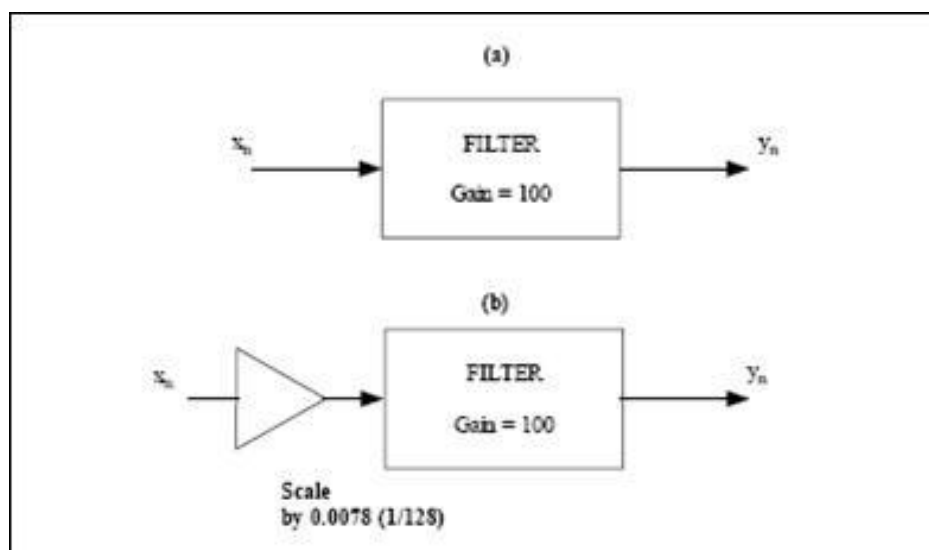
Αριθμητική και λογική μονάδα

Η αριθμητική και λογική μονάδα (ALU) του DSP επεξεργαστή εκτελεί βασικές αριθμητικές και λογικές πράξεις σε ένα μόνο κύκλο εντολής. Οι πιο κοινές από αυτές είναι η πρόσθεση, αφαίρεση, αύξηση, μετατροπή σε αρνητικό αριθμό και λογικές and, or και not. Οι αριθμητικές και λογικές μονάδες διαφέρουν ως προς το μέγεθος της λέξης που χρησιμοποιούν για τις λογικές πράξεις. Μερικοί επεξεργαστές χρησιμοποιούν τελεστές που έχουν πλήρες μέγεθος του accumulator ενώ άλλοι χρησιμοποιούν native-width data words. Αν η αριθμητική και λογική μονάδα δεν μπορεί να εκτελέσει λογικές πράξεις, με μέγεθος λέξης όσο το μέγεθος του accumulator, τότε ο προγραμματιστής πρέπει να εκτελέσει τις λογικές πράξεις σε πολλά στάδια, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος και οι κύκλοι εντολής. Τέλος σε μερικούς επεξεργαστές η αριθμητική και λογική

μονάδα χρησιμοποιείται για multiply-accumulate πράξεις, ενώ σε άλλους ένα ξεχωριστός αθροιστής παρέχεται γι' αυτό το σκοπό.

Ολισθητής

Λέχθηκε προηγουμένως ότι ο προγραμματιστής επιλέγει ένα υποσύνολο από το αποτέλεσμα, το οποίο θα το χρησιμοποιήσει στο επόμενο στάδιο της επεξεργασίας. Ένας ολισθητής (shifter) στο data path διευκολύνει την επιλογή αυτή, με το πολλαπλασιασμό της εισόδου με μια δύναμη του $2(2^n)$. Η σημασία του shifter είναι μεγάλη γιατί σε μερικές DSP λειτουργίες, είναι απαραίτητη η διεύρυνση ή συρρίκνωση του μεγέθους των σημάτων. Έστω για παράδειγμα ένα φίλτρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, με κέρδος ίσο με 100. Αν οι εισοδοί είναι περιορισμένοι σε μια ακτίνα από -1 έως 1, τότε οι τιμές εξόδου είναι από -100 έως 100. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα της υπερχειλίσης πρέπει να κλιμακώθουν τα σήματα και μάλιστα με ένα παράγοντα με τιμή $1/128$ (την κοντινότερη δύναμη του 2 στο $1/100$) πριν το φιλτράρισμα.



Σχήμα 10. Κλιμάκωση σε fixed-point DSP επεξεργαστές.

Ο συμβιβασμός που γίνεται όταν γίνεται κλιμάκωση έχει να κάνει με τη δυναμική περιοχή και την ακρίβεια. Όταν ένα σήμα κλιμακώνεται σε μικρότερη κλίμακα, κάποια από τα μικρότερης τάξης bits της αρχικής τιμής χάνονται ενώ μέγιστο πιθανό πλάτος του σφάλματος κβάντισης δεν μεταβάλλεται. Συνεπώς η ακρίβεια μειώνεται και επειδή η δυναμική περιοχή συνδέεται με την ακρίβεια, γίνεται κατανοητό ότι και αυτή μειώνεται. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η κλιμάκωση απαιτεί πολύ λεπτούς χειρισμούς και πολλές αναλύσεις πριν εμφανιστεί. Θα πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι η κλιμάκωση καθώς και τα guard bits χρησιμοποιούνται

για την εξάλειψη του φαινομένου της υπερχείλισης. Η κλιμάκωση των προσωρινών αποτελεσμάτων ίσως ορισμένες φορές χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η χρήση των guard bits. Η χρήση ωστόσο των guard bits δεν υποκαθιστά την ανάγκη για κλιμάκωση. Η θέση του shifter είναι συνήθως μετά τον πολλαπλασιαστή και την αριθμητική μονάδα, αν και σε μερικούς επεξεργαστές ο shifter είναι ανάμεσά τους. Αρκετοί shifters έχουν περιορισμένες δυνατότητες, προσφέροντας για παράδειγμα ολίσθηση δεξιά ή αριστερά μόνο κατά ένα bit. Ένα άλλο είδος shifter είναι ο barrel shifter ο οποίος προσφέρει την δυνατότητα ολίσθησης κατά πολλά bits σ'ένα μόνο κύκλο εντολής, ο οποίος βρίσκεται συχνή εφαρμογή στους DSP επεξεργαστές.

Υπερχείλιση

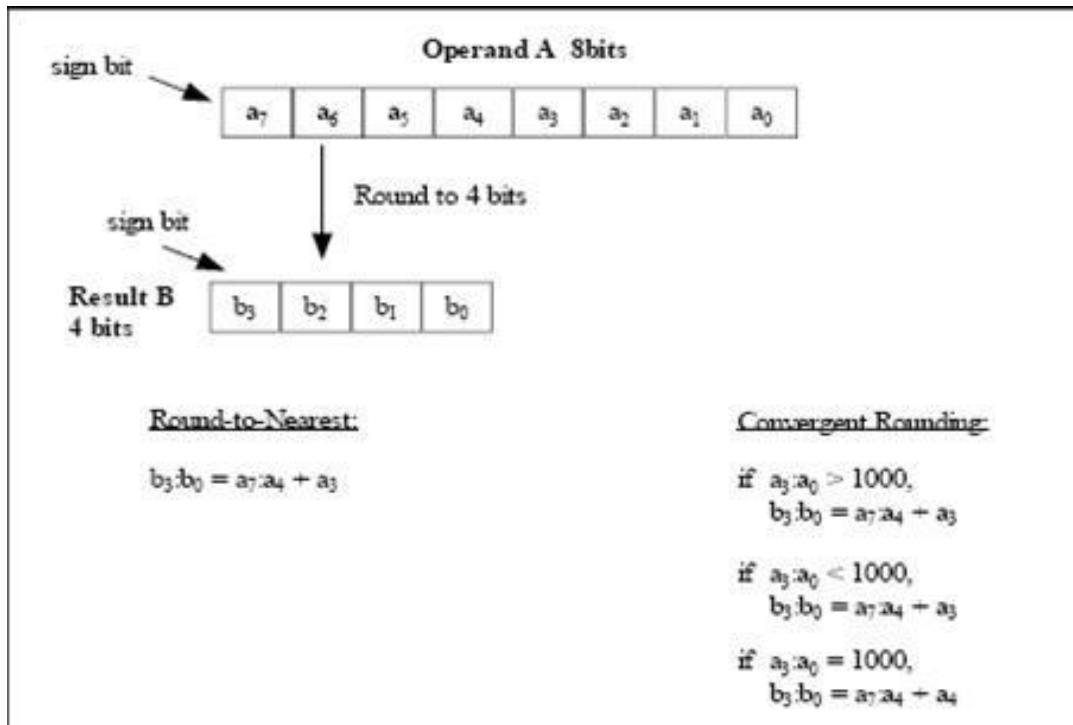
Πολλοί DSP επεξεργαστές, εμπεριέχουν την έννοια της άθροισης κάποιων τιμών όταν για παράδειγμα, σε κάποιο αλγόριθμο φιλτραρίσματος τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές τα αποτελέσματα πρέπει να προστεθούν μεταξύ τους. Όταν μια σειρά από αριθμούς προστίθενται μεταξύ τους, το αποτέλεσμα είναι δυνατόν να μεγαλώσει σε μέγεθος. Η περίπτωση στην οποία το αποτέλεσμα μιας πράξης έχει τόσο μεγάλη τιμή που δεν μπορεί να αναπαρασταθεί από τον accumulator, λέγεται υπερχείλιση (overflow). Όταν συμβαίνει υπερχείλιση στον accumulator καταχωρείται ένα λάθος αποτέλεσμα. Ακόμα και αν ο accumulator κρατά το σωστό αποτέλεσμα, υπερχείλιση μπορεί να συμβεί όταν ο accumulator παρέχει guard bits και ο αριθμός μεταφερθεί στη μνήμη. Στην περίπτωση αυτή ο accumulator μπορεί να δεχθεί τιμές μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να καταχωρηθούν στη μνήμη. Υπερχείλιση, μπορεί αυτόματα να συμβεί όταν χρησιμοποιείται ένας shifter για να κλιμακώσει την τιμή του accumulator καθώς εκείνη εγγράφεται στη μνήμη.

Υπάρχουν δύο τεχνικές για να αντιμετωπιστεί η υπερχείλιση. Η πρώτη τεχνική είναι η σωστή κλιμάκωση όλων των αποτελεσμάτων, ανεξάρτητα από τα δεδομένα εισόδου. Μια άλλη καλύτερη εναλλακτική λύση είναι η χρήση κορεσμού (saturation) στην οποία ένα ειδικό κύκλωμα ανιχνεύει την υπερχείλιση και αντικαθιστά την λανθασμένη έξοδο με τη μεγαλύτερη θετική τιμή που μπορεί να παρασταθεί. Για παράδειγμα αν προστεθούν οι αριθμοί $50+65$ με ένα υπολογιστή δύο ψηφίων, το αποτέλεσμα που είναι 115, δεν μπορεί να παρασταθεί σωστά και στον υπολογιστή αναγράφεται η τιμή 15. Με τη χρήση της saturation αριθμητικής το αποτέλεσμα θα είναι 99 (το μεγαλύτερο θετικό αριθμό δύο ψηφίων), που πάλι είναι λάθος αλλά το σφάλμα εδώ είναι μικρότερο. Οι fixed-point DSP επεξεργαστές γενικά παρέχουν ειδικό hardware για την saturation αριθμητική ώστε να γίνεται αυτόματα ή με την εκτέλεση μιας ειδικής εντολής. Το hardware αυτό λέγεται limiter από κάποιους κατασκευαστές.

Στρογγυλοποίηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στον πολλαπλασιασμό, την πρόσθεση και άλλες αριθμητικές πράξεις αυξάνονται οι απαιτήσεις σε bits για να παρασταθούν σωστά τα διάφορα αποτελέσματα. Συνήθως είναι απαραίτητη η μείωση της ακρίβειας αυτών των αποτελεσμάτων, όπως για παράδειγμα όταν μεταφέρονται τα περιεχόμενα ενός 36-bit accumulator σε μια 16-bit περιοχή μνήμης. Ο πιο απλός τρόπος να γίνει κάτι τέτοιο είναι αν αγνοηθούν τα λιγότερο σημαντικά ψηφία της αναπαράστασης. Η διαδικασία αυτή λέγεται αποκοπή (truncate). Για παράδειγμα για να αποκοπεί μια τιμή 36 bit σε 16 bit τα τελευταία bits θα χαθούν. Αφού λοιπόν χάνεται πληροφορία εμφανίζεται στο σήμα κάποιο σφάλμα. Ας σημειωθεί ότι η τιμή που έχει αποκοπεί είναι πάντα μικρότερη από την πραγματική. Αυτό σημαίνει ότι η αποκοπή προσθέτει σφάλμα πόλωσης (bias) στα σήματα. Η τεχνική της στρογγυλοποίησης, που σε μερικούς επεξεργαστές γίνεται αυτόματα ενώ σε άλλους απαιτείται ειδική εντολή, μειώνει το αριθμητικό λάθος καθώς και το σφάλμα πόλωσης. Η πιο απλή μέθοδος στρογγυλοποίησης είναι η τεχνική στρογγυλοποίησης στον κοντινότερο αριθμό (round-to-nearest technique). Αν η τιμή είναι στη μέση δύο κοντινών τιμών, τότε ο αριθμός στρογγυλοποιείται στον ψηλότερο (θετικότερο) αριθμό. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο προστίθεται μια σταθερά ίση με το μισό της τιμής του λιγότερου σημαντικού bit της λέξης εξόδου και κατόπιν αποκόπτεται το αποτέλεσμα στο επιθυμητό εύρος. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι παρουσιάζει μια ασυμμετρία λόγω της στρογγυλοποίησης προς τα επάνω κάθε φορά που ένας αριθμός βρίσκεται στη μέση. Παρόλα αυτά είναι πολύ εύκολη να υλοποιηθεί. Μια βελτιωμένη τεχνική είναι η convergent στρογγυλοποίηση. Σε αυτή τη τεχνική αν ένα αριθμός βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κοντινές τιμές τότε ο πρώτος θα στρογγυλοποιηθεί ή προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Η κατεύθυνση της στρογγυλοποίησης εξαρτάται από την τιμή του bit του αριθμού που θα γίνει στο λιγότερο σημαντικό bit της λέξης εξόδου. Αν αυτό το bit είναι '0' τότε ο αριθμός στρογγυλοποιείται προς τα κάτω (αρνητική κατεύθυνση) ενώ αν είναι '1' θα στρογγυλοποιηθεί προς τα πάνω (θετική κατεύθυνση). Οι δύο μέθοδοι συγκρίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η convergent στρογγυλοποίηση ελαττώνει το σφάλμα πόλωσης γιατί είναι πιο συμμετρική (οι μισοί αριθμοί στρογγυλοποιούνται πάνω και οι άλλοι μισοί κάτω). Τέλος παρόλο που είναι σχετικά εύκολη να υλοποιηθεί δεν χρησιμοποιείται από όλους του DSPs. Ο Analog Devices ADSP-21xx και ο Motorola DSP5600xx είναι δύο επεξεργαστές που παρέχουν αυτή τη στρογγυλοποίηση.



Σχήμα 11. Σύγκριση ανάμεσα στις δύο μεθόδους στρογγυλοποίησης.

Καταχωρητές τελεστών

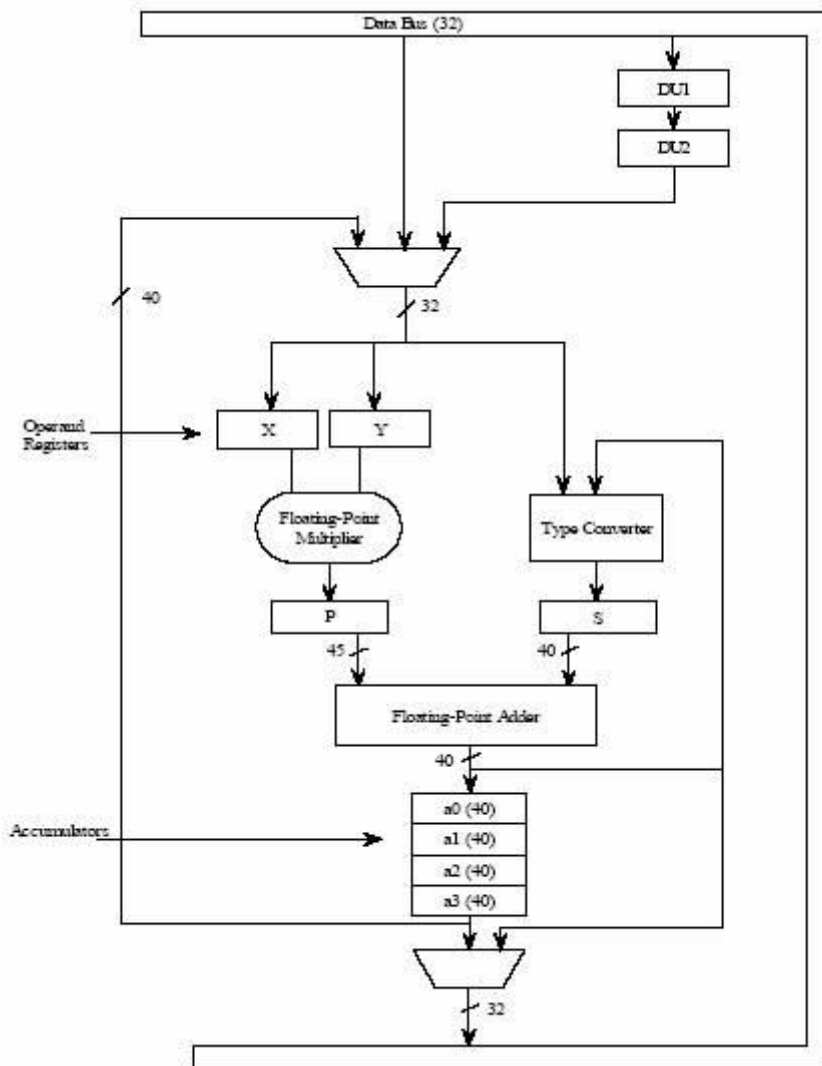
Στους περισσότερους fixed-point DSP επεξεργαστές, οι τελεστές για το data path παρέχονται από ένα μικρό αριθμό καταχωρητών ή από τον (ή τους) accumulator μέσα στο data path. Οι τιμές πρέπει να φορτωθούν στους καταχωρητές τελεστών με MOVE εντολές πριν επεξεργαστούν από το data path. Ο επεξεργαστής που επεξεργάζεται τα δεδομένα, αφού αυτά καταχωρηθούν, συχνά λέμε ότι έχει load-store αρχιτεκτονική. Στους καταχωρητές έχουμε πρόσβαση χρησιμοποιώντας register-direct διευθυνσιοδότηση. Σε μερικούς επεξεργαστές, (για παράδειγμα στους Texas Instruments TMS320C2x/C5x), οι τελεστές μπορεί να έρχονται κατευθείαν από τη μνήμη, στο data path χρησιμοποιώντας memory-direct ή register-indirect διευθυνσιοδότηση.

Floating-Point data path

Στους floating-point DSP επεξεργαστές, τα data path είναι σχεδόν όμοια με αυτά των fixed-point επεξεργαστών. Στην ενότητα αυτή, θα δοθεί έμφαση στα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα δύο data paths. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα τυπικό floating data path, σε αυτή την περίπτωση του 32-bit επεξεργαστή της AT&T DSP3210.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Στους περισσότερους floating-point DSP επεξεργαστές, το κύριο data path είναι ικανό και για floating-point αλλά και για fixed-point υπολογισμούς, αλλά μπορούν να εκτελούν ένα τύπο λειτουργίας σε κάθε κύκλο εντολής. Μερικοί floating-point επεξεργαστές παρέχουν δύο data paths, ένα για floating-point και ένα για fixed-point λειτουργίες. Αυτό συμβαίνει στον AT&T DSP32xx για παράδειγμα. Στους επεξεργαστές οι οποίοι διαθέτουν ξεχωριστά data paths, το fixed-point data path δεν διαθέτει πολλαπλασιαστή.



Σχήμα 12. Floating-point data path του επεξεργαστή AT&T DSP3210.

Πολλαπλασιαστής

Οι πολλαπλασιαστές των floating-point επεξεργαστών δέχονται δύο native size (συνήθως 32 bit) floating-point αριθμούς. Σε αντίθεση με τους fixed-point πολλαπλασιαστές, οι floating-point γενικά δεν παράγουν ένα μεγάλο αποτέλεσμα έτσι ώστε να αποφευχθεί η

απώλεια της ακρίβειας. Για παράδειγμα, όταν πολλαπλασιάζονται δύο IEEE-754 αριθμούς μονής ακρίβειας, κάθε τιμή εισόδου έχει δεκαδικό μέρος 24 bits. Για τη διατήρηση της ακρίβειας, η τιμή εισόδου πρέπει να έχει εύρος 48-bits. Οι περισσότεροι floating-point πολλαπλασιαστές δεν υποστηρίζουν το πλήρες μήκος του πολλαπλασιασμού. Αντί για αυτό, υποστηρίζουν το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού να είναι μεγαλύτερο σε bits από ότι οι αριθμοί εισόδου, παρέχοντας συνήθως επιπλέον 8-12 bits για το δεκαδικό μέρος (mantissa).

Αριθμητική και Λογική Μονάδα

Οι αριθμητικές και λογικές μονάδες των floating-point επεξεργαστών παρέχουν συνήθως δυνατότητα για πρόσθεση, αφαίρεση και άλλες αριθμητικές πράξεις όπως απόλυτη τιμή, αντίθετοι αριθμοί, ελάχιστη και μέγιστη τιμή, αντίστροφη τιμή. Οι floating-point επεξεργαστές χρησιμοποιούν της αριθμητική και λογική τους μονάδα για multiply accumulate λειτουργίες. Υπάρχουν μερικοί επεξεργαστές, όπως για παράδειγμα οι AT&T DSP32C, που παρέχουν την multiply-add λειτουργία. Η λειτουργία αυτή διαφοροποιείται από την multiply-accumulate στο ότι το αποτέλεσμα καταχωρείται σε διαφορετικό καταχωρητή. Λογικές πράξεις δεν έχουν νόημα στα floating-point δεδομένα και για αυτό και συνήθως δεν παρέχονται στις floating-point αριθμητικές και λογικές μονάδες.

Overflow – underflow

Με την floating-point αριθμητική, η υπερχειλίση καθώς και άλλες καταστάσεις καλούνται συχνά εξαιρέσεις. Ο επεξεργαστής ανιχνεύει μια τέτοια εξαίρεση με το να θέτει τα απαραίτητα bits σε έναν status register ή προκαλώντας κάποιο interrupt αναθέτοντας την διαχείριση της εξαίρεσης σε μια ειδική ρουτίνα. Η υπερχειλίση δεν λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη στους floating-point επεξεργαστές λόγω της μεγάλης δυναμικής περιοχής. Ωστόσο σε μερικές εφαρμογές η υπερχειλίση χρίζει ιδιαίτερης σημασίας. Οι περισσότεροι floating-point DSP επεξεργαστές αντιμετωπίζουν την υπερχειλίση θέτοντας ένα status flag και αυτόματα θέτουν σε κόρο (saturate) το αποτέλεσμα της λειτουργίας που προκάλεσε την υπερχειλίση. Μια άλλη εξαίρεση είναι η υποχειλίση (underflow) που συμβαίνει όταν το αποτέλεσμα μιας πράξης είναι πολύ μικρό για να παρασταθεί. Παράδειγμα είναι ο πολλαπλασιασμός δύο πολύ μικρών αριθμών με αποτέλεσμα το γινόμενό τους να είναι μικρότερο από τους αριθμούς αυτούς και επομένως να υπάρχει το ενδεχόμενο να μην μπορεί να αναπαρασταθεί. Σε αυτή την περίπτωση, ο επεξεργαστής θέτει το αποτέλεσμα στο μηδέν και τίθεται ένα flag στο status register.

Στρογγυλοποίηση

Οι περισσότεροι floating-point επεξεργαστές αυτόματα στρογγυλοποιούν τους αριθμούς σε μια 40 με 44-bit διάταξη. Τα αποτελέσματα γράφονται στη μνήμη είτε σαν εκτεταμένης ακρίβειας (extended precision) αριθμούς είτε σαν native μονής ακρίβειας αριθμούς συνήθως 32 bits. Όπως στους fixed-point επεξεργαστές, οι περισσότεροι floating-point χρησιμοποιούν την απλή τεχνική στρογγυλοποίησης προς τον κοντινότερο αριθμό (round-to-nearest). Ο Motorola DSP96002 είναι μοναδικός γιατί χρησιμοποιεί όλες τις τεχνικές στρογγυλοποίησης που καθορίζονται από το IEEE-754 πρότυπο, όπως για παράδειγμα η convergent στρογγυλοποίηση ή στρογγυλοποίηση προς τον κοντινότερο θετικό, στρογγυλοποίηση προς το μηδέν ή προς τον κοντινότερο αρνητικό.

Accumulators

Γενικά οι floating-point επεξεργαστές έχουν περισσότερους και μεγαλύτερους καταχωρητές από τους fixed-point. Σε κάποιους floating-point επεξεργαστές, (AT&T DSP3210) ένα μικρό αριθμό καταχωρητών έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να χρησιμοποιηθούν σαν accumulators. Άλλοι επεξεργαστές παρέχουν ένα αριθμό από γενικών καθηκόντων καταχωρητές για να δέχονται αποτελέσματα από multiply-accumulate και άλλες αριθμητικές λειτουργίες.

Shifter

Με την floating-point αριθμητική, το hardware αυτόματα κλιμακώνει τα αποτελέσματα ώστε να διατηρηθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Ο shifter που κάνει κλιμάκωση στα δεδομένα δεν είναι γενικά ορατός ή ελεγχόμενος από τον προγραμματιστή. Για τους επεξεργαστές που έχουν δύο ξεχωριστά data path, ο shifter μπορεί εξ'ολοκλήρου να ελέγχεται από τον προγραμματιστή για ολίσθηση των fixed-point δεδομένων.

Τελεστές και καταχωρητές τελεστών

Οι περισσότεροι floating-point DSP επεξεργαστές παρέχουν τελεστές για το data path από τους καταχωρητές των τελεστών ή από τους accumulators. Αυτό καλείται register-direct διευθυνσιοδότηση. Οι τιμές πρέπει να φορτώνονται από τη μνήμη στους καταχωρητές με move εντολές. Μερικοί επεξεργαστές (AT&T DSP32xx) παρέχουν τους τελεστές κατευθείαν από τη μνήμη στο data path χρησιμοποιώντας register-indirect διευθυνσιοδότηση.

Κεφάλαιο 3

Αναφορά στις βασικές οικογένειες της Texas Instruments, Motorola, Analog Devices, AT & T. Βασικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά.

