



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<<Αξιολόγηση απόδοσης διαμορφωτή και αποδιαμορφωτή FBMC για εφαρμογές 5G>>

<<Performance evaluation of FBMC modulator and demodulator for 5G applications>>



Καραμπίνας Αντώνιος (ΑΜ: 039)

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Αγγέλης, Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Σχολή Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Άρτα, 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους εκείνους που με τη βοήθειά τους κατάφερα να περατώσω τις μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αγγέλη Κωνσταντίνο για τη συνεχή του καθοδήγηση και ενθάρρυνση. Οι παρατηρήσεις του με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής.

Επίσης ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στο Μεταπτυχιακό που συνεργάστηκα μαζί τους κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Ακόμη να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στο μεταπτυχιακό αυτό πρόγραμμα που μέσα από το διάλογο και τις συζητήσεις μας στις εργασίες μας , καταφέραμε να διευρύνουμε το γνωστικό μας πεδίο στις τρέχουσες τεχνολογίες.

Τέλος, πάνω από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου , η οποία με στηρίζει όλα τα χρόνια σε κάθε μου βήμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιολόγηση της απόδοσης των διαμορφωτών και των αποδιαμορφωτών Filter Bank Multicarrier (FBMC) για εφαρμογές 5G εστιάζει στη φασματική αποδοτικότητα, την αντοχή σε παρεμβολές καθυστέρησης (latency), την ακρίβεια των συμβόλων και την υποστήριξη υψηλών ταχυτήτων δεδομένων. Η FBMC σε σύγκριση με το OFDM, λόγω των φίλτρων, περιορίζει τα προβλήματα στο φάσμα. Παρά τη μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα, η FBMC παρουσιάζει μικρότερο χρόνο λάθους, καθιστώντας την ιδανική για περιβάλλοντα 5G. Επιπλέον, είναι πιο ανθεκτικό στις λειτουργίες πολλαπλών διαδρομών και κινητικότητας που είναι χρήσιμες για τις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες. Η πειραματική αξιολόγηση μέσω των προσομοιώσεων και δοκιμών πεδίου με τη χρήση του AWR, μας επιβεβαιώνει τις δυνατότητες της FBMC να υποστηρίξει τις απαιτήσεις των εφαρμογών 5G.

Λέξεις κλειδιά: *FBMC, 5G, διαμορφωτής, αποδιαμορφωτής, AWR.*

ABSTRACT

The performance evaluation of Filter Bank Multicarrier (FBMC), modulators and demodulators for 5G applications focuses on spectral efficiency, immunity to interference latency, symbol accuracy and support for high data rates. FBMC offers higher spectral efficiency and immunity to interference compared to OFDM due to filters that limit spectral leakage. Despite higher computational complexity, FBMC exhibits lower latency, making it the region for 5G environments. In addition, it is more resistant to multipathing and mobility, features critical to modern wireless communications. Experimental evaluation through simulations and field tests using AWR confirms to us the capabilities of FBMC to support the requirements of 5G applications.

Word keys: FBMC, modulator, demodulator, 5G, AWR.

Περιεχόμενα

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Εισαγωγή στην τεχνολογία 5G.	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Τεχνολογία 5G	9
1.3 Εφαρμογές και Οφέλη της Τεχνολογίας 5G	10
1.4 Προκλήσεις και Προβλήματα του 5G	11
2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Τεχνολογία OFDM.....	13
2.1 OFDM: Προέλευση και εξέλιξη της τεχνολογίας OFDM (OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing)	13
2.2 Βασικά στοιχεία OFDM	14
3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Τεχνολογία FilterBankMultyCarrier.	18
3.1 Βασικά στοιχεία του FBMC: (FilterBankMultyCarrier)	18
3.2 Πλεονεκτήματα της FBMC.....	18
3.3 Σχεδιασμός πρωτότυπου φίλτρου.....	19
3.4 Ανάλυση πομπού (transmitter) και δέκτη (receiver)	20
3.5 Διαφορές FBMC και OFDM.....	21
4οΚεφάλαιο – Πλαίσιοσυστήματος Filter Bank Multy Carrier – Offset Quadrature Amplitude Modulation.....	26
4.1 Μετατόπισητετραγωνικούπλάτουςδιαμόρφωσης - OQAM: (Offset Quadrature Amplitude Modulation).	26
4.2 Πλαίσιο συστήματος FBMC-OQAM - (System framework)	28
4.3 Πομπός (Transmitter)	29
4.4 Δέκτης (receiver)	31
5ο Κεφάλαιο – Γκαουσιανός Λευκός Θόρυβος και επίδραση σε σύστημα FBMC.	33
5.1 ΓκαουσιανόςΛευκόςΘόρυβος - Additive White Gaussian Noise (AWGN)	33
5.2 Χωρητικότητα καναλιού.....	34
5.3 Επίδραση του AWGN Καναλιού στο σύστημα FBMC-OQAM.....	38
6ο Κεφάλαιο – Προσομοίωση συστημάτων FBMC 16, 32, 64 QAM.	40
6.1 Δημιουργία συστήματος FBMC.....	40
6.2 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 0dB.	42
6.3 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 2dB.	43
6.4 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 4dB.	45
6.5 Σύγκριση και συμπεράσματα συστημάτων FBMC (16,32,64 QAM).	46
Παράρτημα – παράμετροι συμβόλων (modules) που χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα προσομοίωσης.....	47
Βιβλιογραφίαπηγών	86

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Εισαγωγή στην τεχνολογία 5G.

