

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ

«Πληροφορική και Υπολογιστική Βιοϊατρική»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Τεχνικών Διαμόρφωσης Παλμών
(Investigation of Pulse Modulation Techniques)

ΟΝΟΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ:

ΙΩΑΝΝΗΣ ΨΩΜΑΛΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. Θεόδωρος Τσιφτσής

ΛΑΜΙΑ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον συν-επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χρυσικό Θεόφιλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Επίσης, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Τσιφτσή Θεόδωρο για τις εποικοδομητικές του υποδείξεις και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και τη σύντροφό μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιωάννης Ψωμαδάκης

Λαμία, 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διερεύνηση των τεχνικών διαμόρφωσης παλμών αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης στον τομέα των ψηφιακών επικοινωνιών και της επεξεργασίας σήματος. Οι τεχνικές παλμικής διαμόρφωσης είναι μέθοδοι κωδικοποίησης της πληροφορίας σε μια σειρά παλμών, αντί σε μια συνεχή αναλογική κυματομορφή.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές παλμικής διαμόρφωσης, μεταξύ των οποίων:

Διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM): Στην PWM, η πληροφορία κωδικοποιείται στο εύρος των παλμών σε μια σειρά ορθογώνιων παλμών. Το εύρος των παλμών αντιπροσωπεύει το πλάτος του σήματος πληροφορίας και η συχνότητα των παλμών αντιπροσωπεύει τη συχνότητα του σήματος πληροφορίας.

Διαμόρφωση θέσης παλμού (PPM): Στη PPM, η πληροφορία κωδικοποιείται στη θέση (φάση) των παλμών σε μια σειρά παλμών. Η θέση (φάση) των παλμών αντιπροσωπεύει το πλάτος του σήματος πληροφορίας και η συχνότητα των παλμών αντιπροσωπεύει τη συχνότητα του σήματος πληροφορίας.

Διαμόρφωση παλμικού κώδικα (PCM): Στην PCM, το αναλογικό σήμα δειγματοληπτείται σε τακτά χρονικά διαστήματα και τα δείγματα κβαντίζονται σε σταθερό αριθμό bits. Τα κβαντισμένα δείγματα κωδικοποιούνται στη συνέχεια ως μια σειρά παλμών, με τον αριθμό των παλμών να αντιπροσωπεύει την κβαντισμένη τιμή του δείγματος.

Διαφορική διαμόρφωση παλμικού κώδικα (DPCM): Στην DPCM, η πληροφορία κωδικοποιείται μεταδίδοντας τη διαφορά μεταξύ διαδοχικών δειγμάτων του αναλογικού σήματος και όχι τα ίδια τα δείγματα.

Δέλτα διαμόρφωσης (DM): Στην DM, η πληροφορία κωδικοποιείται με τη μετάδοση της κατεύθυνσης αλλαγής του αναλογικού σήματος, αντί της πραγματικής τιμής του σήματος.

Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές παλμικής διαμόρφωσης έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής.

Η διερεύνηση των τεχνικών διαμόρφωσης παλμών συνεχίζεται και αναπτύσσονται νέες τεχνικές για την αντιμετώπιση των περιορισμών των υφιστάμενων μεθόδων. Για παράδειγμα, αναπτύσσονται νέες μέθοδοι που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα πολλαπλών τεχνικών για την επίτευξη καλύτερης απόδοσης όσον αφορά την ακρίβεια, την ανοσία στο θόρυβο και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης.

Η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές λόγω της απλής εφαρμογής και του υψηλού επιπέδου ακρίβειας. Ορισμένες από τις συνήθεις εφαρμογές της PWM περιλαμβάνουν:

Έλεγχος κινητήρων: Η PWM χρησιμοποιείται συνήθως για τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής των ηλεκτροκινητήρων, καθώς και για τη ρύθμιση της ισχύος που παρέχεται στον κινητήρα. Η PWM επιτρέπει τον έλεγχο του κινητήρα με υψηλή ακρίβεια και αποδοτικότητα και μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε ψηφιακά συστήματα ελέγχου.

Φωτισμός LED: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της φωτεινότητας των φώτων LED μεταβάλλοντας το πλάτος των παλμών που οδηγούν το LED. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της φωτεινής εξόδου και μειώνει την ισχύ που καταναλώνεται από το LED.

Μετατροπή ισχύος: Η PWM χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με υψηλή απόδοση και χαμηλή κυμάτωση. Αυτό χρησιμοποιείται συνήθως σε τροφοδοτικά διακοπτόμενης λειτουργίας και αντιστροφείς.

Συστήματα HVAC: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας των ανεμιστήρων και των συμπιεστών στα συστήματα HVAC, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος και στη μείωση των επιπέδων θορύβου.

Ενίσχυση ισχύος: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ισχύος εξόδου των ενισχυτών ήχου, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του ήχου και στη μείωση της παραμόρφωσης.

Αυτά είναι μερικά μόνο παραδείγματα από τις πολλές εφαρμογές της PWM. Συνολικά, η PWM χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του υψηλού επιπέδου ακρίβειας και της ευκολίας εφαρμογής της και συνεχίζει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε ποικίλες εφαρμογές.

Στο Κεφάλαιο 1 της Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιούμε μία εισαγωγή στην διαμόρφωση παλμών. Στο Κεφάλαιο 2 εξετάζουμε τις τεχνικές διαμόρφωσης παλμών και περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά και τις εμπλεκόμενες επεξεργασίες σήματος. Στο Κεφάλαιο 3 εστιάζουμε στην διαμόρφωση εύρους παλμών, ενώ στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε ένα σενάριο εργασίας για την υλοποίηση PWM κυματομορφής σε περιβάλλον προσομοίωσης Falstad και MATLAB.

ABSTRACT

The investigation of pulse modulation techniques is an important field of study in the field of digital communications and signal processing. Pulse modulation techniques are methods of encoding information in a series of pulses, rather than in a continuous analog waveform.

There are several pulse modulation techniques, including:

Pulse Width Modulation (PWM): in PWM, information is encoded in the pulse width in a series of orthogonal pulses. The pulse width represents the amplitude of the information signal and the pulse frequency represents the frequency of the information signal.

Pulse Position Modulation (PPM): In PPM, the information is encoded at the position of the pulses in a series of pulses. The pulse position represents the amplitude of the information signal and the pulse frequency represents the frequency of the information signal.

Pulse Code Modulation (PCM): In PCM, the analog signal is sampled at regular intervals and the samples are quantized to a fixed number of bits. The quantized samples are then encoded as a series of pulses, with the number of pulses representing the quantized value of the sample.

Differential Pulse Code Modulation (DPCM): In DPCM, information is encoded by transmitting the difference between successive samples of the analogue signal rather than the samples themselves.

Delta Modulation (DM): In DM, information is encoded by transmitting the direction of change of the analog signal instead of the actual value of the signal.

Each of these pulse modulation techniques has its own advantages and disadvantages, and the choice of which technique to use depends on the specific requirements of the application.

Investigation of pulse modulation techniques is an on-going process and new techniques are being developed to address the limitations of existing methods.

For example, new methods are being developed that combine the advantages of multiple techniques to achieve better performance in terms of accuracy, noise immunity and bandwidth efficiency.

Pulse Width Modulation (PWM) is widely used in various applications due to its simple implementation and high level of accuracy. Some of the common applications of PWM include:

Motor control: PWM is commonly used to control the speed and torque of electric motors, as well as to regulate the power supplied to the motor. PWM allows motor control with high accuracy and efficiency and can be easily integrated into digital control systems.

LED lighting: PWM is used to control the brightness of LED lights by varying the amplitude of the pulses driving the LED. This allows precise control of the light output and reduces the power consumed by the LED.

Power conversion: PWM is used to convert DC voltage to AC voltage with high efficiency and low ripple. This is commonly used in switching mode power supplies and inverters.

HVAC systems: PWM is used to control the speed of fans and compressors in HVAC systems, which helps improve system energy efficiency and reduce noise levels.

Power enhancement: PWM is used to control the output power of audio amplifiers, which helps improve sound quality and reduce distortion.

These are just a few examples of the many applications of PWM. Overall, PWM is widely used due to its high level of accuracy and ease of implementation and continues to play an important role in a variety of applications.

In Chapter 1 of this thesis we provide an introduction to pulse shaping. In Chapter 2 we review pulse shaping techniques and describe the characteristics and signal processing involved. In Chapter 3 we focus on pulse width modulation, and in Chapter 4 we present a working scenario for implementing PWM waveforms in Falstad and MATLAB simulation environment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
ABSTRACT.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	12
1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	12
1.2 Ψηφιακή Διαμόρφωση.....	13
1.3. Τεχνικές ADC και DAC.....	18
Κεφάλαιο 2: Τεχνικές διαμόρφωσης παλμών.....	20
2.1 Διαμόρφωση παλμών κατά πλάτος (Pulse Amplitude Modulation – PAM).....	20
2.2 Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation – PCM).....	31
2.3 Διαμόρφωση Συχνότητας Παλμού (Pulse – frequency modulation – PFM).....	37
2.4 Πολυπλεξία επιμερισμού χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM).....	37
Κεφάλαιο 3: Διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse width modulation – PWM)....	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Κύκλος λειτουργίας	43
3.3 Ιστορική Αναδρομή.....	44

3.4 Μαθηματική ανάλυση.....	45
3.5 Διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation).....	47
3.6 Διαμόρφωση Δέλτα-Σίγμα (Delta-Sigma Modulation).....	47
3.7 Διαμόρφωση Διανύσματος Χώρου (Space Vector Modulation).....	48
3.8 Τύποι διαμόρφωσης PWM.....	49
3.9 Φάσμα.....	49
3.10 Θεώρημα δειγματοληψίας PWM(PWM Sampling Theorem).....	50
3.11 Εφαρμογές της μεθόδου PWM.....	51
Κεφάλαιο 4: Σενάριο εργασίας για υλοποίηση PWM κυματομορφής.....	58
4.1 IC Διακόπτης 555.....	58
4.2 Υλοποίηση PWM Generator σε περιβάλλον online προσομοιωτή FALSTAD.....	66
4.3 Υλοποίηση και μελέτη PWM σε περιβάλλον MATLAB.....	69
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ιστορικά Στοιχεία

Ιστορικά, η διαμόρφωση παλμών μελετήθηκε στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του '30 και στις αρχές της δεκαετίας του '40 ως προέκταση της δουλειάς και των συμπερασμάτων του Harry Nyquist για το φάσμα και τις ιδιότητες του τετραγωνικού παλμού κατά την μελέτη τηλεγραφικών προβλημάτων και τελικά αποτέλεσε τον θεμέλιο λίθο των ADC και TDM συστημάτων (και των διάφορων συνεργατικών τους σχημάτων) μετά την καινοτόμο δημοσίευση του Claude Shannon το 1948 για την ψηφιακή συγκρότηση πληροφορίας ως βέλτιστο τρόπο συγκρότησης, μετάδοσης, λήψης και δυνητικά αποθήκευσης κάθε μορφής πληροφορίας, ανεξάρτητα από την αρχική της συγκρότηση [1].

Σημαντικό ρόλο έπαιξε επίσης η δουλειά του Bennett που την ίδια περίοδο μελέτησε εκτενώς τις ιδιότητες κάθε σήματος που προκύπτει από κάθε δυνατή διαμόρφωση παλμών, στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας [2].

Η μελέτη της διαμόρφωσης παλμών προέκυψε αρχικά από την ανάγκη μελέτης των ιδιοτήτων των παλμών να κωδικοποιούν πληροφορία, που έχει τις ρίζες της στους κώδικες Gauss-Weber και στον μεταγενέστερο κώδικα Morse. Στις δοκιμές που έκανε ο Nyquist σε δωμάτιο «χωρίς απώλειες» και για τις οποίες γνωρίζουμε σήμερα ότι είχαμε ένα SNR μόλις ίσο με 3 (δηλαδή με 4,77 dB στην λογαριθμική κλίμακα), προέκυψε το όριο Nyquist $R=2B$ [3].

Με τα πειράματα αυτά ο Nyquist προσπάθησε να μεταβάλλει το ύψος (πλάτος) των παλμών, «παραβιάζοντας» τον τετραγωνικό κώδικα (δηλαδή την ψηφιακή τους ιδιότητα) για να μπορέσει να μεταδώσει «περισσότερη» πληροφορία. Αυτό ήταν η απαρχή της διαμόρφωσης παλμών κατά πλάτος. Όμως ο Nyquist ενδιαφερόταν πρωτίστως για την «αντανάκλαση» του περιεχομένου των παλμών στο πεδίο της συχνότητας και ουσιαστικά πραγματοποίησε μία πρώτη μελέτη του φάσματος των παλμών, παρά μία συντεταγμένη μελέτη διαμόρφωσης παλμών κατά πλάτος [3].

Άλλωστε, το κριτήριο για την μεταβολή του πλάτους των παλμών προέκυπτε από τις δυνατότητες του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, κάτι που οδήγησε και στον πρωταρχικό τύπο [3]:

$$M=1+ (A/\Delta V) \quad (1)$$

Όπου M το πλήθος των διαθέσιμων επιπέδων πλάτους παλμών, A το maximum voltage (peak-to-peak) για την παραγωγή παλμών μεταβλητού πλάτους και ΔV το κατώφλι ευαισθησίας, δηλαδή η ελάχιστη επιτρεπόμενη «απόσταση» ανάμεσα σε δύο γειτονικές στάθμες πλάτους που μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως διακριτές τιμές πλάτους για την αποστολή «απευθείας» παλμών σε ασύρματο κανάλι. Ο τύπος αυτός αξιοποιήθηκε στην συνέχεια κατά την «μετάβαση» προς την τελική διατύπωση του θεωρήματος Shannon-Hartley και εξακολουθεί να μας απασχολεί στο ευρύτερο πλαίσιο των ψηφιακών συστημάτων για την συγκρότηση ψηφιακής baseband σηματοδοσίας.

1.2. Ψηφιακή Διαμόρφωση

Η έννοια της διαμόρφωσης (modulation) στις τηλεπικοινωνίες αφορά στην μεταβολή των χαρακτηριστικών ενός σήματος (φορέας) με βάση τα γνωρίσματα ενός αρχικού σήματος πληροφορίας με σκοπό την μετάδοση και λήψη του μέσω ενός φυσικού μέσου μετάδοσης που δεν ευνοεί την μετάδοση και λήψη του σήματος στην αρχική του μορφή για διάφορους λόγους που σχετίζονται με το φυσικό μέσο μετάδοσης ή/και την αρχική μορφή αυτού του πληροφοριακού σήματος [3].

Η διαδικασία της διαμόρφωσης επιτυγχάνεται με την μίξη (πολλαπλασιασμό) του αρχικού baseband σήματος με ένα σήμα που ονομάζεται φορέας (carrier) με συχνότητα ταλάντωσης που καθορίζει την πραγματική συχνότητα μετάδοσης και λήψης της πληροφορίας.

Σκοπός της διαμόρφωσης είναι [4]:

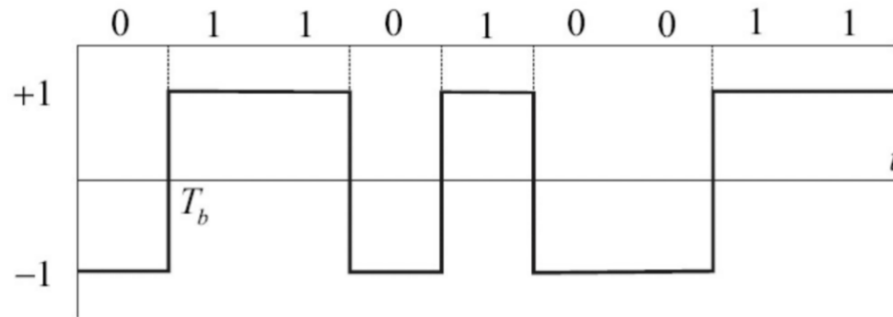
1. Η μετατόπιση του φάσματος του σήματος πληροφορίας από το αρχικό baseband σε ένα νέο φάσμα που καθορίζει η συχνότητα του φορέα.

2. Η ελεγχόμενη μεταβολή ενός εκ των χαρακτηριστικών του φορέα (πλάτος, συχνότητα, φάση) ούτως ώστε στην τελική μορφή αυτών των χαρακτηριστικών να «εντοπίζεται» το αρχικό baseband σήμα πληροφορίας.
3. Στην πλευρά του δέκτη, η αντίστροφη διαδικασία να είναι εφικτή (αποδιαμόρφωση), ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η ορθή ανάκτηση του αρχικού σήματος πληροφορίας.

Ο φορέας αρχικά στις αναλογικές ζωνοδιαβατές επικοινωνίες ήταν τριγωνομετρικός (ημιτονοειδής) (ραδιοφωνία AM – FM). Το εισερχόμενο σήμα πληροφορίας ήταν σε αναλογική μορφή (φωνή, audio) με αποτέλεσμα την αλλοίωση του πλάτους (AM) ή της συχνότητας (FM) του αρχικώς αδιαμόρφωτου φορέα και τελικά την μετάδοση ενός διαμορφωμένου σήματος σε μία νέα περιοχή συχνοτήτων (passband – ζωνοδιαβατό φάσμα) πολύ μεγαλύτερη από το φάσμα του αρχικού σήματος πληροφορίας [5].

Το φάσμα audio/voice εκτείνεται μέχρι τα 20 KHz και η συχνότητα του φορέα (περιοχή μετάδοσης AM – FM) εκτείνεται στο φάσμα των MHz (λίγα MHz για την ραδιοφωνία AM, 87,5-107,5 MHz για την FM) [6]. Στο αρχικό φάσμα, ήταν αδύνατη η μετάδοση φωνής ασύρματα, καθώς δεν μπορούσαμε να έχουμε κεραιές πρακτικά υλοποιήσιμες σε τόσο μεγάλα μήκη κύματος. Το πρόβλημα λοιπόν της baseband μετάδοσης πληροφορίας στο αρχικό φάσμα συχνοτήτων οδήγησε στην αναγκαιότητα της διαμόρφωσης, που επέτρεψε την ασύρματη μετάδοση φωνής, στην αρχική της εφαρμογή, για την AM ραδιοφωνία [3].

Ειδικότερα, η διαδικασία της αντιστοίχισης της ψηφιακής μορφής της πληροφορίας (bits) σε ένα σαφώς ορισμένο πλήθος αναλογικών κυματομορφών ικανών και κατάλληλων να μεταδοθούν στο φυσικό μέσο-κανάλι, είναι αυτό που στις ψηφιακές επικοινωνίες αναφέρεται ως διαμόρφωση (modulation) [7]. Οι ψηφιακές ζωνοδιαβατές διαμορφώσεις μελετήθηκαν μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και χρειάστηκαν αρκετές ακόμα δεκαετίες μέχρι την εμπορική τους χρήση, στα τέλη της δεκαετίας του '80 [3].



Σχήμα 1.1 Τετραγωνικός παλμός στο πεδίο του χρόνου [8]

Η βασική αρχή του τριγωνομετρικού φορέα που διαμορφώνεται κατά πλάτος (ASK), συχνότητα (FSK) ή φάση (PSK) από ένα ψηφιακό πλέον baseband σήμα πληροφορίας, το οποίο μετατοπίζεται από το αρχικό του φάσμα στην περιοχή συχνοτήτων (ζωνοδιαβατό φάσμα) του φορέα, υφίσταται στις ψηφιακές διαμορφώσεις όπως και στις αναλογικές [8].

Κατ' αντιστοιχία, ορίζονται τα ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως είχαμε αρχικά τα αναλογικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα AM – FM και τα αναλογικά τηλεοπτικά συστήματα (PAL, NTSC, SECAM) [9].

Η ουσιαστική θεμελιώδης διαφορά είναι πως το εισερχόμενο baseband σήμα πληροφορίας είναι ψηφιακό, δηλαδή σε μορφή παλμοσειράς [10].

Η συγκρότηση ενός baseband σήματος πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή μπορεί να γίνει απευθείας με συγκρότηση παλμών ή μέσω της διαδικασίας που είναι γνωστή ως μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital conversion) [11].

Και στις δύο περιπτώσεις, έχουμε τελικά την πληροφορία σε ψηφιακή μορφή:

1. Σήμα χρονικά διακριτό
2. Σήμα με δύο και μόνο δύο στάθμες πλάτους (αντιστοιχούν στο λογικό «1» και στο λογικό «0»).
3. Μαθηματική βάση της ψηφιακής πληροφορίας είναι το δυαδικό σύστημα και η άλγεβρα Boole.

Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό κατέστη εφικτή μέσα από την επεξεργασία σήματος που ονομάζεται διαμόρφωση παλμών (pulse modulation). Στην περίπτωση αυτή, αντί για τριγωνομετρικό φορέα, έχουμε έναν αρχικό αδιαμόρφωτο φορέα παλμών που χαρακτηρίζονται από μία αρχική συχνότητα.

Το εισερχόμενο αναλογικό αρχικά baseband σήμα πληροφορίας πολλαπλασιάζεται (μίξη) με τον παλμικό φορέα και ως αποτέλεσμα έχουμε την μετατόπιση συχνότητας του αρχικού baseband σήματος, την χρονική του διακριτοποίηση, και υπό προϋποθέσεις που θα δούμε στην συνέχεια, την μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα.

Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση ενός εκ των χαρακτηριστικών του αρχικού φορέα (σήμα παλμών) κατά πλάτος, συχνότητα, φάση, διάρκεια/εύρος παλμών.

Υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, η διαδικασία αυτή οδηγεί σε ένα σήμα εξόδου που είναι επίσης ψηφιακό και αποτελεί την ψηφιακή μετατροπή του αρχικά εισερχόμενου αναλογικού baseband σήματος πληροφορίας, και ταυτόχρονα αποτελεί την αλλοιωμένη εκδοχή του αρχικού φορέα παλμών, ως αποτέλεσμα της πράξης μίξης (πολλαπλασιασμού) [12].

Η συχνότητα του φορέα δεν ανήκει σε ένα «πολύ απομακρυσμένο» φάσμα σε σχέση με το αρχικό αναλογικό baseband σήμα πληροφορίας.

Αντιθέτως, όπως θα δούμε από το κριτήριο δειγματοληψίας Nyquist, δύναται να είναι διπλάσια από την μέγιστη φασματική συνιστώσα του αρχικού αναλογικού σήματος.

Αυτό αποτελεί μία σημαντική διαφορά σε σχέση με τις αναλογικές ζωνοδιαβατές διαμορφώσεις αλλά και σε σχέση με τις ψηφιακές ζωνοδιαβατές διαμορφώσεις.

Συνεπώς, εάν έχουμε ένα αρχικά αναλογικό baseband σήμα πληροφορίας, τότε για να μεταδοθεί σε ένα ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα, έχουμε την εξής διαδικασία [13]:

- Αρχικά έχουμε διαμόρφωση παλμού (σήμα εισόδου: αναλογικό, φορέας: παλμός, συχνότητα παλμού: καθορίζεται από το κριτήριο δειγματοληψίας Nyquist), για να μετατραπεί το σήμα σε ψηφιακό.
- Στη συνέχεια, εάν επιθυμούμε ασύρματη μετάδοση, απαιτείται ζωνοδιαβατή διαμόρφωση και το ψηφιακό σήμα διαμορφώνει έναν τριγωνομετρικό φορέα πολύ μεγαλύτερης συχνότητας κατά πλάτος, διαμόρφωση ή φάση (ψηφιακές διαμορφώσεις).

Αυτό το διαμορφωμένο σήμα συγκροτεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και μπορεί να οδηγηθεί σε κεραίες για να μεταδοθεί ασύρματα.

Μπορεί επίσης να οδηγηθεί σε μία οπτική ίνα (radio-over-fiber).

Σε μία οπτική ίνα μπορεί να οδηγηθεί και ένα απευθείας ψηφιακό baseband σήμα για να διαμορφώσει ένα laser (πηγή φωτονίων) κατά πλάτος ή φάση και έτσι να έχουμε ψηφιακή διαμόρφωση οπτικής πηγής.

Σε ένα ομοαξονικό καλώδιο, τα ψηφιακά σήματα μπορούν να μεταδοθούν σε baseband μορφή. Επειδή όμως το ομοαξονικό καλώδιο λειτουργεί σε σχετικά υψηλότερο φάσμα από τα συνήθη baseband σήματα, απαιτείται μία ακόμα ενέργεια.