DSP επεξεργαστές

Οι πιο πολλοί επεξεργαστές μοιράζονται κάποια κοινά χαρακτηριστικά και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να υποστηρίζουν επαναλαμβανόμενες αριθμητικές πράξεις. Στον επόμενο πίνακα δίνονται μερικοί χαρακτηριστικοί DSP επεξεργαστές, από τις μερικές δεκάδες που υπάρχουν στο εμπόριο.

Κατασκευαστής	Οικογένεια Επεξεργαστή	Τύπος Αριθμητικής	Εύρος δεδομένων	Ταχύτητα (MIPS)
	ADSP-21xx	Fixed	16	33
Analog Devices	ADSP-210xx	Floating	32	40
	DSP16xx	Fixed	16	70
AT&T	DSP32xx	Floating	32	20
	DSP5600x	Fixed	24	40
	DSP561xx	Fixed	16	30
Motorola	DSP563xx	Fixed	24	80
NEC	μPD7701x	Fixed	16	33
	TMS320C1x	Fixed	16	8,8
	TMS320C2x	Fixed	16	40
Texas Instruments	TMS320C3x	Floating	32	25
	TMS320C4x	Floating	32	30
	TMS320C54x	Fixed	16	50
	TMS320C62x	Fixed	16	2400
	TMS320C67x	Floating	32	1600
	TMS320C64x	Fixed	16	4800

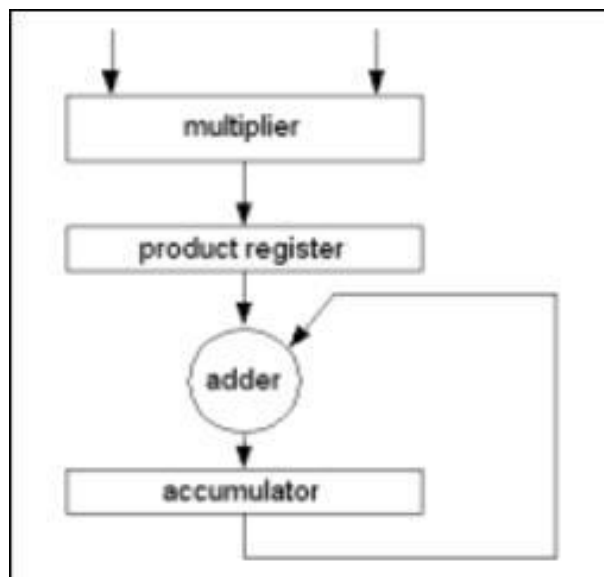
Πίνακας 1. Εμπορικοί DSP επεξεργαστές.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Το πιο συχνά αναφερόμενο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα για γρήγορες λειτουργίες πολλαπλασιασμού και συσσώρευσης (multiply & accumulate) σε ένα κύκλο εντολής. Οι λειτουργίες αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στα ψηφιακά φίλτρα, στους μετασχηματισμούς Fourier και στη συσχέτιση. Οι σχέσεις που περιγράφουν χαρακτηριστικούς DSP αλγόριθμους δίνονται στην συνέχεια.

✓ Συνέλιξη:	$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k)$
✓ Συσχέτιση:	$r_{x,y}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l)$
✓ FIR filtering:	$y(n) = \sum_{m=0}^M b_m x(n-m)$
✓ IIR filtering:	$y(n) = \sum_{m=0}^M b_m x(n-m) - \sum_{m=1}^N a_m y(n-m)$

Για να επιτευχθεί η δυνατότητα για γρήγορες λειτουργίες πολλαπλασιασμού και συσσώρευσης, οι DSPs έχουν στο ίδιο ολοκληρωμένο ένα πολλαπλασιαστή και ένα accumulator, οι οποίοι βρίσκονται στην κύρια μονάδα αριθμητικής επεξεργασίας (data path).

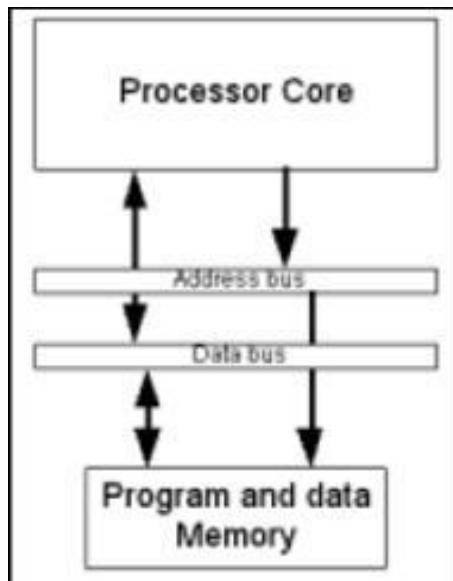


Σχήμα 1. Μονάδα πολλαπλασιασμού και συσσώρευσης.

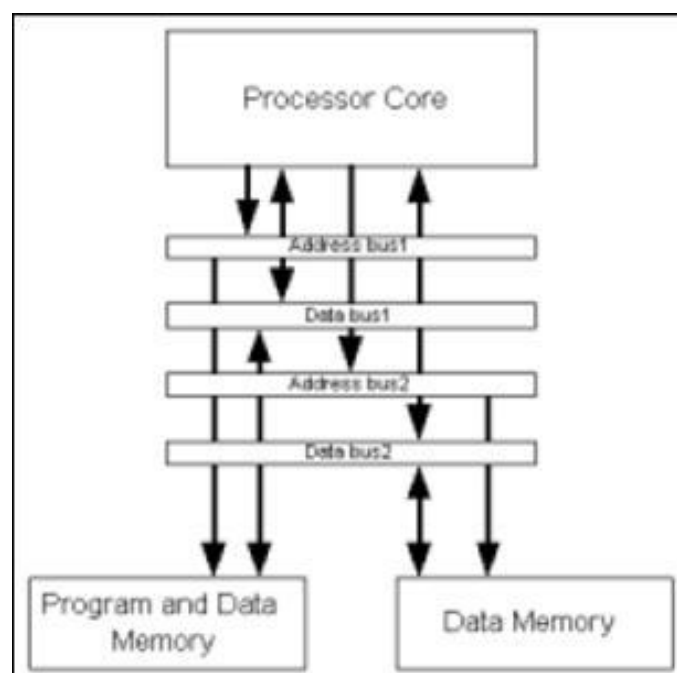
Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η αρχιτεκτονική της πολλαπλής πρόσβασης στη μνήμη (multiple-access memory architecture). Αυτό επιτρέπει σε έναν DSP επεξεργαστή να κάνει

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

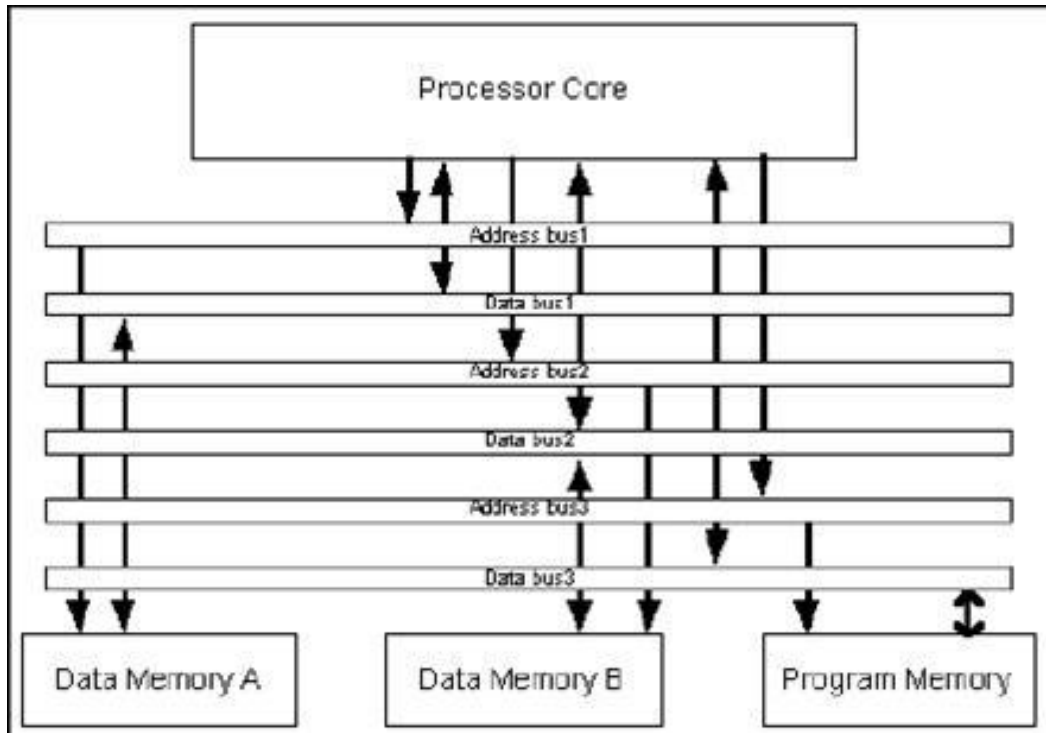
fetch μία εντολή ενώ παράλληλα να λαμβάνει τους τελεστές για την εντολή ή να αποθηκεύει το αποτέλεσμα της προηγούμενης εντολής στην μνήμη. Υψηλό εύρος δεδομένων (bandwidth) μεταξύ του επεξεργαστή και της μνήμης είναι αναγκαίο για την καλή απόδοση αν επαναλαμβανόμενες και απαιτητικές λειτουργίες απαιτούνται από έναν αλγόριθμο, όπως άλλωστε είναι και το συνηθισμένο σε έναν DSP αλγόριθμο. Στα επόμενα σχήματα δίνονται οι τρεις πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές μνήμης έτσι ώστε να γίνει κατανοητό το πλεονέκτημα της μνήμης πολλαπλής προσπέλασης στην υλοποίηση ενός DSP αλγόριθμου. Για να δειχτεί η διαφορά στην υλοποίηση ενός κλασικού DSP αλγόριθμου, όπως είναι το FIR filtering, σε διαφορετικές δομές μνήμης, δίνονται τα σχήματα 5 και 6



Σχήμα 2. Αρχιτεκτονική απλής προσπέλασης Von- Neumann.



Σχήμα 3. Αρχιτεκτονική Harvard.

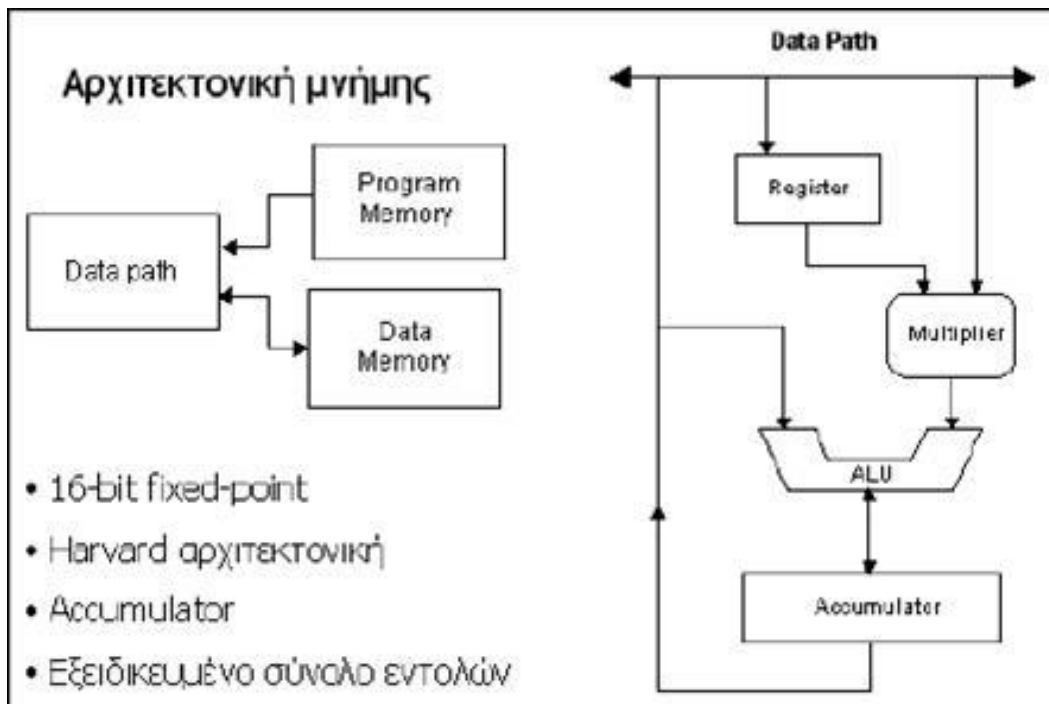


Σχήμα 4. Αρχιτεκτονική Τροποποιημένη Harvard.

loop :	Αρχιτεκτονική μνήμης
mov	*r0, x0
mov	*r1, x1
mpv	x0, y0, a
add	a, b
mov	y0, *r2
inc	r0
inc	r1
inc	r2
dec	ctr
tst	ctr
inz	loop

Υπολογίζεται ένας συντελεστής σε κάθε επανάληψη

Σχήμα 5. Υλοποίηση FIR φίλτρου σε αρχιτεκτονική μνήμης απλής προσπέλασης.



Σχήμα 6. Υλοποίηση FIR φίλτρου σε αρχιτεκτονική μνήμης Harvard.

Επόμενο κοινό χαρακτηριστικό είναι οι εξειδικευμένοι τρόποι διευθυνσιοδότησης (addressing modes), οι οποίοι επιτρέπουν στον επεξεργαστή να χειρίζεται αποτελεσματικά τα δεδομένα. Για την γένεση των τρόπων διευθυνσιοδότησης υπάρχουν ειδικές μονάδες γένεσης διευθύνσεων (address generation units), έτσι ώστε ο επεξεργαστής να χειρίζεται τα δεδομένα ενώ στο υπόβαθρο να καθορίζονται οι τρόποι με τους οποίους θα διευθυνσιοδοτούνται τα δεδομένα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δυνατότητα κυκλικής (circular ή modulo) διευθυνσιοδότησης data buffers. Το στοιχείο της γένεσης διάφορων τρόπων διευθυνσιοδότησης είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τους DSP επεξεργαστές από τους επεξεργαστές γενικού σκοπού.

Οι DSPs επίσης διαθέτουν τη δυνατότητα για έλεγχο του προγράμματος (specialized program control) με το οποίο επιτυγχάνεται όχι μόνο ικανός έλεγχος των βρόχων στους αλγόριθμους αλλά και ταχεία διαχείριση των διακοπών (interrupts) για συχνές λειτουργίες εισόδου / εξόδου.

Ένα τελευταίο κοινό χαρακτηριστικό των DSPs είναι τα περιφερειακά που βρίσκονται στο ολοκληρωμένο του επεξεργαστή. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα είναι :

- Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
- Σειριακές θύρες

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

❑ DMA ελεγκτές

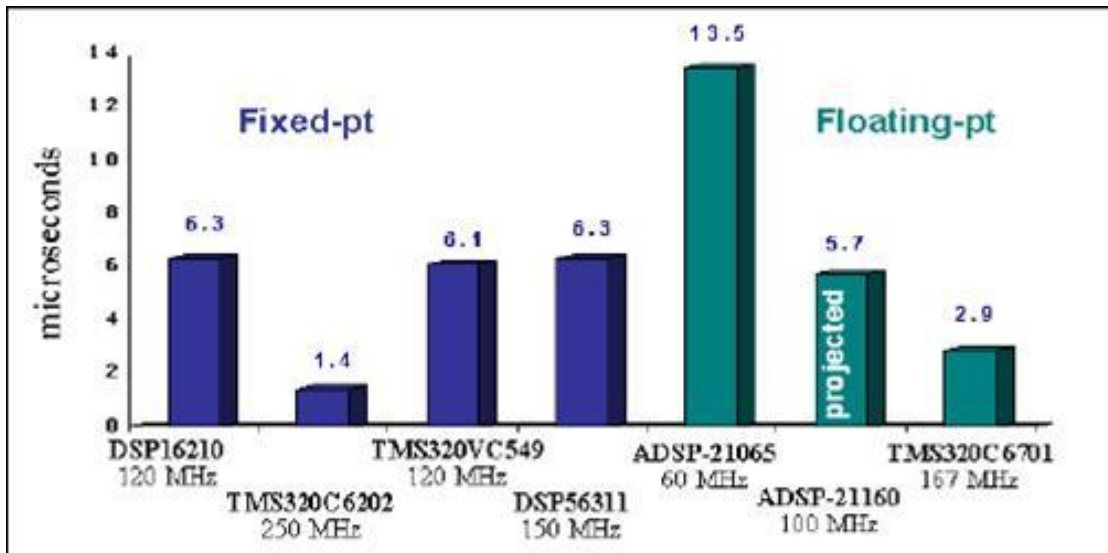
Τα περιφερειακά αυτά επιτρέπουν χαμηλού κόστους σχεδιασμούς συστημάτων. Στην ουσία ένας DSP επεξεργαστής είναι ένας μικροελεγκτής που είναι εξειδικευμένος να επεξεργάζεται αποτελεσματικά δεδομένα.

Τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα 2.

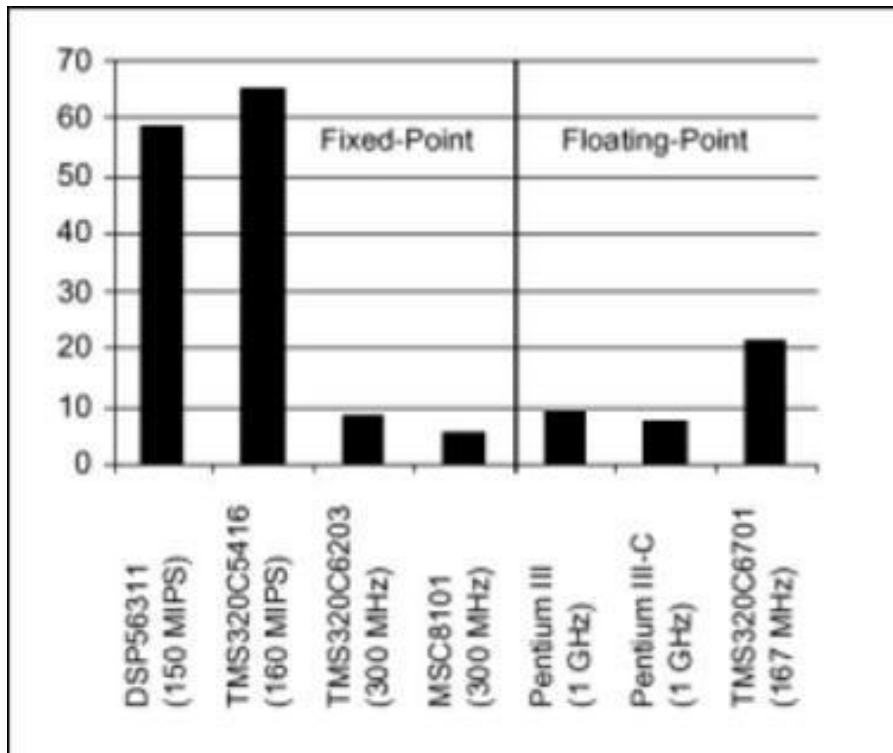
Χαρακτηριστικό	Χρήση
Fast multiply-accumulate	Οι περισσότεροι DSP αλγόριθμοι, συμπεριλαμβανομένου του φιλτραρίσματος, FFT μετασχηματισμού, εξαρτώνται από τον πολλαπλασιασμό
Multiple-access memory αρχιτεκτονική	Αρκετές DSP λειτουργίες απαιτούν την ανάγνωση μιας εντολής προγράμματος και πολλαπλά δεδομένα σε ένα κύκλο εντολής για καλύτερη απόδοση
Specialized addressing modes	Αποτελεσματικός χειρισμός των πινάκων με τα δεδομένα καθώς και first-in, first-out buffers στην μνήμη
Specialized program control	Αποτελεσματικός χειρισμός των βρόχων για αρκετούς επαναληπτικούς DSP αλγόριθμους. Γρήγορος χειρισμός των διακοπών για συχνές I/O λειτουργίες
On-chip peripherals and input/output interfaces	Περιφερειακά εντός του chip, όπως αναλογικοί σε ψηφιακοί μετατροπείς, επιτρέπουν τη σχεδίαση συστημάτων χαμηλού κόστους.

Πίνακας 2. Τα βασικά χαρακτηριστικά όλων σχεδόν των DSP επεξεργαστών.

Στην συνέχεια δίνονται συγκριτικές μετρήσεις για την υλοποίηση χαρακτηριστικών αλγορίθμων, όπως FIR filtering και FFT μετασχηματισμό, ανάμεσα σε γνωστούς DSP επεξεργαστές.



Σχήμα 7. Συγκριτικές μετρήσεις για την υλοποίηση FIR φίλτρου.

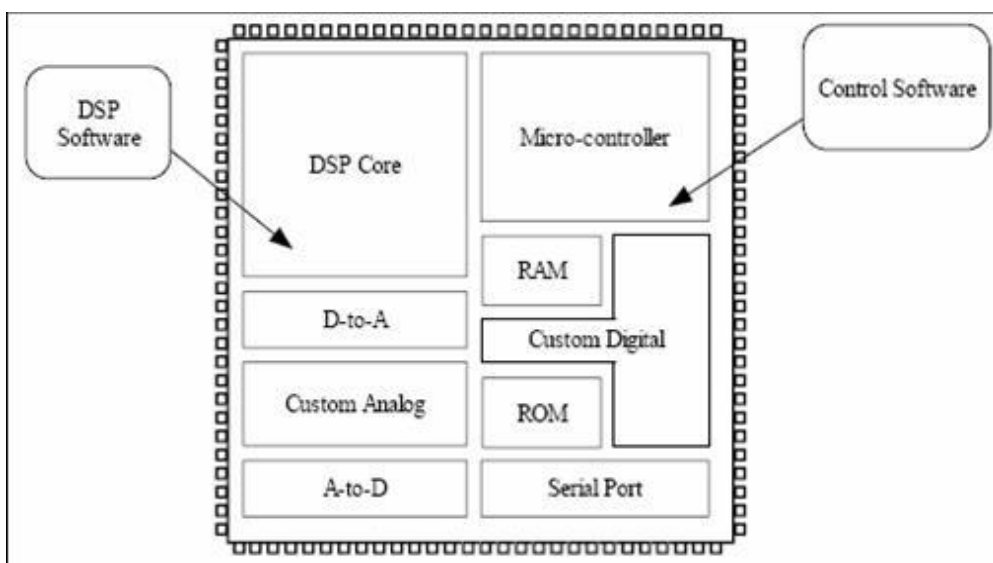


Σχήμα 8. Συγκριτικές μετρήσεις για την υλοποίηση FFT 256 σημείων.

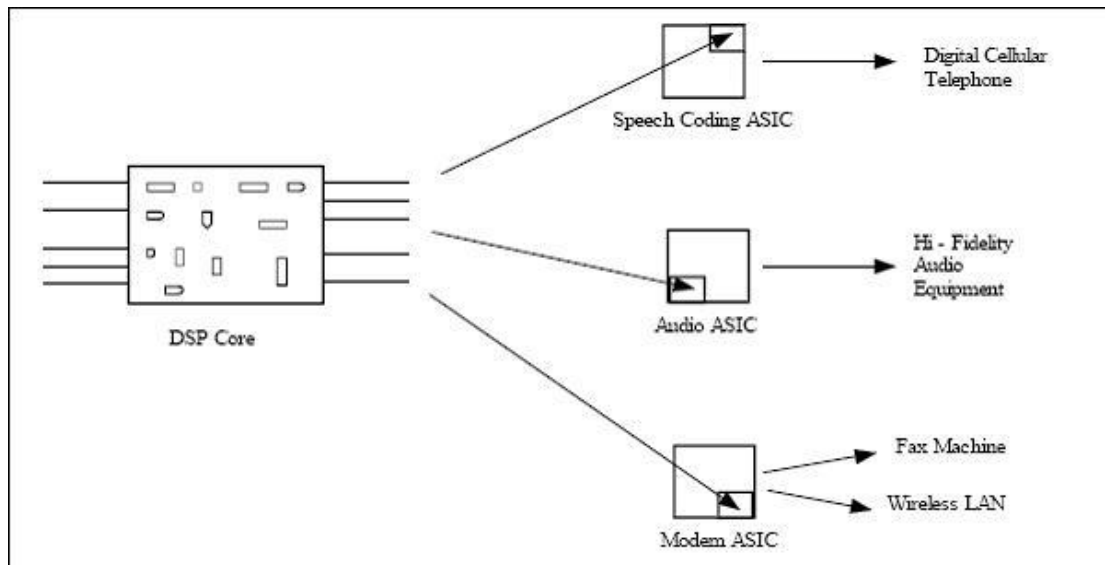
Ενσωματώσεις στους DSP επεξεργαστές

Η πιο συχνή μορφή των DSP επεξεργαστών είναι οι single-chip επεξεργαστές, οι οποίοι καταλαμβάνουν όλο το χώρο στο ολοκληρωμένο. Παράδειγμα single-chip επεξεργαστών είναι ο TMS320C6211 της Texas Instruments και ο DSP56002 της Motorola. Με την πρόοδο όμως της ολοκλήρωσης και των νέων τεχνικών σχεδίασης των ολοκληρωμένων, οι DSPs απαντώνται σε πολλές μορφές. Οι μορφές αυτές αναφέρονται στην συνέχεια.

- *Multichip modules* : Τα multichip modules (MCMs) είναι ένα είδος superchip. Αντί λοιπόν να τοποθετούν ένα IC σε ένα κεραμικό, τα MCMs είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να διαθέτουν πολλά καλούπια (dies) σε ένα "πακέτο" (package). Ένα πλεονέκτημα των MCMs είναι ότι επιτυγχάνουν υψηλότερη πυκνότητα "πακεταρίσματος". Για παράδειγμα, η Texas Instruments κατασκευάζει ένα MCM το οποίο περιλαμβάνει δύο TMS320C40 επεξεργαστές και 128 λέξεις των 32-bits SRAM.
- *DSP cores* : Ένας DSP core είναι ένας DSP επεξεργαστής ο οποίος προορίζεται για δομικό στοιχείο ενός υπο κατασκευή chip. Ένα DSP core-based ASIC (Application Specific Integrated Circuit) είναι ένα ASIC το οποίο ενσωματώνει ένα DSP core σαν ένα στοιχείο σε ολόκληρο το chip. Ένα DSP core-based ASIC επιτρέπει στο σχεδιαστή του συστήματος να ενσωματώσει σε ένα μόνο ολοκληρωμένο ένα προγραμματιζόμενο DSP, μια λογική διασύνδεση (interface logic), περιφερειακά, μνήμη και άλλα στοιχεία. Τα σχήματα 9 και 10 απεικονίζουν ένα DSP core-based ASIC.



Σχήμα 9. Τυπικό DSP core-based ASICs.



Σχήμα 10. Ένα DSP core που προορίζεται για διάφορα ASICs.