1.1 Εισαγωγή

Η πέμπτη γενιά ασύρματων δικτύων (5G) έχει φέρει επανάσταση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, προσφέροντας αυξημένες ταχύτητες δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR) και οι έξυπνες πόλεις. Η αποδοτική διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων και η βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων επικοινωνιών είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του 5G.

Η τεχνολογία 5G αντιπροσωπεύει την πέμπτη γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων και υπόσχεται να φέρει επανάσταση στην επικοινωνία, την οικονομία και την καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Από την αυξημένη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έως την εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και την ενισχυμένη χωρητικότητα δικτύου, το 5G αναμένεται να αποτελέσει τον πυλώνα πάνω στον οποίο θα αναπτυχθούν νέες καινοτομίες και τεχνολογίες. Η ανάπτυξη του 5G δεν είναι μόνο τεχνολογική πρόοδος, αλλά σηματοδοτεί και μια βαθιά κοινωνική και οικονομική μεταβολή.

Οι εφαρμογές του εκτείνονται από την αυτοματοποιημένη βιομηχανία και τα αυτόνομα οχήματα, μέχρι την υγειονομική περίθαλψη και την απομακρυσμένη εκπαίδευση. Μέσω της δυνατότητας για διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών, η οποία είναι γνωστή ως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το 5G υπόσχεται να βελτιώσει την αποδοτικότητα, να μειώσει το κόστος και να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για ανάπτυξη. Ωστόσο, η μετάβαση στην εποχή του 5G δεν είναι χωρίς προκλήσεις.

Η υποδομή που απαιτείται είναι εκτεταμένη και δαπανηρή, ενώ υπάρχουν επίσης ανησυχίες για την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των δεδομένων. Οι κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο πρέπει να συνεργαστούν για να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα και να διασφαλίσουν ότι τα οφέλη του 5G θα είναι προσβάσιμα σε όλους.

Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες 5G είναι η Πολυφέρουσα Διαμόρφωση με Φίλτρα (Filter Bank Multi-Carrier, FBMC). Η FBMC προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες τεχνικές πολυφερουσών διαμορφώσεων, όπως η OFDM, (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), που χρησιμοποιείται στα προηγούμενα δίκτυα 4G. Η τεχνολογία FBMC (Filter Bank Multicarrier) αποτελεί μια από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους πολυμεταφοράς και έχει αναδειχθεί ως ένας από τους πιθανούς διαδόχους της τρέχουσας τεχνολογίας OFDM, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Το FBMC προτείνεται ως λύση για την αντιμετώπιση των περιορισμών και των προκλήσεων που παρουσιάζει το OFDM, ειδικά στις απαιτήσεις των μελλοντικών δικτύων 5G και πέρα. Η πολυμεταφορά με φίλτρα (FBMC) διαφοροποιείται από το OFDM κυρίως στον τρόπο με τον οποίο φιλτράρει τα σήματα. Αυτό καθιστά το FBMC εξαιρετικά αποδοτικό σε περιβάλλοντα όπου η συχνότητα είναι πολύτιμη και η παρεμβολή πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Οι βασικές αρχές λειτουργίας του FBMC και οι προκλήσεις που επιλύει το καθιστούν ιδανικό για μια σειρά από σύγχρονες και μελλοντικές εφαρμογές. Οι υψηλές επιδόσεις του σε όρους φασματικής απόδοσης και η ικανότητά του να λειτουργεί σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο

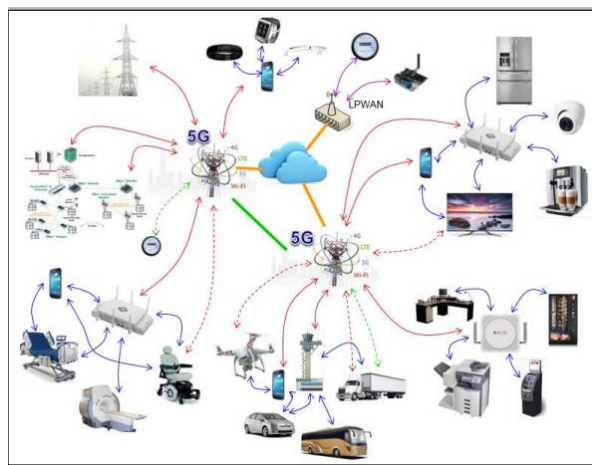
και παρεμβολές το καθιστούν ελκυστικό για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Επιπλέον, το FBMC έχει τη δυνατότητα να προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε εφαρμογές όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), οι ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας και τα έξυπνα δίκτυα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, στο συγκεκριμένο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της απόδοσης των διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών FBMC για εφαρμογές 5G. Στόχος είναι να αναλυθούν και να συγκριθούν διάφορες παραμέτρους απόδοσης, όπως η φασματική απόδοση, η αντίσταση σε παρεμβολές, η καθυστέρηση και η υπολογιστική πολυπλοκότητα. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της FBMC σε σχέση με άλλες τεχνικές και να διερευνηθεί η δυνατότητα βελτιστοποίησής της για τις απαιτητικές συνθήκες των δικτύων 5G.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, θα χρησιμοποιηθούν θεωρητικές αναλύσεις, προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας αναμένεται να συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών FBMC και στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και αξιόπιστων συστημάτων επικοινωνίας για τις εφαρμογές 5G.