Η ενέργεια αυτή αποτελεί την συνένωση ψηφιακών σημάτων με στένεμα της διάρκειάς τους, ούτως ώστε στο αρχικό παράθυρο ενός bit να «χωρέσουν» περισσότερα bit (2, 4, 8 κλπ) από διαφορετικές πηγές πληροφορίας, ούτως ώστε να έχουμε:

1. η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση ενός εκ των χαρακτηριστικών του αρχικού φορέα (σήμα παλμών) κατά πλάτος, συχνότητα, φάση, διάρκεια/εύρος παλμών.
2. αξιοποίηση των χαρακτηριστικών χωρητικότητας του ομοαξονικού καλωδίου για μετάδοση «περισσότερης» πληροφορίας και μάλιστα «γρηγορότερα»(στένεμα παλμού(sec/bit) που οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης(bit/sec) και άρα σε πιο γρήγορη μετάδοση της πληροφορίας)

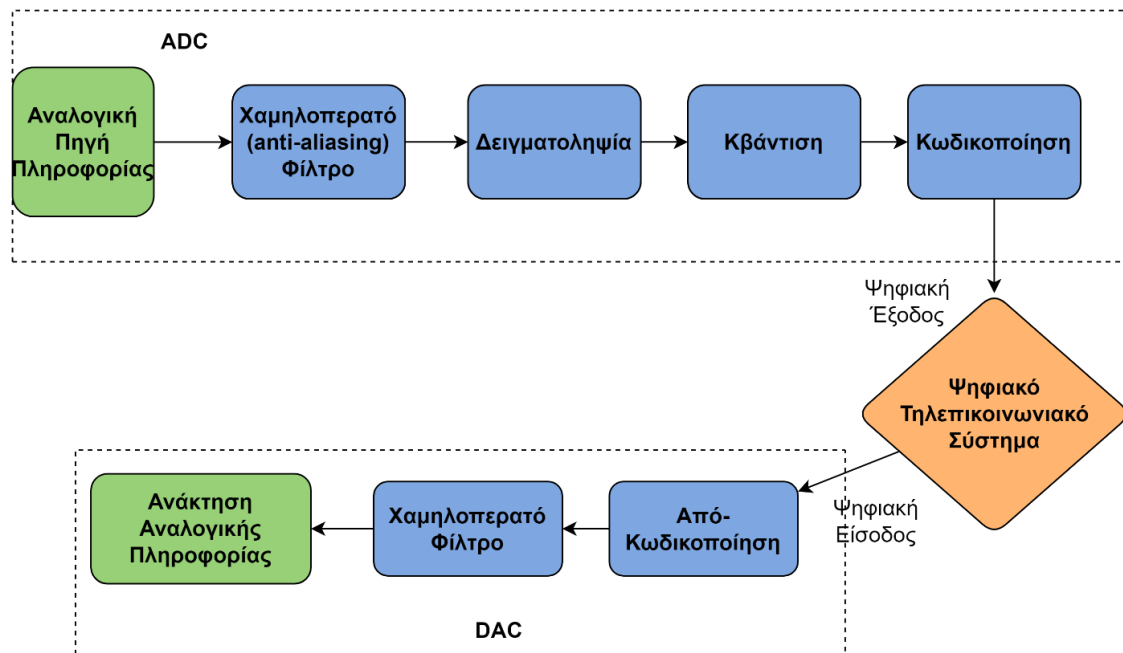
Αυτή συνένωση συνιστά την λεγόμενη Πολυπλεξία Επιμερισμού Χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM) και όπως θα δούμε αποτελεί διαμόρφωση φορέα παλμού από εισερχόμενο ψηφιακό baseband σήμα πληροφορίας [12],1[3].

Η συχνότητα του φορέα επιλέγεται με κριτήριο το επιθυμητό στένεμα του αρχικού bit stream.

Κριτήριο του στενέματος είναι το πόσα κανάλια/ροές πληροφορίας (bit streams) θέλω να συνενώσω για να μεταδώσω πάνω από το ίδιο φυσικό μέσο μετάδοσης.

Η διαδικασία αυτή ξεκίνησε για το ομοαξονικό καλώδιο αλλά έχει επεκταθεί και στις ασύρματες αλλά και στις οπτικές επικοινωνίες.

1.3. Τεχνικές ADC και DAC



Σχήμα 1.2 Τεχνικές ADC και DAC

Το σύστημα *ADC* αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία με τις αντίστοιχες λειτουργίες του καθενός στοιχείου [13]:

- i. Το *anti-aliasing* ή αλλιώς *Χαμηλοπερατό φίλτρο*. Λειτουργία του είναι ο περιορισμός του φάσματος του αναλογικού σήματος, ο οποίος σε συνδυασμό με τη συχνότητα δειγματοληψίας ικανοποιεί τη συνθήκη του Nyquist.

- ii. Ο *Δειγματολήπτης (Sampler)* αναλαμβάνει την μετατροπή του αναλογικού σήματος συνεχούς χρόνου στο αντίστοιχο διακριτού χρόνου.
- iii. Ο *Κβαντιστής (Quantizer)* λειτουργεί, αρχικά, λαμβάνοντας ως είσοδο το διακριτό σήμα της εξόδου του δειγματολήπτη και στην συνέχεια, προσεγγίζοντας τις διακριτές τιμές με συγκεκριμένα επίπεδα πλάτους.
- iv. Λειτουργία του *Κωδικοποιητή (Coder)* είναι η μετατροπή της ακολουθία των επιπέδων πλάτους της εξόδου του κβαντιστή σε δυαδικές κωδικολέξεις (codewords).

Στο σύστημα *DAC* και συγκεκριμένα στον δέκτη πραγματοποιούνται οι αντίστροφες λειτουργίες με σκοπό την ανάκτηση του αναλογικού σήματος πληροφορίας. Ο *Αποκωδικοποιητής (Decoder)* μετατρέπει τις λαμβανόμενες κωδικολέξεις σε επίπεδα πλάτους, τα οποία όταν διέλθουν μέσα από ένα Χαμηλοπερατό φίλτρο δίνουν στην έξοδο το ανακτημένο αντίγραφο του σήματος πληροφορίας [13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΑΛΜΩΝ

2.1. Διαμόρφωση παλμών κατά πλάτος (Pulse Amplitude Modulation - PAM)

Η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PAM) είναι ένα αναλογικό σχήμα διαμόρφωσης στο οποίο το πλάτος του παλμικού φορέα μεταβάλλεται ανάλογα με το στιγμιαίο πλάτος του σήματος μηνύματος.

Το διαμορφωμένο κατά πλάτος σήμα παλμού, θα ακολουθήσει το πλάτος του αρχικού σήματος, καθώς το σήμα διαγράφει τη διαδρομή ολόκληρου του κύματος. Στο φυσικό PAM, ένα σήμα που δειγματοληπτείται με ρυθμό Nyquist ανακατασκευάζεται, περνώντας το από μια αποτελεσματική χαμηλοπερατή συχνότητα (LPF) με ακριβή συχνότητα αποκοπής.

Κατά την διάρκεια της ψηφιακής μετάδοσης μέσα από ένα αναλογικό κανάλι λαμβάνει χώρα η αντιστοίχιση του κάθε συμβόλου σε μια κυματομορφή σήματος [13].

$$\{s_1, \dots, s_M\} \rightleftharpoons \{s_1(t), \dots, s_M(t)\} \quad (2)$$

Για τους σκοπούς της PAM διαμόρφωσης χρησιμοποιείται μια βασική κυματομορφή της οποίας το πλάτος τροποποιείται ανάλογα με το σύμβολο που θέλουμε να μεταδώσουμε.

Τα σήματα PAM διακρίνονται σε δύο περιπτώσεις: α) Βασικής ζώνης, β) Ζωνοπερατά [12]

Η διαμορφωμένη με PAM κυματομορφή είναι:

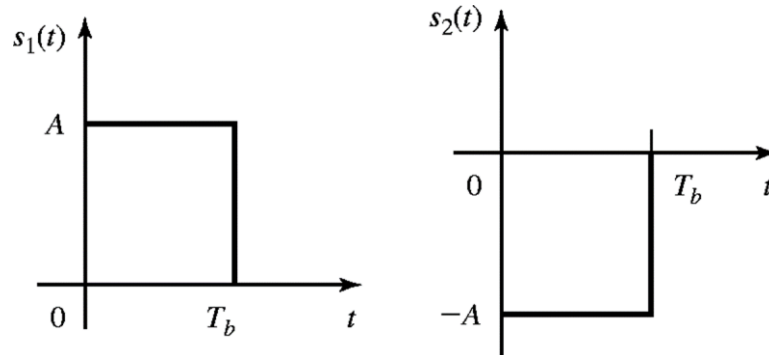
$$x_{c,PAM}t = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} mnT_s \Pi t - \frac{nT_s}{\tau} \quad (3)$$

2.1.1. Δυαδικό PAM Βασικής Ζώνης

Το σήμα αυτό αποτελεί την απλούστερη μέθοδο ψηφιακής διαμόρφωσης, ονομάζεται, επίσης και Δυαδική Αντίποδη Σηματοδοσία [12].

Δυαδικό αλφάβητο:

- ο παλμός πλάτους $+A$ αντιστοιχίζεται στο δυαδικό «1»
- ο παλμός πλάτους $-A$ στο δυαδικό «0»



Σχήμα 2.1 Κυματομορφές 2-PAM [11]

Αν $T_b(\text{sec})$ είναι η περίοδος bit, τότε η μετάδοση γίνεται με ρυθμό σηματοδοσίας $R_b=1/T_b(\text{Hz})$

2.1.2. M-PAM Βασικής Ζώνης

Για την εκπομπή του M-αδικού PAM(M-PAM) βασικής ζώνης χρησιμοποιούνται οι κυματομορφές-σύμβολα $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M = 2^K$, τα οποία αντιστοιχούν σε K bits το καθένα, διαμορφώνοντας το πλάτος ενός βασικού παλμού $g(t)$, διάρκειας T και ενέργειας [13]:

$$\mathcal{E}_g = \int_0^T |g(t)|^2 dt \quad (4)$$

Οι κυματομορφές αυτές είναι [13]:

$$s_i(t) = \begin{cases} (2i - M - 1)g(t), & t \in [0, T] \\ 0, & \text{άλλού} \end{cases}, i = 1, \dots, M. \quad (5)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει ένα σύστημα M-PAM με άρτιο πλήθος συμβόλων, περίπτωση που συνήθως χρησιμοποιείται στην πράξη. Ανάλογα μπορεί να περιγραφεί και το M-PAM με περιττό πλήθος συμβόλων.

Η μορφή του παλμού $g(t)$ επιλέγεται κατά την σχεδίαση του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο εύρος ζώνης, την απόκριση του καναλιού και την διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference).

Ο χώρος σημάτων της M-PAM της είναι μονοδιάστατος με συνάρτηση βάσης [13]:

$$\phi(t) = \frac{g(t)}{\sqrt{\mathcal{E}_g}} \quad (6)$$

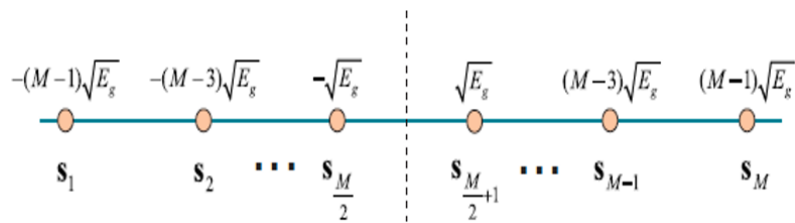
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι κυματομορφές $s_i(t)$ γράφονται σαν γραμμικός συνδυασμός της $\phi(t)$ [13]:

$$s_i(t) = (2i - M - 1) \sqrt{\mathcal{E}_g} \phi(t), i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

και τα σύμβολα είναι:

$$s_i = \left\{ (2i - M - 1) \sqrt{\mathcal{E}_g} \right\} \quad (8)$$

Ο αστερισμός του M-PAM με άρτιο πλήθος συμβόλων είναι αυτός του σχήματος ενώ η αντιστοίχιση των bits σε σύμβολα μπορεί να γίνει με τον κώδικα *Gray*.



Σχήμα 2.2 Αστερισμός M-PAM με άρτιο πλήθος συμβόλων [13]

2.1.3. M-PAM: Ενέργεια συμβόλου και bit

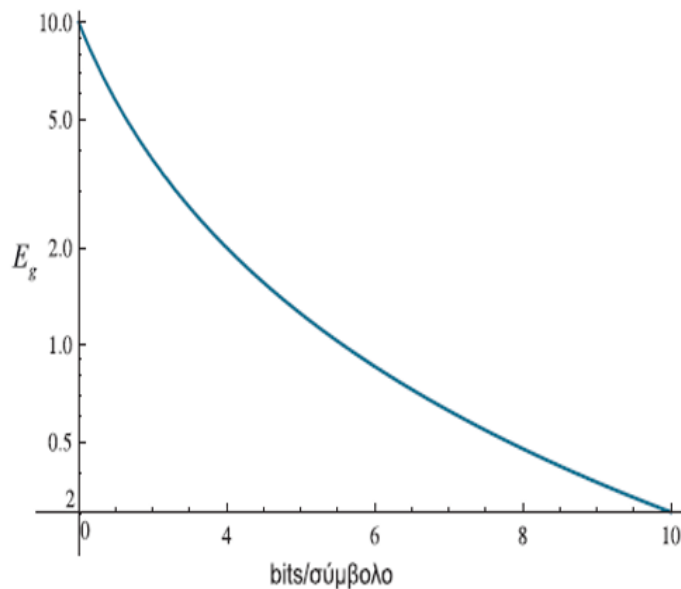
Η μέση ενέργεια συμβόλου του M-PAM για ισοπίθανα σύμβολα θα είναι:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_{s_i} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[(2i - M - 1) \sqrt{\varepsilon_g} \right]^2 = \frac{\varepsilon_g (M^2 - 1)}{3} \quad (9)$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς ε_g βρίσκεται:

$$\varepsilon_g = \frac{3\varepsilon_s}{M^2 - 1} \quad (10)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι με δεδομένο ένα άνω όριο στη μέση ενέργεια συμβόλου ε_s , η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης συμβόλων (μέσω της αύξησης του M) μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω της μείωσης της ενέργειας του βασικού παλμού ε_g . Η μεταβολή της ε_g συναρτήσει του M για $\varepsilon_s = 10$ φαίνεται στο Σχήμα 2.3 [13].



Σχήμα 2.3 Ενέργεια παλμού ως προς το λόγο bits/σύμβολο για $\varepsilon_s = 10$ [13]

2.1.4. M-PAM: Διαμορφωτής

Ένας Διαμορφωτής Πλάτους Παλμού (Pulse Amplitude Modulation-PAM) μπορεί να θεωρηθεί ως ένας διακόπτης που κλείνει κάθε T δευτερόλεπτα για Δ δευτερόλεπτα, και παραμένει ανοικτός στον υπόλοιπο χρόνο. Το PAM σήμα είναι λοιπόν ο πολλαπλασιασμός του σήματος συνεχούς χρόνου $x(t)$ με ένα περιοδικό σήμα με περίοδο T . Το x -PAM(t) σήμα αποτελείται από στενούς παλμούς με τα πλάτη του σήματος εντός του εύρους του παλμού) να υπολογίζονται σύμφωνα με την τεχνική δειγματοληψίας flat-top [14].

Η διαμόρφωση πλάτους παλμού κατηγοριοποιείται σε δύο τύπους

1. PAM μονής πολικότητας
2. PAM διπλής πολικότητας

Η PAM μονής πολικότητας είναι μια κατάσταση όπου μια κατάλληλη σταθερή DC πόλωση προστίθεται στο σήμα για να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι παλμοί είναι θετικοί.

Η PAM διπλής πολικότητας είναι μια κατάσταση όπου οι παλμοί είναι τόσο θετικοί όσο και αρνητικοί.

Σε ορισμένες διαμορφώσεις πλάτους παλμού, το πλάτος κάθε παλμού μπορεί να είναι ευθέως ανάλογο με το στιγμιαίο πλάτος διαμόρφωσης μόλις λάβει χώρα ο παλμός. Σε έναν άλλο τύπο PAM, το πλάτος κάθε σήματος μπορεί να είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το στιγμιαίο πλάτος διαμόρφωσης μόλις συμβεί ένας παλμός.

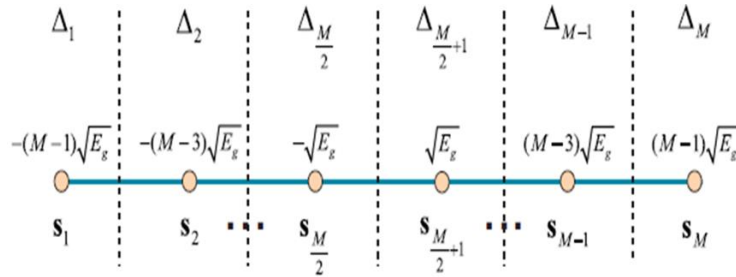
Σε άλλα συστήματα, η ένταση κάθε παλμού εξαρτάται κυρίως από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του σήματος διαμόρφωσης εξαιρουμένης της ισχύος, όπως η στιγμιαία φάση ή αλλιώς η συχνότητα.

Η δυνατότητα χρήσης παλμών σταθερού πλάτους είναι το κύριο πλεονέκτημα της παλμικής διαμόρφωσης. Καθώς η PAM δεν χρησιμοποιεί σήματα σταθερού πλάτους, δεν χρησιμοποιείται συχνά. Μόλις χρησιμοποιηθεί, τότε η συχνότητα του παλμού αλλάζει το φέρον. Είναι πολύ απλό να παραχθεί & να αποδιαμορφωθεί μια διαμόρφωση πλάτους παλμού. Η μετατροπή του σήματος είναι μια γεννήτρια που μπορεί να γίνει προς το PAM που τροφοδοτείται σε μια μόνο είσοδο μιας πύλης AND.

Σήματα στη συχνότητα δειγματοληψίας δίνονται προς το άλλο i/p της πύλης AND, για να την ανοίξουν καθ' όλη τη διάρκεια των απαιτούμενων χρονικών διαστημάτων. Μετά από αυτό, η έξοδος της λογικής πύλης περιλαμβάνει παλμούς στη συχνότητα δειγματοληψίας, η οποία είναι ισοδύναμη σε πλάτος προς την τάση του σήματος σε κάθε δευτερόλεπτο, στη συνέχεια τα σήματα περνούν σε ένα δίκτυο που έχει σχήμα παλμού, το οποίο τους παρέχει μια επίπεδη κορυφή.

2.1.5. M-PAM: Αποδιαμορφωτής

Η αποδιαμόρφωση των σημάτων M-PAM βασικής ζώνης υλοποιείται με την διέλευση του σήματος $r(t)$, που λαμβάνεται στον δέκτη, μέσω ενός συσχετιστή ή προσαρμοσμένου φίλτρου. Στην συνέχεια, ακολουθεί η ανίχνευση του συμβόλου και η αντίστροφη διαδικασία αντιστοίχισης των συμβόλων σε bits [13].



Σχήμα 2.4. Περιοχές απόφασης MLD για το M-PAM [13]

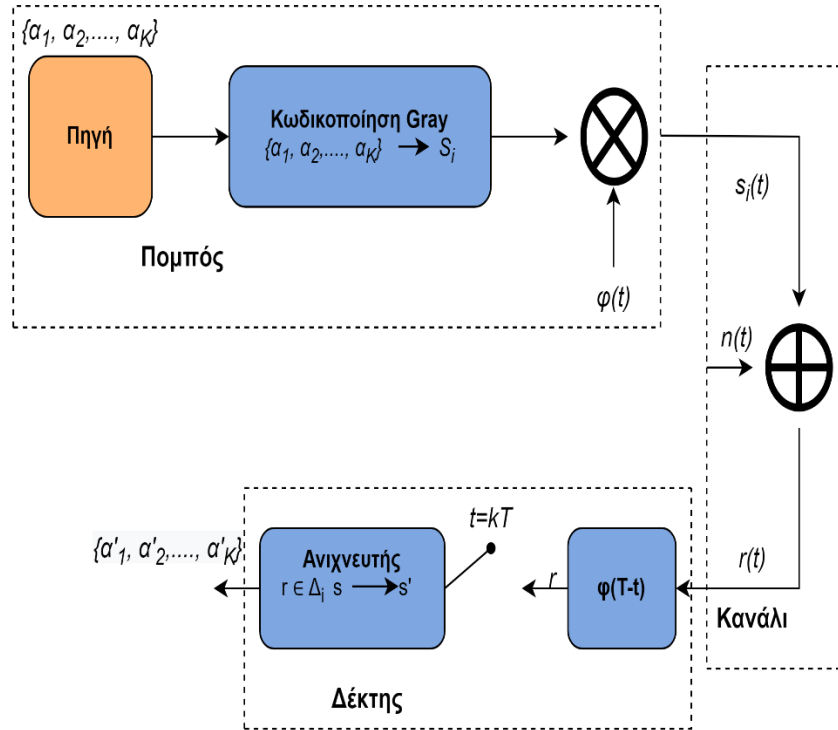
Οι περιοχές απόφασης ορίζονται ως εξής [13]:

$$\begin{aligned} \Delta_1: & \left\{ r < -(M-2)\sqrt{\mathcal{E}_g} \right\} \\ \Delta_2: & \left\{ -(M-2)\sqrt{\mathcal{E}_g} < r < -(M-4)\sqrt{\mathcal{E}_g} \right\} \\ & \vdots \\ \Delta_{M-1}: & \left\{ (M-4)\sqrt{\mathcal{E}_g} < r < (M-2)\sqrt{\mathcal{E}_g} \right\} \\ \Delta_M: & \left\{ (M-2)\sqrt{\mathcal{E}_g} < r \right\} \end{aligned}$$

2.1.6. M-PAM: σύστημα πομπού-δέκτη

Εφαρμογές της PAM διαμόρφωσης για μετάδοση πληροφορίας και σηματοδότηση:

- Χρησιμοποιείται στην επικοινωνία Ethernet.
- Χρησιμοποιείται σε πολλούς μικροελεγκτές για τη δημιουργία σημάτων ελέγχου.
- Χρησιμοποιείται στη φωτοβιολογία.
- Χρησιμοποιείται ως ηλεκτρονικός οδηγός για φωτισμό LED.
- Το PAM χρησιμοποιείται στο δίκτυο Ethernet το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο συστημάτων & χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ αυτών των συστημάτων. Έτσι, το PAM χρησιμοποιείται στις επικοινωνίες Ethernet.
- Τα σήματα ελέγχου μπορούν να παραχθούν σε διάφορους μικροελεγκτές με τη χρήση PAM
- Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης χρησιμοποιείται κυρίως στην ψηφιακή μετάδοση δεδομένων & στις εφαρμογές που αλλάζουν με PCM & PPM. Κυρίως όλα τα τηλεφωνικά μόντεμ που είναι ταχύτερα πάνω από 300 bit/s χρησιμοποιούν QAM (τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους).