Προς το παρόν, πολλές εταιρείες καθιερώθηκαν σαν προμηθευτές DSP cores για ASIC σχεδιασμούς, όπως οι : AT&T, Texas Instruments, SGS-Thomson Microelectronics, DSP Group, Clark-spur Design, 3Soft και Tensleep Design. Φυσικά κάθε εταιρεία διαφέρει ως προς τη σχεδίαση του DSP core. Για παράδειγμα η Texas Instruments περιλαμβάνει όχι μόνο τον επεξεργαστή αλλά μνήμη και περιφερειακά.

- *Πολλαπλοί επεξεργαστές σε ένα chip* : Καθώς η τεχνολογία προχωρά, δίνεται η δυνατότητα στους σχεδιαστές να τοποθετήσουν σε ένα ολοκληρωμένο πολλούς επεξεργαστές. Για παράδειγμα η Motorola και η Zilog προσφέρουν κομμάτια τα οποία έχουν ένα DSP με ένα μικροεπεξεργαστή ή microcontroller σε ένα μόνο chip. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένη απόδοση και μειωμένη κατανάλωση.
- *Πολυεπεξεργαστές* : Οι απαιτήσεις για μια πολύ μεγάλη γκάμα σοβαρών εφαρμογών δεν μπορούν να καλυφθούν από ένα επεξεργαστή. Αν η ικανότητα προγραμματισμού είναι απαραίτητη, ένας πολυεπεξεργαστής βασισμένος σε εμπορικούς DSPs είναι μια πολύ καλή λύση. Παρόλο που κάθε DSP επεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια σχεδίαση πολυεπεξεργαστή, αρκετές εταιρείες κατασκευάζουν DSPs οι οποίοι είναι ειδικά φτιαγμένοι για πολυεπεξεργαστές. Οι πολυεπεξεργαστές τέλος, περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως πολλαπλούς εσωτερικούς διαύλους, bus-sharing logic και παράλληλες θύρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ

4.1 Εργαλεία ανάπτυξης και προγραμματισμού (development tools)

Στο πρώτο μέρος περιγράφονται τα σύγχρονα εργαλεία ανάπτυξης και προγραμματισμού, τα οποία αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για να αναδειχθούν στο μέγιστο δυνατό οι δυνατότητες ενός επεξεργαστή και χαρακτηρίζουν τόσο την πληρότητα όσο και την ποιότητα της εν γένει λειτουργίας του. Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται μια προσέγγιση των διαφόρων τύπων εργαλείων από τη σκοπιά των σημαντικότερων δυνατοτήτων τους και της συνεισφοράς τους στην ανάδειξη των προϊόντων που βασίζονται σε DSPs.

Η δεύτερη παράγραφος αφορά στην παρεχόμενη τεχνική υποστήριξη που συνοδεύει τους DSPs.

Σύγχρονα εργαλεία προγραμματισμού DSPs

Τα βασικότερα πακέτα ανάπτυξης και προγραμματισμού των DSPs είναι το πακέτο εργαλείων της assembly, τα διάφορα πακέτα γλωσσών υψηλού επιπέδου, τα εργαλεία προγραμματισμού που βασίζονται σε block διαγράμματα, τα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου και τα περιβάλλοντα πολυμέσων.

Πακέτο εργαλείων assembly

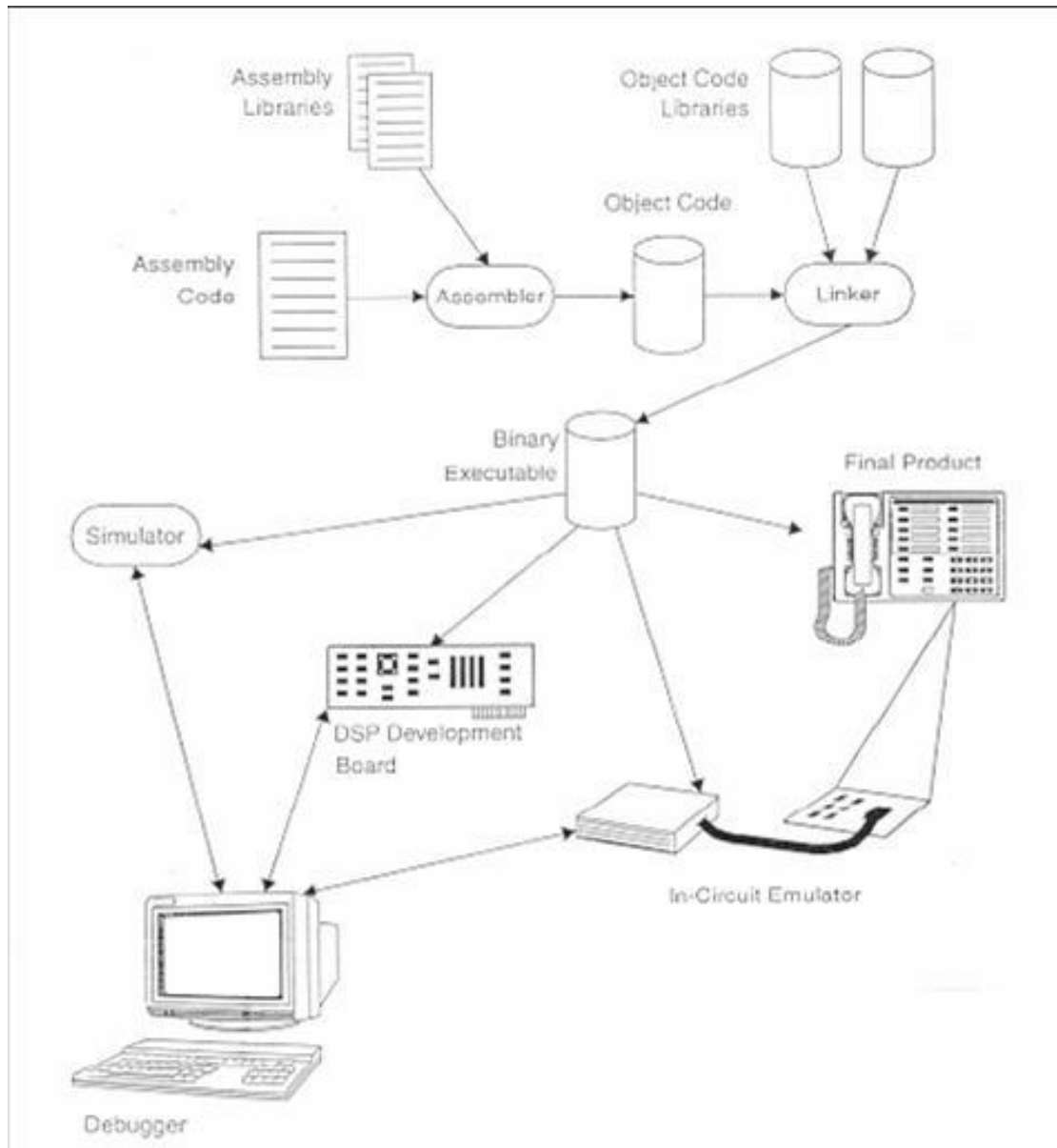
Συγκρινόμενοι με άλλου τύπου ηλεκτρονικές διατάξεις, οι επεξεργαστές DSP καλούνται να συνδυάσουν τις υψηλές επιδόσεις και τη λειτουργικότητα με το χαμηλό κόστος. Το δε απαραίτητο για τον προγραμματισμό τους λογισμικό, πρέπει να είναι ιδιαίτερα ευέλικτο και αποδοτικό. Παραδοσιακά το λογισμικό αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα assembly, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη δυνατότητα βελτιστοποίησης και για κάθε νέα εφαρμογή σχεδιάζεται από την αρχή.

Οι παραπάνω προδιαγραφές καθιστούν τη διαδικασία ανάπτυξης ενός DSP αρκετά δύσκολη, δεδομένου ότι ο προγραμματισμός του σε assembly είναι έργο επίπονο και χρονοβόρο. Σε σύγκριση με τους επεξεργαστές γενικού σκοπού, οι DSPs διαθέτουν ευρεία γκάμα εντολών με πολύ ειδικά χαρακτηριστικά, πράγμα που περιπλέκει ακόμα πιο πολύ τον προγραμματισμό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των fixed-point DSPs. Όπως είθισται να

συμβαίνει σε κάθε διαδικασία σχεδιασμού, έτσι και τώρα, στις αντικειμενικές ικανότητες του προγραμματιστή έρχεται να προστεθεί και η εξίσου σημαντική παράμετρος, εκείνη της προγραμματιστικής πλατφόρμας που έχει στη διάθεσή του. Οι πλατφόρμες προγραμματισμού που βασίζονται στην assembly, περιέχουν συμβολομεταφραστές (assemblers), επιμελητές σύνδεσης (linkers), εξομοιωτές κλήσης και εκτέλεσης εντολών (instruction set simulators), εσωκυκλωματικούς προσομοιωτές (in-circuit emulators), debuggers, διατάξεις λειτουργίας DSPs (development boards) και βιβλιοθήκες. Ο τρόπος που τα διάφορα εργαλεία συνδέονται και συνεργάζονται μεταξύ τους φαίνεται στο σχήμα 1. Το κάθε πακέτο αφορά αποκλειστικά ένα τύπο επεξεργαστή και διατίθεται είτε από τον ίδιο τον κατασκευαστή του DSP, είτε από ανεξάρτητους προμηθευτές. Οι κατασκευαστές DSPs παρέχουν ένα βασικό πακέτο εργαλείων για το κάθε μοντέλο τους, του οποίου η ποιότητα και η πληρότητα διαφέρει κατά περίπτωση. Παραδοσιακά η Texas Instruments παρέχει τα πληρέστερα πακέτα που συμπεριλαμβάνουν και πολυάριθμα προϊόντα τρίτων προμηθευτών. Τελευταία και άλλες εταιρίες, όπως η Analog Devices και η Motorola έχουν λανσάρει εργαλεία ανάπτυξης συμβατά με το περιβάλλον Windows της Microsoft. Η NEC με τη σειρά της παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης που ενσωματώνει στον standard εξοπλισμό του assembler και των λοιπών εργαλείων, έναν επεξεργαστή κειμένου που αναγνωρίζει τον assembly κώδικα. Έτσι το συνολικό πακέτο αποκτά καινούριες δυνατότητες, όπως για παράδειγμα να υπογραμμίζονται τα σημεία του κώδικα όπου υπάρχει λάθος. Τέτοια ολοκληρωμένα περιβάλλοντα ανάπτυξης, παρά το γεγονός ότι εδώ και χρόνια βρίσκουν εφαρμογή σε επεξεργαστές γενικού σκοπού, μόλις τον τελευταίο καιρό άρχισαν να εφαρμόζονται στους DSPs. Και παρά το ότι είναι τόσο καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη των DSPs, παραδόξως τα αντίστοιχα πακέτα που αφορούν στους επεξεργαστές γενικού σκοπού είναι πολύ πιο προηγμένα.

Συμβολομεταφραστές (Assemblers)

Πριν αναφερθούμε εκτενώς στον συμβολομεταφραστή κρίνεται σκόπιμο να εξηγηθεί η έννοια της μεταγλώττισης (compiler). Όταν πάμε να προγραμματίσουμε έναν DSP, το πρόγραμμα είναι σε μορφή πηγαίου κώδικα, είτε πρόκειται για assembly είτε για κάποια γλώσσα υψηλού επιπέδου. Ο ρόλος της μεταγλώττισης είναι να μετατρέψει αυτόν τον κώδικα σε γλώσσα μηχανής, δηλαδή σε δυαδικό κώδικα που είναι έτοιμος να φορτωθεί στη μνήμη και να εκτελεστεί χωρίς πρόσθετη επεξεργασία.



Σχήμα 1. Τρόπος σύνδεσης και συνεργασίας των εργαλείων

Ο ρόλος του συμβολομεταφραστή είναι να μετατρέψει το αρχικό πρόγραμμα που έχει τη μορφή πηγαίου κώδικα (assembly) σε ενότητα καταληκτικού κώδικα ή αλλιώς σε ενότητα κώδικα αντικειμένου (object code). Ο κώδικας αυτός να μεν είναι δυαδικός σε γλώσσα μηχανής, χρειάζεται όμως επιπλέον διαμόρφωση προκειμένου να καταστεί εκτελέσιμος. Κι αυτό διότι περιέχει συμβολικές διευθύνσεις μνήμης, που δεν αντιστοιχούν απ'ευθείας σε συγκεκριμένες θέσεις στη μνήμη. Προκειμένου να καταστεί εκτελέσιμος, οι συμβολικές διευθύνσεις πρέπει να «επανατοποθετηθούν», να τους δοθούν δηλαδή τιμές που να αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θέσεις.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Οι συμβολομεταφραστές κατατάσσονται στα πιο σπουδαία εργαλεία, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς ότι πλήθος πακέτων ανάπτυξης DSPs χρησιμοποιούν την assembly.

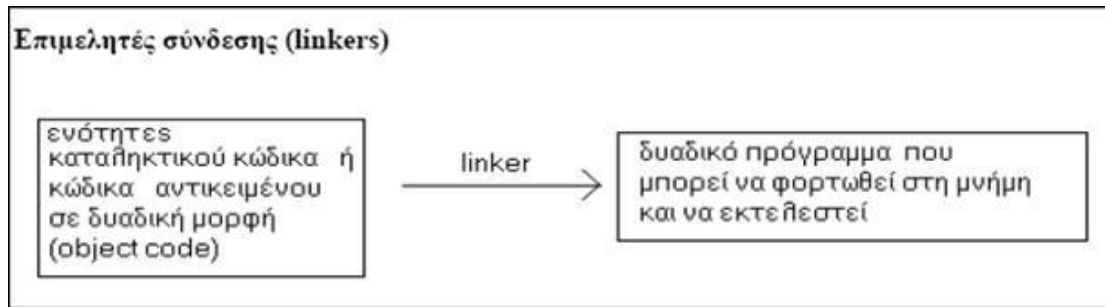
Οι περισσότεροι assemblers έχουν τη δυνατότητα macros, δηλαδή υπάρχει εκ των προτέρων ή φτιάχνεται από τον προγραμματιστή ένα κομμάτι κώδικα, το οποίο συνιστά μια μακροεντολή. Η χρήση τους θυμίζει πολύ τα γνωστά μας από το matlab functions. Ο χρήστης μπορεί να τα ενσωματώσει μέσα στον πηγαίο κώδικα απλά με την κλήση της ενίοτε μακροεντολής. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται το μέγεθος του πηγαίου κώδικα και ταυτόχρονα αποφεύγεται η σύγχυση από την κλήση των υπορουτινών. Στο σχήμα 2 φαίνεται ένα παράδειγμα ορισμού και χρήσης μιας μακροεντολής.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των assemblers είναι η «υπό όρους συμβολομετάφραση». Αυτό σημαίνει ότι ο συμβολομεταφραστής έχει την ευχέρεια, ανάλογα με την τιμή κάποιας προκαθορισμένης μεταβλητής, να επιλέγει το κατά πόσο θα μεταφράσει ή όχι κάποιο καθορισμένο τμήμα του κώδικα. Και κατ'επέκταση να μη μεταφράζει πολλές φορές αλλά μόνο μία, το κομμάτι εκείνο του κώδικα που συναντάει (καθώς σκανάρει το πρόγραμμα) απaráλλαχτο ή ελαφρώς διασκευασμένο. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της κωδικοποίησης ήχου, όπου η «υπό όρους συμβολομετάφραση» διευκολύνει την απόφαση για μετάφραση σε μονοφωνική ή στερεοφωνική μορφή.

```
;set up coefficient and data pointers
    move #data,r0
    move #coeffs,r4
;Call macro for 256 taps
    FIR    256
```

Σχήμα 2. Παράδειγμα ορισμού και χρήσης μακροεντολής για FIR φίλτρο που υλοποιείται στον Motorola DSP5600x

Η COFF (common object files format) είναι μια τυποποίηση που αφορά στα αρχεία του καταληκτικού κώδικα. Το format αυτό δίνει τη δυνατότητα να εμπλουτίζονται τα αρχεία αυτά με σχόλια και υποσημειώσεις, π.χ προσθήκη δεικτών στις γραμμές του προγράμματος που αντιστοιχούν σε εντολές της μηχανής. Η τυποποίηση COFF διευκολύνει να ενσωματώνονται εύκολα στο βασικό πακέτο ανάπτυξης που παρέχει ο ίδιος ο κατασκευαστής του DSP, εργαλεία που προέρχονται από τρίτους προμηθευτές.



Σχήμα 3. Δράση των επιμελητών σύνδεσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3 ο ρόλος του προγράμματος σύνδεσης (ή επιμελητή σύνδεσης) είναι να συνδέσει τις διάφορες ενότητες του κώδικα αντικειμένου και ενδεχομένως και κάποιες βιβλιοθήκες, ώστε να δημιουργήσει το τελικό πρόγραμμα (θα είναι σε γλώσσα μηχανής) που θα φορτωθεί στη μνήμη και θα τρέξει.

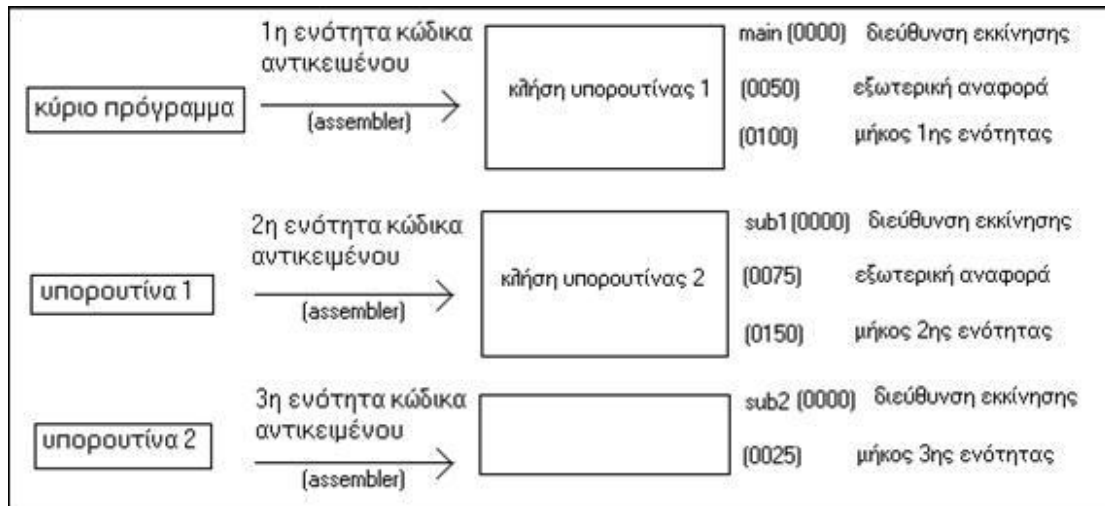
Οι linkers βασίζονται στην ιδέα των χαρτών μνήμης (memory maps), με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η αντιστοίχιση όλων των στοιχείων των αρχείων του καταληκτικού κώδικα στη μνήμη.

Έστω ότι ο πηγαίος κώδικας αποτελείται από ένα κυρίως πρόγραμμα και δύο υπορουτίνες. Ο συμβολομεταφραστής όταν μεταφράζει τον πηγαίο κώδικα δεν είναι σε θέση να διακρίνει το πρόγραμμα από τις υπορουτίνες, διότι υποθέτει ότι όλα ξεκινάνε από την ίδια διεύθυνση. Έτσι δημιουργεί τρεις ξεχωριστές ενότητες καταληκτικού προγράμματος με την ίδια διεύθυνση εκκίνησης όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Επίσης ο συμβολομεταφραστής δεν είναι σε θέση να διακρίνει τα πραγματικά σημεία του προγράμματος στα οποία «μπαίνει», δηλαδή καλείται η κάθε υπορουτίνα. Η κάθε μια από τις τρεις ενότητες καταληκτικού προγράμματος που φαίνονται στο σχήμα 4, περιέχουν διάφορες εντολές οι οποίες αντιστοιχούν σε συμβολικές θέσεις μνήμης. Όταν οι ενότητες επανατοποθετηθούν ή μετακινηθούν, οι παραπάνω διευθύνσεις θα προκύψουν εσφαλμένες, οπότε θα πρέπει να επανατοποθετηθούν.

Η κάθε ενότητα κώδικα αντικειμένου αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο περιέχει το κομμάτι του κώδικα, δηλαδή τις εντολές και τις διάφορες παραμέτρους. Το δεύτερο μέρος ονομάζεται symbol table και αποτελείται από το λεξικό εξωτερικών όρων (external symbol dictionary) και το λεξικό επανατοποθέτησης (relocation dictionary). Το λεξικό εξωτερικών όρων περιλαμβάνει μια λίστα όλων των συμβολικών διευθύνσεων που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη ενότητα καταληκτικού προγράμματος, αλλά δεν έχουν οριστεί με απόλυτο τρόπο. Οι διευθύνσεις αυτές διακρίνονται στις εξωτερικές αναφορές (external references), δηλαδή στα σημεία κλήσης της κάθε υπορουτίνας και στα σημεία εισαγωγής (entry points), δηλαδή στις διευθύνσεις εκκίνησης της κάθε ενότητας. Στο σχήμα 4 μπορεί κανείς αναλυτικά να διακρίνει τα περιεχόμενα του symbol table της κάθε ενότητας. Το λεξικό

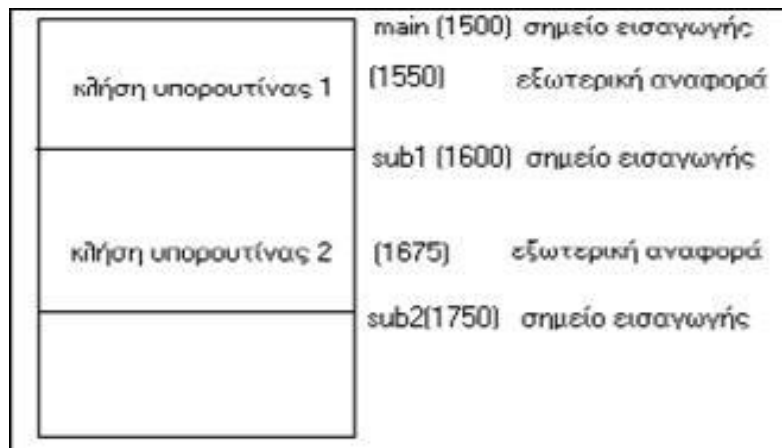
Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

επανατοποθέτησης περιέχει μια λίστα των διευθύνσεων οι οποίες πρέπει να επανατοποθετηθούν μετά τη μετακίνηση της κάθε υπορουτίνας.



Σχήμα 4. Δράση του συμβολομεταφραστή

Μετά την παρέμβαση του linker οι τρεις ενότητες ενώνονται σε μία, η οποία ναί μεν έχει την τυπική δομή ενότητας κώδικα αντικειμένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, ο κώδικάς της όμως είναι πλέον εκτελέσιμος. Ο επιμελητής σύνδεσης διαβάζει κάθε μία ενότητα και καταλήγει ότι η πρώτη έχει μήκος 100 bytes, η δεύτερη 150 bytes και η τρίτη 25 bytes. Κατόπιν μετατοπίζει τον κώδικα της πρώτης ενότητας στη νέα διεύθυνση, που έστω ότι είναι η 1500. Η θέση της δεύτερης ενότητας (σημείο εκκίνησης) υπολογίζεται από το άθροισμα της διεύθυνσης εκκίνησης και του μήκους της πρώτης ενότητας ($1500+100=1600$). Ανάλογα η τρίτη ενότητα τοποθετείται στη θέση 1750. Από τη στιγμή που τα σημεία εισαγωγής της κάθε υπορουτίνας είναι γνωστά, οι εξωτερικές αναφορές μπορούν να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες πραγματικές διευθύνσεις τους. Έτσι οι εντολές «κλήση υπορουτίνας 1» και «κλήση υπορουτίνας 2» θα αντικατασταθούν με μια κλήση υπορουτίνας στη θέση 1550 και μια στη θέση 1675 αντίστοιχα. Εκτός από το λεξικό εξωτερικών όρων γίνεται ενημέρωση και του λεξικού επανατοποθέτησης και έτσι μετά την παρέμβαση του συνδέτη προκύπτει η καινούρια ενότητα με τον εκτελέσιμο κώδικα. Η τελική ενότητα πολλές φορές ονομάζεται και βιβλιοθήκη (library ή archive).



Σχήμα 5. Ενότητα εκτελέσιμου καταληκτικού κώδικα μετά την παρέμβαση του linker

4.2 Εξομοιωτές κλήσης/εκτέλεσης των εντολών (instruction set simulator)

Οι εξομοιωτές εκτέλεσης των εντολών απεικονίζουν με «σοφτγουερικό» τρόπο την κατάσταση και τη λειτουργία του επεξεργαστή. Είναι δηλαδή με άλλα λόγια μια παράσταση του DSP σε εικονική πραγματικότητα. Έχουμε στη διάθεσή μας ολόκληρη την γκάμα των εντολών καθώς και τους καταχωρητές, τις μνήμες και τις διάφορες σημαίες. Έχουμε επίσης τη δυνατότητα χειρισμού των περιεχομένων της μνήμης και των καταχωρητών, και παρακολούθησης της εξέλιξης του κώδικα καθώς τρέχει βήμα προς βήμα (εντολή προς εντολή). Οι εξομοιωτές θεωρείται ότι συνεισφέρουν περισσότερο από κάθε άλλο εργαλείο στη διόρθωση των λαθών (debugging) του κώδικα και στη βελτιστοποίηση του. Πολλά προγράμματα πριν υλοποιηθούν πάνω στον ίδιο τον DSP, δοκιμάζονται πρώτα στον ISS, καθώς το περιβάλλον που παρέχει ένας εξομοιωτής είναι ευέλικτο και δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας. Άλλωστε συνήθως ο ISS είναι διαθέσιμος στην αγορά πριν και από το ίδιο το chip. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι η αδυναμία να αποτυπώσουν τις πραγματικές ταχύτητες του επεξεργαστή και η περιορισμένη ακρίβεια.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές DSP παρέχουν ISS. Όσοι δεν το κάνουν, συνήθως χρησιμοποιούν τους DSPs σαν επιμέρους κομμάτια σε εφαρμογές με PC ή σε σταθμούς εργασίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις που οι εφαρμογές δεν είναι DSP-κεντρικές, ο DSP είναι μέρος ενός ευρύτερου συνόλου και δεν κρίνεται σκόπιμο να εξομοιωθεί η λειτουργία του. Μολαταύτα, ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις, συχνά η απουσία του εξομοιωτή γίνεται αισθητή.

Να επισημανθεί ακόμα ότι ο κάθε ISS αντιπροσωπεύει αυστηρά ένα και μόνο μοντέλο DSP, γεγονός που καθιστά τον εξομοιωτή βαρυσήμαντο παράγοντα για την τελική επιλογή του επεξεργαστή.