1.2 Τεχνολογία 5G

Η τεχνολογία 5G είναι η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, και αποτελεί την εξέλιξη των προηγούμενων τεχνολογιών 4G, 3G και 2G. Στόχος της είναι να προσφέρει ταχύτερες ταχύτητες, μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερη απόκριση σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Έχει φέρει ριζικές αλλαγές στον τρόπο που επικοινωνούμε και χρησιμοποιούμε τις ψηφιακές υπηρεσίες. Σε αυτή την εκτενή ανάλυση εξετάζουμε την τεχνολογία 5G, τα χαρακτηριστικά της, τις εφαρμογές της, και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει. [1]



Εικόνα 1: Δίκτυο 5G

1. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έρχεται να αναβαθμίσει τις δυνατότητες των προηγούμενων γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας (1G, 2G, 3G, 4G), προσφέροντας ταχύτερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη χωρητικότητα

δικτύου. Ο κύριος στόχος του 5G είναι να υποστηρίξει την αυξανόμενη ζήτηση για δεδομένα και να παρέχει υποδομή για νέες καινοτόμες εφαρμογές. Η τεχνολογία 5G (πέμπτη γενιά κινητής τηλεφωνίας) αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες και προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, όπως το 4G. Η 5G έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται στις αυξημένες ανάγκες για ταχύτερες, πιο αξιόπιστες και πιο ευέλικτες επικοινωνίες [1]

2. **Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων:** Το 5G προσφέρει ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν και να ξεπεράσουν τα 10 Gbps, καθιστώντας δυνατή τη μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων σε ελάχιστο χρόνο.
3. **Χαμηλή καθυστέρηση (latency):** Η τεχνολογία 5G έχει σχεδιαστεί για να μειώνει την καθυστέρηση σε επίπεδα κάτω του 1 ms, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν άμεση ανταπόκριση, όπως τα αυτόνομα οχήματα και οι χειρουργικές επεμβάσεις από απόσταση.
4. **Μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου:** Το 5G μπορεί να υποστηρίξει έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο σε σχέση με το 4G, επιτρέποντας την διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT).
5. **Αυξημένη αξιοπιστία και σταθερότητα:** Τα δίκτυα 5G προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία, ακόμα και σε περιβάλλοντα με μεγάλες απαιτήσεις, όπως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.
6. **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Παρόλο που η υποδομή 5G απαιτεί ενέργεια, έχει σχεδιαστεί για να είναι πιο αποδοτική, βοηθώντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα δεδομένων που μεταδίδεται.
7. **Ευέλικτες αρχιτεκτονικές δικτύων:** Η τεχνολογία 5G χρησιμοποιεί αρχιτεκτονικές όπως το network slicing, που επιτρέπουν τη δημιουργία εικονικών δικτύων με διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης και ασφάλειας, ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών.

Συνολικά, η τεχνολογία 5G αποτελεί το θεμέλιο για την περαιτέρω εξέλιξη των ψηφιακών επικοινωνιών και τη δημιουργία νέων καινοτόμων υπηρεσιών που θα αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο ζούμε και εργαζόμαστε.

1.3 Εφαρμογές και Οφέλη της Τεχνολογίας 5G

Οι εφαρμογές του είναι πάρα πολλές και σε πολλούς τομείς και όχι μόνο της καθημερινότητάς μας. Μπορούμε να τη βρούμε:

1. **Βιομηχανική Αυτοματοποίηση:**
 - Το 5G υποστηρίζει την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού, ρομποτικής και παρακολούθησης, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την ασφάλεια στις βιομηχανικές διαδικασίες.
 - Η χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή αξιοπιστία του 5G είναι κρίσιμες για την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των μηχανών.
2. **Αυτόνομα Οχήματα:**
 - Η τεχνολογία 5G επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των αυτόνομων οχημάτων και της υποδομής, μειώνοντας τους κινδύνους και βελτιώνοντας την ασφάλεια στους δρόμους.
 - Η γρήγορη ανταπόκριση και η μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων είναι απαραίτητες για την επεξεργασία και ανταλλαγή των μεγάλων όγκων δεδομένων που παράγουν τα αυτόνομα οχήματα.
3. **Υγεία και Ιατρική Φροντίδα:**

- Το 5G μπορεί να υποστηρίξει την απομακρυσμένη ιατρική παρακολούθηση και τις τηλεχειριζόμενες ιατρικές επεμβάσεις.
- Οι γιατροί μπορούν να διαγνώσουν και να θεραπεύσουν ασθενείς από απόσταση, χρησιμοποιώντας συσκευές που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο μέσω του 5G δικτύου.