Σχήμα 2.5 Δομικό διάγραμμα ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος

2.1.7. BRAM: Πιθανότητα Σφάλματος

Η πιθανότητα του σφάλματος για το BRAM υπολογίζεται ως εξής [13]:

Επειδή $r = s_i + n$, όταν χρησιμοποιηθεί η αντιστοίχιση $s_1 \rightarrow 0$ και $s_2 \rightarrow 1$ και με την προϋπόθεση ότι έχει σταλεί το σύμβολο $s_2 = \{\sqrt{\mathcal{E}_g}\}$, η πιθανότητα σφάλματος θα είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{b|s_2} &= \Pr(\hat{s} \neq s_2 | s_2) = \Pr(r < 0 | s_2) = \Pr\left(\sqrt{\mathcal{E}_g} + n < 0\right) \\
 &= \Pr\left(n < -\sqrt{\mathcal{E}_g}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \int_{-\infty}^{-\sqrt{\mathcal{E}_g}} \exp\left(-\frac{u^2}{N_0}\right) du \\
 &\quad - \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{v^2}{2}} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv = Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right).
 \end{aligned}$$

Παρόμοια, η πιθανότητα σφάλματος με την υπόθεση ότι έχει σταλεί το $s_1 = \{-\sqrt{\mathcal{E}_g}\}$ γράφεται με την μορφή [13]:

$$\begin{aligned} P_{b|s_1} &= \Pr(\hat{\mathbf{s}} \neq s_1 | \mathbf{s}_1) = \Pr(r > 0 | \mathbf{s}_1) = \Pr\left(-\sqrt{\mathcal{E}_g} + n > 0\right) \\ &= \Pr\left(n > \sqrt{\mathcal{E}_g}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right) \end{aligned}$$

Αν θεωρηθεί ότι τα s_1 και s_2 εμφανίζονται με την ίδια a-priori πιθανότητα στην ακολουθία συμβόλων, η συνολική πιθανότητα σφάλματος bit θα είναι [13]:

$$\begin{aligned} P_{b(BPAM)} &= P_{b|s_1} \Pr(\mathbf{s}_1) + P_{b|s_2} \Pr(\mathbf{s}_2) \\ &= \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right) \end{aligned}$$

Επειδή για την περίπτωση του BPAM ισχύει $\varepsilon_b = \varepsilon_g$ θα ισχύει [13]:

$$P_{b(BPAM)} = Q\left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_b}{N_0}}\right) \quad (11)$$

2.1.8. M-PAM: Πιθανότητα Σφάλματος

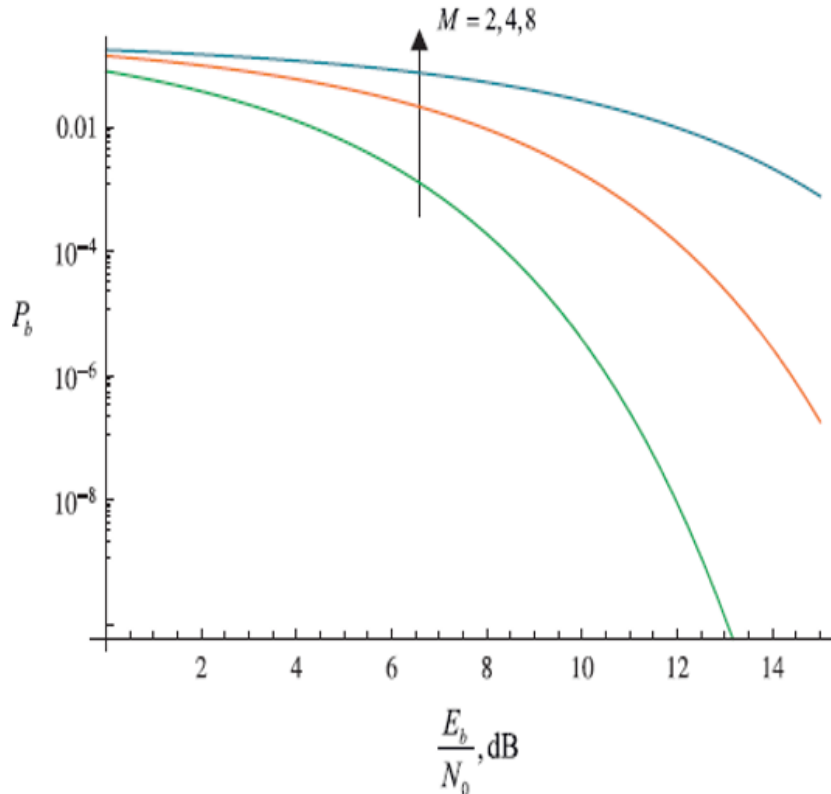
Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου για την γενική περίπτωση του M-PAM δίνεται από την σχέση [13]:

$$\begin{aligned} P_{s(M-PAM)} &= \frac{2(M-1)}{M} Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_g}{N_0}}\right) = \frac{2(M-1)}{M} Q\left(\sqrt{\frac{6\varepsilon_s}{(M^2-1)N_0}}\right) \\ &= \frac{2(M-1)}{M} Q\left(\frac{d_{min}}{\sqrt{2N_0}}\right). \end{aligned}$$

Αν χρησιμοποιηθεί κωδικοποίηση Gray και θεωρώντας υψηλές τιμές (>20dB) για τη σηματοθορυβική σχέση $\frac{\varepsilon_g}{N_0}$, η πιθανότητα σφάλματος bit μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά ως [13]:

$$P_{b(M-PAM)} \simeq \frac{P_s}{\log_2 M} = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{6E_b \log_2 M}{(M^2-1)N_0}} \right) \quad (12)$$

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η πιθανότητα σφάλματος bit του M-PAM για διάφορες τιμές του M και της σηματοθορυβικής σχέσης $\frac{E_b}{N_0}$, σύμφωνα με την [13]:



Σχήμα 2.6 Πιθανότητα Σφάλματος M-PAM [13]

2.1.9. M-PAM: Φασματική Πυκνότητα Ισχύος

Η ακολουθία συμβόλων M-PAM στην είσοδο του καναλιού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t - nT) \quad (13)$$

όπου $g(t)$ είναι ο βασικός παλμός, T είναι η χρονική διάρκεια του συμβόλου και $a = \{a_n\}$ η ακολουθία αποτελούμενη από στάθμες πλάτους κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε K -bits πληροφορίας.

Αποδεικνύεται ότι η ΦΠΙ του $s(t)$ δίνεται ως:

$$S(f) = \frac{1}{T} S_a(f) |G(f)|^2 \quad (14)$$

όπου η $G(f)$ αναφέρεται στον Μ/Σ Fourier του $g(t)$ (απόκριση συχνότητας του φίλτρου εκπομπής) και $S_a(f)$ είναι η ΦΠΙ της ακολουθίας πλατών a .

Η $S_a(f)$ ορίζεται ως:

$$S_a(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_a(m) e^{-j2\pi f m T} \quad (15)$$

Με $R_a(j)$ να ορίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας a .

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα [15]:

- Η ΦΠΙ του $s(t)$ εξαρτάται από τα φασματικά χαρακτηριστικά όχι μόνο του βασικού παλμού $g(t)$ αλλά και της ακολουθίας a .
- Σχεδιάζοντας κατάλληλα τους $G(f)$ και $S_a(f)$ επιτυγχάνεται η διαμόρφωση του φάσματος του σήματος του M-PAM.

Αν ικανοποιείται η συνθήκη κατά την οποία τα πλάτη στην ακολουθία a είναι ασυσχέτιστα και έχουν μέση τιμή μ_a και συνδιακύμανση σ_a , τότε αποδεικνύεται ότι η ΦΠΙ του $s(t)$ δίνεται από τη σχέση [13]:

$$S(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} |G(f)|^2 + \frac{\mu_a^2}{T^2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| G\left(\frac{m}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{m}{T}\right) \quad (16)$$

Ο πρώτος όρος, $\frac{\sigma_a^2}{T} |G(f)|^2$, στην είναι ένα συνεχές φάσμα το οποίο εξαρτάται από τα φασματικά χαρακτηριστικά του $g(t)$. Ο δεύτερος όρος αποτελείται από διακριτές φασματικές συνιστώσες που απέχουν μεταξύ τους κατά $\frac{1}{T}$. Γενικά οι συνιστώσες αυτές δημιουργούν προβλήματα και μπορούν να απομακρυνθούν αν ισχύει $\mu_a = 0$.

2.2. Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation - PCM)

2.2.1. Πλαίσιο Εφαρμογής Διαμόρφωσης PCM

Αντί για «απλή» παλμοσειρά, το PCM παράγει μια σειρά από αριθμούς ή ψηφία, και ως εκ τούτου η διαδικασία αυτή ονομάζεται ψηφιακή. Κάθε ένα από αυτά τα ψηφία, αν και σε δυαδικό κώδικα, αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση το πλάτος του δείγματος σήματος εκείνη τη στιγμή.

Στη διαμόρφωση παλμικού κώδικα, το σήμα μηνύματος αναπαρίσταται από μια ακολουθία κωδικοποιημένων παλμών. Αυτό το σήμα μηνύματος επιτυγχάνεται με την αναπαράσταση του σήματος σε διακριτή μορφή τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το πλάτος.

Το τμήμα του πομπού ενός κυκλώματος διαμόρφωσης παλμικού κώδικα αποτελείται από τη δειγματοληψία, την κβάντιση και την κωδικοποίηση, οι οποίες εκτελούνται στο τμήμα του αναλογικοψηφιακού μετατροπέα. Το χαμηλοπερατό φίλτρο πριν από τη δειγματοληψία αποτρέπει την αλλοίωση του σήματος μηνύματος.

Οι βασικές λειτουργίες στο τμήμα του δέκτη είναι η αναγέννηση των εξασθενημένων σημάτων, η αποκωδικοποίηση και η ανακατασκευή της κβαντισμένης παλμοσειράς. Ακολουθεί το μπλοκ διάγραμμα του PCM που αναπαριστά τα βασικά στοιχεία τόσο του τμήματος πομπού όσο και του τμήματος δέκτη.

Χαμηλοπερατό φίλτρο

Αυτό το φίλτρο εξαλείφει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας που υπάρχουν στο αναλογικό σήμα εισόδου, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος μηνύματος, για να αποφευχθεί η αλλοίωση του σήματος μηνύματος.

Δειγματολήπτης

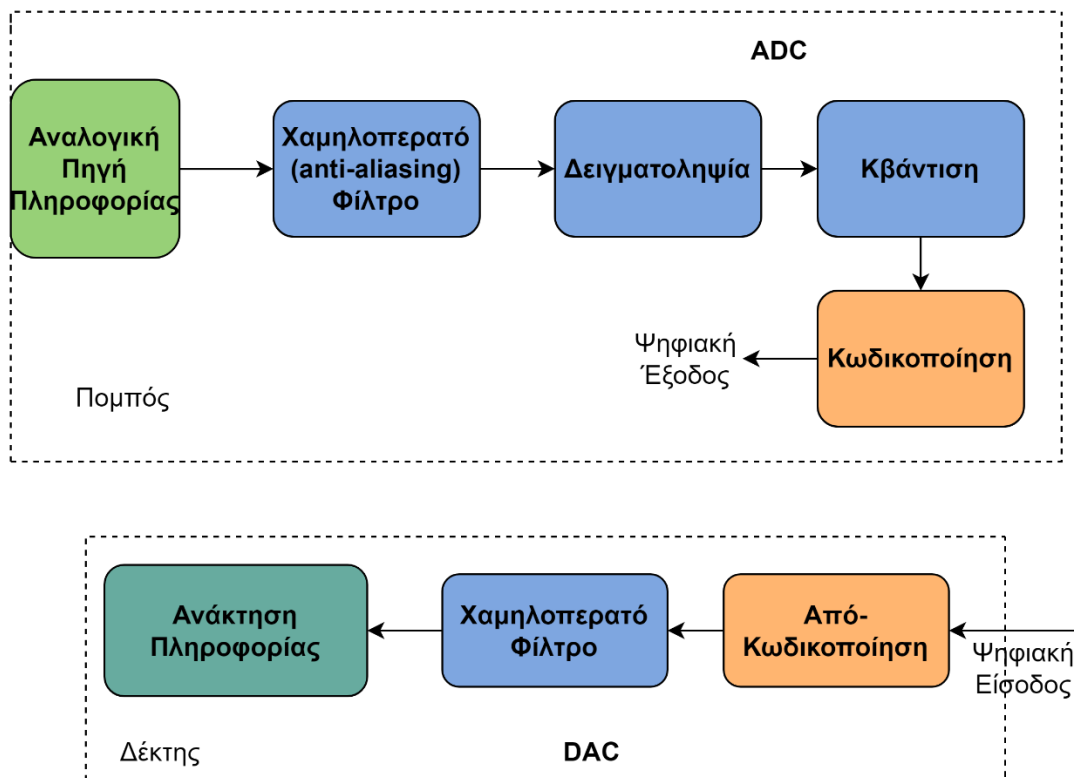
Πρόκειται για την τεχνική που βοηθά στη συλλογή δεδομένων δειγματοληψίας σε στιγμιαίες τιμές του σήματος μηνύματος, ώστε να ανακατασκευαστεί το αρχικό σήμα. Ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το διπλάσιο της συνιστώσας W της υψηλότερης συχνότητας του σήματος μηνύματος, σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας.

Κβαντιστής

Η κβάντιση είναι μια διαδικασία μείωσης των υπερβολικών bits και περιορισμού των δεδομένων. Η δειγματοληπτούμενη έξοδος όταν δίνεται στον κβαντιστή, μειώνει τα περιττά bits και συμπιέζει την τιμή.

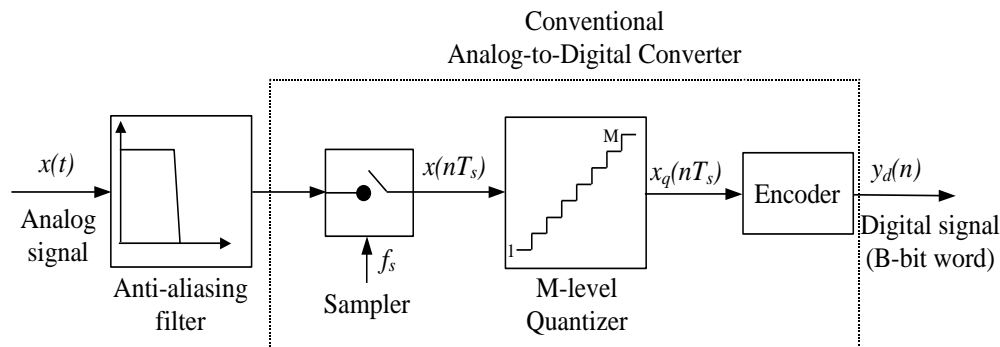
Κωδικοποιητής

Η ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος γίνεται από τον κωδικοποιητή. Ορίζει κάθε κβαντισμένο επίπεδο με δυαδικό κώδικα. Η δειγματοληψία που γίνεται εδώ είναι η διαδικασία sample-and-hold.



Σχήμα 2.7 Δομικό διάγραμμα υλοποίησης Pulse Code Modulation

2.2.2. Παλμοκωδικός Διαμορφωτής (PCM Modulator)



Σχήμα 2.8 Δομικό διάγραμμα ADC μέσω PCM με χρήση anti-aliasing filter [16]

Το φίλτρο *Anti-aliasing* περιορίζει το φάσμα του σήματος προς διαμόρφωση (αναλογικό σήμα εισόδου) σε μία μέγιστη συχνότητα f_{max} (η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού φάσματος) και η λειτουργία του *Encoder* είναι η κωδικοποίηση των κβαντισμένων δειγμάτων στις αντίστοιχες κωδικές λέξεις.

Όταν ένα σήμα πληροφορίας διαμορφώνεται κατά πλάτος με παλμούς, γίνεται διακριτό μόνο στο χρόνο. Παραμένει αναλογικό ως προς τα πλάτη, δεδομένου ότι επιτρέπονται όλες οι τιμές εντός του καθορισμένου εύρους. Το σήμα PAM λέγεται ότι είναι κβαντισμένο όταν κάθε παλμός του σήματος PAM προσαρμόζεται σε πλάτος ώστε να συμπίπτει με το πλησιέστερο επίπεδο εντός ενός πεπερασμένου συνόλου.

Το σφάλμα κβαντισμού (θόρυβος) μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τον αριθμό των επιπέδων κβαντισμού (M), δηλαδή μειώνοντας τα διαστήματα (q) μεταξύ των επιπέδων.

2.2.3. Διαφορική Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Differential Pulse Code Modulation - DPCM)

Αποτελεί μια διαφοροποίηση της μεθόδου *PCM*, περιλαμβάνει τις διαδικασίες της δειγματοληψίας, της κβάντισης και της κωδικοποίησης. Παρουσιάζει όμως μια βασική διαφορά, δεν κβαντίζεται η τιμή του δείγματος αλλά η διαφορά αυτής με μια εκτιμώμενη τιμή. Η πλειοψηφία των σημάτων που αντιστοιχούν σε ηλεκτρική

συγκρότηση πληροφορίας οδηγούν σε μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων. Χρήση του *DPCM* γίνεται σε πρότυπα όπως το *Joint Photographic Experts Group (JPEG)* για την ψηφιοποίηση εικόνας και ως *Adaptive DPCM (ADPCM)* για την συμπίεση ήχου [12].

2.2.4. DPCM: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με το PCM

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου *DPCM* σε σύγκριση με την μέθοδο *PCM* είναι ότι [12]:

- i. Μικρότερος αριθμός επιπέδων του κβαντιστή. Για παράδειγμα, ένα *PCM* 8 επιπέδων μετατρέπεται σε *DPCM* 4 επιπέδων, κατά αυτόν τον τρόπο, απαιτούνται 2 bits (αντί 3) για την κωδικοποίηση ενός δείγματος πληροφορίας. Συνέπεια αυτού είναι η μετάδοση της ίδιας πληροφορίας εξοικονομώντας εύρος ζώνης.
- ii. Απλοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος διότι δεν απαιτείται η παρουσία φίλτρου μετατροπής του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό στον δέκτη, σε αντίθεση με το *PCM*.
- iii. Στο *DPCM* λαμβάνεται υπόψιν και η φυσική (πέρα από την στατιστική) σχέση των διαδοχικών δειγμάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια πιο αξιόπιστη ανάκτηση του αναλογικού σήματος σε σχέση με την αντίστοιχη του *PCM*.

Το κυριότερο μειονέκτημα του *DPCM* σε σχέση με το *PCM* είναι το γεγονός ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στον θόρυβο συγκρινόμενο με το αντίστοιχο *PCM*. Αιτία του φαινομένου αυτού είναι ότι κατά την ανάκτηση ενός δείγματος στον δέκτη παρατηρείται μεγάλη εξάρτηση από τα προηγούμενα δείγματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διάδοση λαθών που έχουν συμβεί προηγουμένως και στα μεταγενέστερα σήματα [14].

2.2.5. Διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation)

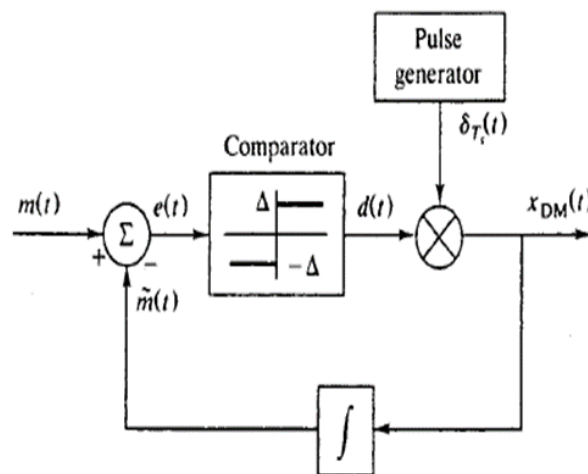
Ως μια ειδική περίπτωση του *DPCM* μπορεί να θεωρηθεί η *Διαμόρφωση Δέλτα* (*Delta Modulation*). Κύριο χαρακτηριστικό της είναι η χρήση του επονομαζόμενου **κβαντιστή δύο επιπέδων ή ενός bit**, που αποτελεί έναν πιο απλό κβαντιστή.

Η χρήση του αυτού του κβαντιστή χαμηλής πολυπλοκότητας ενέχει ένα σημαντικό αντίτιμο, αυτό της απαίτησης για δειγματοληψία σε μεγάλους ρυθμούς. Συνήθως οι ρυθμοί χρειάζεται να είναι μεγαλύτεροι από τη διπλάσια συχνότητα Nyquist, στοχεύοντας στην αύξηση της συσχέτισης των γειτονικών δειγμάτων. Η, κατ' αυτόν τον τρόπο, επίτευξη της πολύ μικρής αλλαγής μεταξύ των δειγμάτων αυτών επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ένα σύστημα *DPCM* με κβάντιση 2 επιπέδων [15].

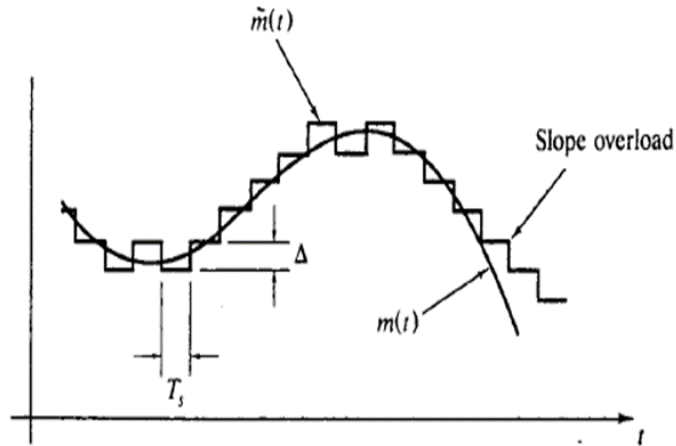
Στον πομπό το στοιχείο καθυστέρησης κατά T , λειτουργεί ως εκτιμητής έτσι ώστε να ισχύει [12]:

$$\hat{m}(n) = y(n - 1) \quad (17)$$

Ο καθυστερητής μαζί με τον αθροιστή αναφέρονται γενικά ως *συσσωρευτής* (*accumulator*). Σε κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας ο συσσωρευτής αυξάνει την προσέγγιση στο σήμα εισόδου κατά $\pm\alpha$ ανάλογα με την έξοδο του κβαντιστή, ενώ το βήμα κβάντισης είναι $\Delta = 2\alpha$.

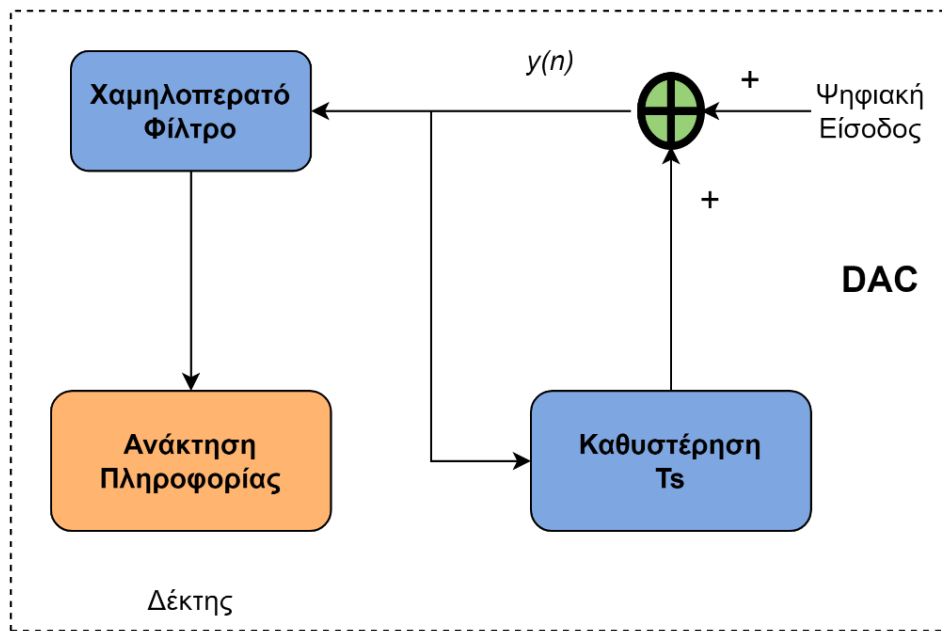


Σχήμα 2.9 Υλοποίηση DPCM [12]



Σχήμα 2.10 Δειγματοληψία στην υλοποίηση DPCM[12]

Στον Δέκτη η ακολουθία $y(n)$ ανακτάται αφού η ακολουθία θετικών και αρνητικών παλμών $b(n)$ εισέλθει σε έναν συσσωρευτή που λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως αυτός του πομπού.



Σχήμα 2.11 Ανάκτηση πληροφορίας με χρήση DAC στον δέκτη[13]

Το σήμα $x_{DM}(t)$ ολοκληρώνεται για να παράξει την προσέγγιση σκάλας (τον εκτιμητή $\hat{m}(t)$). Στην συνέχεια εισέρχεται σε ένα βαθυπερατό φίλτρο για να εξαλειφθούν τα διακριτά άλματα στον εκτιμητή. Χρειαζόμαστε μικρό μέγεθος βήματος

για να αναπαράξουμε την κυματομορφή εισόδου επακριβώς. Για να αποφευχθεί το slope overload, θέλουμε [16]:

$$\frac{\Delta}{T_s} > \left| \frac{dm(t)}{dt} \right|_{\max} \quad (18)$$

2.3. Διαμόρφωση Συχνότητας Παλμού (Pulse-frequency modulation - PFM)

Η διαμόρφωση συχνότητας παλμού δεν χρησιμοποιήθηκε στην πράξη διότι η «αντιστοίχιση» επιπέδων πλάτους του αρχικά αναλογικού σήματος πληροφορίας σε «χρονικές αποστάσεις» (μετατοπίσεις – μεταβολές συχνότητας) του αρχικά αδιαμόρφωτου φορέα παλμού, οδήγησε σε ένα διαμορφωμένο ψηφιακό σήμα εξόδου με μεγάλα κενά «σιγής» που δεν είναι παραγωγικά από πλευράς μετάδοσης – λήψης αλλά ούτε και αποθήκευσης της ψηφιακής πληροφορίας [13].