Πέρα από τα βασικά κοινά στοιχεία των ISS, υπάρχουν και κάποιες παράμετροι που τους διαφοροποιούν. Τέτοιες είναι η ακρίβεια, η ταχύτητα, η πληρότητα, η υποστήριξη debugging και optimization και η επεκτασιμότητα.

□ **Ακρίβεια**

Διακρίνουμε τη χρονική και τη λειτουργική ακρίβεια. Η πρώτη έχει να κάνει με την πιστότητα αντιγραφής των λειτουργιών του DSP όσο αφορά στη χρονική συσχέτισή τους. Για παράδειγμα κάποιες εντολές μπορεί στην πράξη να απαιτούν πάνω από ένα κύκλο εντολής για την εκτέλεσή τους, πράγμα που ενδεχομένως ο εξομοιωτής να αδυνατεί να απεικονίσει.

Η λειτουργική ακρίβεια αντανακλά την πιστότητα αντιγραφής της λειτουργίας του επεξεργαστή σε ποιοτικό επίπεδο. Μέτρο της είναι η ομοιότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εξομοίωση και από την πραγματική εκτέλεση, όταν το ίδιο set εντολών τρέξει κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

□ **Ταχύτητα**

Οι εξομοιωτές συχνά δεν μπορούν να εξομοιώσουν τη λειτουργία του επεξεργαστή στην πραγματική της ταχύτητα. Η ταχύτητα των ISS που τρέχουν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι της τάξης των μερικών χιλιάδων εντολών ανά δευτερόλεπτο. Εξάλλου κάποιοι εξομοιωτές που κυκλοφορούν στην αγορά μπορεί να είναι και πέντε φορές πιο γρήγοροι από κάποιους άλλους.

□ **Πληρότητα**

Κάποιοι ISS μοντελοποιούν τη λειτουργία μόνο του κυρίως πυρήνα του DSP και αγνοούν την ύπαρξη του εξοπλισμού που τον συνοδεύει (διασυνδέσεις εισόδων/εξόδων, περιφερειακά κτλ). Το παραπάνω αποτελεί σπουδαίο μειονέκτημα για έναν εξομοιωτή και σε αντιστάθμιση αυτού κάποιοι κατασκευαστές, δίνουν τη δυνατότητα στον ίδιο το χρήστη να προσθέσει εικονικά τη λειτουργία του συνοδευτικού εξοπλισμού.

□ **Υποστήριξη του ISS με πρόγραμμα εποπτείας και ελέγχου της λειτουργίας (debugging) και με βελτιστοποίηση της λειτουργίας (optimization)**

Το πρόγραμμα που μεσολαβεί ανάμεσα στον εξομοιωτή των εντολών και στο χρήστη και εξασφαλίζει την αμφίδρομη επικοινωνία τους, ονομάζεται debugger.

Ο ίδιος debugger μπορεί να συνοδεύει και τον ISS και τον προσομοιωτή (emulator) του επεξεργαστή, ακόμα και το ίδιο το board πάνω στο οποίο είναι στημένος ο επεξεργαστής. Η ποιότητα του debugger κρίνει σε μεγάλο βαθμό και την απόδοση του εξομοιωτή. Στην περίπτωση που ο κατασκευαστής παρέχει μεταγλωττιστή (compiler) γλώσσα υψηλού επιπέδου, ο ISS παρέχει δυνατότητα debugging, όχι μόνο της assembly, αλλά και της προκειμένης γλώσσας υψηλού επιπέδου.

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά της υποστήριξης debugging και optimization είναι, τα breakpoints (σημεία διακοπής), το profiling, η απαρίθμηση κύκλων εντολής, η διόρθωση πηγαίου κώδικα και συμβολοκώδικα, η ανάλυση βήμα προς βήμα και η απεικόνιση/επεξεργασία δεδομένων. Τα τρία τελευταία από αυτά, χαρακτηρίζουν περισσότερο από τον εξομοιωτή τον ίδιο τον debugger και γι' αυτό το λόγο θα αναλυθούν εκτενώς στη σχετική με τον debugger αναφορά.

Τα breakpoints είναι συνθήκες που ρυθμίζονται από τον ίδιο το χρήστη και όταν ικανοποιούνται η διαδικασία της εξομοίωσης διακόπτεται. Υπάρχουν οι τυπικοί (συνηθισμένοι) breakpoints, οι οποίοι διακόπτουν την εξομοίωση μόνο σε συγκεκριμένα σημεία και άλλοι πιο εξελιγμένοι που μπορούν να ρυθμιστούν με βάση αριθμητικές εκφράσεις που σχετίζονται με τα περιεχόμενα της μνήμης και των καταχωρητών. Οι τελευταίοι βοηθάνε ιδιαίτερα στην ανίχνευση και στη διόρθωση λαθών του προγράμματος που είναι λιγότερο εμφανή.

Profiling είναι η δυνατότητα που δίνει ο ISS στο χρήστη, να διαπιστώσει το χρόνο που ξοδεύει ο επεξεργαστής στο κάθε τμήμα του κώδικα. Το profiling μπορεί να γίνεται ανά εντολή ή ανά περιοχή. Στην πρώτη περίπτωση ο debugger μετράει πόσες φορές εκτελείται η κάθε εντολή στο πρόγραμμα. Στη δεύτερη ο debugger υπολογίζει το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση περιοχών του προγράμματος τα όρια των οποίων ορίζουν κάποια συνάρτηση ή κάποια υπορουτίνα. Το profiling είναι μια ιδιαίτερα χρήσιμη δυνατότητα των εργαλείων ανάπτυξης των DSP, παρόλα αυτά λίγοι μόνο simulators την έχουν.

Απαρίθμηση κύκλων εντολής σημαίνει να μπορεί ο χρήστης να μετρήσει τους κύκλους εντολής που χρειάζονται για να τρέξει το πρόγραμμα ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε σημεία. Να υπενθυμίσουμε ότι κύκλος εντολής (instruction cycle) ονομάζεται ο χρόνος εκτέλεσης της πιο γρήγορης εντολής από τον επεξεργαστή. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη όταν πρέπει να μετρηθεί ο χρόνος εκτέλεσης κάποιου αλγορίθμου ή όταν θέλουμε να υπολογίσουμε το μέσο ή το χειρότερο χρόνο εκτέλεσης μιας υπορουτίνας. Ακόμα αποτελεί μια καλή ευκαιρία να κατανοήσει κανείς τη συμπεριφορά του προγράμματος όταν υπάρχει pipeline και η κάθε εντολή απαιτεί για την εκτέλεσή της περισσότερους του ενός κύκλους εντολής.

□ **Ολοκλήρωση και επεκτασιμότητα (Integration & Extensibility)**

Ο ISS γενικά εξομοιώνει μόνο τη λειτουργία του κυρίως επεξεργαστή και όχι των περιφερειακών ή τη λειτουργία επιπλέον επεξεργαστών σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει περισσότερους του ενός DSPs.

Συνήθως οι ISS περιέχουν για τις εξόδους και τις εισόδους αρχεία αποτύπωσης μνήμης (memory-mapped files). Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να εξομοιωθούν οι διασυνδέσεις I/O, τα δεδομένα που διαβάζονται (αφορά στις εξόδους) ή γράφονται (αφορά στις εισόδους)

εικονικά σε μια θέση μνήμης, αποτυπώνονται πάνω σε αντίστοιχα αρχεία του υπολογιστή με τη βοήθεια του οποίου λειτουργεί ο εξομοιωτής. Σε άλλες περιπτώσεις η κάθε διασύνδεση I/O εξομοιώνεται με τη βοήθεια των pins που τη συνδέει με τον DSP. Το κάθε pin αποκτά τιμή 0 ή 1 ή βρίσκεται σε κατάσταση απροσδιοριστίας και η πληροφορία αυτή αποθηκεύεται σε αντίστοιχα αρχεία. Τέλος κάποιοι ISS εξομοιώνουν τις διασυνδέσεις I/O με τη χρήση scripting language (περιγραφικής γλώσσας), με τη βοήθεια της οποίας προσδιορίζονται λεπτομερώς οι χρόνοι άφιξης των διακοπών καθώς και η ακολουθία των δεδομένων στις εισόδους. Για παράδειγμα τα μοντέλα της οικογένειας μPD7701x της NEC χρησιμοποιούν μια πολύ ισχυρή scripting language.

4.3 Μοντέλα παράλληλης εξομοίωσης hardware/software

Εξαιτίας των όλο και πιο εξελιγμένων και πολύπλοκων συστημάτων που κάνουν χρήση των DSPs, προκύπτει λογικά η ανάγκη χρησιμοποίησης αντίστοιχα εξελιγμένων εξομοιωτών. Τέτοια σύγχρονα συστήματα για παράδειγμα είναι όσα χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα που η χρήση τους εστιάζεται αποκλειστικά στη συγκεκριμένη εφαρμογή (ASICs - Application specific integrated circuit).

Το σημαντικότερο εργαλείο παράλληλης εξομοίωσης είναι το επονομαζόμενο «πλήρως λειτουργικό (full-functional)». Πρόκειται για έναν ISS ενσωματωμένο σε ένα ευρύτερο μοντέλο «χαρντγουερικής» εξομοίωσης του DSP. Το πλήρως λειτουργικό μοντέλο παράλληλα με την εξομοίωση της λειτουργίας του DSP, μοντελοποιεί βασιζόμενο στα pins και τις διασυνδέσεις I/O του επεξεργαστή. Το εργαλείο γίνεται ακόμα χρησιμότερο όταν διαθέτει περιβάλλον αμφίδρομης επικοινωνίας, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιτηρεί τη λειτουργία και να παρεμβαίνει θέτοντας breakpoints ή αλλάζοντας τα περιεχόμενα των καταχωρητών και της μνήμης.

Άλλα μοντέλα παράλληλης εξομοίωσης είναι το bus-functional (εξομοιώνει τις I/O μέσου των pins αλλά όχι και την εκτέλεση του κώδικα), το σχεδιαστικό και το «χαρντγουερικό».

4.4 Προσομοιωτές πάνω στο κύκλωμα (in-circuit emulators)

Η περίπτωση αυτή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πραγματική πλέον λειτουργία της εμπορικής εφαρμογής που χρησιμοποιεί τον DSP. Το εκτελέσιμο αρχείο (σε γλώσσα μηχανής) μπορεί να τρέχει στον προσομοιωτή πάνω στο κύκλωμα την ίδια στιγμή που η εμπορική εφαρμογή λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο στο χρήστη τη δυνατότητα να κάνει debugging και να βελτιστοποιήσει την εφαρμογή που

εκτελείται. Το debugging και το optimization γίνονται με τη βοήθεια ενός PC ή ενός σταθμού εργασίας.

Ο προσομοιωτής δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης του προγράμματος βήμα προς βήμα, όπως επίσης και τη δυνατότητα παρακολούθησης και επεξεργασίας των περιεχομένων της μνήμης και των καταχωρητών. Οι In-Circuit Emulators κατατάσσονται με βάση τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του DSP που μπορούν να παρακολουθήσουν, τη δυνατότητα παρακολούθησης της ροής του προγράμματος και αλλαγής της κατάστασης των pins σε πραγματικό χρόνο, τη δυνατότητα profiling και τη λειτουργία breakpoint συνθηκών σε πραγματικό και μη χρόνο. Αναλυτικότερα έχουμε :

❑ Ταχύτητα επεξεργαστή

Σημαντικό ρόλο στην αποτίμηση ενός προσομοιωτή παίζει το αν μπορεί ή όχι να προσομοιώσει σωστά την πραγματική ταχύτητα του επεξεργαστή και αν ναι ποιες δυνατότητες του debugging είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται κυρίως από την αρχιτεκτονική του emulator.

❑ Παρακολούθηση ροής προγράμματος και αλλαγής κατάστασης των pins

Κάποιοι προσομοιωτές διαθέτουν ταχύτερους buffers, χάρη στους οποίους παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο τόσο η ροή εκτέλεσης του προγράμματος όσο και η κατάσταση των pins των διασυνδέσεων εισόδων και εξόδων. Αυτό επιτυγχάνεται με δειγματοληψία της κατάστασης του διαύλου που μεταφέρει τις διάφορες διευθύνσεις της μνήμης με συχνότητα 1/ (κύκλος εντολής) . Πρόκειται για μια πολύ σημαντική δυνατότητα, διότι πολλά λάθη συμβαίνουν μόνο σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας και όχι σε λειτουργία μικρότερης ταχύτητας, γεγονός που καθιστά ικανό να τα εντοπίσει μόνο ένας προσομοιωτής πραγματικού χρόνου. Κάποιοι προσομοιωτές που δεν έχουν τη δυνατότητα επίβλεψης σε πραγματικό χρόνο, παρέχουν απλά περιορισμένες πληροφορίες μέσω ενός buffer ασυνέχειας. Ο buffer αυτός συνήθως καταγράφει μόνο τις διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού εντολών, οι οποίες χρειάζονται πάνω από ένα κύκλο εντολής με αποτέλεσμα να αλλάζει ο συνήθης τρόπος μέτρησης του απαριθμητή του προγράμματος. Τέτοιες εντολές είναι οι jump, call και return.

❑ Breakpoints

Τα πραγματικού χρόνου breakpoints διακόπτουν τη ροή του προγράμματος όταν η εκτέλεσή του σε πραγματικό χρόνο φτάνει σε συγκεκριμένες διευθύνσεις μνήμης ή όταν άλλες συνθήκες αιχμής πληρούνται. Όλοι ανεξαιρέτως οι προσομοιωτές μπορούν να σταματήσουν ένα πρόγραμμα τη στιγμή της προσπέλασης κάποιας προκαθορισμένης

διεύθυνσης. Μερικοί από αυτούς επιπλέον υποστηρίζουν σε πραγματικό χρόνο διακοπές του προγράμματος, και όταν πληρούνται συνθήκες όπως :

- Προσπέλαση μιας διεύθυνσης μνήμης που αφορά στα δεδομένα
- Προσπέλαση μιας περιοχής διευθύνσεων μνήμης που αφορούν είτε στα δεδομένα είτε στις εντολές του προγράμματος
- Εκτέλεση ενός συγκεκριμένου τύπου εντολών, όπως είναι οι εντολές διακλάδωσης

Κάποιοι προσομοιωτές στα λογικά κυκλώματα που υποστηρίζουν τη χρήση των breakpoints, συμπεριλαμβάνουν έναν ή περισσότερους μετρητές. Με τους μετρητές αυτούς δύναται να καθοριστεί ως συνθήκη διακοπής, η εμφάνιση ενός συγκεκριμένου γεγονότος n φορές. Ο προσομοιωτής TMS320C4x της Texas Instruments διαθέτει τις πλέον εξελιγμένες δυνατότητες breakpoint πραγματικού χρόνου. Οι breakpoints μη πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούνται όταν οι συνθήκες διακοπής είναι σε τέτοιο βαθμό απαιτητικές, που τα λογικά κυκλώματα αδυνατούν να ανταποκριθούν σε πραγματικό χρόνο. Παράδειγμα τέτοιας συνθήκης είναι η αλλαγή μιας συγκεκριμένης τιμής ενός καταχωρητή ή μιας μνήμης. Λόγω της αδυναμίας αξιόπιστου ελέγχου τέτοιων συνθηκών, μετά από κάθε εντολή πρέπει να ελέγχεται βήμα προς βήμα όλη η λειτουργία με την εκτέλεση debugging.

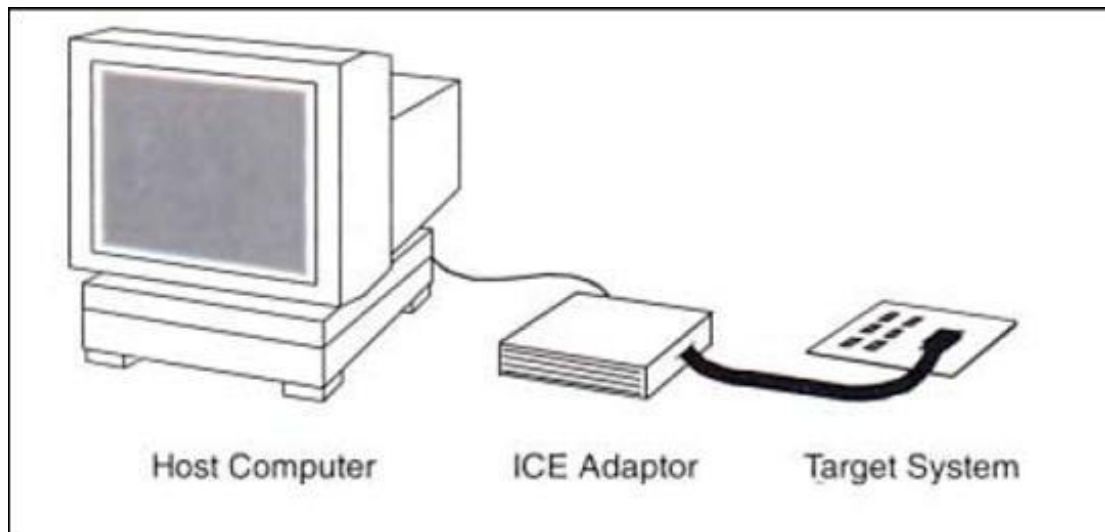
❑ Profiling

Χρησιμοποιείται για να βρεθεί σε ποιο σημείο του κώδικα, αναλώνει το πρόγραμμα τον περισσότερο χρόνο κατά την εκτέλεσή του. Ο χρήστης ενημερώνεται για τον αριθμό των εντολών κατά το τρέξιμο συγκεκριμένου τμήματος του κώδικα και αφού συγκρίνει τον αριθμό αυτό με τον κύκλο εντολής ή με τον κύκλο ρολογιού, μπορεί να αποφασίσει με ποιον τρόπο θα βελτιστοποιήσει το πρόγραμμα. Τέτοια τμήματα κώδικα μπορεί να είναι υπορουτίνες, συναρτήσεις ή και βρόγχοι. Όλοι οι εξομοιωτές έχουν τη δυνατότητα profiling, δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με τους προσομοιωτές, από τους οποίους μόνο μερικά μοντέλα της Texas Instruments τη διαθέτουν. Γενικά πάντως το profiling είναι προτιμότερο να γίνεται από τους emulators παρά από τους instruction set simulators.

Η αρχιτεκτονική των ICE είναι υπεύθυνη για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους. Αναφορικά με τον τύπο της αρχιτεκτονικής οι ICE κατατάσσονται ως ακολούθως :

❑ **Pod-based emulation**

Σ' αυτήν την αρχιτεκτονική ο DSP αποσυνδέεται από την εμπορική εφαρμογή. Μια ειδική ηλεκτρονική διάταξη που ονομάζεται προσαρμογέας ICE και περιέχει μια ειδική δοκιμαστική έκδοση του (προς προσομοίωση) DSP μαζί με επιπλέον λογικά κυκλώματα, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του επεξεργαστή. Ολόκληρη η παραπάνω διάταξη συνδέεται με ένα PC με τη βοήθεια του οποίου θα γίνει η προσομοίωση και συνδέεται επίσης και με την εμπορική εφαρμογή αντικαθιστώντας τον επεξεργαστή. Η Pod-based αρχιτεκτονική προσφέρει τη δυνατότητα εποπτείας της ροής του προγράμματος και της αλλαγής της κατάστασης των pins σε πραγματικό χρόνο. Έχει όμως τα μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και των προβλημάτων χρονισμού καθώς κατά την αντικατάσταση του DSP αλλάζουν κάποια από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυκλώματος. Τέλος να επισημανθεί ότι εξαιτίας της περίπλοκης κυκλωματικής υλοποίησης αλλά και των προαναφερθέντων ζητημάτων, οι pod-based emulators δεν καταφέρνουν πάντα να φτάσουν με επιτυχία την πραγματική ταχύτητα του επεξεργαστή. Κάποτε η εν λόγω αρχιτεκτονική μονοπωλούσε το πεδίο των in-circuit emulators, τώρα όμως έχει παραγκωνιστεί από μια άλλου είδους αρχιτεκτονική, εκείνης των προσομοιωτών σάρωσης που θα εξετάσουμε αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 6. Διάταξη Pod-Based προσομοίωσης

❑ **Scan-based emulation (προσομοίωση σάρωσης)**

Τα τελευταία 10 χρόνια οι κατασκευαστές άρχισαν να ενσωματώνουν πάνω στο chip του DSP κυκλωματική λογική τέτοια, που να υπάρχει δυνατότητα debugging. Η πρόσβαση σ' αυτή τη λογική επιτυγχάνεται μέσω μιας ειδικής σειριακής θύρας. Κάποιοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν θύρα συμβατή με το πρότυπο JTAG, ενώ άλλοι θύρα που προορίζεται αποκλειστικά για αυτόν το σκοπό (βλ. Motorola port OnCE). Συνδέοντας την παραπάνω θύρα

με ένα PC αποκτούμε πρόσβαση στις λειτουργίες debugging. Με τη βοήθεια της κυκλωματικής λογικής που δημιουργήθηκε πάνω στο chip, επιτυγχάνεται τόσο η εποπτεία της λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, όσο και η διακοπή της λειτουργίας όταν πληρείται κάποια συνθήκη παύσης (breakpoint). Από τη στιγμή που θα διακοπεί η λειτουργία, το αρμόδιο λογισμικό που είναι εγκατεστημένο στο PC, επικοινωνεί με τη σχετική με το debugging λογική μέσου της σειριακής θύρας.

Τα πλεονεκτήματα της scan-based προσομοίωσης έναντι της prod-based είναι τα εξής :

- Δεν απαιτείται να μετακινηθεί ο DSP, γεγονός που έχει καθοριστική σημασία στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η σύνδεση του υποκατάστατου επεξεργαστή (εξαιτίας προβλημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως).
- Ο αριθμός των συνδέσεων με την εμπορική εφαρμογή ελαχιστοποιείται (συνήθως οι θύρες debugging έχουν μόνο πέντε επαφές) και έτσι τα σήματα που διοχετεύονται διαμέσου της debugging θύρας, δε χρειάζεται να λειτουργούν στην ίδια ταχύτητα με τα υπόλοιπα σήματα του chip. Έτσι μειώνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος της διάταξης προσομοίωσης, άρα μειώνεται και η πιθανότητα διαταραχής της λειτουργίας της εμπορικής εφαρμογής εξαιτίας της παρέμβασης του προσομοιωτή.
- Λόγω του ότι η debugging logic είναι ενσωματωμένη στο chip του επεξεργαστή, ο προσομοιωτής μπορεί να παρακολουθήσει στο έπακρο την ταχύτητα του DSP. Βέβαια οι προσομοιωτές σάρωσης προκειμένου να υλοποιήσουν κάποιες λειτουργίες όπως είναι η εποπτεία της ροής του προγράμματος, είναι αναγκασμένοι να λειτουργήσουν με πολύ χαμηλή ταχύτητα (αντίθετα οι prod-based προσομοιωτές μπορούν να τις υλοποιήσουν σε πραγματικό χρόνο).

Εξαιτίας του ότι σε κάθε επεξεργαστή που παράγεται, η προκειμένη αρχιτεκτονική απαιτεί πρόσθετη κυκλωματική λογική, το κόστος παραγωγής εκ των πραγμάτων αυξάνεται. Προκειμένου να μην αυξηθεί υπερβολικά θυσιάζονται κάποιες δυνατότητες του emulator, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην prod-based αρχιτεκτονική. Οι εν γένει δυνατότητες του προσομοιωτή περιστελλονται ακόμα περισσότερο εξαιτίας του περιορισμένου εύρους ζώνης της σειριακής θύρας.

Σήμερα η προσομοίωση σάρωσης χρησιμοποιείται σχεδόν απ' όλους τους κατασκευαστές DSPs. Υπάρχουν όμως και ανεξάρτητοι προμηθευτές που ασχολούνται αποκλειστικά με την

κατασκευή προσομοιωτών σάρωσης και διαθέτουν τα προϊόντα τους σε παραδοσιακούς κατασκευαστές DSPs όπως στην Texas Instruments και στη Motorola.

□ **Monitor-based emulation (προσομοίωση επιτήρησης)**

Σε περίπτωση που για λόγους λειτουργικούς ή κόστους δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια από τις προηγούμενες αρχιτεκτονικές, είναι δυνατό τον προσομοιωτή να υποκαταστήσει ένα εποπτικό πρόγραμμα που ονομάζεται monitor, και που βέβαια δε διαθέτει εφάμιλλες δυνατότητες. Για την επικοινωνία του PC πάνω στο οποίο θα τρέχει το monitor και του επεξεργαστή χρησιμοποιείται κατά σύμβαση μια από τις θύρες διασυνδέσεων I/O του DSP, π.χ η θύρα host. Προσομοίωση επιτήρησης συναντάμε επί παραδείγματι στον επεξεργαστή MDSP27080 Mwave DSP της IBM, ο οποίος χρησιμοποιείται στα PCs. Στην περίπτωση αυτή ο προσομοιωτής επιτήρησης επικοινωνεί με τον DSP διαμέσου κάποιας συνηθισμένης θύρας του PC που χρησιμεύει σε άλλες εφαρμογές. Το πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται για τον προσομοιωτή επιπρόσθετο hardware, αλλά ούτε και πρέπει να αντικατασταθεί ο DSP με κάποιο μοντέλο του. Φυσικά όμως ένας monitor-based emulator δεν έχει ανάλογα χαρακτηριστικά με τους προαναφερθέντες προσομοιωτές. Για παράδειγμα με τον προσομοιωτή επιτήρησης δεν είναι δυνατό να οριστούν breakpoints πραγματικού χρόνου που θα προσδιορίζονται από την προσπέλαση κάποιων συγκεκριμένων θέσεων στη μνήμη, σχετικών με τα δεδομένα. Και αυτό διότι δεν υπάρχει τρόπος να ανιχνευτεί η οποιαδήποτε προσπέλαση της μνήμης που αφορά στα δεδομένα. Breakpoints πραγματικού χρόνου μπορούν να οριστούν μόνο όταν σχετίζονται με την προσπέλαση των θέσεων της μνήμης που περιέχουν τις εντολές του προγράμματος. Έτσι όταν προσπελαστεί μια τέτοιου είδους θέση μνήμης, η εντολή αντικαθίσταται με μια εντολή που καλεί το πρόγραμμα monitor. Αφού τρέξει το monitor, η αντικατασταθείσα εντολή επιστρέφει στην αρχική θέση μνήμης. Η παραπάνω συνθήκη διακοπής δεν μπορεί να υλοποιηθεί αν ο εκτελέσιμος κώδικας βρίσκεται αποθηκευμένος σε read only μνήμη. Οι προσομοιωτές επιτήρησης γενικά μπορούν να παρακολουθήσουν την ταχύτητα του επεξεργαστή, είναι όμως αναγκασμένοι να λειτουργήσουν με πολύ χαμηλή ταχύτητα προκειμένου να υλοποιήσουν λειτουργίες όπως η εποπτεία της ροής του προγράμματος, σε αντίθεση με τους rod-based προσομοιωτές που τις υλοποιούν σε πραγματικό χρόνο. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι η κατάσταση του pipeline στον επεξεργαστή αλλάζει πριν προφτάσει να τη δει ο χρήστης, κάθε φορά που θα κληθεί το πρόγραμμα monitor (είτε εξαιτίας κάποιας συνθήκης διακοπής, είτε εξαιτίας του βήμα προς βήμα debugging). Παρά όμως τις όποιες αδυναμίες του, ο προσομοιωτής επιτήρησης είναι φτηνός και εύκολα υλοποιήσιμος, ειδικά στην περίπτωση που ο DSP είναι «φιξαρισμένος» σε μια ευρύτερη διάταξη επεξεργασίας.