4. Ψυχαγωγία και Μέσα Ενημέρωσης:

- Οι βελτιωμένες ταχύτητες και η χαμηλή καθυστέρηση επιτρέπουν την αναπαραγωγή υψηλής ποιότητας videostreaming, ακόμα και σε 4K και 8K ανάλυση.
- Οι εφαρμογές εικονικής και επανζημένης πραγματικότητας θα γίνουν πιο προσιτές και διαδραστικές με την υποστήριξη του 5G. [2], [3]

1.4 Προκλήσεις και Προβλήματα του 5G

Η τεχνολογία 5G, παρά τα πολλά υποσχόμενα πλεονεκτήματά της, στον 21^ο αιώνα που ζούμε, αντιμετωπίζει μια σειρά από προκλήσεις και προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για την επιτυχημένη υλοποίησή της. Αυτές οι προκλήσεις ποικίλουν από τεχνικά ζητήματα μέχρι κοινωνικές και οικονομικές πτυχές.

Τεχνικές Προκλήσεις

Υποδομές Δικτύου: Η ανάπτυξη των δικτύων 5G απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε νέες υποδομές, όπως η εγκατάσταση πολλών μικρών κυψελών (smallcells) για την κάλυψη πυκνοκατοικημένων περιοχών και η αναβάθμιση των υφιστάμενων δικτύων πυρήνα (corenetworks). Η μετάβαση από τις υπάρχουσες υποδομές 4G σε 5G είναι χρονοβόρα και δαπανηρή.

Συχνότητες και Φάσμα: Το 5G χρησιμοποιεί συχνότητες σε υψηλότερες ζώνες του φάσματος, όπως των χιλιοστών των κυμάτων, που προσφέρουν υψηλές ταχύτητες αλλά έχουν περιορισμένη εμβέλεια και διείσδυση σε κτίρια. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη πυκνότερων δικτύων μικρών κυψελών για την εξασφάλιση επαρκούς κάλυψης.

Διαλειτουργικότητα και Συμβατότητα: Η συμβατότητα των νέων συσκευών 5G με τις υπάρχουσες υποδομές 4G είναι κρίσιμη για την ομαλή μετάβαση. Απαιτείται συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών συσκευών και των παρόχων δικτύων για την εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας.

Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα: Τα δίκτυα 5G, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητάς τους και του μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, αντιμετωπίζουν αυξημένους κινδύνους ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Η προστασία των δεδομένων και η εξασφάλιση της ασφάλειας των επικοινωνιών είναι πρωταρχικής σημασίας.

Οικονομικές και Κοινωνικές Προκλήσεις

Κόστος Ανάπτυξης: Η ανάπτυξη και η υλοποίηση των δικτύων 5G απαιτεί σημαντικές επενδύσεις από τις τηλεπικοινωνιακές εταιρείες. Το υψηλό κόστος ανάπτυξης μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και να περιορίσει την ευρεία διαθεσιμότητα της τεχνολογίας.

Ρύθμιση και Πολιτική: Οι κανονισμοί και οι πολιτικές που διέπουν τη χρήση του φάσματος και την ανάπτυξη των υποδομών πρέπει να προσαρμοστούν για να υποστηρίξουν την τεχνολογία 5G. Οι κυβερνήσεις πρέπει να συνεργαστούν με τις επιχειρήσεις για να επιλύσουν ζητήματα αδειοδότησης και να ενθαρρύνουν τις επενδύσεις.

Κοινωνικές Αντιδράσεις: Υπάρχουν ανησυχίες από το κοινό σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις της τεχνολογίας 5G στην υγεία, λόγω της χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων. Η ενημέρωση του κοινού και η διεξαγωγή επιστημονικών ερευνών είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών.

Ψηφιακό Χάσμα: Η τεχνολογία 5G έχει τη δυνατότητα να διευρύνει το ψηφιακό χάσμα μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών, καθώς οι επενδύσεις σε αγροτικές περιοχές μπορεί να είναι λιγότερο ελκυστικές για τις εταιρείες. Η διασφάλιση της ισότιμης πρόσβασης σε όλες τις περιοχές είναι σημαντική για την αποφυγή ανισοτήτων.

Περιβαλλοντικές Προκλήσεις

Κατανάλωση Ενέργειας: Παρά τις προσπάθειες για ενεργειακή αποδοτικότητα, η ανάπτυξη των δικτύων 5G μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας λόγω του μεγάλου αριθμού νέων υποδομών και συσκευών. Η υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών και πρακτικών είναι κρίσιμη για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία: Η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων εγείρει ερωτήματα σχετικά με τις επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι μελέτες και οι έρευνες για την ασφάλεια της ακτινοβολίας πρέπει να συνεχιστούν για να διασφαλιστεί η δημόσια υγεία.