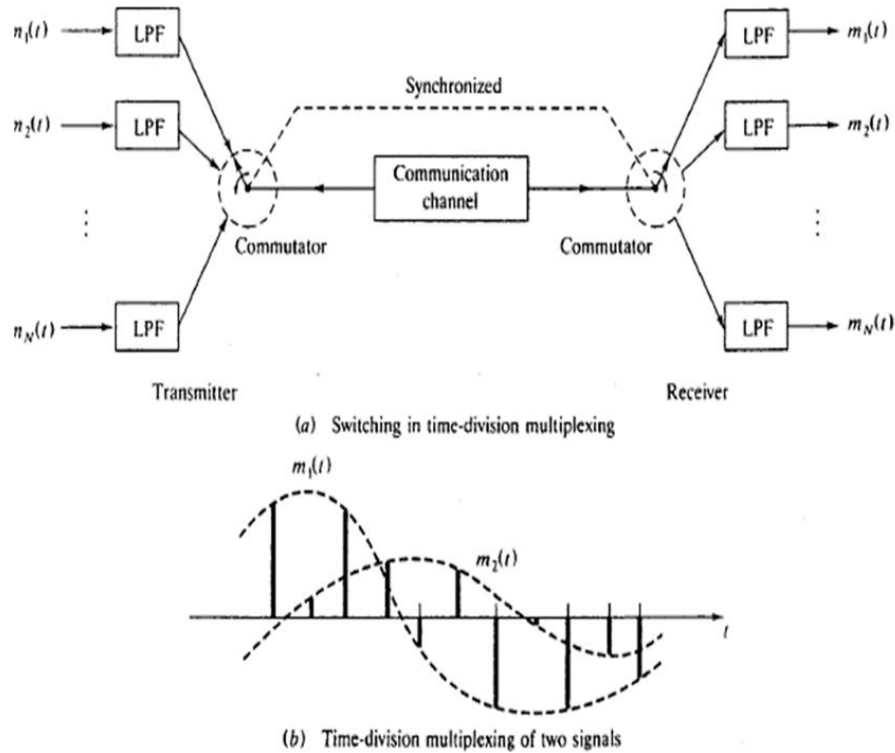
2.4. Πολυπλεξία επιμερισμού χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM)

Η πολυπλεξία επιμερισμού χρόνου αφορά στην χρονική συνένωση δειγμάτων από διαφορετικές πηγές ούτως ώστε η αντίστοιχη πληροφορία από αυτές τις πηγές να μεταδοθεί σειριακά σε ένα κανάλι επικοινωνίας.

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την τεχνική TDM. Κάθε σήμα πληροφορίας διέρχεται καταρχάς από ένα βαθυπερατό (low-pass) φίλτρο για να αποφευχθούν φαινόμενα aliasing.

Κάθε σήμα δειγματοληπτείται στον ρυθμό Nyquist. Πρακτικά, η δειγματοληψία πραγματοποιείται σε ρυθμό 1.1*Nyquist rate, ως τεχνική anti-aliasing. Δηλαδή $f_{\text{sampling}}=2.2*f_{\text{max}}$ (f_{max} : η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού σήματος εισόδου).

Τελικά, ένα σύνθετο σήμα που αποτελείται από τις εναλλασσόμενες χρονικά (time interleaved) παλμοσειρές των επί μέρους (αρχικών) σημάτων πληροφορίας μεταδίδεται στον δίαυλο [12].



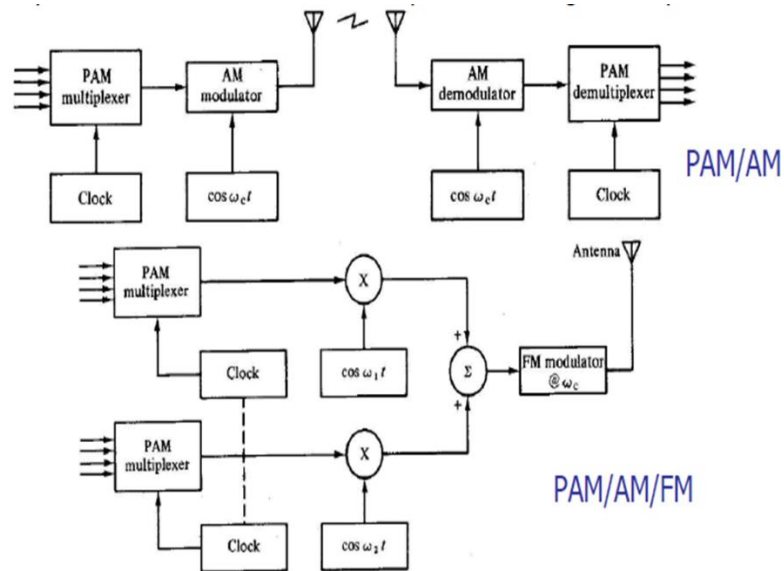
Σχήμα 2.12 Πολυπλεξία με επιμερισμό χρόνου [12]

Αν όλα τα αρχικά σήματα έχουν το ίδιο εύρος ζώνης, μεταδίδονται σειριακά, όπως είδαμε στο σχήμα. Σε διαφορετική περίπτωση, περισσότερα δείγματα προερχόμενα από τα wideband σήματα (τα σήματα μεγαλύτερου φάσματος) πρέπει να μεταδοθούν στην μονάδα του χρόνου.

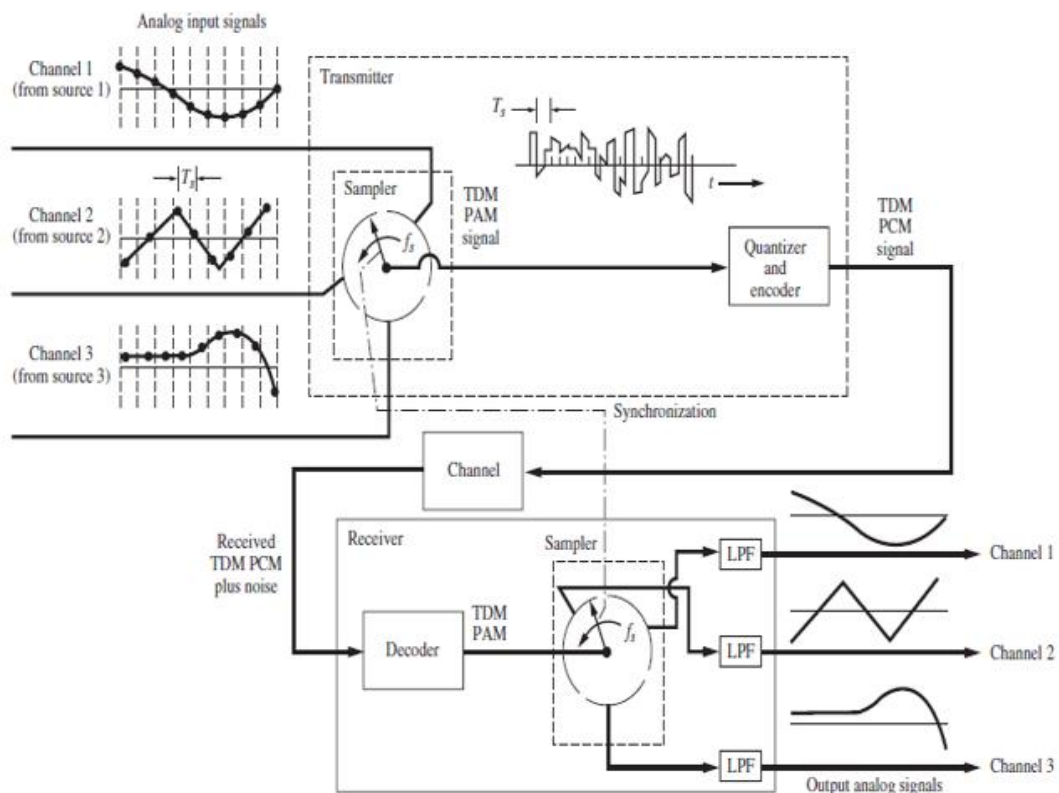
Έστω T ο χρονικός διαχωρισμός ανάμεσα σε γειτονικά δείγματα στο πολυπλεγμένο κατά χρόνο σήμα. Εάν όλα τα σήματα εισόδου έχουν ίδιο φάσμα f_m και δειγματοληπτούνται ισότιμα, τότε έχουμε $T = T_s/n$, όπου n είναι το πλήθος των σημάτων εισόδου και $T_s = 1/f_s \leq 1/(2f_m)$ η περίοδος δειγματοληψίας για κάθε σήμα.

Θεωρώντας το προκύπτον πολυπλεγμένο κατά χρόνο σήμα ως ένα βαθυπερατό σήμα εύρους ζώνης f_{TDM} , τότε ο απαιτούμενος ελάχιστος ρυθμός δειγματοληψίας είναι $2 \cdot f_{TDM}$ [12].

$$f_{TDM} = \frac{1}{2T} = \frac{n}{2T_s} = \frac{1}{2} n f_s \geq n f_m \text{ Hz} \quad (19)$$



Σχήμα 2.13 Συνδυαστική χρήση διαμόρφωσης παλμών και ζωνοδιαβατής διαμόρφωσης για αναλογική μετάδοση [12]



Σχήμα 2.14 Συνδυαστική χρήση πολυπλεξίας επιμερισμού χρόνου και PCM [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ (PULSE WIDTH MODULATION - PWM)

3.1. Εισαγωγή

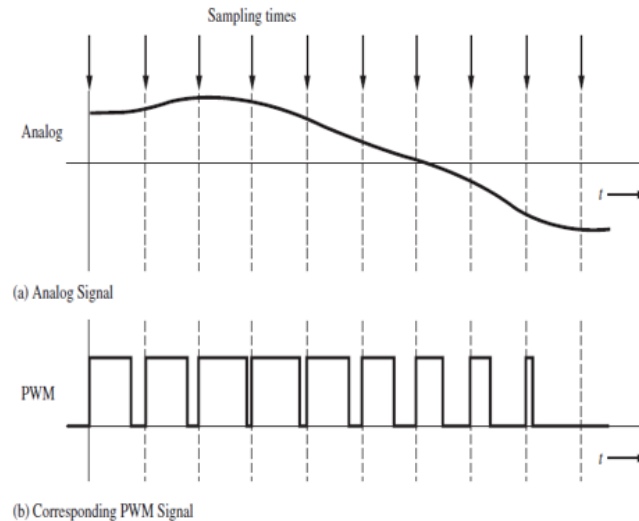
Με την μεταβολή των στοιχείων (εύρος, θέση) που αφορούν τον άξονα χρόνου ενός ψηφιακού σήματος (παλμοσειράς) και με οδηγό τις τιμές δειγματοληψίας ενός αναλογικού σήματος εισόδου μπορούμε να έχουμε διαμόρφωση παλμών ως προς τον χρόνο (Pulse Time Modulation) [12].

Σε αυτή την περίπτωση διακρίνουμε δύο κατηγορίες διαμορφώσεων [13]:

α) την Διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM), εναλλακτικά, μπορούμε να συναντήσουμε στην βιβλιογραφία και τον όρο Pulse Duration Modulation – PDM, δηλαδή διαμόρφωση διάρκειας παλμού

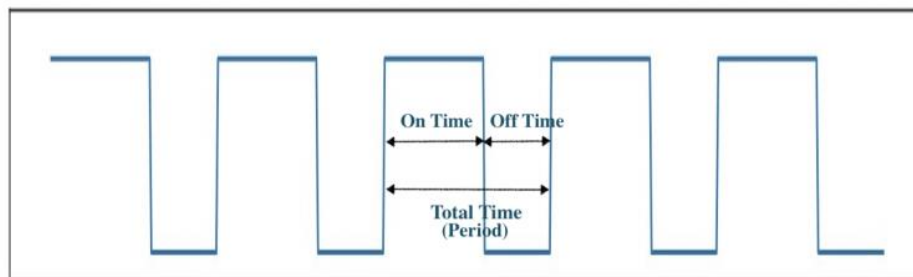
β) την Διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse Position Modulation – PPM)

Για την δειγματοληψία του αναλογικού σήματος εισόδου, το οποίο συνήθως θεωρούμε ότι είναι τριγωνομετρικής μορφής, μπορούμε να έχουμε είτε στιγμιαία είτε φυσική δειγματοληψία.



Σχήμα 3.1 Δημιουργία PWM σήματος [12]

Η Διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM), είναι μια ψηφιακή τεχνολογία που χρησιμοποιεί την ποσότητα ισχύος που παρέχεται σε μια συσκευή η οποία μπορεί να μεταβληθεί. Παράγει αναλογικά σήματα χρησιμοποιώντας μια ψηφιακή πηγή. Ένα σήμα *PWM* είναι βασικά ένα τετράγωνο κύμα που εναλλάσσεται μεταξύ της κατάστασης ενεργοποίησης και απενεργοποίησης (ανοιχτό και κλειστό). Ο κύκλος λειτουργίας και η συχνότητα ενός σήματος *PWM* καθορίζουν τη συμπεριφορά του [13].



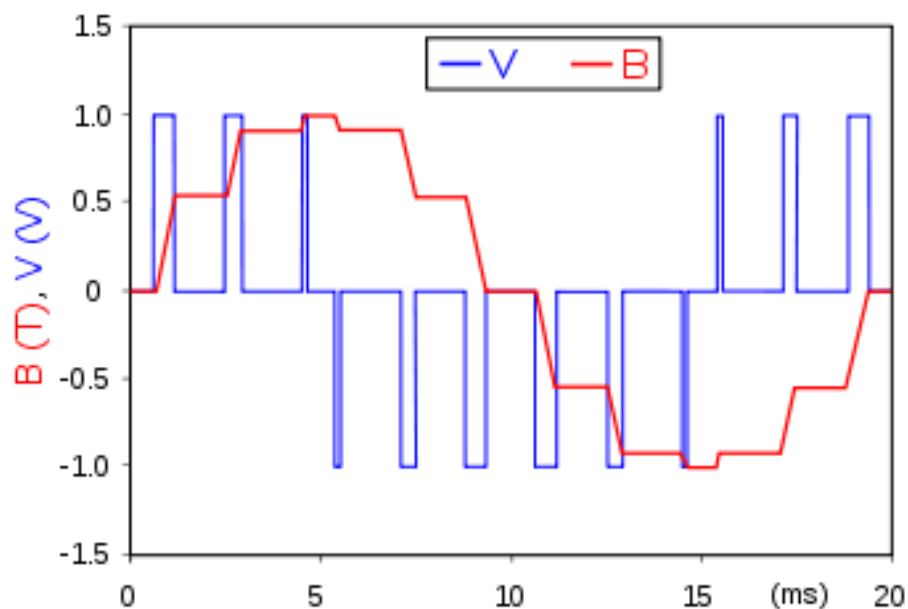
Σχήμα 3.2 Ανάλυση *PWM* σήματος στο πεδίο του χρόνου [16]

Κατά την μέθοδο της *PWM*, μειώνεται η μέση ισχύ που παρέχεται από ένα ηλεκτρικό σήμα τεμαχίζοντάς το αποτελεσματικά σε διακριτά μέρη. Η μέση τιμή της τάσης(και του ρεύματος) που τροφοδοτείται στο φορτίο ελέγχεται μέσω ενός διακόπτη μεταξύ τροφοδοσίας και φορτίου, ο οποίος εναλλάσσεται μεταξύ των θέσεων «ανοιχτό» και «κλειστό» με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό. Όσο περισσότερο διαρκεί η θέση ενεργοποίησης του διακόπτη σε σύγκριση με την διάρκεια απενεργοποίησης, τόσο μεγαλύτερη και η συνολική ισχύς που παρέχεται στο φορτίο [14].

Η μέθοδος *PWM* είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη λειτουργία αδρανειακών φορτίων όπως οι κινητήρες, τους οποίους δεν επηρεάζει τόσο εύκολα αυτή η διακριτή εναλλαγή του διακόπτη, επειδή η αδράνεια τους τους αναγκάζει να αντιδρούν αργά. Η συχνότητα εναλλαγής στην *PWM* πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε να μην επηρεάζει το φορτίο, κάτι που σημαίνει ότι η προκύπτουσα κυματομορφή που γίνεται αντιληπτή από το φορτίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομαλή [15].

Ο ρυθμός (ή η συχνότητα) με τον οποίο δύναται να πραγματοποιείται η εναλλαγή στη παροχή ρεύματος μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το φορτίο

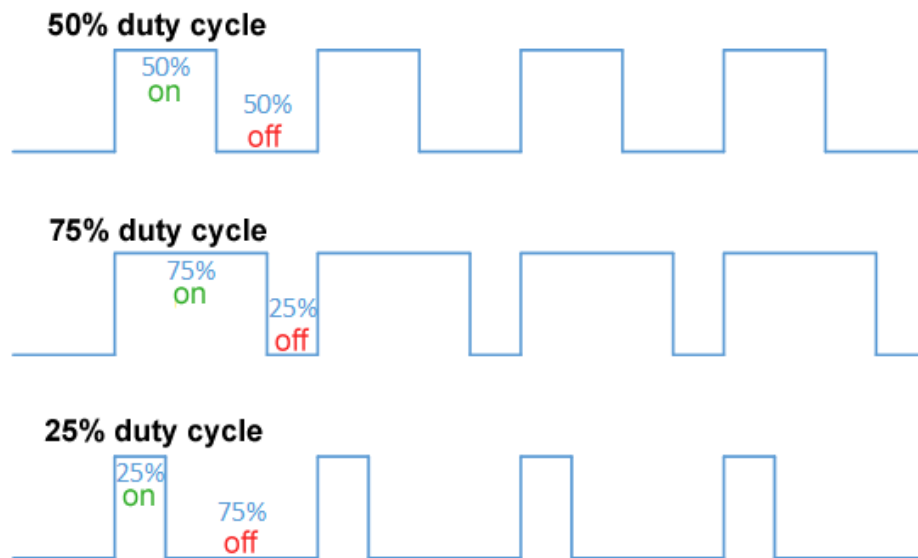
και τον τρόπο εφαρμογής. Για παράδειγμα, η εναλλαγή αυτή πρέπει να γίνεται λίγες φορές το λεπτό σε μια ηλεκτρική κουζίνα, 100 ή 120 Hz (διπλάσια από τη συχνότητα χρήσης) σε ροοστάτη λαμπτήρων, μεταξύ μερικών kHz και δεκάδων kHz για έναν ηλεκτρικό κινητήρα και σε δεκάδες ή εκατοντάδες kHz σε ενισχυτές ήχου και τροφοδοτικά υπολογιστών. Η πολύ χαμηλή απώλεια ισχύος στις συσκευές μεταγωγής αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα της *PWM*. Όταν ένας διακόπτης είναι απενεργοποιημένος, πρακτικά δεν υπάρχει ρεύμα και όταν είναι ενεργοποιημένος και η ισχύς μεταφέρεται στο φορτίο, δεν υπάρχει σχεδόν καμία πτώση τάσης στον διακόπτη. Η απώλεια ισχύος, η οποία είναι το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος, είναι επομένως και στις δύο περιπτώσεις κοντά στο μηδέν. Η *PWM* λειτουργεί επίσης καλά με ψηφιακά χειριστήρια, τα οποία, λόγω της φύσης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, μπορούν εύκολα να ρυθμίσουν τον απαιτούμενο κύκλο λειτουργίας. Η *PWM* έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και σε ορισμένα συστήματα επικοινωνίας, όπου ο κύκλος λειτουργίας της χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση πληροφοριών μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας [16].



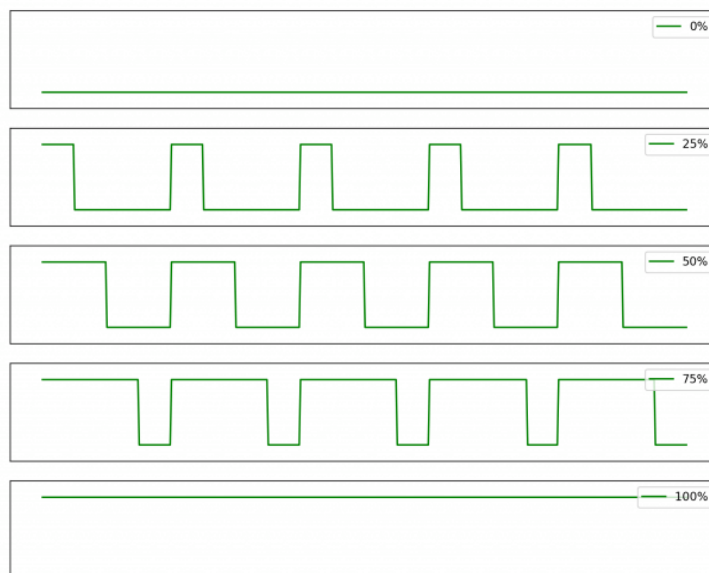
Σχήμα 3.3 Συχνότητα εναλλαγής στην *PWM* σηματοδότηση [17]

3.2. Κύκλος Λειτουργίας

Ο όρος Κύκλος Λειτουργίας περιγράφει την αναλογία του χρόνου «ανοιχτό» ως προς το κανονικό διάστημα ή την «περίοδο» του χρόνου. Σε έναν χαμηλό κύκλο λειτουργίας αντιστοιχεί χαμηλή ισχύ, επειδή η τροφοδοσία είναι απενεργοποιημένη κατά κύριο λόγο στην διάρκειά του. Ο κύκλος λειτουργίας εκφράζεται σε ποσοστό, το 100% σημαίνει ότι ο διακόπτης είναι πλήρως ενεργοποιημένος καθ' όλη την διάρκεια. Κύκλος λειτουργίας 50% σημαίνει ότι η υψηλή κατάσταση διαρκεί το ήμισυ του χρόνου και η χαμηλή κατάσταση διαρκεί το άλλο μισό του χρόνου και παρομοιάζει ένα ιδανικό τετραγωνικό κύμα. Εάν αυτός ο λόγος είναι μεγαλύτερος από 50%, το λογικό υψηλό του σήματος διαρκεί περισσότερο χρόνο από το λογικό χαμηλό και αντίστροφα εάν ο λόγος είναι μικρότερος του 50%. Παρομοίως, ένας κύκλος λειτουργίας 100% σημαίνει ότι το σήμα είναι πάντα ενεργοποιημένο (πλήρης κλίμακα) και ο κύκλος λειτουργίας 0% σημαίνει ότι το σήμα είναι πάντα εκτός λειτουργίας (γείωση) [17],[18].



Σχήμα 3.4 Κύκλος λειτουργίας στην PWM σηματοδότηση [17]



Σχήμα 3.5 Κύκλος λειτουργίας στην PWM σηματοδότηση [16]

3.3. Ιστορική Αναδρομή

Ορισμένες μηχανές (όπως ο κινητήρας μιας ραπτομηχανής) απαιτούν μερική ή μεταβλητή ισχύ. Στο παρελθόν, ο έλεγχος (όπως για παράδειγμα, στο πεντάλ του ποδιού μιας ραπτομηχανής) υλοποιούνταν με τη χρήση ενός ροοστάτη συνδεδεμένου σε σειρά με τον κινητήρα, κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχανόταν η ρύθμιση της ποσότητας του ρεύματος που έρεε μέσω του κινητήρα. Ήταν ένα αναποτελεσματικό σχέδιο, καθώς αυτό σπαταλούσε επίσης ισχύ με την μορφή θερμότητας στο στοιχείο αντίστασης του ροοστάτη, αλλά ήταν ανεκτό επειδή η συνολική ισχύς παρέμενε χαμηλή. Ενώ ο ροοστάτης ήταν μία από τις πολλές μεθόδους ελέγχου της ισχύος, δεν είχε βρεθεί ακόμη μια χαμηλού κόστους και αποτελεσματική μέθοδος μεταγωγής/ρύθμισης ισχύος [19].

Ο μηχανισμός αυτός χρειαζόταν επίσης να μπορεί να λειτουργεί κινητήρες για ανεμιστήρες, αντλίες και ρομποτικούς σερβομηχανισμούς και έπρεπε να είναι αρκετά συμπαγής ώστε να διασυνδέεται με ροοστάτες λαμπτήρων. Έτσι, η *PWM* προέκυψε ως λύση για αυτό το περίπλοκο πρόβλημα [20].

Η εταιρεία Philips, N. V. σχεδίασε ένα σύστημα οπτικής σάρωσης (που δημοσιεύτηκε το 1946) για ηχητικό κομμάτι φιλμ μεταβλητής περιοχής που παρήγαγε την *PWM*. Προοριζόταν για τη μείωση του θορύβου κατά την αναπαραγωγή ενός ηχητικού κομματιού ταινίας. Το προτεινόμενο σύστημα είχε ένα κατώφλι μεταξύ "λευκών" και "μαύρων" τμημάτων του ηχητικού φάσματος [21].

Μια πρώιμη εφαρμογή της *PWM* ήταν στον Sinclair X10, έναν ενισχυτή ήχου 10W που ήταν διαθέσιμος σε μορφή κιτ τη δεκαετία του 1960. Την ίδια περίπου εποχή άρχισε να χρησιμοποιείται η *PWM* στον έλεγχο κινητήρα AC [22].