Συνήθως οι προσομοιωτές επιτήρησης βρίσκουν εφαρμογή σε διατάξεις σαν αυτή που μόλις περιγράφηκε (π.χ PCs)

Όπως οι εξομοιωτές εντολών, έτσι και οι εσωκυκλωματικοί προσομοιωτές υποστηρίζονται από προγράμματα επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και προσομοιωτή, που ονομάζονται όπως έχουμε πει, debuggers. Τα προγράμματα αυτά καθιστούν τον προσομοιωτή πολύ πιο λειτουργικό και αξιοποιήσιμο για το χρήστη.

4.5 Debuggers

Debugger ονομάζεται το πρόγραμμα επικοινωνίας και διασύνδεσης ανάμεσα στο χρήστη και στον προσομοιωτή ή εξομοιωτή, που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εκμεταλλευτεί τη λειτουργικότητα και τα χαρακτηριστικά του ενίοτε εργαλείου. Ένας καλός debugger αποτελεί πάντα ένα πολύτιμο βοηθό για τη δημιουργία λογισμικού. Οι εξομοιωτές και οι προσομοιωτές που διατίθενται από τους κατασκευαστές των DSPs, συνήθως χρησιμοποιούν τον ίδιο debugger, πράγμα που διευκολύνει και τον ίδιο το χρήστη. Μερικές φορές debuggers διατίθενται στο εμπόριο και από ανεξάρτητους προμηθευτές και αφού πρώτα τους έχει επιτραπεί να χρησιμοποιούν όμοιες διασυνδέσεις με τους κατασκευαστές των DSPs.

Οι κυριότεροι τύποι debugger είναι οι ακόλουθοι :

➤ **Debuggers που χρησιμοποιούν κοινούς χαρακτήρες, διαμορφωμένους ανά γραμμή εντολής**

Οι debuggers αυτής της κατηγορίας επικοινωνούν με το χρήστη, με τη βοήθεια κειμένου εντός κάποιου «παραθύρου». Το περιβάλλον μοιάζει πολύ με το περιβάλλον του MS-DOS. Παρά το ότι φαινομενικά είναι απλό και χρηστικό, στην πραγματικότητα έχει αποδειχθεί αρκετά δύσχρηστο σε πολύπλοκες εφαρμογές. Οι AT&T χρησιμοποιεί τέτοιου είδους debuggers για τους DSPs κινητής υποδιαστολής.

➤ **Debuggers που χρησιμοποιούν χαρακτήρες, διαμορφωμένους σε «παράθυρα»**

Αποτελούν εξέλιξη των προηγούμενων και απλά ομαδοποιούν τις διάφορες πληροφορίες, τοποθετώντάς τις σε διακριτά παράθυρα. Τέτοιου είδους debuggers χρησιμοποιούν οι Texas Instruments και η Analog Devices.

➤ **Debuggers που βασίζονται σε γραφικά και χρησιμοποιούν «παραθυρική» διαμόρφωση**

Αυτός ο τύπος debugger χρησιμοποιεί περιβάλλον παρόμοιο με εκείνο των Windows και είναι ο πλέον εξελιγμένος, ευέλικτος και χρηστικός. Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ρυθμίσει τις απεικονίσεις των διαφόρων

στοιχείων με όποιο τρόπο επιθυμεί και παράλληλα στο ίδιο τερματικό να επεξεργάζεται και άλλου είδους εφαρμογές. Τέτοιου είδους debuggers χρησιμοποιούν πλέον όλοι οι κατασκευαστές DSPs.

Εκτός από τον τρόπο που ο χρήστης θα επικοινωνεί με τον debugger, άλλες σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους debuggers είναι η ικανότητά τους να διαβάζουν πηγαίο αλλά και συμβολικό κώδικα, η παροχή on-line υποστήριξης των χρηστών αναφορικά με τις εντολές του debugger αλλά και του ίδιου του επεξεργαστή, ο τρόπος παρουσίασης των δεδομένων και η δυνατότητα εισαγωγής στοιχείων, η δυνατότητα ορισμού μεταβλητών που θα παρακολουθούμε κατά βούληση, in-line assembly και disassembly και η αναφορά εντολών (command logging and scripting).

➤ **Αναγνώριση/επεξεργασία συμβολικού κώδικα**

Η ικανότητα του debugger να χειρίζεται τα αντικείμενα ή τις μεταβλητές του προς επεξεργασία κώδικα (καταληκτικού), χωρίς να κάνει χρήση των αριθμητικών τιμών τους ή των διευθύνσεών τους, αλλά με απλή αναφορά στα συμβολικά τους ονόματα. Η κατανόηση του συμβολικού κώδικα από τον debugger είναι εξίσου βασική είτε ο πηγαίος κώδικας είναι γραμμένος σε assembly είτε σε γλώσσα υψηλού επιπέδου.

➤ **Επεξεργασία σε επίπεδο πηγαίου κώδικα**

Η ικανότητα να διαχειρίζεται τα αντικείμενα του κώδικα αντικειμένου (καταληκτικού) με απ'ευθείας αναφορές στον πηγαίο κώδικα. Συνήθως ένα παράθυρο απεικονίζει τον πηγαίο κώδικα και καθώς ο εξομοιωτής εκτελεί βήμα βήμα το πρόγραμμα, υπογραμμίζεται η γραμμή εκείνη που περιέχει την εντολή που εκτελείται την κάθε στιγμή. Κάποιοι debuggers μπορούν να διαχειριστούν τον πηγαίο κώδικα είτε είναι γραμμένος σε assembly είτε σε γλώσσα υψηλού επιπέδου, ενώ κάποιοι άλλοι «διαβάζουν» μόνο τη μία γλώσσα.

➤ **Τρόποι απεικόνισης και εισαγωγής δεδομένων**

Έχει πολύ μεγάλη σημασία να μπορεί ο debugger να υποδείξει στο χρήστη τις πραγματικές πτυχές του εκάστοτε προβλήματος, πράγμα που καθίσταται εφικτό αν βρεθεί ένας έξυπνος τρόπος απεικόνισης των δεδομένων. Θα μπορούσε για παράδειγμα ο debugger, να υπογραμμίζει τα δεδομένα που άλλαξαν ανάμεσα σε δύο σημεία του προγράμματος ή να δίνει στο χρήστη την ευχέρεια να επιλέξει τη μορφή των δεδομένων, αν δηλαδή θα βρίσκονται

σε δεκαεξαδική ή σε δυαδική μορφή. Ένας debugger που θα παρουσίαζε όλα τα δεδομένα στο ίδιο αριθμητικό σύστημα προφανώς θα υστερούσε ως προς το παραπάνω σημείο. Επίσης σημαντικό θα ήταν να παρουσίαζε στο τερματικό και τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο στάδιο του profiling, είτε αυτό έγινε στον ISS είτε στον ICE. Μια τέτοια δυνατότητα όμως μόνο λίγοι debuggers την έχουν.

➤ **Γραφική απεικόνιση των σημάτων**

Είναι μια δυνατότητα που λίγοι debuggers έχουν και συνίσταται στη γραφική παρουσίαση των σημάτων της επιλογής του χρήστη. Πρόκειται για σπουδαίο χαρακτηριστικό, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί και με τη συμβολή ξεχωριστών του debugger γραφικών εργαλείων που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

➤ **Παρακολούθηση μεταβλητών**

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποιες διευθύνσεις της μνήμης ή των καταχωρητών ή ακόμα και να ορίσει κάποιες νέες μεταβλητές που προκύπτουν από το συνδυασμό των παραπάνω και να τις παρακολουθεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο. Οι τιμές του παραθύρου αυτού θα αλλάζουν κάθε φορά που ο ISS ή ο ICE διακόπτει εξαιτίας κάποιου breakpoint την εκτέλεση του προγράμματος.

➤ **Disassembly**

Ο debugger επανασυνθέτει τον assembly κώδικα από το δυαδικό εκτελέσιμο αρχείο που βρίσκεται σε γλώσσα μηχανής. Διαφέρει από την επεξεργασία στο επίπεδο του πηγαίου κώδικα ως προς το εξής σημείο : η τελευταία χρησιμοποιεί επιλεκτικά στοιχεία του πηγαίου κώδικα χωρίς πρόβλημα σύγχυσης, ενώ η διαδικασία disassembly μεταφράζει («ασεμπλάρει») ολόκληρο τον καταληκτικό κώδικα σε assembly. Εξάλλου υπάρχει και η δυνατότητα μετάφρασης σε assembly μόνο μιας γραμμής καταληκτικού δυαδικού κώδικα και αποθήκευσή της μετά στη μνήμη. Έτσι εάν ζητηθεί σε assembly η συγκεκριμένη εντολή δε χρειάζεται να μεταφραστεί εξολοκλήρου ο κώδικας. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ταχύτητα διόρθωσης μικρών λαθών.

➤ **Αναφορά εντολών (command logging)**

Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός αρχείου αναφοράς όλων των εντολών που εκτελέστηκαν στη διάρκεια μιας ορισμένης διαδικασίας debugging. Ένα session logging καταγράφει όχι μόνο τις εντολές που εκτελέστηκαν, αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το debugging. Η δυνατότητα scripting ή αλλιώς macro έχει να κάνει με την ανάσυρση και την εκτέλεση εντολών από κάποιο αρχείο, που ενδεχομένως να είναι ένα αρχείο αναφοράς (log file).

Όταν παρέχεται από κάποιον κατασκευαστή μεταγλωττιστής (compiler) για γλώσσα υψηλού επιπέδου, συνήθως ο debugger εκτός από την assembly είναι συμβατός και με τη γλώσσα υψηλού επιπέδου. Εάν δε συμβαίνει αυτό, η διαδικασία του debugging σε γλώσσα διάφορης της assembly είναι προβληματική. Σε μια τέτοια περίπτωση ανεξάρτητοι προμηθευτές μεταγλωττιστών γλωσσών υψηλού επιπέδου, αναλαμβάνουν να συνοδεύσουν τους compilers με debuggers συμβατούς με τις γλώσσες αυτές.

4.6 Βιβλιοθήκες κώδικα assembly

Οι βελτιστοποιημένες βιβλιοθήκες κώδικα σε assembly, μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερα χρήσιμες αναφορικά με την ελάττωση του χρόνου δημιουργίας ενός λογισμικού ανάπτυξης, αλλά και αναφορικά με την ποιότητά του. Ο προγραμματιστής μπορεί να δανειστεί ένα έτοιμο και δοκιμασμένο τμήμα κώδικα και να το επαναχρησιμοποιήσει αυτούσιο, εξοικονομώντας με αυτό τον τρόπο πολύ χρόνο. Αλλά ακόμα και αν δεν εντοπίσει αυτούσιο το ζητούμενο τμήμα του κώδικα, τα διάφορα παραδείγματα θα του φανούν χρήσιμα σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Ίσως μάλιστα να εντοπίσει κάποιο παρεμφερές κομμάτι κώδικα, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιήσει αφού πρώτα το διασκευάσει ελαφρώς. Όλα αυτά βέβαια υπό την προϋπόθεση ότι οι βιβλιοθήκες περιέχουν πηγαίο κώδικα, γιατί υπάρχουν και οι λεγόμενες βιβλιοθήκες αντικειμένου που περιέχουν καταληκτικό κώδικα.

Οι βιβλιοθήκες διακρίνονται σε βιβλιοθήκες συναρτήσεων (function libraries) και σε βιβλιοθήκες εφαρμογών (application libraries). Οι πρώτες περιέχουν σχετικά σύντομες συναρτήσεις, όπως συναρτήσεις πολλαπλασιασμού πινάκων ή συναρτήσεις φιλτραρίσματος. Τέτοιες βιβλιοθήκες παρέχονται από τους ίδιους του κατασκευαστές, πιθανώς μάλιστα και να συμπεριλαμβάνονται και στα συνοδευτικά manual books των DSPs. Η Texas Instruments π.χ διαθέτει μια εκτενή βιβλιοθήκη συναρτήσεων που αφορά τα μοντέλα της. Από εκεί και έπειτα περισσότερο εξειδικευμένες βιβλιοθήκες συναρτήσεων παρέχονται από ανεξάρτητους προμηθευτές.

Οι βιβλιοθήκες εφαρμογών περιέχουν μεγάλα τμήματα κώδικα που αντιπροσωπεύουν ολοκληρωμένες εφαρμογές ή μέρος αυτών. Μπορεί να περιέχουν ολόκληρο τον κώδικα, για παράδειγμα μιας εφαρμογής κωδικοποίησης φωνής. Τέτοιες βιβλιοθήκες διατίθενται μόνο από ανεξάρτητους προμηθευτές. Επί παραδείγματι η εταιρία Analogical Systems διαθέτει βιβλιοθήκες για εφαρμογές τηλεπικοινωνίας και κωδικοποίησης φωνής, που αφορούν στους επεξεργαστές DSP5600x της Motorola και ADSP-21xx της Analog Devices. Ακόμα όμως και οι ίδιοι κατασκευαστές μερικές φορές διαθέτουν έναντι επιπλέον χρέωσης, βιβλιοθήκες εφαρμογών.

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούν assembly δεν παύουν να είναι χρήσιμες και για τους προγραμματιστές της C και αντιστρόφως.

4.7 Υψηλού επιπέδου εργαλεία προγραμματισμού

Οι γλώσσες υψηλού επιπέδου επιτρέπουν στο χρήστη να χρησιμοποιήσει συμβολικά ονόματα για τις θέσεις μνήμης. Αυτά τα ονόματα λέγονται μεταβλητές, διότι η τιμή των διευθύνσεων μνήμης που αντιπροσωπεύουν μπορεί να αλλάξει. Οι τιμές των διευθύνσεων μνήμης που δεν αλλάζουν, ονομάζονται σταθερές.

Οι γλώσσες υψηλού επιπέδου ελαχιστοποιούν την απαιτούμενη από τον προγραμματιστή, γνώση της αρχιτεκτονικής του υπολογιστή. Τα προγράμματα σε πηγαίο κώδικα, είτε πρόκειται για γλώσσα υψηλού επιπέδου είτε για assembly, μεταφράζονται σε γλώσσα μηχανής ώστε να καθίστανται εκτελέσιμα. Στην assembly κάθε εντολή αντιστοιχεί σε μια εντολή της γλώσσας μηχανής, ενώ στις γλώσσες υψηλού επιπέδου η κάθε εντολή αντιστοιχεί σε πολλές εντολές της γλώσσας μηχανής.

Οι προγραμματιστές χρησιμοποιούν συνήθως την assembly διότι θεωρείται ότι έτσι μπορούν να εκμεταλλευτούν με πιο αποδοτικό τρόπο τις δυνατότητες των διάφορων πακέτων ανάπτυξης και προγραμματισμού. Μ'όλα ταύτα και η χρήση γλωσσών υψηλού επιπέδου μπορεί να έχει κάποια πλεονεκτήματα. Ως τέτοια αναγνωρίζονται τα παρακάτω :

- **Παραγωγικότητα** : Οι υψηλού επιπέδου γλώσσες είναι πιο φιλικές στον προγραμματιστή, οπότε αποφεύγονται τα συχνά λάθη κατά το γράψιμο του κώδικα.
- **Δυνατότητα διατήρησης** : Μιας και οι γλώσσες αυτές είναι πιο κατανοητές από την assembly, μπορούν πιο εύκολα να διατηρηθούν.
- **Δυνατότητα μεταφοράς** : Ένας κώδικας σε υψηλού επιπέδου γλώσσα μπορεί ευκολότερα να μεταφερθεί και να εφαρμοστεί σε ένα διαφορετικό

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

επεξεργαστή απ'αυτόν που είχε γραφτεί αρχικά. Αντίθετα η χρήση ενός assembly code, επειδή λαμβάνει υπόψη στοιχεία της αρχιτεκτονικής, περιορίζεται αποκλειστικά σε έναν DSP.

Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των γλωσσών υψηλού επιπέδου είναι ότι υστερούν στην ταχύτητα εκτέλεσης και ότι επεκτείνονται πάρα πολύ συγκριτικά με την assembly για να περιγράψουν τον ίδιο ποιοτικά κώδικα. Οι αδυναμίες αυτές αποδεικνύονται καθοριστικής σημασίας, τη στιγμή που οι σύγχρονοι επεξεργαστές φτιάχνονται με προδιαγραφές μικρού κόστους και μεγάλων επιδόσεων. Μπορεί όμως και να λειτουργήσουν θετικά σε περιπτώσεις εμπορικών εφαρμογών που πρέπει το γρηγορότερο να είναι διαθέσιμες στην αγορά, όπως και σε περιπτώσεις που οι υπολογιστικές απαιτήσεις δεν είναι και τόσο μεγάλες. Η καθιέρωση πακέτων που κάνουν χρήση γλώσσας υψηλού επιπέδου μπορεί να αυξηθεί, εφόσον γίνεται συνδυασμός με assembly για την παραγωγή του κώδικα.

Γλώσσα προγραμματισμού C

Είναι η πιο δημοφιλής γλώσσα όταν πρόκειται για προγραμματισμό ενός DSP σε γλώσσα υψηλού επιπέδου. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη εξοικείωση των προγραμματιστών με τη C, στην απλότητά της, αλλά και στο γεγονός ότι σχετίζεται με την αρχιτεκτονική του DSP. Σήμερα όλοι οι επεξεργαστές που προγραμματίζονται σε γλώσσα υψηλού επιπέδου, διαθέτουν μεταγλωττιστή της C, αφενός λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών της και αφετέρου επειδή στην αγορά κυκλοφορούν εξελιγμένοι μεταγλωττιστές της C.

Η γλώσσα C μπορεί να είναι δημοφιλής, δεν παύει όμως να έχει και σοβαρές ελλείψεις. Δεν υποστηρίζει δεδομένα που βρίσκονται σε μορφή σταθερής υποδιαστολής (καθοριστικό χαρακτηριστικό για τον προγραμματισμό fixed-point επεξεργαστών), ούτε όμως και μιγαδικούς αριθμούς (καθοριστικό χαρακτηριστικό για τον προγραμματισμό επεξεργαστών που χρησιμοποιούν μιγαδική αριθμητική).

Για τη διευθέτηση αυτών των θεμάτων πολλοί κατασκευαστές μεταγλωττιστών, διαθέτουν κατάλληλες επεκτάσεις της C, ούτως ώστε να αυξάνουν την αποδοτικότητα και τη χρησιμότητά της. Οι περισσότεροι compilers σήμερα δίνουν τη δυνατότητα στον προγραμματιστή να εισάγει στοιχεία της assembly απευθείας στον κώδικα assembly που θα προκύψει από τη μετατροπή του κώδικα της C. Σε άλλες περιπτώσεις δε, παρέχονται «δείκτες μνήμης», ο ρόλος των οποίων είναι να ενημερώνουν το μεταγλωττιστή της C για τις ακριβείς θέσεις μνήμης που καταλαμβάνουν συγκεκριμένες μεταβλητές. Τέλος αξίζει να επισημανθεί και η προσπάθεια της NCEG, ώστε η C μετά από κατάλληλες επεκτάσεις να ανταποκρίνεται καλύτερα στις υπολογιστικές απαιτήσεις των σύγχρονων DSPs.

Άλλες γλώσσες υψηλού επιπέδου για τον προγραμματισμό των DSPs

- **C++**
Πολλοί υποστηρίζουν ότι η C++ θα επικρατήσει μελλοντικά στο πεδίο των DSPs. Και αυτό διότι ο προγραμματιστής έχει την ευχέρεια να ορίσει νέους τύπους δεδομένων και τελεστές με αποτέλεσμα να αυξάνεται δραστικά η ικανότητα παραμετροποίησης της γλώσσας. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι το ίδιο πρόγραμμα μπορεί πλέον να γραφτεί με συντομότερο τρόπο. Επιπλέον ο μεταγλωττιστής εκμεταλλευόμενος τους τελεστές, αποκτά καλύτερες πιθανότητες βελτιστοποίησης του κώδικα.

- **ADA (Analog Differential Analyser)**
Διαθέτει αρκετά αξιόλογα χαρακτηριστικά, ειδικά για τον προγραμματισμό επεξεργαστών που χρησιμοποιούν fixed-point αριθμητική. Είναι πιο ισχυρή γλώσσα από την C, μιας και διαθέτει ευρύτερη γκάμα δομών, μεταβλητών και εντολών (σχεδόν διπλάσιες από τη C). Ταυτόχρονα όμως αυτό αποτελεί και μειονέκτημα αφού την καθιστά δύσχρηστη και δυσνόητη, με αποτέλεσμα σε απλές εφαρμογές όπως ο χειρισμός των bit να προτιμάται η χρήση της C. Μέχρι πριν λίγο καιρό μόνο η TARTAN διέθετε compiler της ADA και απευθυνόταν στους DSPs TMS320C3x/C4x της Texas Instruments και ADSP-2106x της Analog Devices.

4.8 Αποδοτικότητα των γλωσσών υψηλού επιπέδου

Γενικά οι γλώσσες αυτές δεν έτυχαν μεγάλης αποδοχής από τους DSPs, κυρίως επειδή ο κώδικας που προκύπτει μετά τη μεταγλώττιση των γλωσσών αυτών δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικός όσο αφορά στην ταχύτητα εκτέλεσης και στη χρήση της μνήμης.

Η κυριότερη αιτία της χαμηλής απόδοσης τους, είναι η μη αποδοτική συνεργασία των DSPs με τους compilers. Η προσπάθεια των κατασκευαστών για ελαχιστοποίηση του κόστους με παράλληλη αύξηση της απόδοσης των επεξεργαστών, οδήγησε σε μια συγκεκριμένη αντίληψη για την αρχιτεκτονική των DSPs : να μπορούν να δημιουργηθούν οι απαραίτητοι αλγόριθμοι του Digital Signal Processing με τη χρήση του ελάχιστου δυνατού αριθμού συναρτήσεων. Απεναντίας η επιδίωξη των κατασκευαστών επεξεργαστών γενικού σκοπού, ήταν να τους καταστήσουν όσο πιο φιλικούς γίνεται με τους μεταγλωττιστές. Μερικές από τις δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι μεταγλωττιστές είναι οι εξής :

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- Πολλαπλοί χώροι μνήμης (multiple memory spaces)
- Μικρός αριθμός καταχωρητών (με μεταβλητό μήκος)
- Μη ορθογωνικότητα των εντολών (δηλαδή οι εντολές να μπορούν να εκτελεστούν μόνο με συγκεκριμένους τρόπους διευθυνσιοδότησης)
- Ανυπαρξία κυκλωματικής λογικής για το χειρισμό δομών δεδομένων τύπου στοιβάδας / σωρού (stack : τα δεδομένα να εντάσσονται στη λογική τελευταίο εισερχόμενο = πρώτο εξερχόμενο ή αλλιώς τα δεδομένα να εισέρχονται και να εξέρχονται από το ίδιο άκρο του σωρού)

Επιπλέον ο compiler πρέπει να μπορεί να χειριστεί σωστά τις πολυεντολές όπως είναι η MAC (πολλαπλασιασμός - φόρτωση), την παράλληλη κίνηση δεδομένων και τις δυνατότητες που δίνουν οι βρόγχοι στην κυκλωματική υλοποίηση (looping).

Ένα άλλο μειονέκτημα των μεταγλωττιστών γλωσσών υψηλού επιπέδου έχει να κάνει με τη διαχείριση της μνήμης. Οι DSPs λειτουργούν γρηγορότερα όταν οι εντολές και τα δεδομένα βρίσκονται αμφοτέρωθεν αποθηκευμένα στην on-chip μνήμη, η οποία όμως είναι εκ των πραγμάτων περιορισμένης έκτασης (συνήθως της τάξης των μερικών εκατοντάδων ή χιλιάδων λέξεων). Ο κώδικας όμως που παράγουν οι σύγχρονοι compilers είναι πολύ ευρύς για να φιλοξενηθεί από την on-chip μνήμη, με προφανή αντίκτυπο στην ταχύτητα λειτουργίας του επεξεργαστή.

Η περιορισμένη αποδοτικότητα τους γίνεται περισσότερο αισθητή στους fixed-point επεξεργαστές. Αφενός το χαμηλό budget των εφαρμογών που χρησιμοποιούν fixed-point επεξεργαστές, δεν αφήνει πολλά περιθώρια για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της μικρής ταχύτητας λειτουργίας και της διαχείρισης της μνήμης. Αφετέρου η δημοφιλέστερη γλώσσα υψηλού επιπέδου, η C, αδυνατεί να παραστήσει δεδομένα σε μορφή fixed-point και προφανώς η εξομοίωση της αριθμητικής floating-point σε DSPs τύπου fixed-point είναι εντελώς ασύμφορη. Έτσι αν ο κατασκευαστής του compiler δεν έχει προνοήσει για κάποια επέκταση που να επιτρέπει τη διαχείριση fixed-point δεδομένων, η διαδικασία προγραμματισμού περιπλέκεται δραματικά. Ένας κατασκευαστής που διαθέτει τέτοιου είδους επέκταση, είναι η Intermetrics που απευθύνεται στον επεξεργαστή μPD7701x της NEC.

Οι floating-point επεξεργαστές εμφανίζουν επίσης τέτοιου είδους προβλήματα αλλά σε μικρότερο βαθμό. Και αυτό διότι εξαιτίας του μεγαλύτερου budget των floating-point επεξεργαστών, υπάρχει η δυνατότητα να αντιμετωπιστούν οι όποιες αδυναμίες, με αντίτιμο βέβαια την αύξηση του κόστους. Ακόμα η κυκλωματική υλοποίηση των επεξεργαστών

αυτών υποστηρίζει την αριθμητική κινητής υποδιαστολής, γεγονός που κάνει τη C γλώσσα την πλέον κατάλληλη για τον προγραμματισμό τους. Και τέλος επειδή έχουν μεγάλο αριθμό καταχωρητών (μιας και τα δεδομένα σε floating-point μορφή πίνουν περισσότερο χώρο), οι εντολές έχουν μεγαλύτερη ορθογωνικότητα.