Συνολικά, οι προκλήσεις και τα προβλήματα της τεχνολογίας 5G απαιτούν συντονισμένη προσπάθεια από κυβερνήσεις, επιχειρήσεις και την επιστημονική κοινότητα για να επιλυθούν. Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων είναι κρίσιμη για την επιτυχή υλοποίηση και την αξιοποίηση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας 5G, προσφέροντας σημαντικά οφέλη στην κοινωνία και την οικονομία. Η Υποδομή και Κόστος Ανάπτυξης του 5G απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε νέες υποδομές, όπως μικροκυψελιδικά δίκτυα και νέους πύργους κινητής τηλεφωνίας. Όπως επίσης, οι υψηλές συχνότητες που χρησιμοποιούνται από το 5G έχουν μικρότερη εμβέλεια, κάτι που σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότερα σημεία πρόσβασης για την κάλυψη μιας περιοχής. Ακόμη για τα Ρυθμιστικά και Νομικά Θέματα η ανάπτυξη του 5G αντιμετωπίζει προκλήσεις από ρυθμιστικές αρχές, καθώς και από ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των δεδομένων. Στην υγεία και την ασφάλεια, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την επίδραση της ακτινοβολίας των 5G δικτύων στην υγεία, αν και οι επιστημονικές μελέτες μέχρι σήμερα δεν έχουν δείξει συγκεκριμένες επιβλαβείς συνέπειες. Είναι εξίσου σημαντικό να συνεχιστεί η έρευνα και να ληφθούν μέτρα για την ενημέρωση του κοινού. [2], [3]

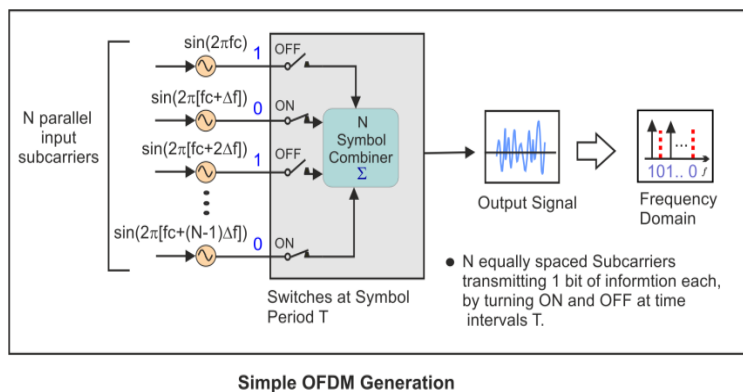
Κλείνοντας το κομμάτι της τεχνολογίας 5G αναμένεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο που επικοινωνούμε και χρησιμοποιούμε τις ψηφιακές υπηρεσίες. Οι υψηλές ταχύτητες, η χαμηλή καθυστέρηση και η μεγάλη χωρητικότητα του 5G ανοίγουν τον δρόμο για νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής και προωθώντας την καινοτομία. Παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει, η υιοθέτηση του 5G είναι αναπόφευκτη και αναμένεται να αποτελέσει τη βάση για την επόμενη γενιά τεχνολογικών εξελίξεων.

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Τεχνολογία OFDM.

2.1 OFDM: Προέλευση και εξέλιξη της τεχνολογίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Η OFDM είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες λόγω της υψηλής απόδοσής της στη μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα με πολυδιάστατη διασπορά. [4], [10]

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει τις ρίζες της στις δεκαετίες του 1960 και του 1970, όταν οι ερευνητές άρχισαν να αναζητούν τρόπους για τη βελτίωση της αποδοτικότητας στη μετάδοση δεδομένων. Οι αρχικές ιδέες για τη διαίρεση του φάσματος σε πολλαπλές υποφέρουσες συχνότητες παρουσιάστηκαν από ερευνητές όπως ο R.W. Chang, ο οποίος δημοσίευσε την πρώτη θεωρητική εργασία για το OFDM το 1966. Το βασικό πλεονέκτημα της OFDM, όπως παρουσιάστηκε αρχικά, ήταν η αντοχή στις παραμορφώσεις και παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών διάδοσης (multipath interference). [4]



Εικόνα 2: simpleOFDMGeneration

Εξέλιξη:

- **1970s-1980s:** Η βασική θεωρία της OFDM εξελίχθηκε, αλλά η πρακτική εφαρμογή της ήταν περιορισμένη λόγω της έλλειψης ισχυρών ψηφιακών επεξεργαστών σήματος (DSP). Παρ' όλα αυτά, η έρευνα συνεχίστηκε και οι βασικές αρχές της OFDM βελτιώθηκαν και τελειοποιήθηκαν. [10]
- **1990s:** Η ανάπτυξη ισχυρών DSPs και η πρόοδος στην τεχνολογία VLSI (Very Large Scale Integration) επέτρεψε την πρακτική εφαρμογή της OFDM σε εμπορικά συστήματα. Το OFDM έγινε δημοφιλές στις ασύρματες επικοινωνίες, ειδικά με την εισαγωγή των προτύπων DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) και DAB (Digital Audio Broadcasting).
- **2000s:** Η τεχνολογία OFDM υιοθετήθηκε ευρέως σε διάφορα πρότυπα επικοινωνιών, όπως Wi-Fi (IEEE 802.11a/g/n), WiMAX (IEEE 802.16), και LTE (Long Term Evolution). Η ευελιξία και η αποδοτικότητα της OFDM την καθιστούν ιδανική για υψηλές ταχύτητες δεδομένων και μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης.
- **2010s και Εντεύθεν:** Η εξέλιξη της OFDM συνεχίστηκε με την ανάπτυξη του 5G NR (New Radio), όπου χρησιμοποιούνται βελτιωμένες μορφές της τεχνολογίας, όπως η