3.4. Μαθηματική ανάλυση

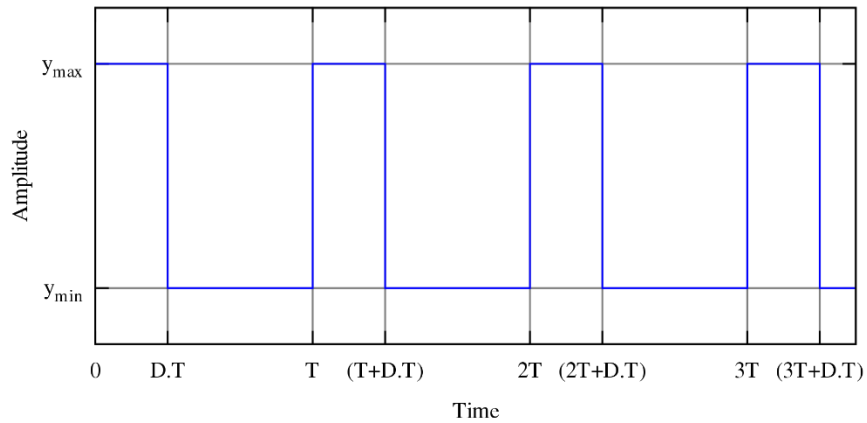
Η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους παλμού (*PWM*) χρησιμοποιεί ένα ορθογώνιο παλμικό κύμα το εύρος παλμού του οποίου διαμορφώνεται και έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της μέσης τιμής της κυματομορφής. Λαμβάνοντας υπόψιν μια κυματομορφή παλμού μορφής $f(t)$, με περίοδο T , ελάχιστη τιμή y_{min} , μέγιστη τιμή y_{max} και κύκλο λειτουργίας D (βλέπε Σχήμα 3.6) η μέση τιμή της κυματομορφής δίδεται από [23]:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (20)$$

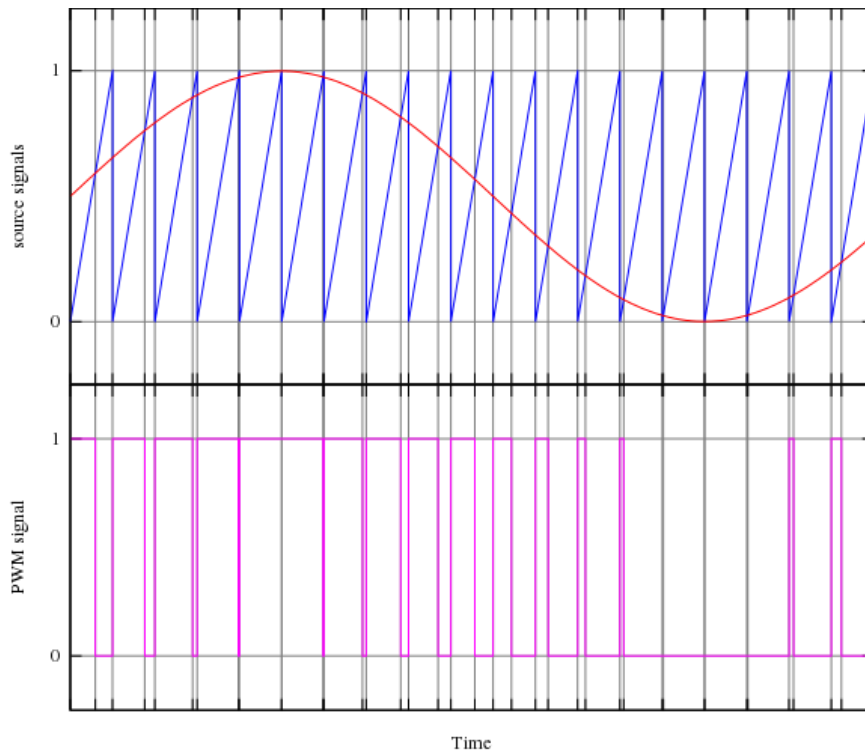
Εφόσον η $f(t)$ είναι ένα παλμικό κύμα, η τιμή του είναι y_{max} για $0 < t < D \cdot T$ και y_{min} για $D \cdot T < t < T$. Οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται [23]:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \\ &= \frac{1}{T} (D \cdot T \cdot y_{max} + T(1 - D)y_{min}) \\ &= Dy_{max} + (1 - D)y_{min} \end{aligned} \quad (21)$$

Η τελευταία έκφραση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω σε περιπτώσεις που ισχύει $y_{min} = 0$, οπότε έχουμε $\bar{y} = Dy_{max}$. Από αυτό εξάγουμε ότι η μέση τιμή του σήματος (\bar{y}) εξαρτάται άμεσα από τον κύκλο λειτουργίας D .



Σχήμα 3.6 Ανάλυση κύκλου λειτουργίας PWM [17]

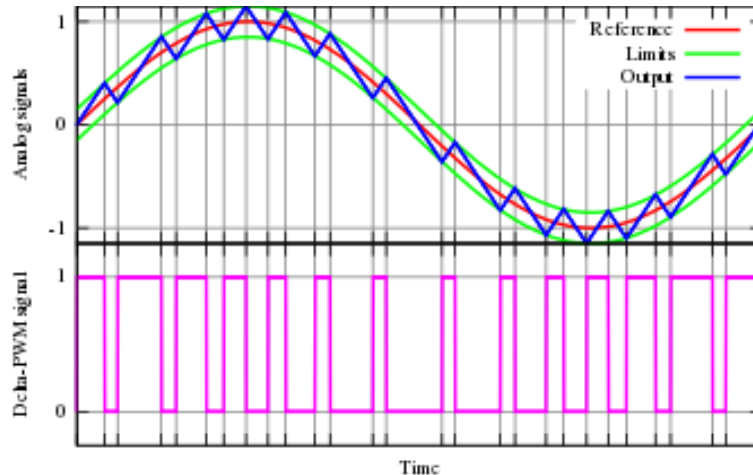


Σχήμα 3.7 Δημιουργία PWM σηματοδότησης με τριγωνική κυματομορφή [17]

Ο απλούστερος τρόπος για να δημιουργήσουμε ένα σήμα *PWM* είναι η διατομή, η οποία απαιτεί μόνο μια κυματομορφή τριγώνου ή πριονωτής μορφής (η οποία δημιουργείται εύκολα χρησιμοποιώντας έναν απλό ταλαντωτή) και έναν συγκριτή. Το σήμα *PWM* βρίσκεται σε υψηλή κατάσταση όταν η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μεγαλύτερη από την κυματομορφή διαμόρφωσης, διαφορετικά βρίσκεται σε χαμηλή κατάσταση.

3.5. Διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation)

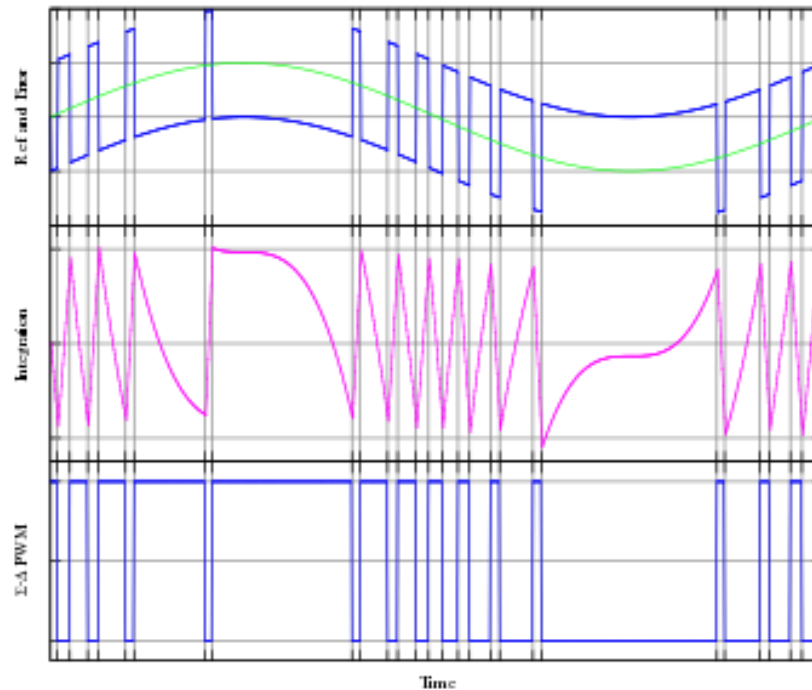
Κατά τη χρήση της διαμόρφωσης δέλτα για τον έλεγχο *PWM*, το σήμα εξόδου ενσωματώνεται και το αποτέλεσμα συγκρίνεται με συγκεκριμένα όρια. Τα όρια αυτά αντιστοιχούν σε ένα σήμα αναφοράς που μετατοπίζεται από μια σταθερά. Κάθε φορά που το ολοκλήρωμα του σήματος εξόδου φτάνει σε ένα από τα όρια, το σήμα *PWM* αλλάζει κατάσταση [24].



Σχήμα 3.8 Χρήση διαμόρφωσης δέλτα για την *PWM* σηματοδότηση [17]

3.6. Διαμόρφωση Δέλτα-Σίγμα (Delta-Sigma Modulation)

Στη διαμόρφωση δέλτα-σίγμα (delta-sigma modulation) ως μέθοδο ελέγχου *PWM*, πραγματοποιείται η αφαίρεση του σήματος εξόδου από ένα σήμα αναφοράς σχηματίζοντας ένα σήμα σφάλματος. Αυτό το σφάλμα ενσωματώνεται και όταν το ολοκλήρωμα του σφάλματος υπερβαίνει τα όρια, η έξοδος αλλάζει κατάσταση [24],[25].



Σχήμα 3.9 Χρήση διαμόρφωσης δέλτα-σίγμα για την PWM σηματοδότηση [17]

3.7. Διαμόρφωση Διανύσματος Χώρου (Space Vector Modulation)

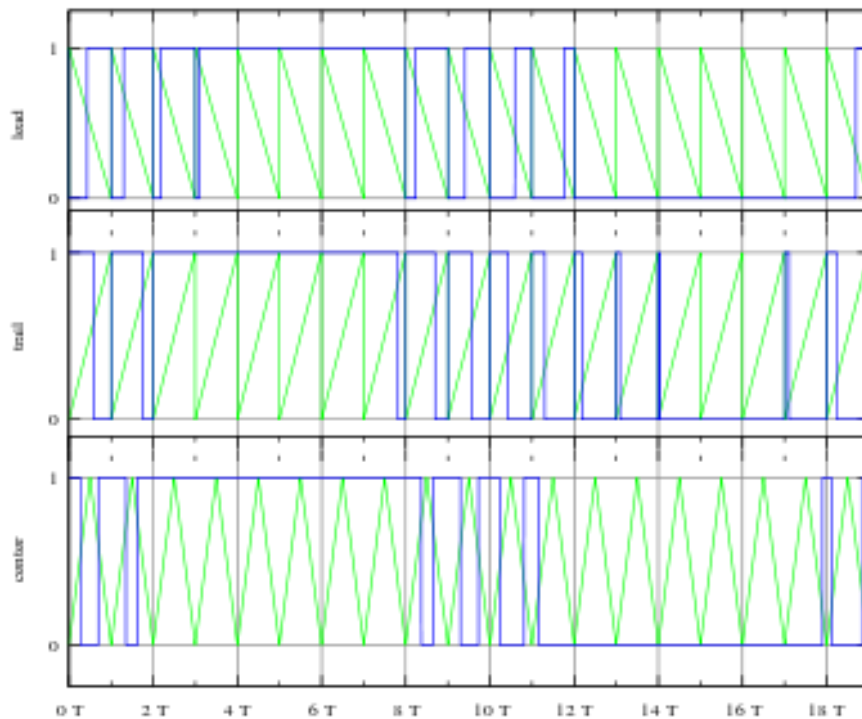
Η διαμόρφωση διανύσματος χώρου (space vector modulation) αποτελείται από έναν αλγόριθμο ελέγχου *PWM* για παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος πολλαπλών φάσεων, στον οποίο λαμβάνει χώρα σε τακτά χρονικά διαστήματα δειγματοληψία του σήματος αναφοράς.

Μετά από κάθε δείγμα, επιλέγονται μη μηδενικά ενεργά διανύσματα μεταγωγής δίπλα στο διάνυσμα αναφοράς και επιλέγονται ένα ή περισσότερα από τα μηδενικά διανύσματα μεταγωγής για το κατάλληλο κλάσμα της περιόδου δειγματοληψίας προκειμένου να συντεθεί το σήμα αναφοράς ως ο μέσος όρος των χρησιμοποιούμενων διανυσμάτων [23]-[25].

3.8. Τύποι διαμόρφωσης PWM

Παρατηρούνται 3 τύποι διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) [23]-[25]:

- 1) Το κέντρο παλμού μπορεί να μείνει σταθερό στο κεντρικά του χρονικού παραθύρου και να μεταβάλλονται και οι δύο άκρες του παλμού για συμπίεση ή επέκταση του πλάτους.
- 2) Το αριστερό(μπροστινό) άκρο να μένει σταθερό στο χρονικό παράθυρο και το δεξί άκρο(της ουράς) να μεταβάλλεται.
- 3) Το δεξί άκρο (της ουράς) να μένει σταθερό και το αριστερό(μπροστινό) άκρο να μεταβάλλεται.



Σχήμα 3.10 Τύποι διαμόρφωσης PWM [17]

3.9. Φάσμα

Τα φάσματα που προκύπτουν (και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις) είναι σχεδόν όμοια και το καθένα τους περιέχει μια συνιστώσα συνεχούς ρεύματος—μια πλευρική ζώνη βάσης που περιέχει το διαμορφωτικό σήμα και τους διαμορφωμένους

φορείς φάσης σε κάθε αρμονική της συχνότητας του παλμού. Τα πλάτη των αρμονικών ομάδων περιορίζονται από μια συνάρτηση $\sin x/x$ και εκτείνονται στο άπειρο. Το άπειρο εύρος ζώνης προκαλείται από τη μη γραμμική λειτουργία του διαμορφωτή εύρους παλμού. Κατά συνέπεια, ένα ψηφιακό *PWM* πάσχει από παραμόρφωση aliasing που μειώνει σημαντικά τη δυνατότητα εφαρμογής του στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας. Περιορίζοντας το εύρος ζώνης του πυρήνα *PWM*, μπορούμε να περιορίσουμε σημαντικά έως και να αποφύγουμε τα φαινόμενα aliasing [25].

Αντίθετα, ο έλεγχος *PWM* μέσω διαμόρφωσης δέλτα είναι μια τυχαία διαδικασία που παράγει συνεχές φάσμα χωρίς διακριτές αρμονικές.

3.10. Θεώρημα δειγματοληψίας PWM(PWM Sampling Theorem)

Η διαδικασία μετατροπής *PWM* είναι μη γραμμική και γενικά υποτίθεται ότι παρουσιάζει μια ατελή ανάκτηση σήματος φίλτρου χαμηλής διέλευσης. Το θεώρημα δειγματοληψίας της *PWM* δείχνει ότι η μετατροπή *PWM* μπορεί να είναι και τέλεια. Το θεώρημα δηλώνει ότι "Οποιοδήποτε σήμα περιορισμένης ζώνης βάσης εντός $\pm 0,637$ μπορεί να αναπαρασταθεί από μια κυματομορφή διαμόρφωσης εύρους παλμού (*PWM*) με μοναδιαίο πλάτος. Ο αριθμός των παλμών στην κυματομορφή είναι ίσος με τον αριθμό των δειγμάτων Nyquist και ο περιορισμός κορυφής είναι ανεξάρτητος από το αν η κυματομορφή είναι δύο επιπέδων ή τριών επιπέδων" [26].

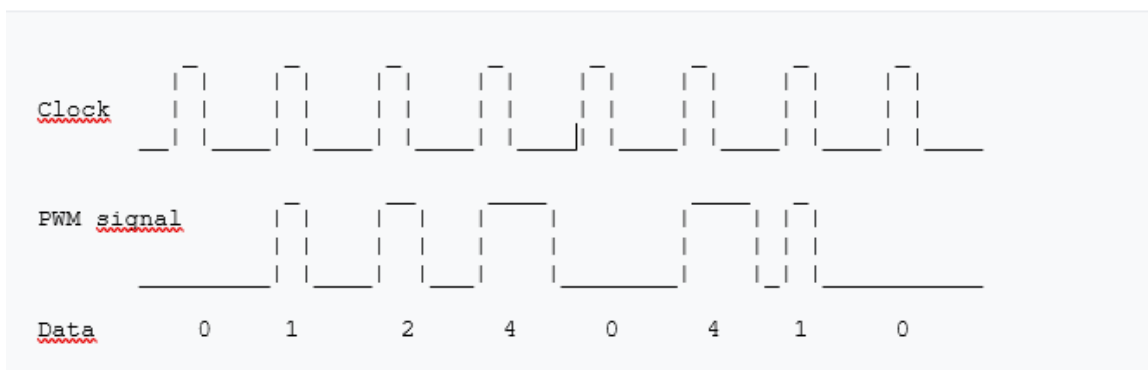
Θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist-Shannon [27]: "Εάν υπάρχει ένα σήμα που περιορίζεται τέλεια σε εύρος ζώνης f_0 , τότε μπορείτε να συλλέξετε όλες τις πληροφορίες που υπάρχουν σε αυτό το σήμα δειγματίζοντάς το σε διακριτούς χρόνους, εφόσον όμως, ο ρυθμός δειγματοληψίας σας είναι μεγαλύτερος από $2f_0$."

3.11. Εφαρμογές της μεθόδου PWM

3.11.1. Τηλεπικοινωνίες

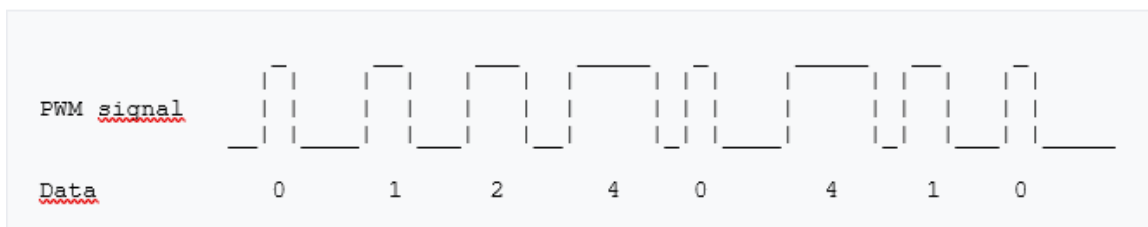
Στις τηλεπικοινωνίες, η *PWM* είναι μια τεχνική διαμόρφωσης σήματος όπου τα πλάτη των παλμών αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές δεδομένων που κωδικοποιούνται στο ένα άκρο και αποκωδικοποιούνται στο άλλο [12].

Παλμοί διαφορετικού μήκους (η πληροφορία καθ' εαυτή) θα αποστέλλονται σε τακτά χρονικά διαστήματα (η φέρουσα συχνότητα της διαμόρφωσης).



Σχήμα 3.11 Διαμόρφωση PWM σήματος με χρήση clock για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές [18]

Δεν είναι απαραίτητο, όμως, να συμπεριληφθεί ένα σήμα ρολογιού, διότι το μπροστινό άκρο του σήματος δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρολόι εάν προστεθεί μια μικρή μετατόπιση σε κάθε τιμή δεδομένων προκειμένου να αποφευχθεί μια τιμή δεδομένων με παλμό μηδενικού μήκους [13].



Σχήμα 3.12 Διαμόρφωση PWM σήματος χωρίς χρήση clock για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές [18]

3.11.2. Παροχή Ενέργειας

Η *PWM* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ποσότητας ισχύος που παρέχεται σε ένα φορτίο αποφεύγοντας τις απώλειες που θα προκύπταν από μια γραμμική παροχή ισχύος με μέσα αντίστασης. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ότι η ισχύς που αντλείται από το φορτίο δεν είναι σταθερή αλλά μάλλον ασυνεχής, το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην ενέργεια που παρέχεται στο φορτίο η οποία επίσης είναι ασυνεχής. Ωστόσο, το φορτίο μπορεί να είναι επαγωγικό και με επαρκώς υψηλή συχνότητα η σειρά παλμών μπορεί να εξομαλυνθεί και να ανακτηθεί η μέση αναλογική κυματομορφή (μας δίνεται η δυνατότητα και εφόσον είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον πρόσθετα παθητικά ηλεκτρονικά φίλτρα). Κατά αυτόν τον τρόπο η ροή ισχύος στο φορτίο μπορεί να είναι συνεχής. Αντίθετα, η ροή ισχύος από την τροφοδοσία δεν είναι σταθερή και στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται κάποιας μορφής αποθήκευση ενέργειας από την πλευρά τροφοδοσίας. (Στην περίπτωση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, ένας πυκνωτής για την απορρόφηση ενέργειας που αποθηκεύεται στην (ως επί τω πλείστον παρασιτική) επαγωγή της πλευράς τροφοδοσίας) [28].

Υψηλής συχνότητας συστήματα ελέγχου ισχύος *PWM* κατασκευάζονται εύκολα με διακόπτες ημιαγωγών. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, παρουσιάζεται σχεδόν μηδενική ισχύς στον διακόπτη και στην κατάσταση ενεργοποίησης και όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων μεταξύ των καταστάσεων ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι μη μηδενικά και έτσι η ισχύς καταναλώνεται στους διακόπτες. Αλλάζοντας γρήγορα την κατάσταση μεταξύ της πλήρους ενεργοποίησης και της πλήρους απενεργοποίησης (συνήθως λιγότερο από 100 nanoseconds), η επαγωγή ισχύος στους διακόπτες μπορεί να είναι αρκετά χαμηλή σε σύγκριση με την ισχύ που παρέχεται στο φορτίο [29].

Οι σύγχρονοι διακόπτες ημιαγωγών όπως τα MOSFET ή τα διπολικά τρανζίστορ με μόνωση (IGBT) είναι τα πλέον κατάλληλα εξαρτήματα για ελεγκτές υψηλής απόδοσης. Οι μετατροπείς συχνότητας που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να πετύχουν απόδοση άνω του 98%.

Τα τροφοδοτικά μεταγωγής έχουν χαμηλότερη απόδοση λόγω των χαμηλών επιπέδων τάσης εξόδου (συχνά απαιτούνται ακόμη και λιγότερα από 2V για μικροεπεξεργαστές), αλλά και πάλι μπορεί να επιτευχθεί μια απόδοση μεγαλύτερη του 70–80% [30].

Οι ρυθμιστές των μεταβλητής ταχύτητας ανεμιστήρων υπολογιστών χρησιμοποιούν συνήθως τη *PWM*, καθώς είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με ένα ποτενσιόμετρο ή έναν ροοστάτη. (Κανένα από τα δύο δεν είναι πρακτικό να λειτουργεί ηλεκτρονικά, θα απαιτούσαν την ύπαρξη ενός μικρού κινητήρα κίνησης.)

Οι ροοστάτες φωτός για οικιακή χρήση χρησιμοποιούν έναν συγκεκριμένο τύπο ελέγχου *PWM*. Οι ροοστάτες φωτός οικιακής χρήσης αποτελούνται από τυπικά ηλεκτρονικά κυκλώματα που καταστέλλουν τη ροή ρεύματος κατά τη διάρκεια καθορισμένων τμημάτων του κάθε κύκλου της τάσης της γραμμής AC. Η ρύθμιση της φωτεινότητας του φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός είναι απλώς θέμα ρύθμισης του σε ποια τάση (ή φάση) στον μισό κύκλο του εναλλασσόμενου ρεύματος ο ροοστάτης αρχίζει να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα στην πηγή φωτός (π.χ. χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρονικό διακόπτη όπως π.χ. ένα triac). Σε αυτήν την περίπτωση, ο κύκλος λειτουργίας *PWM* είναι ο λόγος του χρόνου αγωγιμότητας προς τη διάρκεια του μισού του κύκλου AC που ορίζεται από τη συχνότητα της τάσης γραμμής AC (50Hz ή 60Hz ανάλογα τη χώρα) [31].

Αυτοί οι σχετικά απλοί τύποι ροοστάτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά με πηγές αδρανούς (ή σχετικά αργής αντίδρασης) φωτός όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, για παράδειγμα, για τους οποίους η πρόσθετη διαμόρφωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προκαλείται από το ροοστάτη προκαλεί μόνο αμελητέες πρόσθετες διακυμάνσεις στο εκπεμπόμενο φως. Ωστόσο, ορισμένοι άλλοι τύποι πηγών φωτός, όπως οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED), οι οποίοι ανάβουν και σβήνουν εξαιρετικά γρήγορα θα τρεμόπαιζαν αισθητά εάν τροφοδοτούνταν με τάσεις κίνησης χαμηλής συχνότητας. Τα αντιληπτά φαινόμενα τρεμοπαίγματος από τέτοιες πηγές φωτός ταχείας απόκρισης μπορούν να μειωθούν αυξάνοντας τη συχνότητα PWM [32].

Εάν οι διακυμάνσεις του φωτός είναι αρκετά γρήγορες, το ανθρώπινο οπτικό σύστημα δεν μπορεί πλέον να τις αντιληφθεί και το μάτι αντιλαμβάνεται τη μέση ένταση χρόνου χωρίς τρεμόπαιγμα.