4.9 Βιβλιοθήκες γλωσσών υψηλού επιπέδου

Οι μεταγλωττιστές γλωσσών υψηλού επιπέδου συμπεριλαμβάνουν βιβλιοθήκες οι οποίες περιέχουν συναρτήσεις υποστήριξης που συναντώνται σε τέτοιου είδους γλώσσες. Στα πλαίσια αυτά, περιλαμβάνουν και ένα περιεκτικό τμήμα της πρότυπης βιβλιοθήκης της C, όπως αυτή ορίζεται από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Τυποποίησης (American National Standards Institute). Εκεί περιγράφονται κάποιες βασικές συναρτήσεις (`strcpy`, `atoi`), αλλά κάποιες άλλες παραλείπονται (`printf`, `scanf`, `getc`). Ουσιαστικές συναρτήσεις όπως η `sin` και η `cos`, παρά το ότι περιλαμβάνονται στην παραπάνω βιβλιοθήκη, δεν μπορούν να αξιοποιηθούν από τους fixed-point DSPs γιατί το ANSI χρησιμοποιεί για τους ορισμούς του, floating-point αριθμητική διπλής ακρίβειας.

Πολλοί ανεξάρτητοι προμηθευτές διαθέτουν βιβλιοθήκες με στοιχειώδεις έως και πολύ περίπλοκες υπορουτίνες, όπως είναι η κωδικοποίηση ήχου ή η διαμόρφωση στα modems. Οι βιβλιοθήκες αυτές είτε είναι γραμμένες σε assembly είτε σε γλώσσες υψηλού επιπέδου, μπορούν να διαβαστούν από μεταγλωττιστές γλωσσών υψηλού επιπέδου.

4.10 Debuggers

Είναι σημαντικό οι compilers να συνοδεύονται από ανάλογους debuggers. Δεν έχει νόημα και είναι μη παραγωγικό, ένας προγραμματιστής να έχει στη διάθεσή του μεταγλωττιστή γλωσσών υψηλού επιπέδου και να πρέπει να επεξεργαστεί το μεταγλωττισμένο κώδικα με έναν debugger που διαβάζει assembly. Γι' αυτό και πολύ σπάνια διαπιστώνει κανείς στους προμηθευτές μεταγλωττιστών, μια τέτοια αναντιστοιχία.

Εργαλεία προγραμματισμού που βασίζονται σε block διαγράμματα

Πολλοί θεωρούν ότι τα block διαγράμματα είναι πιο φυσικός τρόπος έκφρασης των διάφορων αλγορίθμων της επεξεργασίας σήματος. Τα σχετικά εργαλεία προγραμματισμού δίνουν στο χρήστη την ευχέρεια να σχεδιάζει, να υλοποιεί και να προσομοιώνει αλγόριθμους που δίνονται σε μορφή block διαγραμμάτων. Παράγουν δηλαδή, εκτελέσιμο καταληκτικό κώδικα από αλγόριθμους που παριστάνονται από block διαγράμματα.

Τα υποφαινόμενα εργαλεία προγραμματισμού μπορούν να αξιοποιηθούν με ποικίλους τρόπους. Μπορούν πρώτα απ'όλα να μετατρέψουν γρήγορα έναν αλγόριθμο μορφής block διαγράμματος, σε πρόγραμμα της C ή της assembly. Μπορούν επίσης να αποκτήσουν εύκολη πρόσβαση στις διάφορες βιβλιοθήκες συναρτήσεων ή εφαρμογών, εκμεταλλευόμενα ακριβώς τη μορφή που έχουν οι βιβλιοθήκες. Τέλος συχνά διαθέτουν εξομοιωτές, επεξεργασία fixed-point δεδομένων, δημιουργία κώδικα, ακόμα και δυνατότητα σχεδιασμού σε επίπεδο hardware, χαρακτηριστικό εξαιρετικά χρήσιμο.

Τα τέσσερα δημοφιλέστερα εργαλεία του είδους, είναι το SPW της Alta Group, το DSP Station της Mentor Graphics, το COSSAP της Synopsys και το Hypersignal for Windows Block Diagram της Hyperception. Και τα τέσσερα δημιουργούν κώδικα σε C από τις προδιαγραφές που δίνονται σε μορφή block διαγράμματος. Ο κώδικας αυτός στη συνέχεια μεταγλωττίζεται, φορτώνεται και τρέχει πάνω σε έναν οποιοδήποτε DSP, αν και τα προγράμματα της C υποτίθεται ότι τρέχουν μόνο σε floating-point DSPs.

4.11 Λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου

Λειτουργικό σύστημα ονομάζεται το πρόγραμμα που ελέγχει την πρόσβαση στους πόρους του υπολογιστή (κατανομή πόρων) και διαχειρίζεται τη σειρά εκτέλεσης των διάφορων διαδικασιών στον επεξεργαστή, με αποτέλεσμα την εν γένει αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (ή αλλιώς Kernel που σημαίνει ένα λειτουργικό σύστημα που βρίσκεται πάντα φορτωμένο στη μνήμη), είναι εκείνο ακριβώς που εξασφαλίζει τη λειτουργία του λειτουργικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Η real time λειτουργία συνεπάγεται ότι ο μέγιστος χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που θα συμβεί κάποια διακοπή και μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας που ξεκίνησε αμέσως μετά τη διακοπή, δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο ανώτατο όριο. Συνεπάγεται επίσης πως η κάθε διαδικασία έχει συγκεκριμένο χρόνο στη διάθεσή της για να ολοκληρωθεί και ότι πρόκειται να απασχολήσει μόνο ένα προκαθορισμένο ποσοστό της CPU. Τα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου δίνουν τη δυνατότητα στον επεξεργαστή να κάνει παράλληλα και άλλες δουλειές χωρίς να εμφανίζονται συγκρούσεις (conflicts).

Η ύπαρξη ενός τέτοιου λειτουργικού συστήματος, δεν εξασφαλίζει αυτόματα ότι ολόκληρο το σύστημα θα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Στην πραγματικότητα υπάρχουν βαριές διαδικασίες που μπορούν να «κρασάρουν» ένα σύστημα ακόμα και αν βασίζεται σε λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου. Τα λειτουργικά συστήματα π.χ χρησιμεύουν απλά στη σχεδίαση συστημάτων που η λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο, είναι εκ των προτέρων γνωστή.

Τα λειτουργικά συστήματα π.χ χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό στους επεξεργαστές γενικού σκοπού, καθώς και στους RISK επεξεργαστές. Σήμερα κάποια από αυτά

χρησιμοποιούνται και στους DSPs. Μερικά εξ' αρχής σχεδιάστηκαν για χρήση σε DSPs, ενώ άλλα προσαρμόστηκαν στη συνέχεια. Αυτή η τελευταία κατηγορία, περιλαμβάνει λειτουργικά συστήματα που είναι γραμμένα σε C, με λίγα μόνο στοιχεία από assembly και διατίθενται μόνο σε floating-point DSPs, εξαιτίας του ότι ο μεταγλωττιστής της C υποστηρίζει μόνο floating-point αριθμητική.

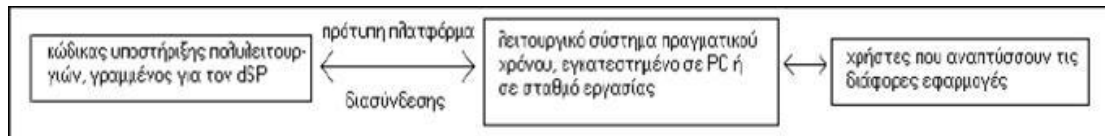
Μόνο λίγα λειτουργικά συστήματα διατίθενται για fixed-point επεξεργαστές. Το SPOX της Microsystems είναι το κυρίαρχο πρόγραμμα αυτής της κατηγορίας και απευθύνεται στη σειρά 5600x της Motorola αλλά και σε άλλους επεξεργαστές.

Περιβάλλοντα πολυμέσων

Το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι DSPs όταν ενσωματωθούν σε ηλεκτρονικές διατάξεις εξειδικευμένου σκοπού, είναι ότι μπορούν να εκτελούν ποικίλες λειτουργίες ακόμα και ταυτόχρονα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ενσωμάτωσής τους σε PC ή σε σταθμούς εργασίας, όπου χρησιμοποιούνται ως fax, modems, music synthesizers κ.α. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η συνθήκη των πολλαπλών λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο, κρίνεται αναγκαία η εγκατάσταση λειτουργικού συστήματος, γεγονός που ασφαλώς επιβαρύνει το κόστος. Αφού στο μέλλον αναμένεται πολλοί κατασκευαστές DSPs να διαθέτουν τον απαραίτητο κώδικα που θα υποστηρίζει τις πολυλειτουργίες που περιγράφηκαν, θα πρέπει να οριστεί ένα πρότυπο πρόγραμμα διασύνδεσης του κώδικα αυτού με το λειτουργικό περιβάλλον. Έτσι οι προγραμματιστές που έχουν άμεση επικοινωνία μόνο με την ευρύτερη διάταξη που ενσωματώνει τον DSP (ένα PC ή ένα σταθμό εργασίας), επικοινωνούν δηλαδή με το λειτουργικό σύστημα, θα μπορούν να αξιοποιήσουν τη δυνατότητα για πολυλειτουργίες μέσω της πρότυπης πλατφόρμας διασύνδεσης και να αναπτύξουν έτσι τις εφαρμογές τους.

Στο σχήμα 7 φαίνεται αναλυτικά η δομή ενός περιβάλλοντος πολυμέσων.

Ένα περιβάλλον λειτουργίας πολυμέσων περιλαμβάνει ένα λειτουργικό σύστημα συνοδευόμενο από την πρότυπη πλατφόρμα επικοινωνίας που περιγράψαμε προηγουμένως, καθώς και το ειδικό λογισμικό που ενεργοποιεί αυτήν την πλατφόρμα και είναι εγκατεστημένο στο PC ή στο σταθμό εργασίας. Επίσης μπορεί να περιλαμβάνει και κάποιες βιβλιοθήκες, στις οποίες περιγράφεται ο απαραίτητος κώδικας που δίνει τη δυνατότητα στον DSP να εκτελέσει την κάθε μία από τις πολυλειτουργίες.



Σχήμα 7. Δομή περιβάλλοντος πολυμέσων

Υποστήριξη Εφαρμογών (application support)

Οι DSPs είναι πολύπλοκες ηλεκτρονικές διατάξεις, τόσο από πλευράς software όσο και από πλευράς hardware. Όταν κανείς πρόκειται να επιλέξει επεξεργαστή οφείλει να δώσει μεγάλη βαρύτητα στην παρεχόμενη τεχνική υποστήριξη μετά την αγορά, προκειμένου να διευκολυνθεί στην προγραμματιστική διαδικασία αλλά και στην αντιμετώπιση των όποιων δυσχερειών και προβλημάτων.

Η τεχνική υποστήριξη που παρέχεται ποικίλλει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Φιλοσοφία κάποιων όπως η Analog Devices και η Texas Instruments, είναι η ευρεία παροχή υποστήριξης προς όλους τους χρήστες, ενώ κάποιοι άλλοι όπως η AT&T, περιορίζονται μόνο σε πελάτες αιχμής.

Προμήθεια εγχειριδίων τεχνικού περιεχομένου (documentation)

Περιλαμβάνουν data sheets, οδηγίες χρήσης και εγχειρίδια εφαρμογών. Οι οδηγίες χρήσης περιλαμβάνουν συνήθως εμπειριστατωμένη περιγραφή της αρχιτεκτονικής του DSP, εκτενή αναφορά στο σύνολο των εντολών και ίσως και κάποια παραδείγματα προγραμματισμού. Η ποιότητα του documentation μπορεί να διαφέρει σημαντικά από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Ένα ακριβές και λεπτομερές documentation πάντως, προσφέρει σπουδαία βοήθεια στη χρήση του DSP και μάλιστα κάποιες εταιρίες όπως η Analog Devices το χρεώνουν επιπλέον.

Τα data sheets περιλαμβάνουν λεπτομέρειες για το χρονοισμό και τις διάφορες εξωτερικές συνδέσεις του DSP. Συνήθως τα όσα αναφέρουν είναι ακριβή, όχι όμως και απολύτως κατανοητά. Τα data sheets πολλές φορές είναι μέρος του εγχειριδίου χρήσης (user's guide).

Τα εγχειρίδια εφαρμογών τέλος, αποτελούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο κομμάτι του documentation, διότι περιέχουν εκτεταμένες πληροφορίες για το εύρος των εφαρμογών του κάθε DSP και συνοδεύονται από πλήθος παραδειγμάτων.

4.12 Μηχανικοί υποστήριξης (applications engineers)

Αναφέρονται και ως AEs και ενδεχομένως είναι και το πιο σημαντικό κομμάτι της υλικοτεχνικής υποστήριξης ενός DSP. Είναι εξειδικευμένοι στον ενίοτε επεξεργαστή που υποστηρίζουν και μπορεί είτε να εργάζονται στην έδρα της κατασκευάστριας εταιρίας, είτε να εδρεύουν στα κατά τόπους παραρτήματά της (field applications engineers).

Ο ρόλος τους έχει να κάνει με το στάδιο πριν την πώληση του επεξεργαστή, αλλά και μετά. Στην πρώτη περίπτωση προβάλλουν τα πλεονεκτήματα του DSP, την γκάμα των εφαρμογών του και συχνά επεκτείνονται και σε αναλυτικές συγκρίσεις με τα ανταγωνιστικά μοντέλα. Έπειτα από την προμήθεια του DSP, οι AEs παρέχουν όποια βοήθεια χρειαστεί ο πελάτης στον τρόπο ανάπτυξης των εφαρμογών και στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που πιθανώς να προκύψουν.

Παρά την καθοριστική συμβολή τους, οι AEs είναι δυσεύρετοι. Για να αντιμετωπίσουν το ζήτημα αυτό οι κατασκευάστριες εταιρίες αναθέτουν συχνά την πρόσληψη τέτοιων μηχανικών στους περιφερειακούς διανομείς τους. Αυτοί οι μηχανικοί, να μεν έχουν σημαντική συνεισφορά, δεν έχουν όμως συνήθως το γνωστικό υπόβαθρο των «πρώτων στη τάξη» AEs.

Τηλεφωνική υποστήριξη

Συχνά οι κατασκευαστές παρέχουν τεχνική υποστήριξη. Τις τηλεφωνικές υπηρεσίες προσφέρουν μηχανικοί υποστήριξης, με τον τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ούτε και σε αυτή την περίπτωση καλύπτονται επαρκώς οι ανάγκες των πελατών, δεδομένου μάλιστα ότι οι απαντήσεις από τηλεφώνου δεν έχουν την ίδια ακρίβεια και πληρότητα. Συνήθως οι χρήστες αφήνουν τις ερωτήσεις τους σε κάποιον τηλεφωνητή ή τις στέλνουν με fax.

Ιστοσελίδες στο διαδίκτυο

Όσοι χρήστες διαθέτουν modem μπορούν να επισκεφθούν τις ειδικού σκοπού ιστοσελίδες. Εκεί παρέχονται βιβλιοθήκες συναρτήσεων και προγραμμάτων καθώς και συχνά τιθέμενες ερωτήσεις με τις απαντήσεις τους. Οι ιστοσελίδες αυτές έχουν δημιουργηθεί από τον ίδιο τον κατασκευαστή του DSP ή και από άλλους και η πρόσβαση είναι είτε δωρεάν είτε έναντι αμοιβής. Η δε αποτελεσματικότητα αυτού του είδους της υποστήριξης, εξαρτάται ανάλογα με το δημιουργό και το δίκτυο.

Σεμινάρια κατάρτισης

Συνήθως πρόκειται για ταχύρυθμα σεμινάρια διάρκειας μίας έως τριών ημερών, που κοστολογούνται περίπου 1000\$ το άτομο.

Παροχή τεχνικής υποστήριξης από τρίτες εταιρίες

Τέλος πέρα από τους ίδιους τους κατασκευαστές, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ανεξάρτητων εταιριών που δραστηριοποιούνται στον τομέα των υπηρεσιών υποστήριξης.

Έτσι στην αγορά και στο διαδίκτυο ο χρήστης μπορεί να βρει για κάθε επεξεργαστή που τον ενδιαφέρει :

- εξειδικευμένα εγχειρίδια
- ειδικά πακέτα ανάπτυξης και προγραμματισμού
- εξειδικευμένους συμβούλους
- ειδικά εκπαιδευτικά προγράμματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ DSP56002

Το DSP56002 είναι ένα γενικού σκοπού, απλό ολοκληρωμένο Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος (DSP). Το DSP56002EVM Evaluation Module (EVM) είναι μια χαμηλού κόστους πλατφόρμα υλικού που χρησιμοποιεί τον επεξεργαστή DSP56002 για σχεδιασμό συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος πραγματικού χρόνου.

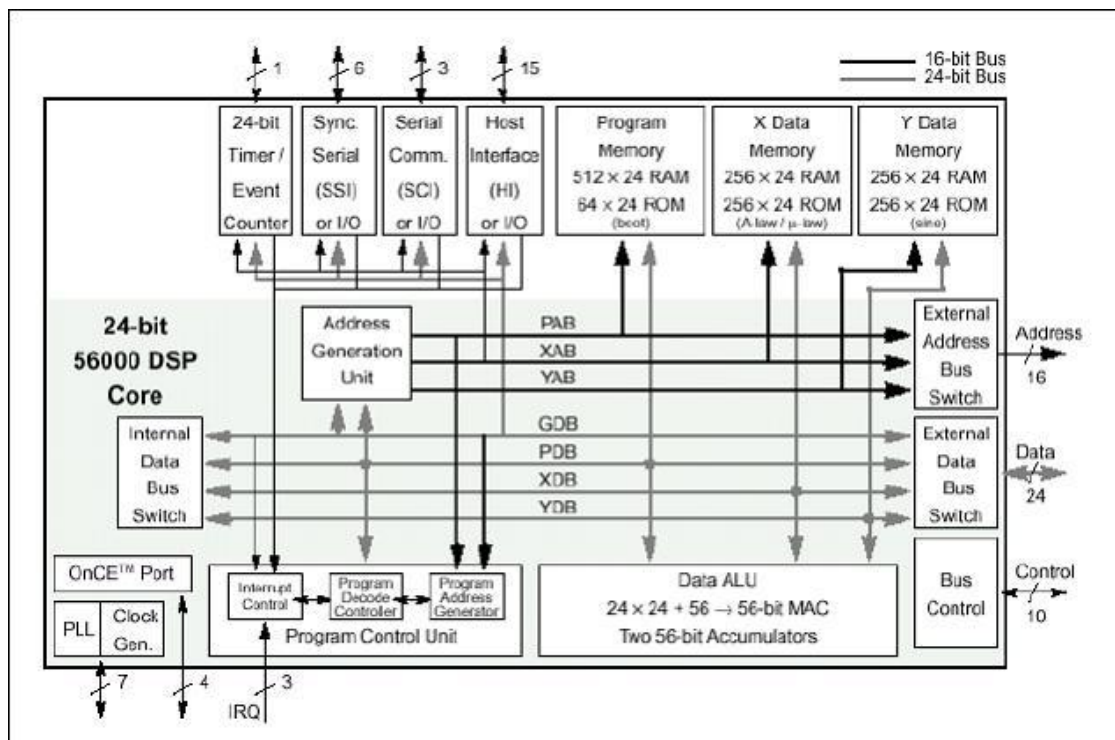
Η οικογένεια επεξεργαστών DSP56002 αποτελείται από ένα αποδοτικό 24-bit πυρήνα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και μια περιοχή επέκτασης. Στην περιοχή επέκτασης, το ολοκληρωμένο υποστηρίζει διαφορετικούς σχηματισμούς μνήμης και περιφερειακών τα οποία μπορούν να αλλάζουν από το ένα μέλος της μιας οικογένειας στο άλλο.

5.1 Χαρακτηριστικά και προδιαγραφές του DSP56002

- 24-bit fixed point επεξεργαστής
- περισσότερες από 40 εκατομμύρια εντολές ανά sec (MIPS), 25ns κύκλος εντολής στα 80 MHz. Περισσότερες από 33 (MIPS), 30.3 ns κύκλος εντολής στα 66 MHz.
- Περισσότερες από 240 εκατομμύρια πράξεις ανά sec (MOPS) στα 80MHz. Περισσότερες από 198 MOPS στα 66MHz.
- Παράλληλος 24x24-bit πολλαπλασιασμός - συσσώρευση σε 1 κύκλο εντολής (2 κύκλους ρολογιού)
- 2 x 56-bit συσσωρευτές που περιλαμβάνουν bit επέκτασης
- 56-bit πρόσθεση / αφαίρεση σε 1 κύκλο εντολής
- 48x48-bit διπλής ακρίβειας (double precision) πολλαπλασιασμός με 96-bit αποτέλεσμα σε 6 κύκλους εντολής
- Αριθμητική κλασματικών και ακεραίων με υποστήριξη ακρίβειας πολλών επιπέδων
- 1 ALU, 1 πολλαπλασιαστής
- Κορεσμός και νορμαλισμός
- Ενσωματωμένοι hardware DO βρόχοι
- 512x24 Μνήμη Προγράμματος RAM και 64x24-bit ROM αυτοδύναμης εκκίνησης
- Δύο 256x24-bit Μνήμες Δεδομένων RAM

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- Δύο 256x24 Μνήμες Δεδομένων ROM που περιέχουν πίνακες ημιτόνων και των προτύπων για επεξεργασία σημάτων ομιλίας A-law και μ -law
- Υψηλής ταχύτητας θύρα για επέκταση της μνήμης εξωτερικά (Θύρα A) με 16-bit δίαυλο διευθύνσεων και 24-bit δίαυλο δεδομένων
- Θύρα Host Διασύνδεσης (HPI) 8-bit με υποστήριξη DMA
- Θύρα Σύγχρονης Σειριακής Διασύνδεσης (Synchronous Serial Interface - SSI)
- Θύρα Επικοινωνίας (Ασύγχρονης) Σειριακής Διασύνδεσης (Serial Communication Interface - SCI)
- Θύρα OnCE (On-chip Emulation) για γρήγορη και ανεξάρτητη αποσφαλμάτωση
- 24-bit χρονομετρητής / απαριθμητής



Σχήμα 1. Block διάγραμμα του DSP56002

Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU)

Οι κύριες συνιστώσες της CPU του επεξεργαστή 56002 είναι :

- Δίαυλοι δεδομένων
- Δίαυλοι διευθύνσεων
- Μονάδες εκτέλεσης :
 - ❖ Λογική - αριθμητική Μονάδα Δεδομένων (data ALU)
 - ❖ Μονάδα Παραγωγής Διευθύνσεων (AGU)
 - ❖ Μονάδα Ελέγχου Προγράμματος (PCU)
- Επέκταση Μνήμης (Θύρα A)

Δίαυλοι δεδομένων

Οι δίαυλοι δεδομένων περιλαμβάνουν τους

- X Δίαυλο Δεδομένων (X Data Bus - XDB)
- Y Δίαυλο Δεδομένων (Y Data Bus - YDB)
- Δίαυλο Δεδομένων Προγράμματος (Program Data Bus - PDB)
- Δίαυλο Γενικών Δεδομένων (Global Data Bus - GDB)

Οι δίαυλοι δεδομένων X και Y μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ της ALU και της X και Y μνήμης δεδομένων, αντίστοιχα. Ο X και Y δίαυλοι δεδομένων επίσης μπορούν να αντιμετωπίζονται σαν παράλληλοι, από τις κύριες εντολές, με αποτέλεσμα να λειτουργούν σαν 48-bit δίαυλοι. Ο δίαυλος δεδομένων προγράμματος μεταφέρει prefetched λέξεις εντολών. Ο δίαυλος Γενικών Δεδομένων οδηγεί την μεταφορά άλλων δεδομένων όπως μεταφορές Εισόδου /Εξόδου προς και από τις περιφερειακές διατάξεις.

Δίαυλοι Διευθύνσεων

Οι δίαυλοι διευθύνσεων περιλαμβάνουν τους :

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- X Δίαυλο Διεύθυνσης (X Address Bus - XAB)
- Y Δίαυλο Διεύθυνσης (Y Address Bus - YAB)
- Δίαυλο Διεύθυνσης Προγράμματος (Program Address Bus - PAB)

Ο XAB και ο YAB παρέχουν την διεύθυνση δεδομένων η οποία δείχνει σε ορισμένες θέσεις στις εσωτερικές μνήμες δεδομένων X και Y αντίστοιχα.

Ο PAB παρέχει διεύθυνση δεδομένων η οποία δείχνει σε ορισμένη θέση στην εσωτερική μνήμη προγράμματος P.

Τα τμήματα της εξωτερικής μνήμης διευθυνσιοδοτούνται από ένα απλό 16-bit δίαυλο διευθύνσεων απλής κατεύθυνσης οδηγούμενο από έναν πολυπλέκτη τριών εισόδων ο οποίος μπορεί να επιλέγει τον XAB, τον YAB ή τον PAB.

Αριθμητική και Λογική Μονάδα (Data Arithmetic Logic Unit - Data ALU)

Η Αριθμητική και Λογική Μονάδα (ΑΛΜ) Εκτέλεσης Δεδομένων δείχνεται στο σχήμα 3 και εκτελεί αριθμητικές και λογικές πράξεις στους τελεστές των δεδομένων. Οι κύριες συνιστώσες της ALU περιλαμβάνουν : καταχωρητές δεδομένων, μια παράλληλη λογική μονάδα πολλαπλασιασμού / συσσώρευσης (MAC), έναν συσσωρευτή ολίσθησης, μια μονάδα χειρισμού bit και δύο ολισθητές / περιοριστές.

Καταχωρητές δεδομένων.

Η ALU έχει 4 καταχωρητές εισόδου δεδομένων και 6 καταχωρητές συσσώρευσης όπως δείχνεται στο σχήμα 2.

Καταχωρητές εισόδου δεδομένων

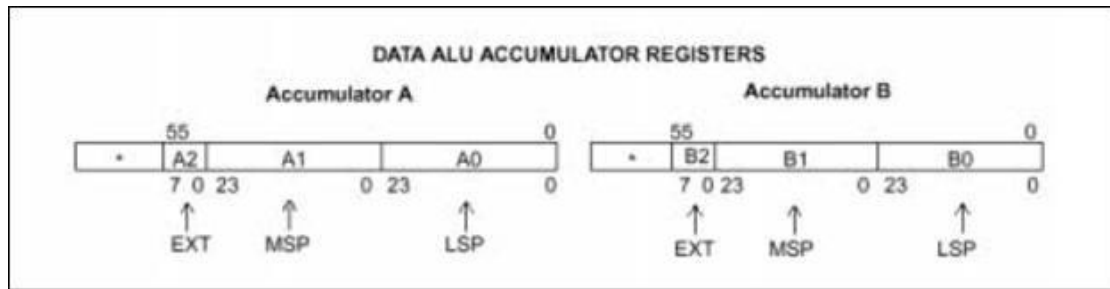
Οι X1, X0 και Y1, Y0 καταχωρητές εισόδου δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν 4 ανεξάρτητοι 24-bit καταχωρητές X1, X0, Y1 και Y0. Οι 48-bit καταχωρητές X και Y μπορούν να δημιουργηθούν από την παράλληλη σύνδεση των X1: X0 και Y1:Y0, αντίστοιχα.