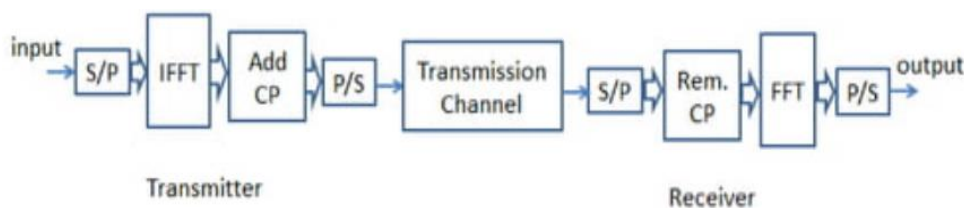
CP-OFDM και η DFT-s-OFDM, για τη διασφάλιση ακόμα μεγαλύτερης αποδοτικότητας και απόδοσης στις ασύρματες επικοινωνίες.

Η OFDM παίζει καθοριστικό ρόλο στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες για τους εξής λόγους:

1. **Αποτελεσματική Χρήση του Φάσματος - Πυκνή συσκευασία συχνοτήτων:** Η OFDM χρησιμοποιεί ορθογώνιες συχνότητες που επιτρέπουν τη συμπαγή συσκευασία των υποκαναλιών, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές μεταξύ τους και επιτυγχάνοντας υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος.
2. **Αντοχή στις Πολυδιάστατες Διασπορές - Μείωση των παρεμβολών:** Η OFDM είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις παρεμβολές από πολλαπλές διαδρομές διάδοσης, που είναι συνήθεις σε ασύρματα περιβάλλοντα. Η χρήση των πολλαπλών υποκαναλιών επιτρέπει την εύκολη διόρθωση των παρεμβολών.
3. **Υποστήριξη Υψηλών Ταχυτήτων Δεδομένων - Μεγάλες ταχύτητες:** Η OFDM επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με πολύ υψηλές ταχύτητες, κάτι που είναι κρίσιμο για τις σύγχρονες εφαρμογές όπως streaming βίντεο, τηλεδιασκέψεις, και διαδικτυακές υπηρεσίες.
4. **Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα - Δυναμική προσαρμογή:** Η OFDM επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης (π.χ. εύρος ζώνης, ισχύς μετάδοσης) ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση.
5. **Συμβατότητα με MIMO - Βελτίωση χωρητικότητας:** Η OFDM συνεργάζεται άψογα με τεχνολογίες πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO), βελτιώνοντας σημαντικά την χωρητικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.
6. **Υποστήριξη Ετερογενών Δικτύων - Διαλειτουργικότητα:** Η OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα δίκτυα, όπως Wi-Fi, LTE, και 5G, προσφέροντας μια ενιαία πλατφόρμα για πολλαπλές τεχνολογίες και εφαρμογές.

2.2 Βασικά στοιχεία OFDM

Η OFDM έχει αποδειχθεί ως μια από τις πιο αποδοτικές και ευέλικτες τεχνολογίες διαμόρφωσης στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, καθιστώντας την ιδανική για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για μεγαλύτερες ταχύτητες, χαμηλότερες καθυστερήσεις και υψηλότερη αξιοπιστία. Είναι μια τεχνική μετάδοσης πολλαπλών φορέων, όπου κάθε φορέας επιλέγεται να είναι ορθογώνιος με τους άλλους ούτως ώστε να μπορούν να διακριθούν στο φάσμα συχνοτήτων στο δέκτη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πρότυπο των σημερινών 4G, που παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές τρέχουσες εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεοπτική μετάδοση (DVB) και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Βασικό μπλοκ σχήμα του πομπού η παρακάτω εικόνα: [10]



Εικόνα 3: Transmitter and Receiver

Βασικά το σήμα που εισέρχεται και πρόκειται να μεταδοθεί, πρώτα, μετατρέπεται από σειριακή σε παράλληλη μορφή. Κάθε παράλληλο μπλοκ περιέχει τόσα δείγματα όσα και ο συνολικός αριθμός των υποφορέων. Στη συνέχεια υπολογίζεται με τη χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) του μπλοκ πριν προστεθεί το κυκλικό πρόθεμα (CP). Μετά και το (CP), το αποτέλεσμα μετατρέπεται πάλι σε σειριακή μορφή και παραδίδεται στο κανάλι για μετάδοση. [5], [10]

Στην τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), τα φαινόμενα ICI (Inter-Carrier-Interference) και ISI (Inter-Symbol-Interference) παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του σήματος και τη συνολική επίδοση του συστήματος.