Στις ηλεκτρικές κουζίνες, η συνεχής μεταβλητή ισχύς εφαρμόζεται στα θερμαντικά στοιχεία, όπως η εστία ή η σχάρα, χρησιμοποιώντας μια συσκευή γνωστή ως *simmerstat*. Αυτό αποτελείται από έναν θερμικό ταλαντωτή που λειτουργεί με περίπου δύο κύκλους ανά λεπτό και ο μηχανισμός μεταβάλλει τον κύκλο λειτουργίας ανάλογα με τη ρύθμιση του κουμπιού. Η θερμική χρονική σταθερά των θερμαντικών στοιχείων είναι αρκετά λεπτά, έτσι ώστε οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας να είναι πολύ μικρές για να ληφθούν σοβαρά υπόψιν.

3.11.3. Ρύθμιση τάσης

Η *PWM* χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή αποδοτικών ρυθμιστών τάσης. Μεταβάλλοντας την τάση στο φορτίο με τον κατάλληλο κύκλο λειτουργίας, η έξοδος προσεγγίζει μια τάση στο επιθυμητό επίπεδο επίτευξης. Ο θόρυβος μεταγωγής που παρουσιάζεται συνήθως φιλτράρεται με επαγωγέα και πυκνωτή.

Μια εκ των μεθόδων μετρά την τάση εξόδου. Όταν είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή, ανάβει τον διακόπτη. Αντίστροφα, όταν η τάση εξόδου είναι πάνω από την επιθυμητή, κλείνει τον διακόπτη.

3.11.4. Ηχητικά εφέ και ενίσχυση ήχου

Μεταβάλλοντας τον κύκλο λειτουργίας μιας κυματομορφής παλμού σε ένα όργανο σύνθεσης δημιουργεί χρήσιμες διακυμάνσεις του ηχοχρώματος. Μερικά synthesizers διαθέτουν ένα trimmer κύκλου λειτουργίας για τις εξόδους των τετραγωνικών κυμάτων τους, το σημείο 50% (πραγματικό τετραγωνικό κύμα) είναι διακριτικό με το αντί, επειδή οι ζυγές αρμονικές ουσιαστικά εξαφανίζονται στο ποσοστό του 50%. Τα κύματα παλμών, συνήθως 50%, 25% και 12,5%, συνθέτουν τα soundtrack των κλασικών βιντεοπαιχνιδιών. Ο όρος *PWM* όπως χρησιμοποιείται στη σύνθεση ήχου (μουσικής) αναφέρεται στην αναλογία μεταξύ του υψηλού και του

χαμηλού επιπέδου που διαμορφώνεται δευτερευόντως με έναν ταλαντωτή χαμηλής συχνότητας. Αυτό δίνει ένα ηχητικό εφέ παρόμοιο με το chorus(ρεφρέν) ή τους ελαφρώς ξεκούρδιστους ταλαντωτές που παίζονται μαζί. (Στην πραγματικότητα, το *PWM* είναι ισοδύναμο με το άθροισμα δύο κυμάτων πριονωτής μορφής με το ένα από αυτά ανεστραμμένο) [28].

Μια νέα κατηγορία ενισχυτών ήχου που βασίζονται στην αρχή *PWM* γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Ονομάζονται ενισχυτές κατηγορίας D και παράγουν ένα ισοδύναμο *PWM* του αναλογικού σήματος εισόδου το οποίο τροφοδοτείται στο μεγάφωνο μέσω ενός κατάλληλου δικτύου φίλτρων για να μπλοκάρει τον φορέα και να ανακτήσει τον αρχικό ήχο. Αυτοί οι ενισχυτές χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλές τιμές απόδοσης ($\geq 90\%$) και συμπαγές μέγεθος/ελαφρύ βάρος για μεγάλες εξόδους ισχύος. Για μερικές δεκαετίες, οι βιομηχανικοί και στρατιωτικοί ενισχυτές PWM χρησιμοποιούνταν από κοινού και συχνά για την λειτουργία σερβοκινητήρων. Στις μηχανές MRI, τα πηνία διαβάθμισης πεδίου λειτουργούν με ενισχυτές *PWM* υψηλής σχετικά ισχύος [29].

Ιστορικά, μια ακατέργαστη μορφή *PWM* έχει χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή ψηφιακού ήχου PCM στο ηχείο των υπολογιστών, το οποίο υλοποιείται από δύο μόνο επίπεδα τάσης, συνήθως 0V και 5V. Με προσεκτικό συγχρονισμό της διάρκειας των παλμών και βασιζόμενοι στις ιδιότητες φυσικού φιλτραρίσματος του ηχείου (περιορισμένη απόκριση συχνότητας, αυτεπαγωγή, κ.λπ.) ήταν δυνατό να επιτευχθεί μια κατά προσέγγιση αναπαραγωγή δειγμάτων μονοφωνικού PCM, αν και σε πολύ χαμηλή ποιότητα, και με πολύ διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των διαφορετικών υλοποιήσεων [30].

Πρόσφατα, εισήχθη η μέθοδος κωδικοποίησης ήχου Direct Stream Digital, η οποία χρησιμοποιεί μια γενικευμένη μορφή διαμόρφωσης πλάτους παλμού που ονομάζεται διαμόρφωση πυκνότητας παλμού. Λαμβάνει χώρα σε αρκετά υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας (συνήθως της τάξης των MHz) και καλύπτει ολόκληρο το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων με ιδιαίτερα επαρκή πιστότητα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται στη μορφή SACD και η αναπαραγωγή του κωδικοποιημένου σήματος

ήχου είναι ουσιαστικά παρόμοια με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στους ενισχυτές κατηγορίας D.

3.11.5. Ηλεκτρολογικά

Τα σήματα SPWM (Sine-triangle pulse width modulation) χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μικρο-μετατροπέων (χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλιακής και αιολικής ενέργειας). Αυτά τα σήματα μεταγωγής τροφοδοτούνται στα FET που χρησιμοποιούνται στη συσκευή. Η απόδοση της συσκευής εξαρτάται από το αρμονικό περιεχόμενο του σήματος *PWM*. Πραγματοποιείται πολλή έρευνα για την εξάλειψη των ανεπιθύμητων αρμονικών και τη βελτίωση της θεμελιώδους αντοχής, μερικές από τις οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση ενός τροποποιημένου σήματος φορέα αντί ενός κλασικού σήματος πριονωτής μορφής προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες ισχύος και να βελτιωθεί η απόδοση. Μια άλλη κοινή εφαρμογή είναι στη ρομποτική όπου τα σήματα *PWM* χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας του ρομπότ ελέγχοντας τους κινητήρες του [31].

3.11.6. Ενδείξεις LED που αναβοσβήνουν ελαφρώς

Οι τεχνικές *PWM* χρησιμοποιούνται συνήθως για να κάνουν κάποια ένδειξη (όπως ένα LED) να "αναβοσβήνει απαλά". Το φως μεταβάλλεται σιγά σιγά από το σκοτάδι στη πλήρη ένταση και σιγά σιγά εξασθενεί ξανά στο σκοτάδι. Μετά η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται. Η περίοδος θα είναι πολλά ελαφρά αναβοσβησίματα ανά δευτερόλεπτο έως αρκετά δευτερόλεπτα για μία αναλαμπή. Μια φωτεινή ένδειξη αυτού του τύπου δεν θα ενοχλούσε τόσο πολύ όσο μια φωτεινή ένδειξη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης "που αναβοσβήνει έντονα". Η ενδεικτική λυχνία στο Apple iBook G4, PowerBook 6,7 (2005) ήταν αυτού του τύπου. Αυτό το είδος της ένδειξης ονομάζεται επίσης "παλμική λάμψη".

3.11.7. Άμεσος έλεγχος ροπής (DTD)

Ο άμεσος έλεγχος ροπής(DTD) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κινητήρων AC και σχετίζεται στενά με τη διαμόρφωση δέλτα. Η ροπή του κινητήρα και η μαγνητική ροή εκτιμώνται και ελέγχονται ώστε να παραμείνουν εντός των αποδεκτών ζωνών υστέρησής τους ενεργοποιώντας έναν νέο συνδυασμό των διακοπών ημιαγωγών της συσκευής κάθε φορά που οποιοδήποτε σήμα τείνει να αποκλίνει από τη ζώνη του [32].

3.11.8. Αναλογία χρόνου (Time Proportioning)

Πολλά είναι τα ψηφιακά κυκλώματα που μπορούν να παράγουν σήματα *PWM* (π.χ. η πλειοψηφία των μικροελεγκτών έχουν εξόδους *PWM*). Συνήθως χρησιμοποιούν έναν μετρητή που αυξάνεται περιοδικά (συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με το ρολόι του κυκλώματος) και επαναφέρεται στο τέλος κάθε περιόδου του *PWM*. Την στιγμή κατά την οποία η τιμή του μετρητή είναι μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς, η έξοδος *PWM* αλλάζει κατάσταση από υψηλή σε χαμηλή (ή από χαμηλή σε υψηλή). Αυτή η τεχνική αναφέρεται ως αναλογία χρόνου, ιδιαίτερα ως έλεγχος αναλογίας χρόνου – ποιά αναλογία ενός σταθερού χρόνου κύκλου δαπανάται σε υψηλή κατάσταση.

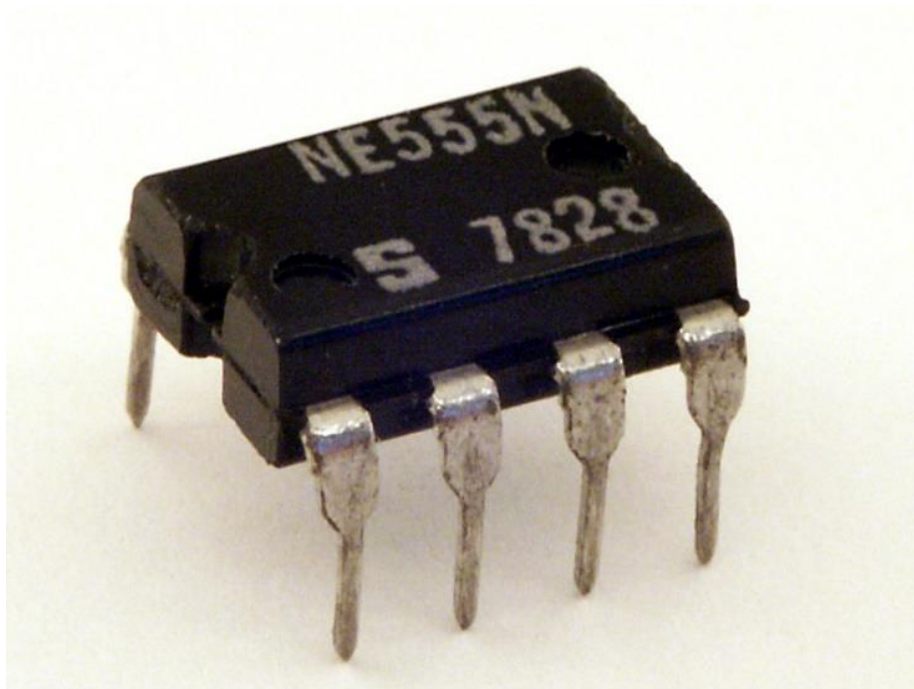
Ο αυξανόμενος και περιοδικά μηδενικός μετρητής είναι η διακριτή έκδοση της μεθόδου τομής πριονωτής μορφής. Ο αναλογικός συγκριτής της μεθόδου τομής γίνεται με μία απλή ακέραια σύγκριση μεταξύ της τρέχουσας τιμής μετρητή και της ψηφιακής (πιθανώς ψηφιοποιημένης) τιμής αναφοράς. Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να μεταβληθεί μόνο σε διακριτά βήματα, ως συνάρτηση της ανάλυσης του μετρητή. Ωστόσο, ένας μετρητής υψηλής ανάλυσης μπορεί να προσφέρει μια αρκετά ικανοποιητική απόδοση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

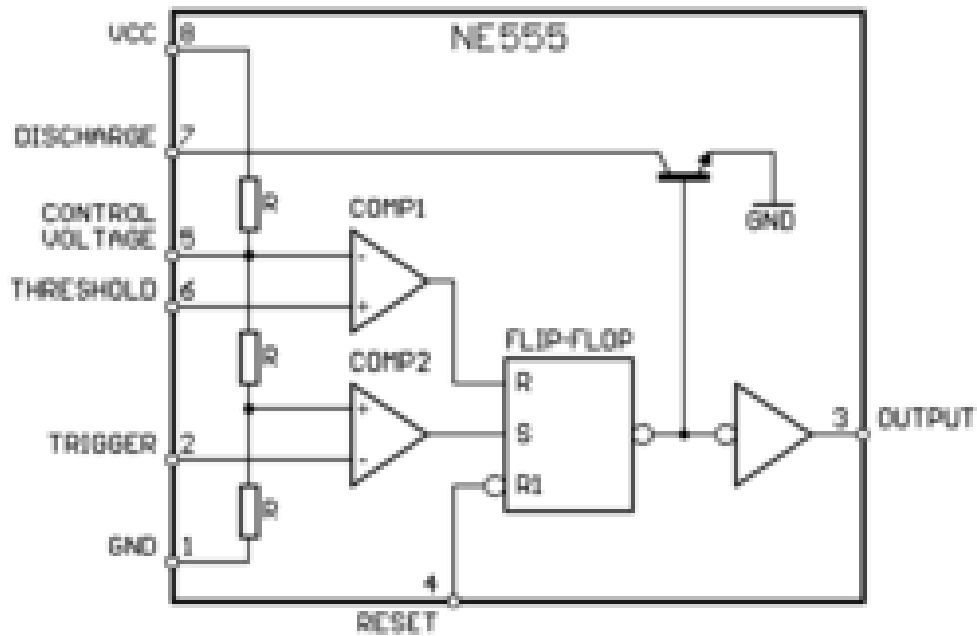
ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΩΜ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ

4.1. IC Διακόπτης 555

Ο IC χρονοδιακόπτης 555 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (τσιπ) που χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών χρονοδιακόπτη, καθυστέρησης, παραγωγής παλμών και ταλαντωτή. Τα παράγωγα παρέχουν δύο (556) ή τέσσερα (558) κυκλώματα χρονοισμού σε ένα πακέτο. Το σχέδιο κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1972 από τη Signetics. Από τότε, πολλές εταιρείες έχουν κατασκευάσει τους αρχικούς διπολικούς χρονοδιακόπτες, καθώς και παρόμοιους χρονομετρητές CMOS χαμηλής κατανάλωσης. Σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις το 2017, περισσότερα από ένα δισεκατομμύριο 555 χρονόμετρα παράγονται ετησίως και ο σχεδιασμός αυτός ήταν "πιθανώς το πιο δημοφιλές ολοκληρωμένο κύκλωμα που κατασκευάστηκε ποτέ" [33].



Εικόνα 4.1. Το τσιπ 555 σε συσκευασία DIP 8 ακίδων κατασκευής Signetics [36]



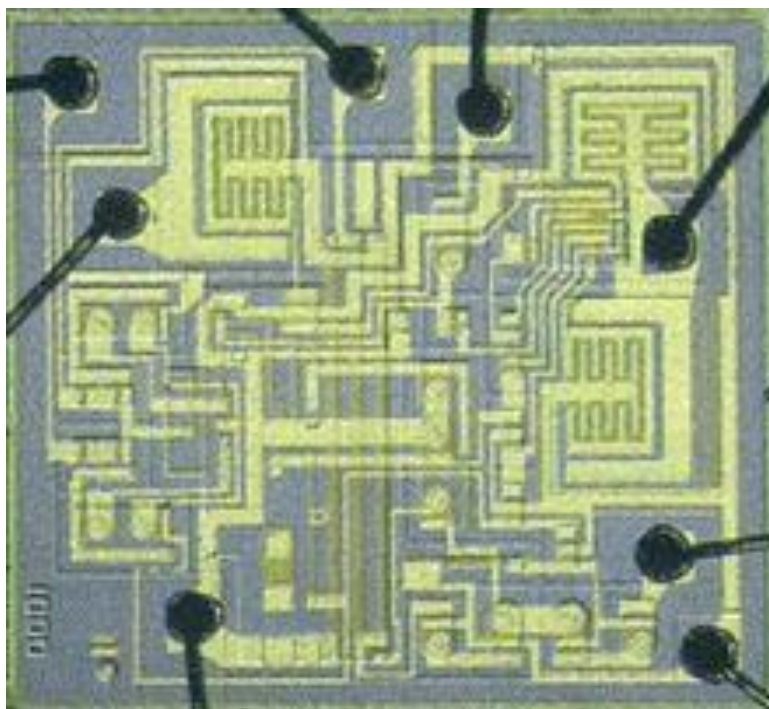
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα του Εσωτερικού Μπλοκ [36]

4.1.1. Σχεδιασμός

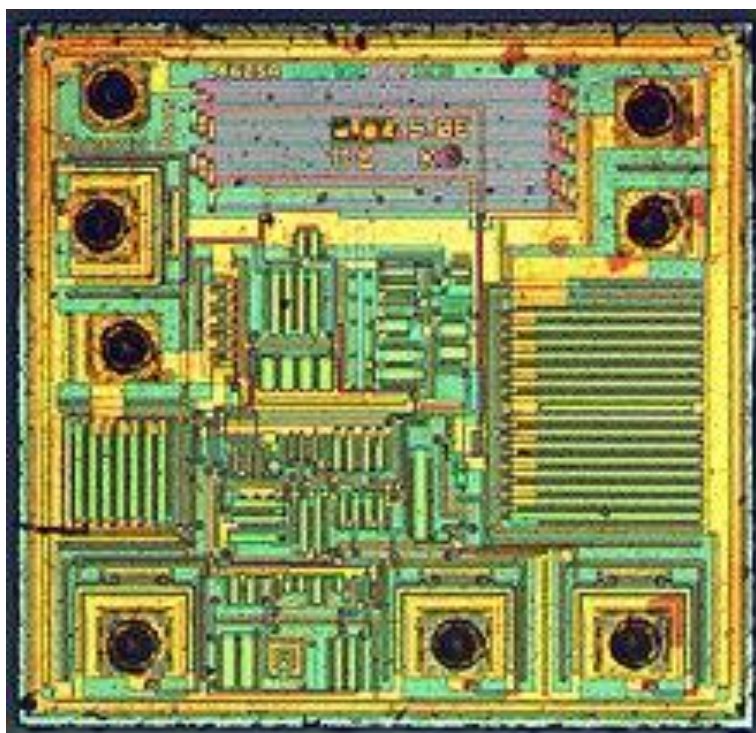
Ανάλογα με τον κατασκευαστή, το τυπικό πακέτο 555 ενσωματώνει το ισοδύναμο 25 τρανζίστορ, 2 διόδων και 15 αντιστάσεων σε ένα τσιπ σιλικόνης συσκευασμένο σε ένα πακέτο διπλής σειράς 8 ακίδων (DIP-8). Οι διαθέσιμες παραλλαγές περιλαμβάνουν το 556 (ένα DIP-14 που συνδυάζει δύο πλήρη 555 σε ένα τσιπ), και τα 558 / 559 (και οι δύο παραλλαγές είναι ένα DIP-16 που συνδυάζει τέσσερα χρονομέτρα μειωμένης λειτουργικότητας σε ένα τσιπ) [33]-[39].

Τα εξαρτήματα NE555 λειτουργούν στην εμπορική περιοχή θερμοκρασιών, από 0 °C έως +70 °C, και το εξάρτημα αριθμού SE555 λειτουργεί στο στρατιωτικό εύρος θερμοκρασίας, από -55 °C έως +125 °C. Τα τσιπ αυτά είναι διαθέσιμα τόσο σε μεταλλικό κουτί υψηλής αξιοπιστίας (συσκευασία T) όσο και σε χαμηλότερου κόστους κουτί από εποξειδικό πλαστικό (συσκευασία V). Έτσι, οι πλήρεις αριθμοί εξαρτημάτων είναι NE555V, NE555T, SE555V και SE555T [33]-[39].

Επίσης, οι εκδόσεις CMOS χαμηλής κατανάλωσης του 555 είναι πλέον διαθέσιμες, όπως το Intersil ICM7555 και το Texas Instruments LMC555, TLC555, TLC551 [33]-[39].



Εικόνα 4.2 Σιλικονούχα θήκη του πρώτου τσιπ 555 (1971)[39]



Εικόνα 4.3: Θήκη ενός τσιπ CMOS NXP ICM7555 [39]

4.1.2. Τρόποι Λειτουργίας

Το 555 IC έχει τους ακόλουθους τρόπους λειτουργίας [40]:

1. **Ασταθής (Ελεύθερη) Λειτουργία:** Το 555 μπορεί να λειτουργήσει ως ηλεκτρονικός ταλαντωτής. Οι χρήσεις του περιλαμβάνουν τα φλας LED και λαμπτήρων, τη δημιουργία παλμών, τα λογικά ρολόγια, την παραγωγή τόνου, τους συναγερμούς ασφαλείας, τη διαμόρφωση θέσης παλμού και ούτω καθεξής. Το 555 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ένα απλό σύστημα ADC, μετατρέποντας μια αναλογική τιμή σε μήκος παλμού (π.χ., η επιλογή ενός θερμίστορ ως αντίστασης χρονισμού επιτρέπει τη χρήση του 555 σε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας με την περίοδο του παλμού εξόδου να καθορίζεται από τη θερμοκρασία). Στη συνέχεια με την χρήση ενός κυκλώματος που βασίζεται σε μικροεπεξεργαστή μπορεί να μετατρέψει την περίοδο παλμού σε θερμοκρασία, να τη γραμμικοποιήσει και ακόμη και να παρέχει μέσα βαθμονόμησης.
2. **Λειτουργία Monostable (one-shot):** Σε αυτή τη λειτουργία, το 555 λειτουργεί ως γεννήτρια παλμών "one-shot". Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν τα χρονόμετρα, την ανίχνευση των παλμών που λείπουν, τους διακόπτες χωρίς αναπήδηση, τους διακόπτες αφής, τους διαιρέτες συχνότητας, τη μέτρηση χωρητικότητας, την διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) και ούτω καθεξής.
3. **Λειτουργία Bistable (flip-flop):** Το 555 λειτουργεί ως SR flip-flop. Οι χρήσεις περιλαμβάνουν τους μανδαλωτούς διακόπτες χωρίς αναπήδηση.
4. **Λειτουργία σκανδάλης Schmitt (inverter):** Το 555 λειτουργεί ως πύλη μετατροπέα σκανδάλης Schmitt που μετατρέπει μια θορυβώδη είσοδο σε καθαρή ψηφιακή έξοδο.

4.1.3. Ασταθής (Ελεύθερη) Λειτουργία

Στο Case Study που παρουσιάζουμε στην συνέχεια χρησιμοποιείται η *Ασταθής Λειτουργία* για την παραγωγή ενός ηλεκτρικού κυκλώματος παραγωγής παλμών *PWM*. Ακολουθούν λίγα λόγια για αυτή τη μέθοδο.

Στην Ασταθή διαμόρφωση, ο χρονοδιακόπτης 555 εκπέμπει μια συνεχή ροή ορθογώνιων παλμών με συγκεκριμένη συχνότητα. Η σταθεροποιημένη διαμόρφωση υλοποιείται χρησιμοποιώντας δύο αντιστάσεις, R_1 και R_2 και έναν πυκνωτή C . Σε αυτήν τη διαμόρφωση, ο ακροδέκτης ελέγχου δεν χρησιμοποιείται, επομένως συνδέεται με τη γείωση μέσω ενός πυκνωτή αποσύνδεσης 10 nF για τη διακλάδωση του ηλεκτρικού θορύβου. Οι ακίδες κατωφλίου και σκανδάλης συνδέονται με τον πυκνωτή C και επομένως έχουν την ίδια τάση [41].

Αρχικά, ο πυκνωτής C δεν φορτίζεται, επομένως ο ακροδέκτης της σκανδάλης λαμβάνει μηδενική τάση, η οποία είναι μικρότερη από το $1/3$ της τάσης τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια, ο ακροδέκτης σκανδάλης κάνει την έξοδο να ανέβει ψηλά και το τρανζίστορ εσωτερικής εκφόρτισης να μεταβεί σε λειτουργία αποκοπής. Δεδομένου ότι ο ακροδέκτης εκφόρτισης δεν είναι πλέον βραχυκυκλωμένος στη γείωση, το ρεύμα ρέει μέσω των αντιστάσεων R_1 και R_2 στον πυκνωτή, φορτίζοντας τον. Ο πυκνωτής C αρχίζει να φορτίζει έως ότου η τάση γίνει ίση με τα $2/3$ της τάσης τροφοδοσίας [42].

Εκείνη τη στιγμή, η ακίδα κατωφλίου κάνει την έξοδο να πέσει χαμηλά και το τρανζίστορ εσωτερικής εκφόρτισης να μπει σε λειτουργία κορεσμού. Κατά συνέπεια, ο πυκνωτής αρχίζει να αποφορτίζεται μέσω του R_2 μέχρι η τάση να γίνει μικρότερη από το $1/3$ της τάσης τροφοδοσίας. Τότε ο ακροδέκτης σκανδάλης κάνει την έξοδο να φτάσει ψηλά ξανά και το τρανζίστορ εσωτερικής εκφόρτισης μεταβαίνει, ως συνέπεια, ξανά στη λειτουργία αποκοπής. Και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται [43].