Καταχωρητές συσσώρευσης δεδομένων.

Οι 6 καταχωρητές συσσώρευσης δεδομένων A2, A1, A0, B2, B1 και B0, σχηματίζουν δύο γενικού σκοπού 56-bit συσσωρευτές, A και B. Ο συσσωρευτής A είναι η αλληλοδιαδοχή των καταχωρητών A2:A1:A0 και αντίστοιχα ο καταχωρητής B η αλληλοδιαδοχή των B2:B1:B0. Οι καταχωρητές A1, A0, B1 και B0 έχουν εύρος 24-bit έκαστος ενώ οι καταχωρητές A2 και B2 έχουν εύρος 8-bit έκαστος. Οι δύο συσσωρευτές μπορούν να θεωρούνται σαν 48-bit

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

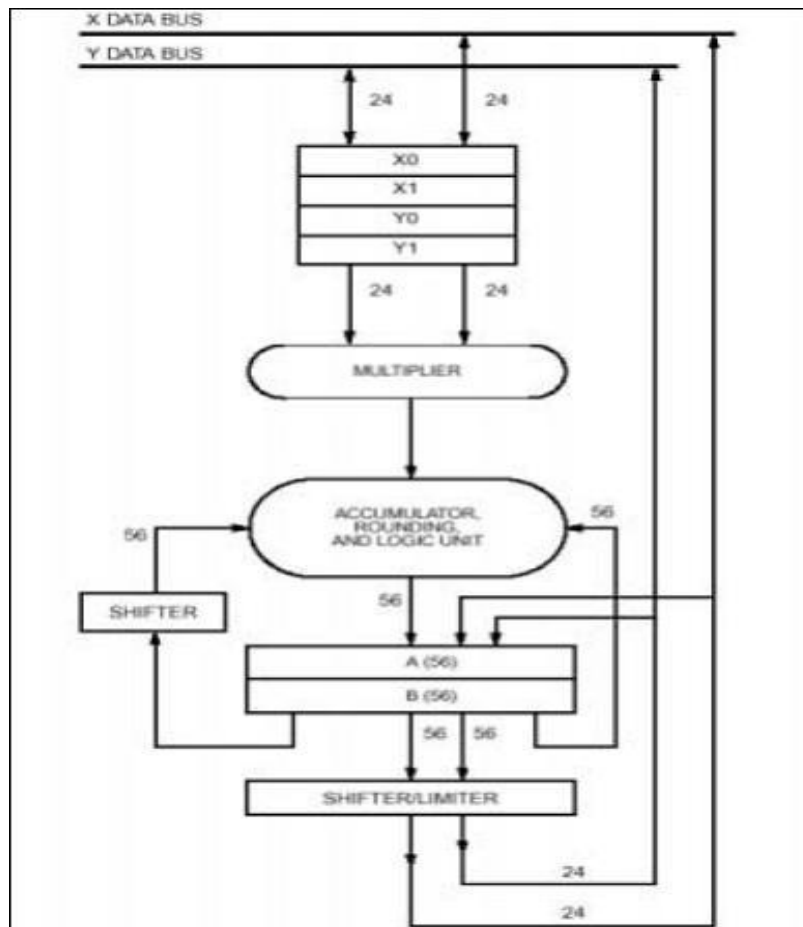
εύρους καταχωρητές με επέκταση 8-bit. Για το λόγο αυτό οι καταχωρητές A2 και B2 καλούνται καταχωρητές επέκτασης (σχήμα 2)



Σχήμα 2. Καταχωρητές συσσώρευσης δεδομένων

□ Λογική Μονάδα Πολλαπλασιασμού - Συσσώρευσης

Η Λογική Μονάδα Πολλαπλασιασμού - Συσσώρευσης εκτελεί όλες τις λειτουργίες υπολογισμού του επεξεργαστή DSP56002 όπως πολλαπλασιασμό, πρόσθεση, αφαίρεση, AND, OR, XOR και NOT. Δέχεται περισσότερους από τρεις τελεστέους δεδομένων εισόδου και παράγει αποτέλεσμα 56-bit που αποθηκεύεται πάντα στους συσσωρευτές A και B.



Σχήμα 3. Μπλόκ διάγραμμα της ΑΛΜ του DSP56002

□ Ολισθητές δεδομένων / Περιοριστής

Οι δύο Ολισθητές δεδομένων/Περιοριστές παρέχουν ειδικό προϋπολογισμό στα δεδομένα τα οποία μετακινούνται από τους συσσωρευτές στους XDB ή YDB. Ένας 56-bit.

Ολισθητής δεδομένων / Περιοριστής είναι συνδεδεμένος με τον συσσωρευτή A και ο άλλος με τον B. Κάθε Ολισθητής / Περιοριστής αποτελείται από ένα ολισθητή ακολουθούμενο από ένα περιοριστή.

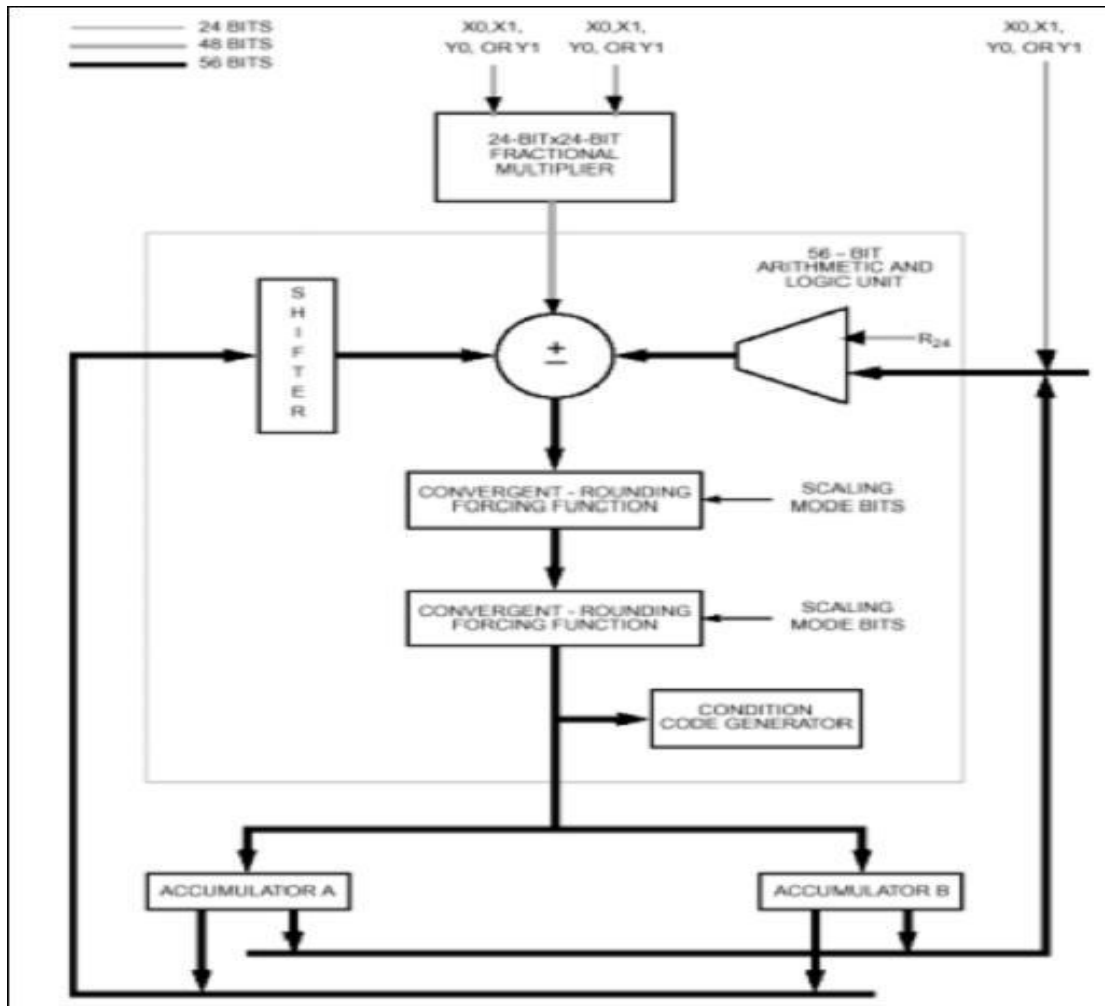
□ Ολισθητές δεδομένων.

Κάθε ολισθητής δεδομένων είναι ικανός να ολισθήσει ένα τελεστέο δεδομένων κατά ένα bit αριστερά, ένα bit δεξιά ή να περάσει τα δεδομένα μέσα απ' αυτόν χωρίς ολίσθηση.

Ένα ολισθητής δεδομένων είναι συνδεδεμένος με τον A συσσωρευτή και ο άλλος με τον B συσσωρευτή. Η έξοδος κάθε ολισθητή δεδομένων περνά μέσα από έναν συσχετιζόμενο με αυτόν Περιοριστή δεδομένων, όπου ο περιοριστής έχει 24-bit έξοδο και ένδειξη υπερχειλίσσης εξόδου. Ο ολισθητής δεδομένων ελέγχεται από τα σήματα κλιμάκωσης (Scaling Mode Bits) S1 και S2 που βρίσκονται στον καταχωρητή Status Register (SR), όπου S1 και S2 είναι το ενδέκατο και δέκατο bit αντίστοιχα. Τα S1 και S2 επιτρέπουν δυναμική κλιμάκωση των δεδομένων σταθερής υποδιαστολής (fixed-point data) χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να τροποποιήσει τις εντολές του προγράμματος. Οι τρόποι κλιμάκωσης δείχνονται στον πίνακα 1 :

S1	S0	Τρόποι κλιμάκωσης
0	0	Χωρίς κλιμάκωση
0	1	Κλιμάκωση προς τα πάνω (1-bit αριθμητικό δεξιά ολίσθηση)
1	0	Κλιμάκωση προς τα κάτω (1-bit αριθμητικό αριστερή ολίσθηση)

Πίνακας 1. Τρόποι ελέγχου κλιμάκωσης μέσω των scaling bits S1 και S0



Σχήμα 4. Μονάδα Πολλαπλασιασμού / Συσσωρευσης (MAC)

□ Περιοριστές (Limiters)

Κάθε ένας από τους δύο περιοριστές δεδομένων έχει τη δυνατότητα της αυτόματης εκτέλεσης, εάν βέβαια είναι αναγκαίο, αριθμητικής κορεσμού στους τελεστέους δεδομένων οι οποίοι μετακινούνται από τους XDB και YDB. Εάν τα περιεχόμενα του επιλεγμένου συσσωρευτή μπορούν να αντιπροσωπευθούν στο μέγεθος του τελεστή προορισμού χωρίς υπερχειλίση, ο περιοριστής δεδομένων απενεργοποιείται και ο τελεστέος δεν τροποποιείται. Εάν όμως τα δεδομένα του επιλεγμένου συσσωρευτή δεν μπορούν να αντιπροσωπευθούν στο μέγεθος του τελεστή προορισμού χωρίς υπερχειλίση, ο περιοριστής δεδομένων θα αντικαταστήσει τα αρχικά δεδομένα με μια περιορισμένη τιμή έχοντας μέγιστο μέγεθος και το ίδιο πρόσημο με τα αρχικά δεδομένα. Ο περιορισμός πραγματοποιείται στην έξοδο του συσχετιζόμενου με αυτόν ολισθητή δεδομένων. Η τιμή στον συσσωρευτή προέλευσης δεν αλλάζει. Ένας περιοριστής δεδομένων είναι συσχετισμένος με τον συσσωρευτή A και ο άλλος με τον συσσωρευτή B.

Με τους δύο ολισθητές δεδομένων / περιοριστές, δύο 24-bit τελεστές μπορούν να περιορισθούν ανεξάρτητα στον ίδιο κύκλο εντολής. Επίσης δύο ολισθητές δεδομένων / περιοριστές μπορούν να συνδεθούν παράλληλα ώστε να σχηματίσουν έναν 48-bit περιοριστή για τελεστές long-word.

Μονάδα Παραγωγής Διευθύνσεων (Address Generation Unit - AGU)

□ Αρχιτεκτονική της AGU

Η AGU χρησιμοποιεί αριθμητική ακεραίου για να υπολογίσει την ενεργό διεύθυνση που είναι αναγκαία για την διευθυνσιοδότηση των τελεστών δεδομένων στη μνήμη και περιέχει τους καταχωρητές που χρησιμεύουν για την παραγωγή της διεύθυνσης.

Η AGU διαιρείται σε δύο πανομοιότυπα μισά καθένα από τα οποία έχει μια Αριθμητική Λογική Μονάδα Διευθύνσεων (Address ALU) και 4 σύνολα από 3 καταχωρητές. Οι καταχωρητές είναι οι :

- Καταχωρητές διεύθυνσης (Address Registers : R0 - R3, R4 - R7)
- Καταχωρητές μετατόπισης (Offset Registers : N0 - N3, N4 - N7)
- Καταχωρητές τροποποίησης (Modifier Registers : M0 - M3, M4 - M7)

Οι οκτώ καταχωρητές Rn, Nn και Mn αντιμετωπίζονται σαν τριπλέτες καταχωρητές π.χ. μόνο οι καταχωρητές N2 και M2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενημερώσουν τον R2.

Οι οκτώ τριπλέτες είναι: R0:N0:M0, R1:N1:M1, R2:N2:M2, R3:N3:M3, R4:N4:M4, R5:N5:M5, R6:N6:M6 και R7:N7:M7.

Δυο αριθμητικές μονάδες μπορούν να παράγουν δύο 16-bit διευθύνσεις σε κάθε κύκλο εντολής. Η AGU μπορεί να διευθυνσιοδοτήσει άμεσα 65.536 θέσεις μέσω του XAB και τις ίδιες θέσεις μέσω των YAB και PAB. Οι δύο ανεξάρτητες ALUs διευθύνσεων συνεργάζονται με τις δύο μνήμες δεδομένων για να τροφοδοτήσουν την ALU δεδομένων με δύο τελεστές σε ένα απλό κύκλο. Κάθε τελεστέος μπορεί να διευθυνσιοδοτείται από την τριπλέτα Rn, Nn, Mn.

□ Αρχείο Καταχωρητών Διευθύνσεων (Address Register Files - Rn)

Κάθε ένα από τα δύο αρχεία καταχωρητών διευθύνσεων αποτελείται από 4 καταχωρητές των 16-bit. Τα δύο αρχεία περιέχουν τους καταχωρητές R0 - R3 και R4 - R7 οι οποίοι συνήθως περιέχουν διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται σαν δείκτες για θέσεις μνήμης. Οι

καταχωρητές αυτοί μπορούν να εγγράφονται ή να διαβάζονται από τον Δίαυλο Γενικών Δεδομένων (GDB)

❑ **Αρχείο Καταχωρητών Μετατόπισης (Offset Register Files - Nn)**

Κάθε ένα από τα δύο αρχεία καταχωρητών μετατόπισης αποτελείται από 4 καταχωρητές των 16-bit. Τα δύο αρχεία περιέχουν τους καταχωρητές N0 - N3 και N4 - N7 οι οποίοι περιέχουν τις τιμές δεδομένων ή μετατόπισης για την αναβάθμιση των δεικτών διευθύνσεων. Οι καταχωρητές αυτοί μπορούν να εγγράφονται ή να διαβάζονται από τον Δίαυλο Γενικών Δεδομένων (GDB)

❑ **Αρχείο Καταχωρητών Τροποποίησης (Modifier Register Files - Mn)**

Κάθε ένα από τα δύο αρχεία καταχωρητών αναβάθμισης αποτελείται από 4 καταχωρητές των 16-bit. Τα δύο αρχεία περιέχουν τους καταχωρητές M0 - M3 και M4 -M7 οι οποίοι προσδιορίζουν τον τύπο της αριθμητικής που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια του υπολογισμού της αναβάθμισης των καταχωρητών ή του περιεχομένου των δεδομένων. Οι καταχωρητές αυτοί μπορούν να εγγράφονται ή να διαβάζονται από τον Δίαυλο Γενικών Δεδομένων (GDB).

❑ **Αριθμητική και Λογική Μονάδα Διευθύνσεων (Address ALU)**

Οι δύο Αριθμητικές και Λογικές Μονάδες Διευθύνσεων (Address ALUs) είναι πανομοιότυπες και η κάθε μια περιέχει έναν 16-bit πλήρη αθροιστή (full adder) ο οποίος καλείται και αθροιστής μετατόπισης (offset adder) και μπορεί να προσθέτει:

- Συν 1
- Μείον 1
- Τα περιεχόμενα των αντίστοιχων καταχωρητών μετατόπισης

- Το συμπλήρωμα ως προς 2 του N με τα περιεχόμενα των επιλεγμένων καταχωρητών διεύθυνσης

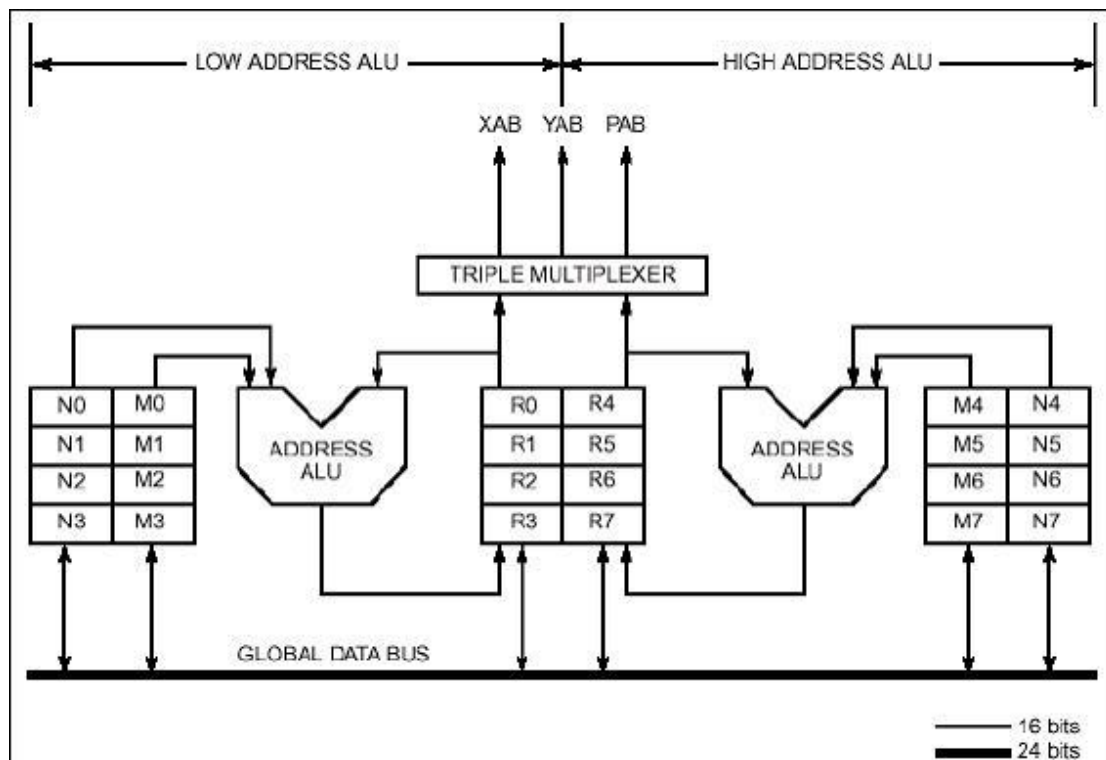
Ένας δεύτερος πλήρης αθροιστής (ο οποίος καλείται modulo adder) προσθέτει το σύνολο του αποτελέσματος του πρώτου αθροιστή με μια modulo τιμή, M ή -M, ενώ το M -1 αποθηκεύεται στον αντίστοιχο καταχωρητή τροποποίησης. Ένας τρίτος πλήρης αθροιστής ο οποίος καλείται αθροιστής αντιστροφής κρατουμένου (reverse-carry adder) μπορεί να προσθέτει :

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- Συν 1
- Μείον 1
- Τη μετατόπιση N (που αποθηκεύεται στον αντίστοιχο καταχωρητή μετατόπισης)
- Την τιμή -N στην διεύθυνση του επιλεγμένου καταχωρητή με το κρατούμενο να διαδίδεται προς την αντίστροφη κατεύθυνση

❑ Πολυπλέκτες Εξόδου Διευθύνσεων (Address Output Multiplexers)

Οι πολυπλέκτες εξόδου διευθύνσεων (σχήμα 5) επιλέγουν την πηγή μεταξύ των διαύλων XAB, YAB και PAB. Οι πολυπλέκτες αυτοί κατευθύνουν στους διαύλους XAB, YAB ή PAB τα σήματα που προέρχονται από τους καταχωρητές R0 - R3 ή R4 - R7.



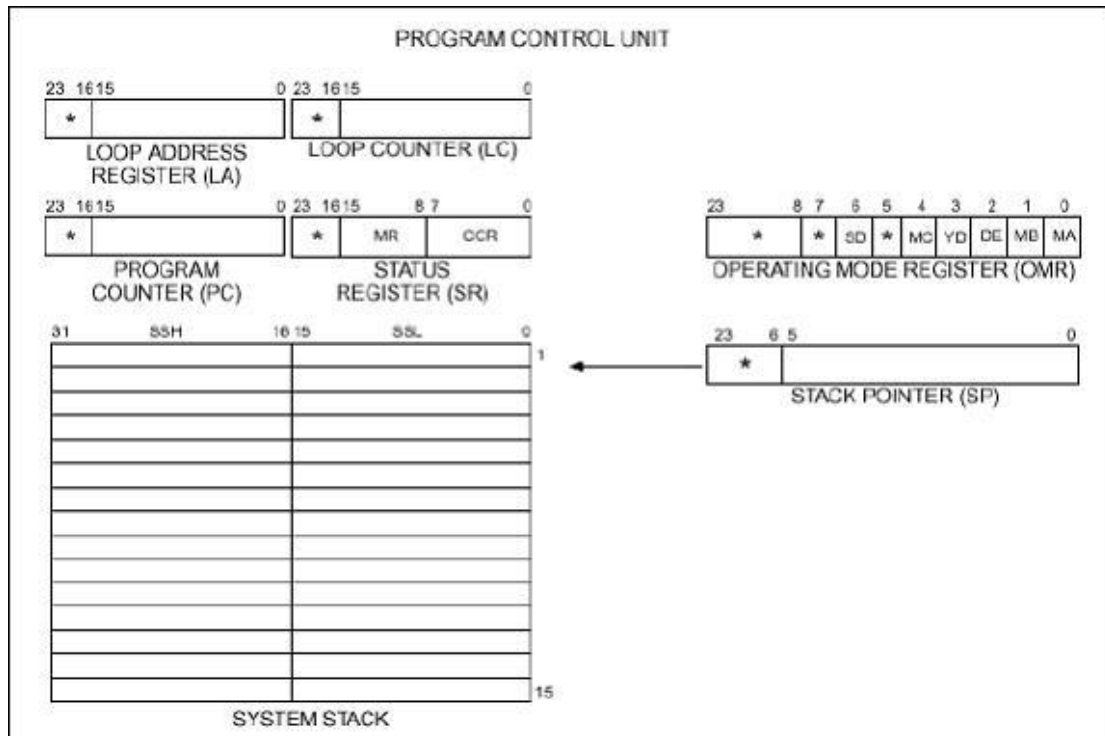
Σχήμα 5. Μονάδα Παραγωγής Διευθύνσεων

Μονάδα Ελέγχου Προγράμματος (Program Control Unit)

Η Μονάδα Ελέγχου Προγράμματος είναι μια από τις τρεις μονάδες εκτέλεσης της κεντρικής υπομονάδας επεξεργασίας. Η μονάδα αυτή εκτελεί την παραγωγή διεύθυνσης προγράμματος (instruction prefetch), την αποκωδικοποίηση των εντολών, τον έλεγχο του hardware DO βρόχου και τον υπολογισμό των αιτήσεων διακοπών (interrupts). Ο προγραμματιστής βλέπει την PCU σαν ένα σύνολο από 6 καταχωρητές και μια στοίβα συστήματος (System Stack - SS). Επιπροσθέτως των πόρων ελέγχου κανονικής ροής προγράμματος όπως :

- Ο Μετρητής Προγράμματος (Program Counter – PC)
- Καταχωρητής Κατάστασεων (Status Register - SR)
- Το Σύστημα Στοίβας (System Stack - SS)

Η PCU περιλαμβάνει επίσης έναν Καταχωρητή Τρόπου Λειτουργίας (Operating Mode Register - OMR) και τους καταχωρητές Διεύθυνσης Βρόχου (Loop Address Register - LA και Μετρητή Βρόχου (Loop Counter - LC) που υποστηρίζουν την hardware εντολή βρόχου DO. Η στοίβα είναι μια 15-επιπέδων, 32-bit ιδιαίτερη εσωτερική μνήμη η οποία αποθηκεύει τα περιεχόμενα του PC και του SR όταν πρόκειται για κλήση υπορουτινών, μεγάλες διακοπές (long interrupts) και προγράμματα βρόχων. Η SS επίσης αποθηκεύει τα περιεχόμενα των καταχωρητών LC και LA. Κάθε θέση στην SS διευθυνσιοδοτείται σαν ένας 16-bit καταχωρητής και χωρίζεται σε Ανώτερη Στοίβα Συστήματος (System Stack High - SSH) και Κατώτερη Στοίβα Συστήματος (System Stack Low - SSL). Ένας καταχωρητής δείκτη (Stack Pointer - SP) δείχνει τις θέσεις του SS. Το σχήμα 6 δείχνει το προγραμματιστικό μοντέλο της Μονάδας Ελέγχου Προγράμματος, δηλαδή τη διάταξη των καταχωρητών και τη στοίβα συστήματος :