- **ISI (Inter-Symbol Interference):** Το φαινόμενο ISI εμφανίζεται όταν τα σήματα από διαδοχικά σύμβολα επηρεάζουν το ένα το άλλο λόγω της πολυδιάσχυσης (multipath propagation) στο κανάλι μετάδοσης. Όταν ένα σήμα διαδίδεται μέσω διαφορετικών διαδρομών, μπορεί να φτάσει στον δέκτη με διαφορετικές καθυστερήσεις (γιατί ακολουθεί διαφορετικές διαδρομές), με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται τμήματα διαδοχικών συμβόλων. Αιτία του ISI είναι ότι προκαλείται κυρίως από το γεγονός ότι σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, η διάρκεια ενός συμβόλου δεν επαρκεί ώστε να εξαφανιστούν όλες οι ανακλάσεις του προηγούμενου συμβόλου πριν ξεκινήσει το επόμενο. Το κανάλι γίνεται μη γραμμικό λόγω της ανάμειξης αυτών των ανακλάσεων, οδηγώντας σε αλλοίωση των δεδομένων.

Αντιμετώπιση στο OFDM: Η χρήση του Cyclic Prefix (CP) στην OFDM είναι η βασική τεχνική για την αντιμετώπιση του ISI. Το Cyclic Prefix προσθέτει ένα επιπλέον χρονικό διάστημα πριν από το κάθε σύμβολο, το οποίο είναι αντίγραφο του τέλους του συμβόλου. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα καταφέρνει να απορροφήσει την πολυδιάσχυση και να αποφύγει το ISI, καθώς οι καθυστερημένες ανακλάσεις πέφτουν μέσα στο CP και δεν επηρεάζουν το κύριο σύμβολο.

- **ICI (Inter-Carrier Interference):** Το ICI αναφέρεται σε παρεμβολές μεταξύ των υπό-μεταφορέων (subcarriers) στο OFDM. Το OFDM βασίζεται στην ορθογωνιότητα των υπό-μεταφορέων, που σημαίνει ότι οι υπό-μεταφορείς δεν παρεμβάλλουν ο ένας τον άλλο εφόσον η ορθογωνιότητα διατηρείται. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να προκύψει ICI. Αιτία ICI είναι η πιο κοινή αιτία για την εμφάνιση ICI είναι η σφάλμα συγχρονισμού συχνότητας (frequency offset), το οποίο μπορεί να προκύψει από διαφορές στη συχνότητα των ταλαντωτών του πομπού και του δέκτη, ή λόγω του φαινομένου Doppler που παρατηρείται σε κινούμενα κανάλια. Αυτό το σφάλμα οδηγεί σε απώλεια της ορθογωνιότητας των υπό-μεταφορέων και προκαλεί παρεμβολές μεταξύ τους.

Αντιμετώπιση στο OFDM: Για την ελαχιστοποίηση του ICI, χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως συγχρονισμός συχνότητας (frequency synchronization), αλγόριθμοι για εκτίμηση και αντιστάθμιση του σφάλματος συχνότητας, καθώς και πιο εξελιγμένες τεχνικές όπως adaptive modulation. [5]

Συνοψίζοντας, το ISI αντιμετωπίζεται κυρίως μέσω του Cyclic Prefix, το οποίο επιτρέπει στον δέκτη να ξεπεράσει τα προβλήματα της πολυδιάσχυσης. Το ICI εμφανίζεται όταν χαθεί η ορθογωνιότητα των υπό-μεταφορέων, συνήθως λόγω σφαλμάτων συχνότητας, και μπορεί να μειωθεί με τεχνικές συγχρονισμού. Η διαχείριση αυτών των δύο παραγόντων είναι κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος OFDM και συμβάλλει στην αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε δύσκολα κανάλια επικοινωνίας. [4], [5]

Υπάρχουν όμως κάποια ζητήματα για το OFDM:

Μέσα από αυτά τα προβλήματα-ζητήματα που προκύπτουν μπορούμε να τα διαχωρίσουμε και είναι οι κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η OFDM όταν πρόκειται για νέες απαιτήσεις 5G. Έτσι διερευνώνται νέες κυματομορφές. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

- **Ευαισθησία στο FrequencyOffset (Σφάλμα Συχνότητας):** Το OFDM βασίζεται στην ορθογωνιότητα μεταξύ των υπό-μεταφορέων, η οποία εξασφαλίζει ότι οι υπό-μεταφορείς δεν παρεμβάλλουν ο ένας στον άλλο. Ωστόσο, το σύστημα είναι πολύ ευαίσθητο σε σφάλματα συχνότητας, όπως:
 - a) αλλαγές στη συχνότητα του ταλαντωτή (π.χ. λόγω ανακρίβειας των ταλαντωτών του πομπού ή του δέκτη).
 - b) Φαινόμενο Doppler που συμβαίνει σε κινούμενα κανάλια (π.χ. σε κινητές επικοινωνίες).

Αυτά τα σφάλματα μπορούν να οδηγήσουν σε Inter-Carrier Interference (ICI), καθώς χάνεται η ορθογωνιότητα μεταξύ των υπό-μεταφορέων, προκαλώντας παρεμβολές μεταξύ τους. Για να μειωθεί το πρόβλημα, απαιτείται συγχρονισμός συχνότητας και χρήση ειδικών τεχνικών αντιστάθμισης του φαινομένου Doppler.