Κατά τον πρώτο παλμό, ο πυκνωτής φορτίζει από το μηδέν έως τα $2/3$ της τάσης τροφοδοσίας, ωστόσο σε μεταγενέστερους παλμούς φορτίζει μόνο από το $1/3$ έως τα $2/3$ της τάσης τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια, ο πρώτος παλμός έχει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με μεταγενέστερους παλμούς. Επιπλέον, ο πυκνωτής φορτίζει και μέσω των δύο αντιστάσεων, αλλά αποφορτίζεται μόνο μέσω του R_2 , επομένως το

υψηλό διάστημα εξόδου είναι μεγαλύτερο από το χαμηλό διάστημα. Αυτό φαίνεται στις ακόλουθες εξισώσεις [44]:

Το υψηλό χρονικό διάστημα εξόδου κάθε παλμού δίνεται από:

$$t_{high} = \ln(2) \cdot (R_1 + R_2) \cdot C \quad (22)$$

Το χαμηλό χρονικό διάστημα εξόδου κάθε παλμού δίνεται από:

$$t_{low} = \ln(2) \cdot R_2 \cdot C \quad (23)$$

Επομένως, η συχνότητα f του παλμού δίνεται από:

$$f = \frac{1}{t_{high} - t_{low}} = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2R_2) \cdot C} \quad (24)$$

Και ο κύκλος λειτουργίας D δίνεται από:

$$D(\%) = \frac{t_{high}}{t_{high} + t_{low}} 100 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} 100 \quad (25)$$

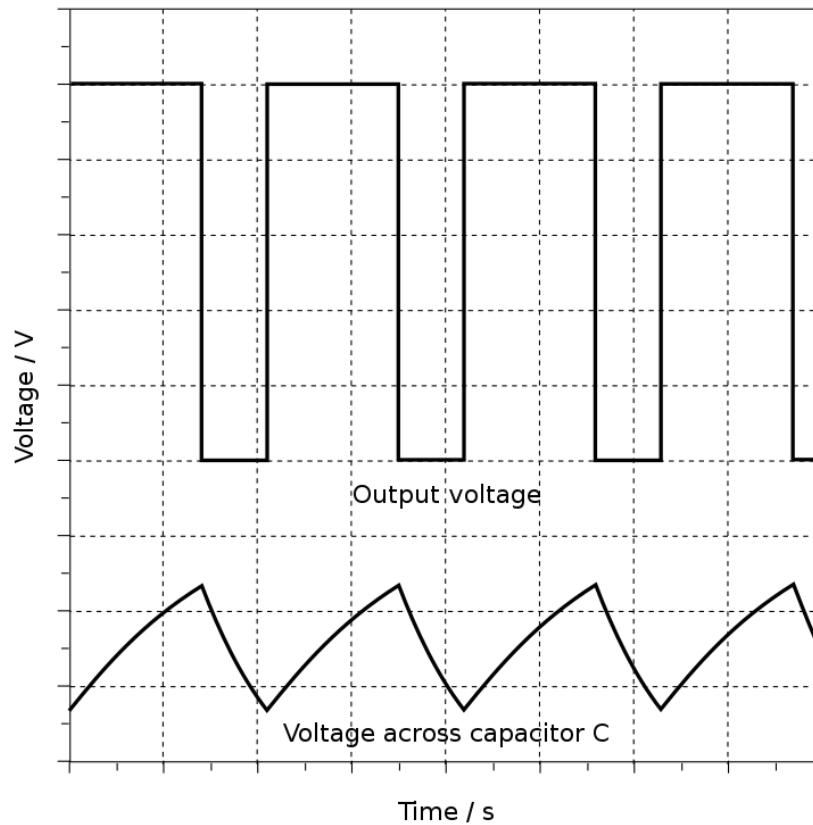
όπου t είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα, R είναι η αντίσταση σε ohms, C είναι η χωρητικότητα σε farads και $\ln(2)$ είναι ο φυσικός λογάριθμος του 2 (μια σταθερά που είναι 0,693147 όταν στρογγυλοποιείται σε 6 σημαντικά ψηφία), αλλά συνήθως προσεγγίζεται με λιγότερα ψηφία στα βιβλία του χρονοδιακόπτη 555 και σε φύλλα δεδομένων, όπως στις τιμές των 0,7, 0,69 ή 0,693.

Απαιτήσεις αντίστασης R_1 :

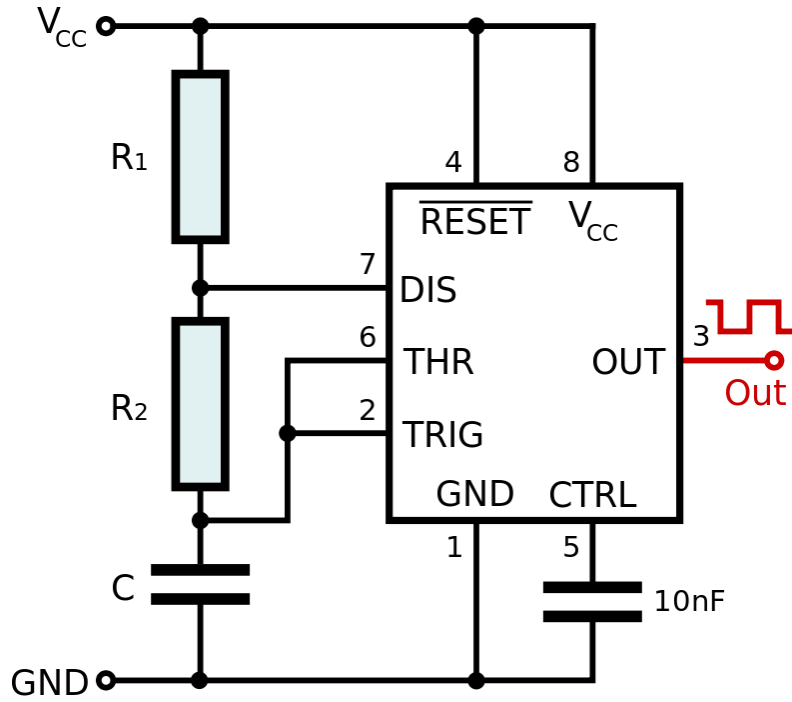
- Το μέγιστο επίπεδο ισχύος της R_1 πρέπει να είναι μεγαλύτερη του $\frac{V_{CC}^2}{R_1}$, σύμφωνα με το νόμο του Ohm.
- Ιδιαίτερα, με διπολικούς τύπους 555, πρέπει να αποφεύγονται χαμηλές τιμές της R_1 , έτσι ώστε η έξοδος να παραμένει κορεσμένη κοντά στα μηδέν βολτ κατά την εκφόρτιση, όπως έχουμε υποθέσει στην παραπάνω

εξίσωση. Διαφορετικά, ο χαμηλός χρόνος εξόδου θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίστηκε παραπάνω.

Ο πρώτος κύκλος θα διαρκέσει σημαντικά περισσότερο από τον υπολογιζόμενο χρόνο, καθώς ο πυκνωτής πρέπει αρχικά να φορτίσει από 0 V έως $\frac{2}{3}$ του V_{CC} από την ενεργοποίηση, αλλά μόνο από το $\frac{1}{3}$ του V_{CC} έως τα $\frac{2}{3}$ του V_{CC} στους επόμενους κύκλους [38].



Σχήμα 4.2 Κυματομορφή κατά την Ασταθή Λειτουργία [17]



Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση ενός Χρονοδιακόπτη 555 σε λειτουργία Ασταθούς Λειτουργίας [17]

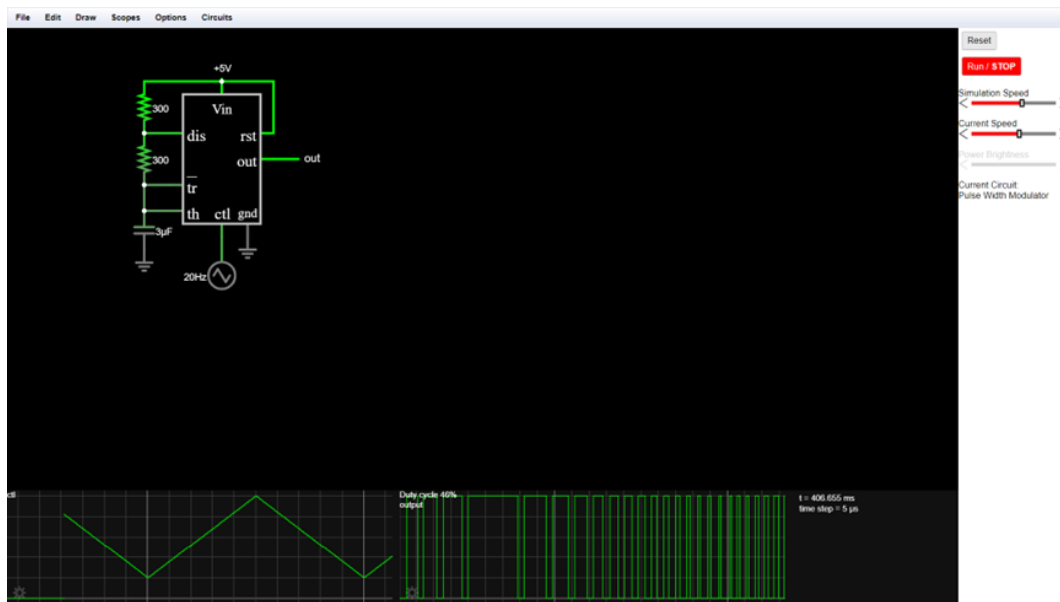
4.2. Υλοποίηση PWM Generator σε περιβάλλον online προσομοιωτή

FALSTAD

Αφού κατευθυνθούμε στον ιστότοπο < <https://www.falstad.com/circuit/> > [45]
και επιλέξουμε την διαδρομή: “ File -> Import From Text “, κάνουμε στο

```
$ 1 0.000005 4.818269829109882 56 5 50 5e-11  
  
165 240 128 256 128 4 0  
  
R 304 96 304 80 0 0 40 5 0 0 0.5  
  
R 304 288 304 336 0 3 20 2 3 0 0.5  
  
O 368 192 416 192 0 0  
  
w 240 160 208 160 0  
  
r 208 160 208 96 0 300  
  
w 208 96 304 96 0  
  
w 208 256 240 256 0  
  
c 208 256 208 304 0 0.000003 3.3195340310156274 0.001  
  
g 208 304 208 320 0 0  
  
w 208 224 208 256 0  
  
w 208 224 240 224 0  
  
r 208 160 208 224 0 300  
  
w 304 96 368 96 0  
  
w 368 96 368 160 0  
  
g 336 288 336 304 0 0  
  
o 2 32 0 4102 5 0.000390625 0 2 2 3 ctl  
  
o 3 16 0 36878 4.999999950000001 0.0001 1 1 output
```

παράθυρο διαλόγου που παρουσιάζεται επικόλληση των παραπάνω κώδικα. Πατώντας το “Enter” μας παρουσιάζεται η παρακάτω εικόνα του κυκλώματος.



Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση ενός Χρονοδιακόπτη 555 σε λειτουργία Ασταθούς Λειτουργίας

Το κύκλωμα αυτό αποτελεί ένα κύκλωμα παραγωγής σήματος PWM με την χρήση του IC χρονοδιακόπτη 555. Τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος αυτού είναι:

Pulse amplitude: 5 V

Max pulse width: 4 ms

Start: 4 ms

Min pulse width: 0.3 ms

R₁: 300 Ω

R₂: 300 Ω

C: 3 μF

Triangle Wave Generator:

f: 20 Hz

V_{max}: 2 V

V_{off}: 3 V

Αυτό σημαίνει ότι στο κύκλωμα που έχουμε ο διακόπτης μας όταν βρίσκεται στην θέση «ανοιχτό» παράγει τάση ίση με 5 V και στην θέση «κλειστό» 0 V. Το μέγιστο εύρος του παλμού έχει διάρκεια 4 ms και το ελάχιστο εύρος του παλμού διάρκεια 0.3 ms. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο κύκλος λειτουργίας του κυκλώματος κυμαίνεται μεταξύ του 20% και του 91%. Οι αντιστάσεις στο κύκλωμα (R_1 και R_2) είναι και οι δύο μεγέθους 300 Ω και ο πυκνωτής (C) χωρητικότητας 3 μF . Η γεννήτρια τριγωνικού σήματος έχει συχνότητα (f) 20 Hz, η μέγιστη τιμή τάσης (V_{max}) που μπορεί να λάβει είναι 2 V και η τάση κατά την οποία παύει η λειτουργία της (V_{off}) είναι τα 3 V.

Κατά την λειτουργία του κυκλώματος και κατά την έναρξη λειτουργίας του παρατηρούμε ότι, το πρώτο κύμα που παράγεται είναι αυτό με το ελάχιστο εύρος και με την πάροδο του χρόνου τα κύματα που παράγονται έχουν ολοένα και μεγαλύτερο εύρος μέχρι να επιτευχθεί αυτό με το μέγιστο εύρος. Δηλαδή, κατά την έναρξη λειτουργίας ο διακόπτης μεταβάλλεται πολύ γρήγορα μεταξύ των καταστάσεων «ανοιχτό»-«κλειστό» παράγοντας πολλά σήματα με μικρό όμως εύρος (το πρώτο κύμα που παράγεται είναι και αυτό με το μικρότερο εύρος, διάρκειας μόλις 0.3 ms), ο χρόνος αυτός της μεταβολής μειώνεται ενώ και το πλήθος των σημάτων μειώνεται ενώ σταδιακά αυξάνεται το εύρος τους, μέχρι να επιτευχθεί ο παλμός μέγιστης διάρκειας και εύρους κατά την οποία ο διακόπτης μένει εξ' ολοκλήρου στην κατάσταση «ανοιχτό» (διάρκεια 4 ms). Ο κύκλος λειτουργίας του κυκλώματος μεταβαίνει αυξανόμενος από το 35% έως το 91% όπου και ολοκληρώνεται η εκπομπή του σήματος μέγιστου εύρους και ο διακόπτης επιστρέφει στην κατάσταση «κλειστό». Η διάρκεια αυτού του κύκλου είναι 30 ms.

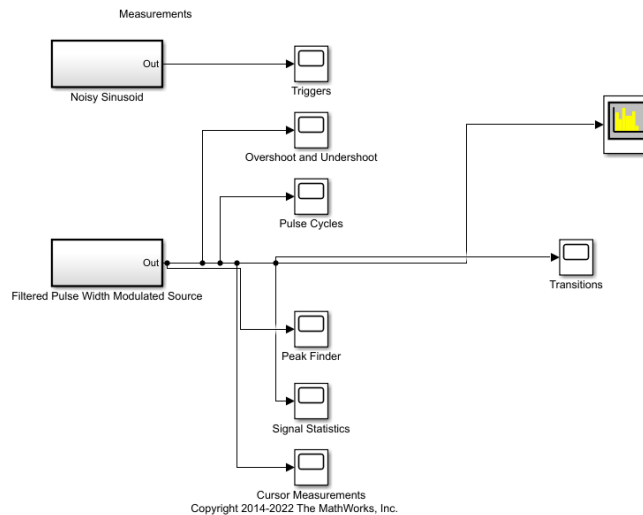
Το ακριβώς αντίστροφο γίνεται στην συνέχεια. Ο διακόπτης αρχίζει να μεταβάλλεται όλο και γρηγορότερα μεταξύ των καταστάσεων «ανοιχτό-κλειστό» μειώνοντας τα εύρη των παραγόμενων κυμάτων και αυξάνοντας τον αριθμό τους ενώ και ο κύκλος λειτουργίας συνεχώς μειώνεται.

Κατά την διάρκεια ενός τέτοιου κύκλου παρατηρούμε επίσης ότι το τριγωνικό waveform (trigger signal) τείνει αυξανόμενο από το ελάχιστο σημείο του κατά την ενεργοποίηση του κυκλώματος, επιτυγχάνοντας το μέγιστό του κατά την στιγμή επίτευξης του κύματος μέγιστου εύρους.

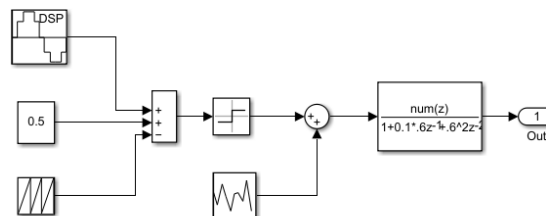
Στην συνέχεια τείνει μειούμενο μέχρι και την επίτευξη της ελάχιστης τιμής του, κατά το χρονικό σημείο δημιουργίας του σήματος ελαχίστου εύρους.

4.3. Υλοποίηση και μελέτη PWM σε περιβάλλον MATLAB

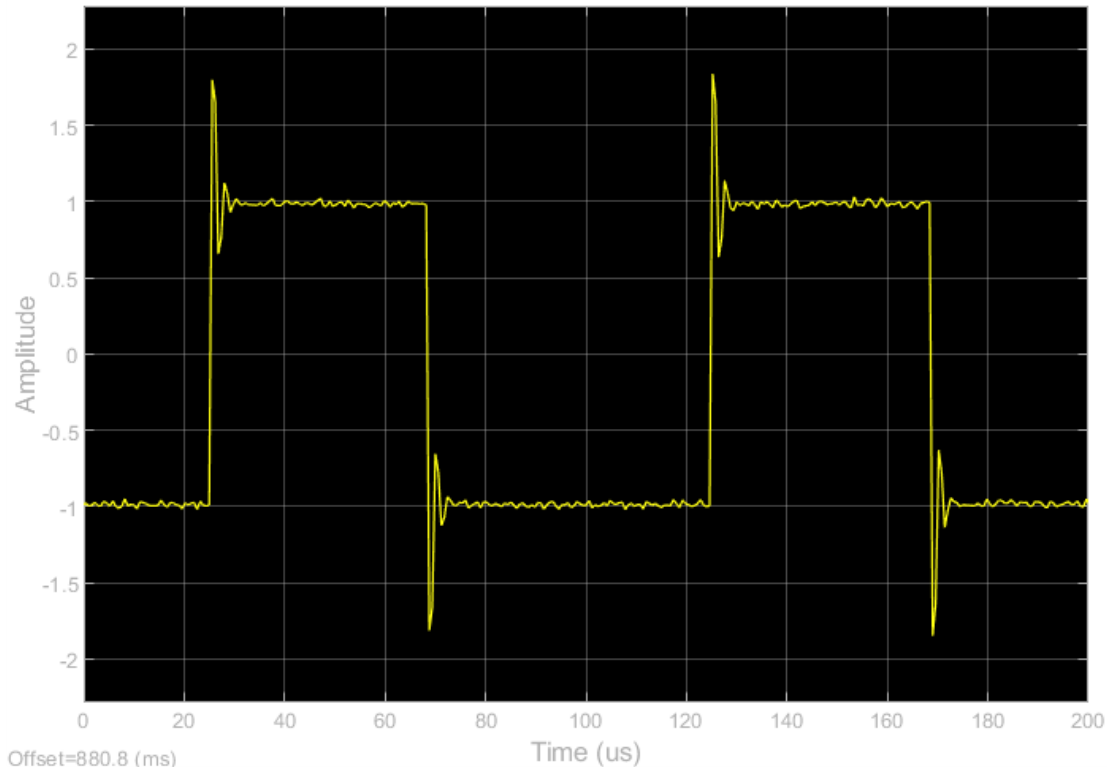
Μετά από την ανάλυση της υλοποίησης του PWM διαμορφωτή στο Falstad, παρουσιάζουμε την υλοποίηση PWM κυματομορφής σε περιβάλλον ημιτονοειδούς θορύβου στο Simulink του MATLAB [46]. Βλέπουμε το δομικό διάγραμμα στο Σχήμα 4.5 στο οποίο έχουμε προσθέσει αναλυτή φάσματος για να εξετάσουμε συγκεκριμένα το φάσμα του PWM σήματος. Στο Σχήμα 4.6 βλέπουμε το υποσύστημα (πάντα σε περιβάλλον Simulink) της πηγής PWM σήματος.



Σχήμα 4.5 Simulink model για δημιουργία PWM κυματομορφής



Σχήμα 4.6 Simulink model για την φιλτραρισμένη πηγή PWM σήματος



Σχήμα 4.7Κυματομορφή PWM σήματος με ημιτονικό θόρυβο στα pulse edges

Στο Σχήμα 4.7 βλέπουμε την κυματομορφή του PWM σήματος (στιγμιότυπο). Στο αναλυτικό workspace της προσομοίωσής μας υπάρχει το active simulation που δείχνει τις διακυμάνσεις του εύρους της PWM κυματομορφής. Τα συγκεκριμένα στατιστικά properties του PWM παλμού καταγράφονται στις Εικόνες 4.4 και 4.5.

Παρατηρούμε επίσης το noisy sinupoidal signal (Σχήμα 4.8) και την επίδρασή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, στα edges του παλμού. Αυτό προκαλεί μία άμεση επίπτωση στο προκύπτον φάσμα όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.9 μέσω του αναλυτή φάσματος.

Στο active module του Simulink καταγράφουμε τις διακυμάνσεις του φάσματος όπως προκύπτουν από την διακύμανση του εύρους του χρονικά μεταβαλλόμενου ψηφιακού παλμού.

Το εύρος του παλμού μεταβάλλεται από 40 μsec έως 60 μsec. Για να μελετήσουμε περαιτέρω το φάσμα μίας παλμοσειράς που έχει αυτά τα range of values στις τιμές της

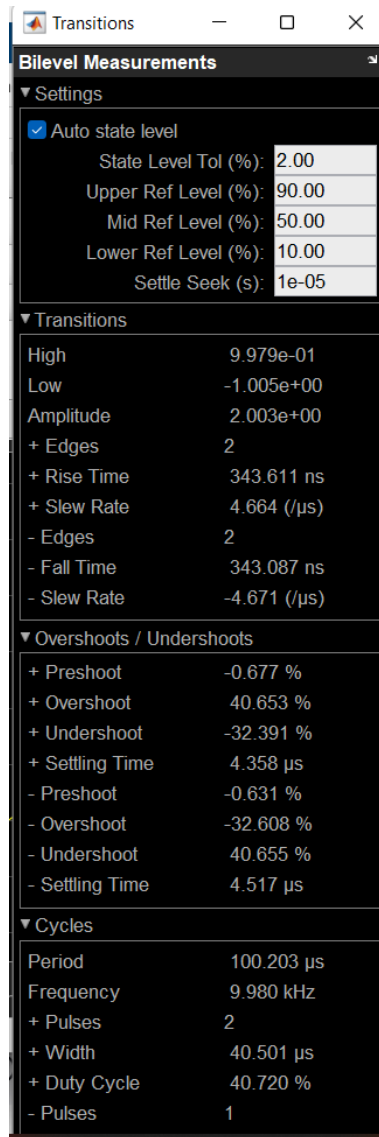
χρονοσειράς, καταγράφουμε το φάσμα για δύο κυματομορφές τετραγωνικών παλμών που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές. Ο κώδικας έχει ως εξής:

```
% Create a Rectangular Waveform object
Waveform = phased.RectangularWaveform('SampleRate',1e+06,...
'PulseWidth',4e-05,'PRF',10000,'NumPulses',10,'FrequencyOffset',0);
Fs = Waveform.SampleRate;
% Call step method of Waveform to generate IQ samples of Waveform
x = Waveform();
% Create figure for Real and Imaginary
figure;
l = (0:length(x)-1)/Fs;
subplot(2,1,1);
[~, scale, ~] = engunits(l(end));
l = l*scale;
plot(l,real(x));
axis([0 1000 -0.1 1.1]);
xlabel('');
ylabel('Amplitude: Real Part (V)');
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(l,imag(x));
axis([0 1000 -0.1 0.1]);
xlabel('Time (\mus)');
ylabel('Amplitude: Imaginary Part (V)');
grid on;

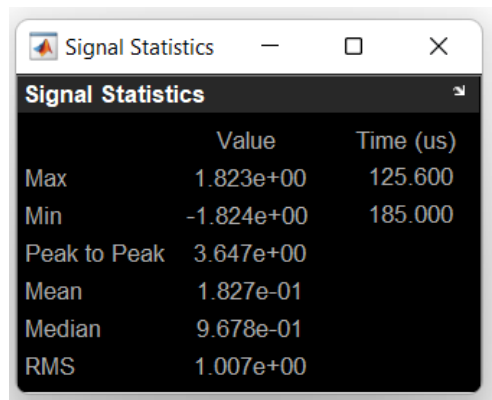
% Create figure for Spectrum
figure;
pwelch(x, [], [], [], Fs, 'centered');
xlabel('Frequency (kHz)');
ylabel('Power/Frequency (dB/Hz)');
title('Power Spectral Density of Baseband Signal');

% Create a Matched Filter object
coeff = getMatchedFilter(Waveform);
Compression = phased.MatchedFilter('Coefficients',coeff(:,1), ...
'SpectrumWindow','None');
y = Compression(x);
```

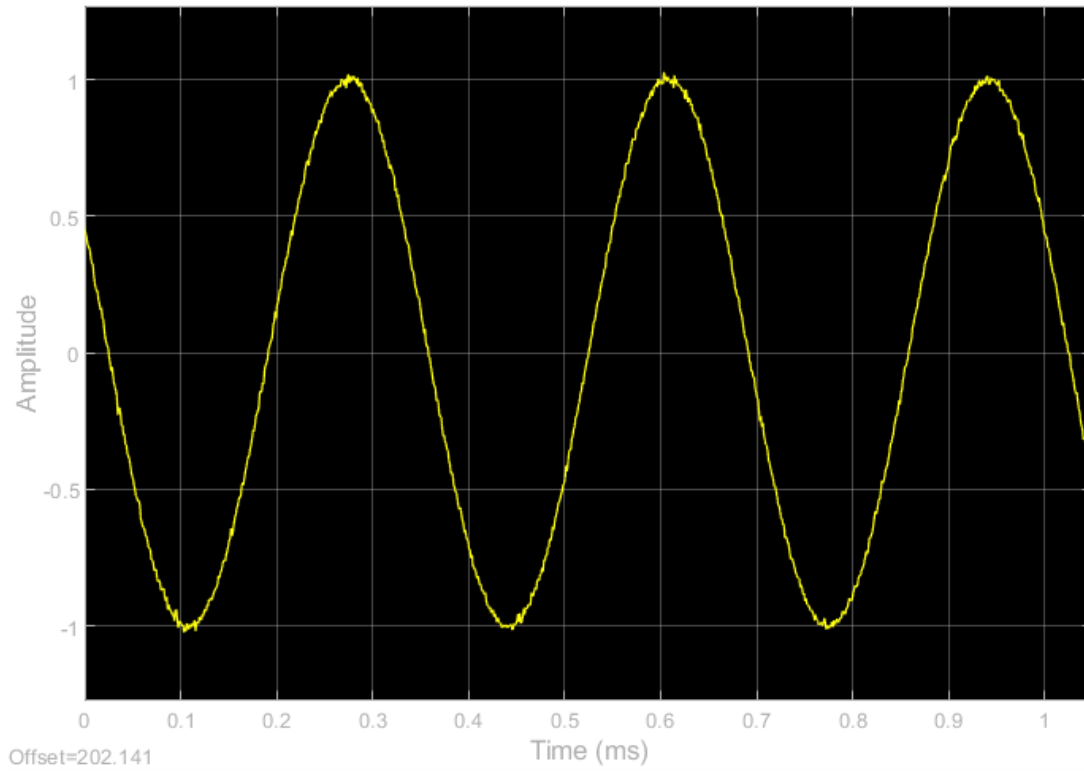
Τα αποτελέσματα καταγράφονται στα Σχήματα 4.10 (κυματομορφή) και 4.11 (φάσμα) για τον τετραγωνικό παλμό με εύρος 40 μsec και στα Σχήματα 4.12 (κυματομορφή) και 4.13 (φάσμα) για τον τετραγωνικό παλμό με εύρος 60 μsec .