Σχήμα 6. Στοιβα Συστήματος με τους συσχετιζόμενους καταχωρητές

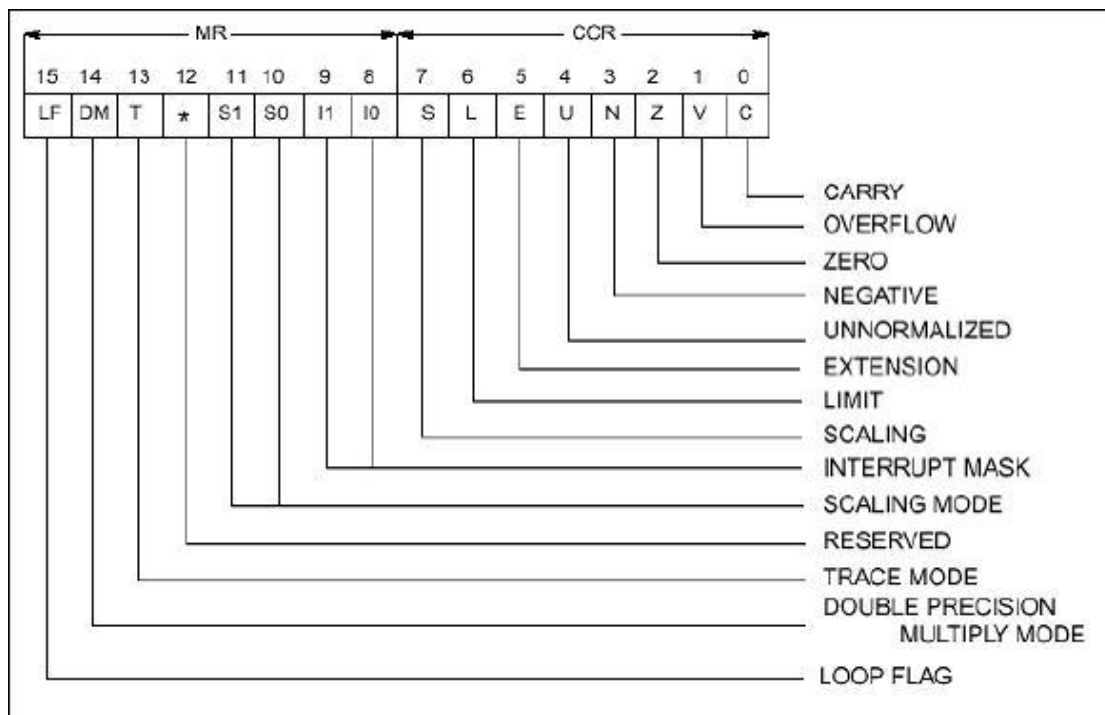
Εξήγηση της λειτουργίας των καταχωρητών:

- ❑ **Program Counter Register (PC):** Ο 16-bit Μετρητής Προγράμματος (PC) δείχνει στην Μνήμη Προγράμματος (P-Memory) την θέση της επόμενης λέξης εντολής (word), τελεστέου άμεσων δεδομένων (immediate data operand) ή τελεστέου άμεσης διεύθυνσης (immediate address operand).
- ❑ **Status Register (SR):** Ο 16-bit Καταχωρητής Καταστάσεως (SR) αποτελείται από δύο καταχωρητές των 8-bit, τον Καταχωρητή Τρόπου (Mode Register - MR) και τον Καταχωρητή Κωδικοποιημένης Συνθήκης (Condition Code Register - CCR). Ο MR περιέχει τα 8 υψηλότερης τάξης bits του SR ενώ ο CCR τα 8 χαμηλότερης τάξης bits του SR. Ο MR είναι ένας ειδικού σκοπού καταχωρητής ο οποίος προσδιορίζει την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος του επεξεργαστή. Όλοι οι καταχωρητές έχουν την δυνατότητα ανάγνωσης / εγγραφής για τη διευκόλυνση της διαδικασίας διόρθωσης λαθών. Αν και κανένας καταχωρητής δεν είναι 24-bit, διαβάζονται ή γράφονται από διάυλο 24-bit.
- ❑ **System Stack(SS):** Η Στοιβα Συστήματος (σχήμα 8) είναι μια ιδιαίτερη 32x15 εσωτερική μνήμη που αποθηκεύει τα περιεχόμενα του Program

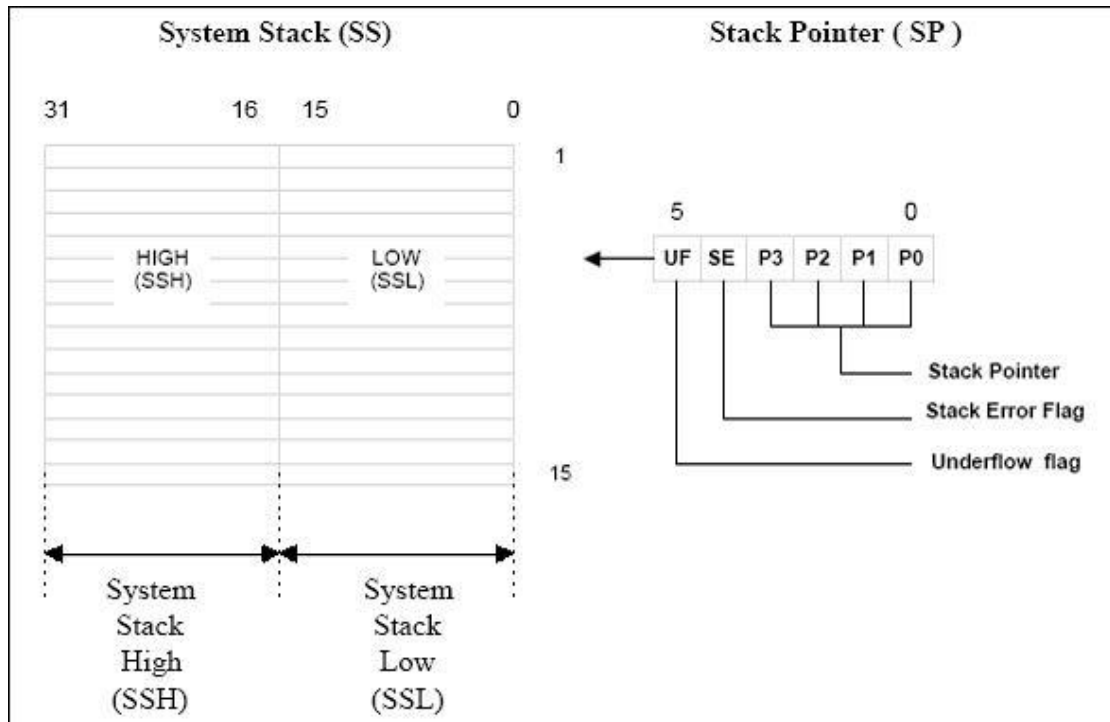
Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Counter (PC) και Status Register (SR) όταν πρόκειται για κλήση υπορουτινών, μεγάλες διακοπές και προγράμματα βρόχου. Η SS μπορεί επίσης να αποθηκεύει τα περιεχόμενα του Loop Counter και Loop Address Register.

- **Stack Pointer(SP):** Ο 6-bit Stack Pointer (σχήμα 8) είναι καταχωρητής ο οποίος δείχνει την θέση της κορυφής του System Stack και υποδεικνύει στο System Stack καταστάσεις συνθήκης όπως underflow, empty, full, overflow.



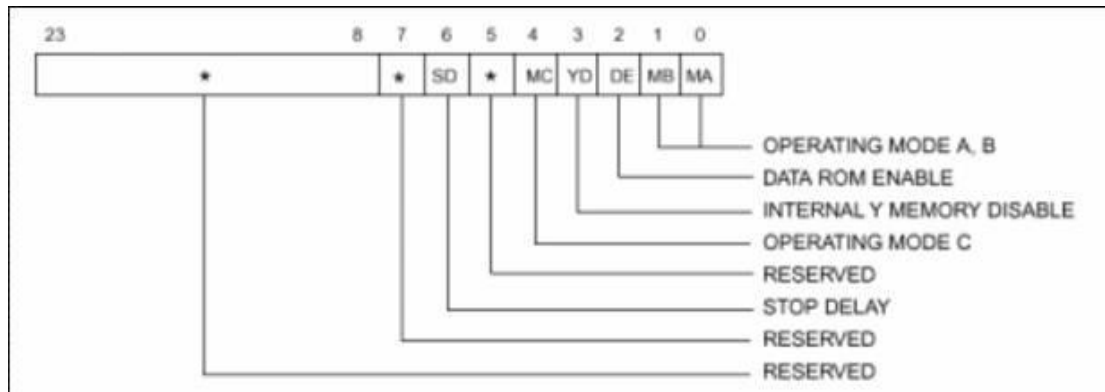
Σχήμα 7. Καταχωρητής Καταστάσεων (Status Register)



Σχήμα 8. Στοίβα Συστήματος και Δείκτης Στοίβας

- ❑ **Loop Counter (LC):** Ο 16-bit Loop Counter μετρά τον αριθμό των επαναλήψεων σε μια hardware DO loop εντολή ή σε μια hardware REPEAT εντολή.
- ❑ **Loop Address Register(LA):** Ο 16-bit Loop Address Register δείχνει τη θέση της τελευταίας instruction word σε ένα hardware DO loop.
- ❑ **Operating Mode Register (OMR):** Ο 24-bit Operating Mode Register προσδιορίζει τον τρέχοντα τρόπο λειτουργίας του επεξεργαστή DSP56002. Μόνο 6 bits του OMR είναι ορισμένα. Αυτά προσδιορίζουν το πώς οι διάφορες μνήμες είναι χαρτογραφημένες, όπως επίσης και τη διαδικασία εκκίνησης.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος



Σχήμα 9. Καταχωρητής Τρόπου Λειτουργίας

Διακοπές (Interrupts)

Οι διακοπές μπορούν να συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ροής ενός προγράμματος για να εξυπηρετήσουν μια εξωτερική συσκευή. Ο επεξεργαστής DSP56002 βρίσκεται πάντοτε σε μια από τις πέντε καταστάσεις επεξεργασίας :

- κανονικής (normal)
- εξαίρεσης (exception)
- επαναφοράς (reset)
- αναμονής (wait)
- τερματισμού (stop)

Οι διακοπές (interrupts) που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια κάποιας από τις παραπάνω καταστάσεις λειτουργίας περιγράφονται αμέσως στα επόμενα.

Κατάσταση Κανονικής Λειτουργίας (Normal Processing State)

Η Κατάσταση Κανονικής Λειτουργίας συνδέεται με τη διαδικασία της εκτέλεσης των εντολών. Η εκτέλεση των εντολών στον επεξεργαστή DSP56002 συμβαίνει σε μια τριών βαθμίδων pipeline (fetch-decode-execute). Μερικές όμως εντολές χρειάζονται περισσότερο χρόνο για την εκτέλεση, όπως εντολές μεγαλύτερες από μια λέξη ή εντολές που χρησιμοποιούν τρόπο διευθυνσιοδότησης που χρειάζεται χρόνο μεγαλύτερο από ένα κύκλο ή εντολές που απαιτούν αλλαγή του ελέγχου ροής. Στο τέλος ένας κύκλος χρειάζεται για να εκκαθαρισθεί το pipeline.

Εξαιρέσεις Καταστάσεων Υπολογισμού (Exception Interrupt Processing)

Οι εξαιρέσεις στις καταστάσεις υπολογισμού είναι συνδεδεμένες με διακοπές οι οποίες μπορεί να παράγονται από συνθήκες εντός του DSP ή από εξωτερικές πηγές. Στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος μια από τις κύριες χρήσεις των διακοπών είναι η μεταφορά δεδομένων μεταξύ της μνήμης του DSP ή των καταχωρητών και μιας περιφερειακής συσκευής. Υπάρχουν πολλές πηγές διακοπών στον DSP56002 και μερικές από αυτές μπορούν να παράγουν περισσότερες από μια διακοπές. Ο επεξεργαστής DSP56002 περιλαμβάνει έναν κατάλογο με κατηγοριοποίηση της προτεραιότητας με 32 διανύσματα διακοπών που παρέχουν γρήγορες διακοπές (fast interrupts). Οι επόμενες γραμμές δίνουν με γενικό τρόπο το πώς ο DSP56002 υπολογίζει τις διακοπές :

- Μια διακοπή hardware είναι συγχρονισμένη με το ρολόι του DSP και η σημαία αναμονής της διακοπής για την ιδιαίτερη διακοπή αυτή είναι σε κατάσταση set. Μια πηγή διακοπής μπορεί να έχει μόνο μια αναμονή διακοπής σε μια δεδομένη στιγμή.
- Όλες οι αναμονές διακοπών (εξωτερικές και εσωτερικές) περνούν από διαδικασία διαιτησίας για να εκλεγεί η διακοπή που θα υπολογισθεί. Ο διαιτητής αυτόματα αναγνωρίζει οποιαδήποτε διακοπή από το IPL (Interrupt Priority Level) μικρότερο από το λανθάνον επίπεδο διακοπής (Interrupt Mask Level) στον SR και επιλέγει τις υπόλοιπες διακοπές με την υψηλότερη IPL.
- Ο ελεγκτής διακοπών τότε “παγώνει” τον μετρητή προγράμματος (PC) και ανακαλεί δυο εντολές στις δύο αντίστοιχες διευθύνσεις των διανυσμάτων διακοπής που συσχετίζονται με τις επιλεγμένες διακοπές.
- Ο ελεγκτής διακοπών ενσωματώνει τις δύο εντολές στο ρεύμα εντολών και αποδεσμεύει τον μετρητή προγράμματος (PC) ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάκληση της επόμενης εντολής. Τότε αρχίζει τη διαιτησία για την επόμενη διακοπή.

Εάν καμία εντολή δεν αλλάζει τη ροή των εντολών του προγράμματος (όπως μια JSR), η κατάσταση της μηχανής δεν σώζεται στη στοιβα και εκτελείται μια γρήγορη διακοπή. Μια μεγάλη διακοπή συμβαίνει εάν μια από τις ανακαλούμενες εντολές διακοπών είναι μια εντολή JSR.

□ Τύποι διακοπών στην Κατάσταση Εξαιρέσεων Υπολογισμού

Ο επεξεργαστής DSP56002 πραγματοποιεί δυο τύπους ρουτίνων διακοπών : τις γρήγορες (fast) και τις μεγάλες (long). Οι γρήγορες διακοπές ανακαλούν μόνον δύο λέξεις (words) και αυτόματα επανέρχονται στο σημείο εκτέλεσης του κυρίου προγράμματος ενώ οι μεγάλες διακοπές για να επιστρέψουν στο κυρίως πρόγραμμα πρέπει να εκτελέσουν μια εντολή RTI. Οι γρήγορες ρουτίνες διακοπών αποτελούνται από δύο λέξεις διακοπής που εισέρχονται αυτόματα. Οι γρήγορες διακοπές δεν είναι ποτέ διακοπτόμενες. Οι μεγάλες διακοπές πρέπει να τερματίζονται πάντα από μια εντολή RTI. Οι μεγάλες διακοπές διακόπτονται από διακοπές με υψηλότερο επίπεδο προτεραιότητας.

□ Δομή προτεραιότητας διακοπών.

Οι διακοπές οργανώνονται σε μια ευέλικτη δομή προτεραιότητας. Κάθε διακοπή έχει ένα συσχετιζόμενο Επίπεδο Προτεραιότητας Διακοπής (Interrupt Priority Level - IPL) το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από το 0 μέχρι το 3. Τα επίπεδα 0, 1 και 2 είναι λανθάνοντα. Το επίπεδο 3 είναι μη λανθάνον και έχει την μεγαλύτερη IPL. Οι διακοπές με IPL 3 είναι οι :

- RESET
- Illegal Instruction Interrupt (III)
- NonMaskable Interrupt (NMI)
- Stack Error
- Trace
- Software Interrupt (SWI)

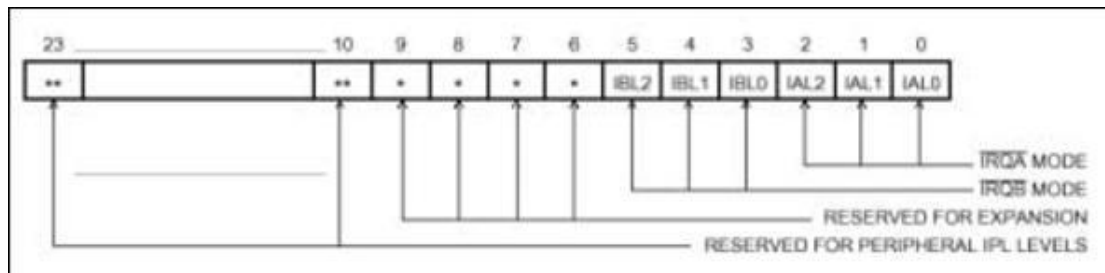
Τα interrupt mask bits (I1, I0) στον Status Register (SR) αντανakλούν το τρέχον επίπεδο προτεραιότητας και δείχνουν την δέουσα IPL για μια πηγή διακοπής να διακόψει τον επεξεργαστή. Οι διακοπές αναστέλλονται για όλα τα επίπεδα προτεραιότητας που είναι υποκείμενα του κυρίου επιπέδου προτεραιότητας του επεξεργαστή. Όμως το επίπεδο διακοπών 3 είναι μη λανθάνον και επομένως μπορεί να διακόπτει πάντα τον υπολογιστή.

□ Επίπεδα Προτεραιότητας Διακοπών.

Τα IPL για κάθε περιφερειακή διάταξη on-chip (HI, SSI, SCI) και για κάθε εξωτερική πηγή διακοπής (IRQA , IRQB) μπορούν να προγραμματισθούν σε ένα από τα τρία λανθάνοντα επίπεδα προτεραιότητας (IPL 0, 1, 2) με έλεγχο από λογισμικό. Τα IPL

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

δηλώνονται εγγράφοντας τα αντίστοιχα bits στο Καταχωρητή Προτεραιότητας Διακοπών (Interrupt Priority Register - IPR) όπως δείχνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10. Καταχωρητής Προτεραιότητας Διακοπών

Ο καταχωρητής αυτός με ικανότητα εγγραφής / ανάγνωσης βρίσκεται στη μνήμη προγράμματος στη διεύθυνση \$FFFF. Ο IPR προσδιορίζει το επίπεδο προτεραιότητας διακοπών (IPL) για κάθε διάταξη που αιτείται διακοπής συμπεριλαμβανομένων και των IRQA, IRQB και κάθε περιφερειακής διάταξης. Επιπροσθέτως προσδιορίζει τον τρόπο σκανδαλισμού των εξωτερικών πηγών διακοπής και χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τις ιδιαίτερες εξωτερικές διακοπές. Ο IPR εκκαθαρίζεται στο RESET ή με την εντολή reset. Σημειώτεον ότι εάν υπάρχουν πολλές αιτήσεις διακοπής με το ίδιο IPL τότε αυτές ιεραρχούνται εντός του επιπέδου με μια δεύτερη σταθερή δομή προτεραιότητας που παρέχεται από τον επεξεργαστή.

□ Πηγές Διακοπών.

Οι διακοπές μπορούν να προέλθουν από οποιαδήποτε από τις διευθύνσεις διανυσμάτων που δείχνονται στον πίνακα 2 και δείχνουν την αντιστοιχούσα διεύθυνση της έναρξης της διακοπής για κάθε πηγή διακοπής. Οι διευθύνσεις αυτές βρίσκονται στις πρώτες 64 θέσεις της μνήμης προγράμματος.

Interrupt Starting Address	IPL	Interrupt Source
\$0000	3	Hardware RESET
\$0002	3	Stack Error
\$0004	3	Trace
\$0006	3	SWI

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

\$0008	0 – 2	IRQA
\$000A	0 – 2	IRQB
:	:	Διανυσματα διαθέσιμα για περιφερειακά
\$001E	3	NMI
:	:	Διανυσματα διαθέσιμα για περιφερειακά
\$003E	3	Illegal Instruction

Πίνακας 2 Πηγές διακοπών σε σχέση με το IPL και την Διεύθυνση Εκκίνησης Διακοπής

□ Πηγές Διακοπών Hardware.

Υπάρχουν δύο τύποι hardware διακοπών στον DSP56002 : εσωτερικές και εξωτερικές. Οι εσωτερικές περιλαμβάνουν όλες τις on-chip διατάξεις. Οι εξωτερικές hardware πηγές διακοπών είναι οι ακροδέκτες RESET , NMI , IRQA και IRQB του ελεγκτή διακοπών προγράμματος της Μονάδας Προγράμματος Ελέγχου.

Κατάσταση επεξεργασίας RESET

Ο επεξεργαστής εισέρχεται σε κατάσταση επεξεργασίας RESET όταν συμβαίνει μια hardware reset και ο εξωτερικός ακροδέκτης RESET ενεργοποιείται. Η κατάσταση reset :

- Επαναφέρει σε αρχικές συνθήκες (reset) τις εσωτερικές περιφερειακές διατάξεις.
- Θέτει τους Modifier Registers στην \$FFFF.
- Εκκαθαρίζει τον καταχωρητή προτεραιότητας διακοπής.
- Θέτει τον BCR στην \$FFFF και με αυτόν τον τρόπο εισάγει 15 βαθμίδες αναμονής σε όλες τις προσβάσεις στις εξωτερικές μνήμες.
- Εκκαθαρίζει τον Stack Pointer
- Εκκαθαρίζει τα bits των scaling mode, trace mode, loop flag, double precision, multiply mode, condition code του Status Register και θέτει τα interrupt mask bits στον SR.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

- Εκκαθαρίζει το data ROM enable bit, το stop delay bit και το internal Y memory disable bit και
- Ο DSP παραμένει στην κατάσταση reset μέχρι ο ακροδέκτης RESET is deasserted.

Όταν ο επεξεργαστής απενεργοποιεί την κατάσταση reset :

- Φορτώνει τα operating mode bits του OMR από τους εξωτερικούς ακροδέκτες επιλογής τρόπου λειτουργίας (MODA , MODB , MODC) και
- Αρχίζει η εκτέλεση του προγράμματος από τη διεύθυνση της μνήμης προγράμματος που ορίζεται από την κατάσταση των bits MODA, MODB και MODC του OMR.

Κατάσταση Αναμονής (Wait Processing)

Η εντολή WAIT φέρνει τον επεξεργαστή σε κατάσταση αναμονής η οποία είναι μια από τις δύο καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Όταν όμως υπάρχει αίτηση από την OnCE θύρα ο DSP αποδεσμεύεται από την κατάσταση αναμονής (wait). Στην κατάσταση αναμονής το εσωτερικό ρολόι αποσυνδέεται από όλο το εσωτερικό κύκλωμα εκτός των εσωτερικών περιφερειακών διατάξεων. Όλες οι εσωτερικές διαδικασίες αναστέλλονται μέχρι να συμβεί μια μη εμποδιζόμενη διακοπή ή ο ακροδέκτης της Αίτησης Αποσφαλμάτωσης της OnCE θύρας να εισάγει σήμα ή ο DSP να βρεθεί σε κατάσταση reset.

Κατάσταση Τερματισμού Υπολογισμών.

Η εντολή τερματισμού φέρνει τον επεξεργαστή στην κατάσταση της χαμηλότερης κατανάλωσης ισχύος. Στην κατάσταση τερματισμού ο ταλαντωτής του ρολογιού αποσυνδέεται. Το ολοκληρωμένο εκκαθαρίζει όλες τις περιφερειακές και εξωτερικές (IRQA, IRQB, NMI) διακοπές όταν εισέρχεται στην κατάσταση τερματισμού (stop). Trace ή λάθη στοίβας τα οποία είναι σε αναμονή παραμένουν σε αναμονή. Τα επίπεδα προτεραιότητας των περιφερειακών παραμένουν όπως ήταν πριν την εκτέλεση της εντολής STOP. Τα on-chip περιφερειακά κρατούνται στην δική τους ιδιαίτερη κατάσταση reset ενώ διαρκεί η κατάσταση τερματισμού.

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Η διαδικασία τερματισμού αναστέλλει όλες τις δραστηριότητες του επεξεργαστή μέχρι να συμβεί κάτι από τα επόμενα :

- Ένα σήμα χαμηλής στάθμης εφαρμόζεται στον ακροδέκτη IRQA
- Ένα σήμα χαμηλής στάθμης εφαρμόζεται στον ακροδέκτη RESET
- Ένα σήμα χαμηλής στάθμης εφαρμόζεται στον ακροδέκτη DR

Οποιοδήποτε από τα σήματα αυτά θα ενεργοποιήσει τον ταλαντωτή και μετά από μια καθυστέρηση στην οποία σταθεροποιείται το ρολόι, γίνεται και πάλι ενεργό για τον επεξεργαστή και τα περιφερειακά. Η περίοδος καθυστέρησης της σταθεροποίησης του ρολογιού προσδιορίζεται από το stop delay (SD) bit του OMR (Operation Mode Register).

Η ακολουθία stop αποτελείται από 8 κύκλους εντολής που καλούνται stop cycles.

Παράδειγμα :

Η εντολή STOP εξάγεται σαν εντολή n3 στον πρώτο κύκλο, αποκωδικοποιείται στον κύκλο 2 και αναγνωρίζεται σαν εντολή stop και εκτελείται στον κύκλο 3. Η επόμενη εντολή (n4) εξάγεται κατά τη διάρκεια του stop κύκλου 2 αλλά δεν αποκωδικοποιείται στο κύκλο 3 γιατί στον χρόνο αυτό έχει προηγηθεί η αποκωδικοποίηση της STOP εντολής. Ο επεξεργαστής σταματά το ρολόι και εισέρχεται στον τρόπο stop. Ο επεξεργαστής θα παραμείνει στην κατάσταση αυτή μέχρι την επανεκκίνηση του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bateman A, and Paterson-Stephens I., The DSP Handbook: Algorithms, Applications and Design Techniques, Prentice Hall, 2002.
2. Ifeachor E.C. and Jervis B.W., Digital Signal Processing – A Practical approach, 2nd Edition, Prentice Hall 2002.
3. Chassaing Rulph, DSP Applications Using C and the TMS320C6X DSK, J. Wiley, 2002.
4. Yu Hen Hu, edit., Programmable Digital Signal Processors, architecture, programming and applications, Marcel Dekker,2002.
5. Motorola, DSP56002 User’s Guide, 1993.
6. Motorola, DSP56002EVM Product Information, 1993.
7. Meyer R. and Schwartz K., “FFT Implementation on DSP Chips-Theory and Practice”, ICASSP, 1990.
8. Lapsley P., Bier J., Shoham A. and Lee E., DSP Processor Fundamentals, Architectures and Features, IEEE Press, 1997.
9. Burrus, C.S. Parks, T.W, DFT/FFT and Convolution Algorithms, John Wiley and Sons, New York, 1985.
10. Texas Instruments, TMS320C62x/C67x Programmer’s Guide, 2000.
11. Texas Instruments, “TMS320C62x DSP Library Programmer’s Reference”, March 2000.
12. Texas Instruments, “G.723.1 Dual Rate Speech Coder: Multichannel TMS320C62X Implementation”, Application Report, SPRA552B, February 2000, by Dillon Thomas, Jr.
13. Galanis M. and Zigouris E., “DSP Algorithm Implementation on the TMS320C6211 DSK”, Internal Report, Electronics Laboratory, Electronics and Computer Division,

Ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος

Patras University, Patras, 2002, (the report and the code are also provided in TI's University Program site).