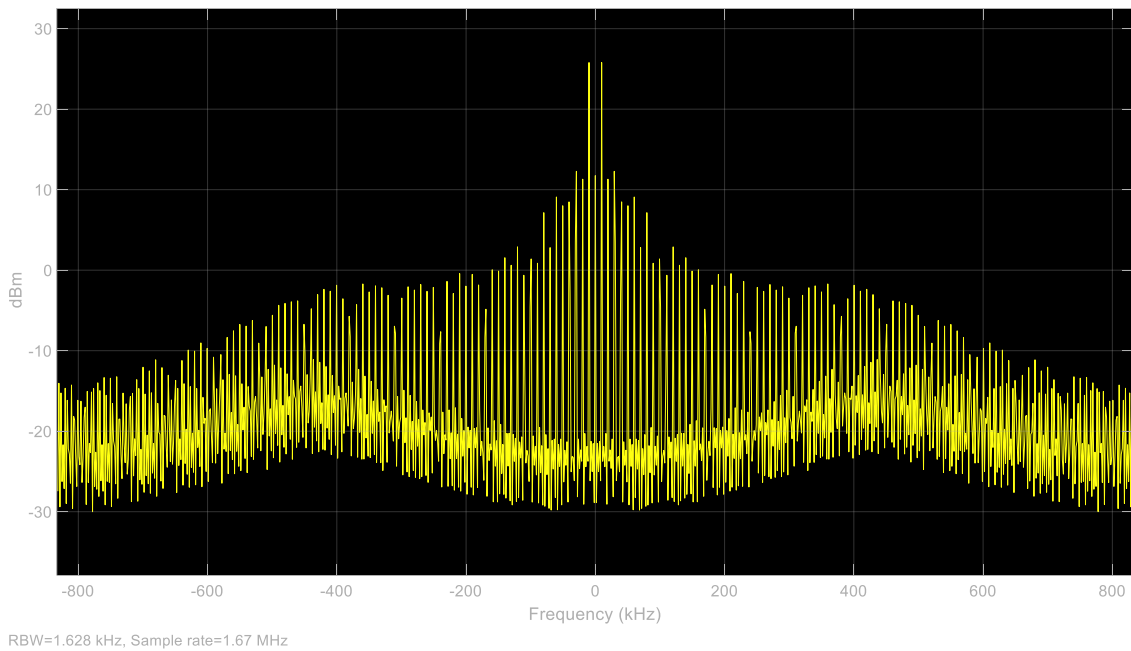
Εικόνα 4.4 Στατιστικές ιδιότητες PWM σήματος



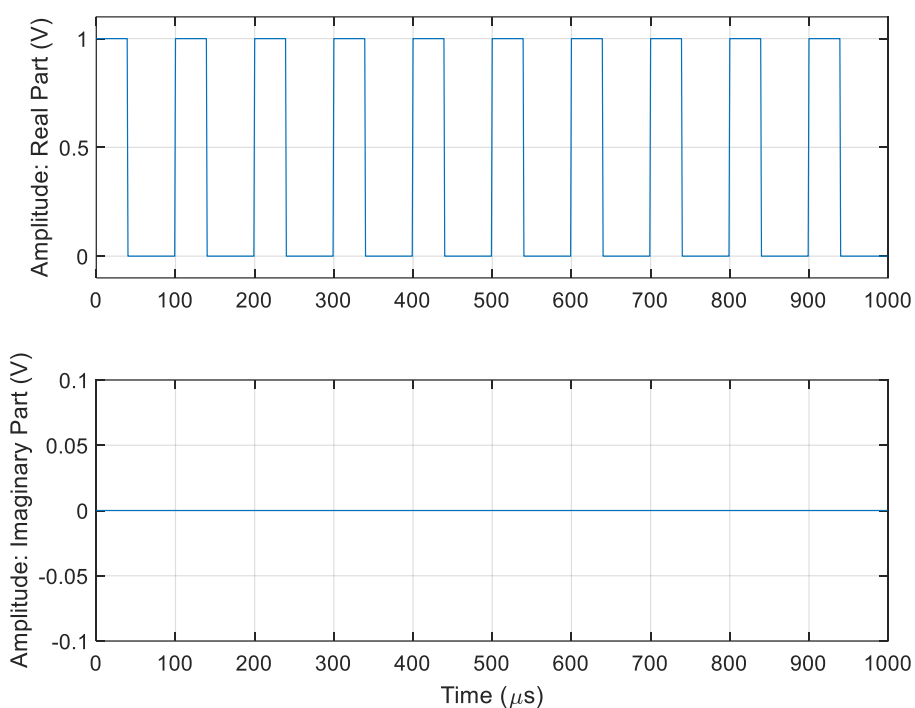
Εικόνα 4.5 Στατιστικές ιδιότητες PWM σήματος



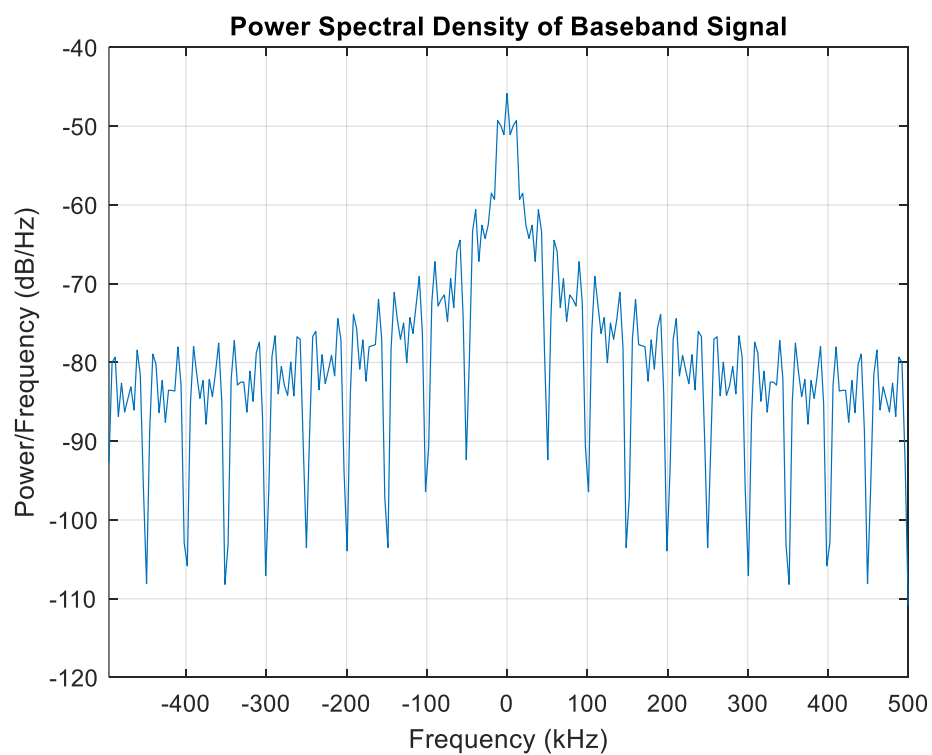
Σχήμα 4.8 Ημιτονικό noise trigger στα pulse edges



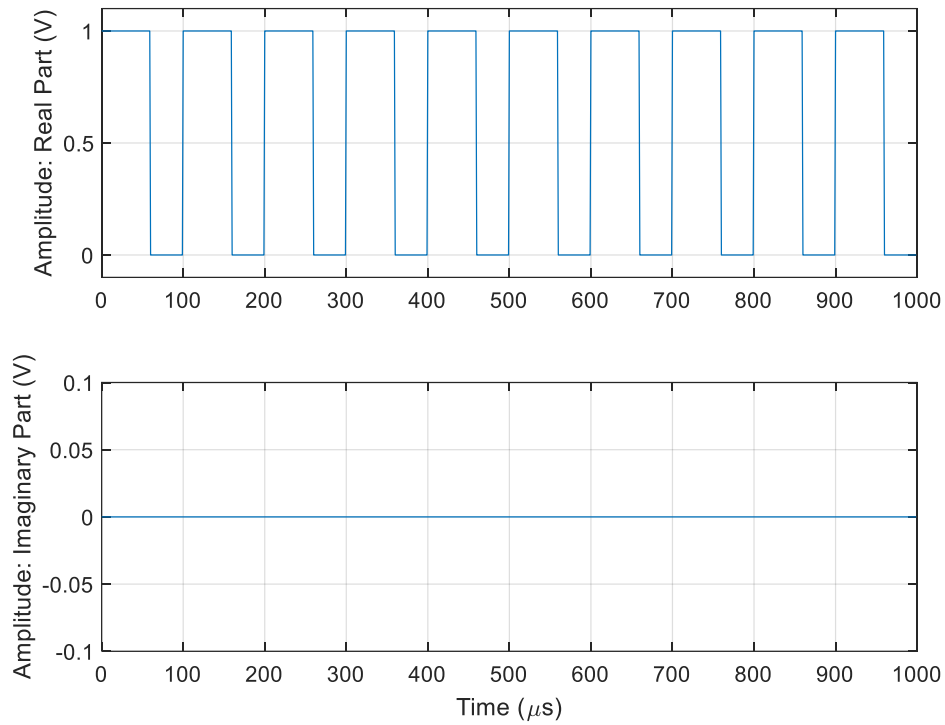
Σχήμα 4.9 Φάσμα PWM σήματος (στιγμιότυπο)



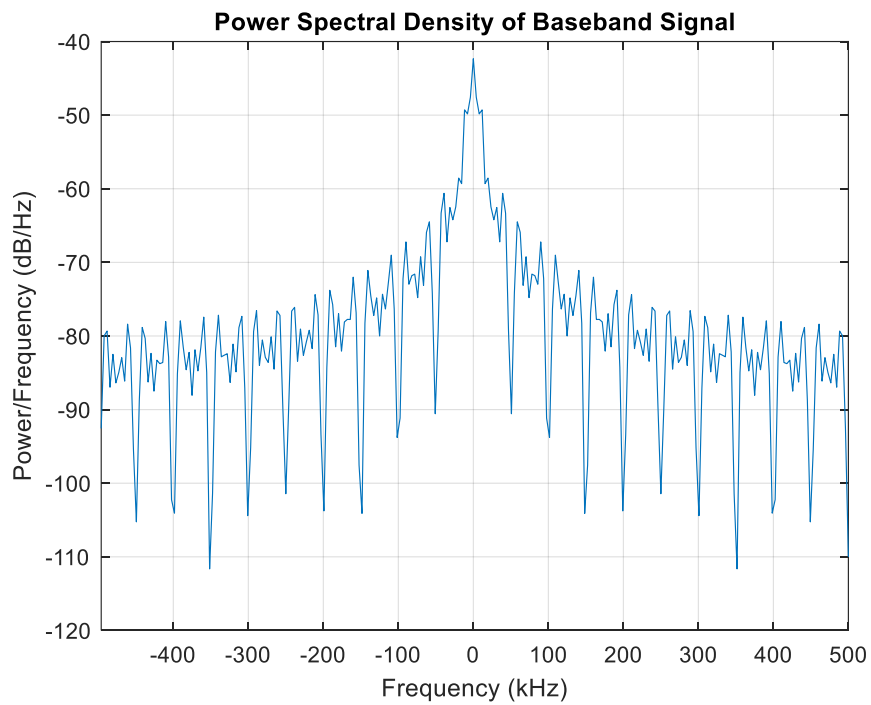
Σχήμα 4.10 Κομματομορφή digital pulse με εύρος 40 μsec



Σχήμα 4.11 Φάσμα digital pulse με εύρος 40 μsec



Σχήμα 4.12 Κυματομορφή digital pulse με εύρος 60 μsec



Σχήμα 4.13 Φάσμα digital pulse με εύρος 60 μsec

Παρατηρούμε μεταξύ άλλων στα Σχήματα 4.11 και 4.13 που αφορούν στα φάσματα και που μπορούν να αναχθούν ως τα extreme snapshots του μεταβαλλόμενου φάσματος του Σχήματος 4.9 πως έχουμε οριοθέτηση του 3-dB bandwidth στα 10-15 KHz.

Αυτό συνάδει με τις προδιαγραφές του εύρους ζώνης με βάση το όριο Nyquist (Nyquist-bound bandwidth) που υπολογίζουμε εύκολα στο MATLAB για παλμό διάρκειας 40 msec (1^{ος} υπολογισμός) και 60 msec (2^{ος} υπολογισμός) ως εξής:

```
>> B=1/(2*(4e-5))
```

```
B =
```

```
1.2500e+04
```

Δηλαδή εύρος ζώνης 12.5 KHz για παλμό 40 msec.

```
>> B=1/(2*(6e-5))
```

```
B =
```

```
8.3333e+03
```

Δηλαδή εύρος ζώνης (προσεγγιστικά) 8.5 KHz για παλμό 60 msec.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναλύσαμε το μαθηματικό υπόβαθρο της διαμόρφωσης παλμών και πιο συγκεκριμένα της διαμόρφωσης παλμών κατά εύρος, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Παρατηρήσαμε την δυσκολία του ακριβούς προσδιορισμού στο πεδίο της συχνότητας ακριβώς λόγω της ιδιαίτερης φύσης αυτής της παλμοσειράς, με το μεταβλητό εύρος παλμών να προκύπτει από διαδικασίες διαμόρφωσης που εμπλέκουν την τριγωνική κυματομορφή και που μπορούν να βελτιστοποιηθούν με διάφορες μεθόδους.

Παρουσιάστηκαν επίσης εκτενώς οι εφαρμογές της PWM σηματοδοσίας, τόσο στις τηλεπικοινωνίες, όσο (πρωτίστως) σε ζητήματα signal processing και σε εφαρμογές ελέγχου. Στην εποχή του Internet of Things, αυτές οι πολύπλευρες εφαρμογές τείνουν να συγκλίνουν ιδίως στον τομέα του Industry 4.0, όπου «κλασική» σηματοδοσία πληροφορίας και σηματοδοσία ελέγχου δύνανται να παρέχονται από την ίδια ευρυζωνική υποδομή, και μάλιστα μέσω ασύρματου front-end, πχ στην περίπτωση των private industrial 5G networks. Σε αυτήν την περίπτωση, η περαιτέρω γνώση των ιδιοτήτων μίας PWM σηματοδοσίας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο (ακόμα περισσότερο) στο πεδίο της συχνότητας, αποκτούν ακόμα μεγαλύτερη σημασία.

Με αυτά κατά νου, πραγματοποιήσαμε το σενάριο εργασίας που καταλήγει στην μελέτη του φάσματος μίας PWM σηματοδοσίας που παράγεται σε ελεγχόμενο περιβάλλον προσομοίωσης. Με την χρήση του FALSTAD παρουσιάζουμε το ψηφιακό ενσωματωμένο διακριτό στοιχείο που μπορεί να παράξει μία τέτοια σηματοδοσία, και με την χρήση του MATLAB μελετάμε σε πραγματικό χρόνο το μεταβαλλόμενο κατά συχνότητα φάσμα για δεδομένα χρονικά όρια μεταβολής του εύρους της παλμοσειράς. Με περαιτέρω χρήση του MATLAB εξετάζουμε τις οριακές τιμές του φάσματος για τις ακραίες τιμές μεταβολής του εύρους στο πεδίο του χρόνου και αντιπαραβάλλουμε τις τιμές αυτές με το φάσμα 3-dB εύρους ζώνης κατά Nyquist που προβλέπει η «κλασική» θεωρία διαμόρφωσης παλμών, με αποτελέσματα άμεσα αξιοποιήσαμε τόσο για baseband μετάδοση PWM σηματοδοσίας όσο και για ζωνοδιαβατή διαμόρφωση στα πλαίσια υλοποίησης 5G private industrial network.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
2. J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2000.
3. Θ. Χρυσικός, «Ανάλυση Ψηφιακών και Δικτυακών Μέσων», ΔΠΜΣ Πληροφορική και Υπολογιστική Βιοϊατρική, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Λαμία, 2022.
4. Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics.
5. Chrysikos, Theofilos, and Stavros Kotsopoulos. "RF Channel Modeling for 5G Systems." *New Directions in Wireless Communications Systems: From Mobile to 5G* (2017): 47.
6. Patzold, Matthias. Mobile fading channels: Modelling, analysis and simulation. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
7. T. Rappaport, Wireless Communications: Principles & Practice. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
8. <http://recordingology.com/in-the-studio/distortion/square-wave-calculations/>
9. W. C. Jakes (Ed.), Microwave mobile communications. New York, NY: Wiley Interscience, 1974.
10. Davarian, Faramaz. "Mobile digital communications via tone calibration." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 36.2 (1987): 55-62.
11. Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Καθηγητής Κώστας Μπερμπερίδης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
12. Hsu, Hwei P. Analog and Digital Communications. The McGraw-Hill companies, Inc., 2003.
13. Γεώργιος Κ. Καραγιαννίδης, Κοραλία Ν. Παππή, Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, 4η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN: 978-960-418-675-4, 2017.
14. Bateman, Andrew. Digital Communications: Design for the real world. Addison-Wesley, 1999.
15. Sklar, Bernard. Digital communications: fundamentals and applications. 2001.

16. <https://www.seeedstudio.com/blog/>
17. https://en.wikipedia.org/wiki/555_timer_IC
18. <https://www.i-programmer.info/>
19. "[Sizing a Grid-Tied PV System ...with Battery Backup](#)". Home Power Magazine.
20. Westmijze, W. K. (1946). "[A New Method of Counteracting Noise in Sound Film Reproduction](#)". Journal of the Society of Motion Picture Engineers. **47** (5): 426–440. [doi:10.5594/J12769](#). [ISSN 0097-5834](#) – via IEEE.
21. Schönung, A.; Stemmler, H. (August 1964). "Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren". BBC Mitteilungen. **51** (8/9): 555–577.
22. Du, Ruoyang; Robertson, Paul (2017). "[Cost Effective Grid-Connected Inverter for a Micro Combined Heat and Power System](#)" (PDF). IEEE Transactions on Industrial Electronics. **64** (7): 5360–5367. [doi:10.1109/TIE.2017.2677340](#). [ISSN 0278-0046](#). [S2CID 1042325](#).
23. Barr, Michael (1 September 2001). "[Introduction to Pulse Width Modulation \(PWM\)](#)". Barr Group.
24. Fundamentals of HVAC Control Systems, by Robert McDowall, [p. 21](#)
25. Hausmair, Katharina; Shuli Chi; Peter Singerl; Christian Vogel (February 2013). "Aliasing-Free Digital Pulse-Width Modulation for Burst-Mode RF Transmitters". IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. **60** (2): 415–427. [CiteSeerX 10.1.1.454.9157](#). [doi:10.1109/TCSI.2012.2215776](#). [S2CID 21795841](#).
26. J. Huang, K. Padmanabhan, and O. M. Collins, "The sampling theorem with constant amplitude variable width pulses", IEEE transactions on Circuits and Systems, vol. 58, pp. 1178 - 1190, June 2011.
27. Wescott, Tim (August 14, 2018). "[Sampling: What Nyquist Didn't Say, and What to Do About It](#)" (PDF). Wescott Design Services. The Nyquist-Shannon sampling theorem is useful, but often misused when engineers establish sampling rates or design anti-aliasing filters.
28. [Synthesizing Strings: PWM & String Sounds](#)

29. Hirak Patangia, Sri Nikhil Gupta Gourisetti, "A Harmonically Superior Modulator with Wide Baseband and Real-Time Tunability", IEEE International Symposium on Electronic Design (ISED), India, Dec.11.
30. Hirak Patangia, Sri Nikhil Gupta Gourisetti, "Real Time Harmonic Elimination Using a Modified Carrier", CONIELECOMP, Mexico, Feb 2012.
31. Hirak Patangia, Sri Nikhil Gupta Gourisetti, "A Novel Strategy for Selective Harmonic Elimination Based on a Sine-Sine PWM Model", MWSCAS, U.S.A, Aug 2012.
32. <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/06/16/basic-electronics-pulse-width-modulationpwm-and-arduino-applications/>
33. "[NE555 Datasheet](#)" (PDF). [Texas Instruments](#). September 2014. [Archived](#) (PDF) from the original on June 28, 2017.
34. "[Linear LSI Data and Applications Manual](#)". [Signetics](#). 1985.
35. Fuller, Brian (15 August 2012). "[Hans Camenzind, 555 timer inventor, dies](#)". EE Times. Retrieved 27 December 2016.
36. https://www.academia.edu/23085765/555_timer_IC_555_timer_IC_NE555_from_Signetics_in_dual_in_line_package
37. Lowe, Doug (2017-02-06). [Electronics All-in-One For Dummies](#). Wiley. p. 339. [ISBN 978-1-119-32079-1](#). The 555 timer chip, developed in 1970, is probably the most popular integrated circuit ever made. By some estimates, more than a billion of them are manufactured every year.
38. [van Roon 2007](#), Fig 3 & related text
39. "[Oral History Hans Camenzind Historic 555 Integrated Circuit Page6](#)". Semiconductor Museum. Retrieved 2022-02-27.
40. "[ICM7555-556 Datasheet](#)" (PDF). [Intersil](#). June 2016. Archived from [the original](#) (PDF) on June 29, 2017.
41. "[LMC555 Datasheet](#)" (PDF). [Texas Instruments](#). July 2016. [Archived](#) (PDF) from the original on June 28, 2017.
42. "[TLC555 Datasheet](#)" (PDF). [Texas Instruments](#). August 2016. [Archived](#) (PDF) from the original on June 28, 2017.

43. ["TLC551 Datasheet" \(PDF\). Texas Instruments.](#) September 1997. [Archived](#) (PDF) from the original on June 29, 2017.
44. <https://www.electronicshub.org/555-timer-pwm/>
45. <https://www.falstad.com/circuit/>
46. <https://www.mathworks.com/>