- **Μεγάλη Ευαισθησία στο Παράσιτο Παρεμβολής (PhaseNoise):** Η OFDM είναι επίσης ευαίσθητη στο παράσιτο φάσης (phasenoise), το οποίο μπορεί να προκύψει λόγω των ανακριβειών των ταλαντωτών ή άλλων παραγόντων. Το παράσιτο φάσης προκαλεί διαταραχές στην ορθογωνιότητα των υπό-μεταφορέων και αυξάνει το ICI. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, είναι απαραίτητη η χρήση σταθερών ταλαντωτών και τεχνικών εκτίμησης και αντιστάθμισης του phasenoise.
- **Υψηλή Λόγος Κορυφής προς Μέση Τιμή Ισχύος (PAPR - Peak-to-AveragePowerRatio):** Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα της OFDM είναι ο υψηλός λόγος κορυφής προς μέση τιμή ισχύος (PAPR). Αυτό συμβαίνει διότι το OFDM σήμα είναι το άθροισμα πολλών υπό-μεταφορέων, και όταν πολλοί υπό-μεταφορείς βρίσκονται σε φάση, το σήμα αποκτά υψηλή κορυφή ισχύος. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε ένα πρόβλημα: Ο υψηλός PAPR απαιτεί τη χρήση ενισχυτών με μεγάλο δυναμικό εύρος (dynamicrange), κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος της αναλογικής αλυσίδας RF. Επιπλέον, οι ενισχυτές πρέπει να λειτουργούν σε μη γραμμικό καθεστώς (saturation), κάτι που οδηγεί σε παραμόρφωση του σήματος και μείωση της απόδοσης. Οι λύσεις που θα μπορούσαν να υπάρξουν όπως τεχνικές μείωσης του PAPR, είναι η κωδικοποίηση (coding), η τεχνική clipping, η διαμόρφωση προ-κωδικοποίησης (precoding) και άλλες.
- **Ευαισθησία στο Inter-SymbolInterference (ISI):** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το φαινόμενο ISI μπορεί να εμφανιστεί σε πολυδιαδρομικά κανάλια όπου τα σήματα από διαδοχικά σύμβολα επικαλύπτονται. Η χρήση του Cyclic Prefix (CP) βοηθά στην αντιμετώπιση του ISI, αλλά προσθέτει επιπλέον υπερφόρτωση (overhead) στη μετάδοση. Και στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε το εξής πρόβλημα, το CP καταναλώνει πολύτιμο εύρος ζώνης (bandwidth) και μειώνει την καθαρή ρυθμοαπόδοση (throughput) του συστήματος. Η αύξηση του CP μπορεί να βελτιώσει την απόδοση σε πολυδιαδρομικά περιβάλλοντα, αλλά αυτό γίνεται σε βάρος της αποδοτικότητας.
- **Απαιτήσεις για Συγχρονισμό Χρόνου:** Το OFDM απαιτεί ακριβή συγχρονισμό χρόνου μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Έστω και μικρές αποκλίσεις στον συγχρονισμό μπορούν να οδηγήσουν σε:

- a) Παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων (ISI).
- b) Απώλεια ορθογωνιότητας των υπό-μεταφορέων, προκαλώντας ICI.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, χρησιμοποιούνται τεχνικές ακριβούς συγχρονισμού και ανίχνευσης της καθυστέρησης του καναλιού.

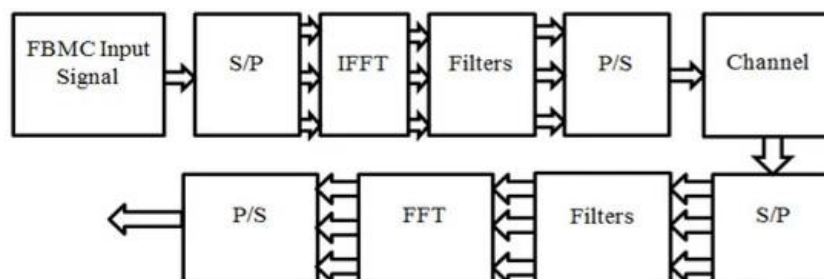
- ο **Απαίτηση σε Υπολογιστική Ισχύ:** Η OFDM βασίζεται στον Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (FFT –Fast Fourier Transform) και στον Αντίστροφο FFT (IFFT) για την υλοποίηση των υπό-μεταφορέων. Αυτές οι μετασχηματισμοί απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, ειδικά για συστήματα με μεγάλο αριθμό υπό-μεταφορέων. Το πρόβλημα που διακρίνεται εδώ είναι σε φορητές συσκευές ή εφαρμογές με περιορισμένη ενέργεια, η ανάγκη για υπολογιστική ισχύ αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος επεξεργασίας. Οι λύσεις που μπορούν να υπάρξουν είναι για τεχνικές βελτιστοποίησης FFT, καθώς και λύσεις hardware για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας.
- ο **Χρήση ΜΗ Ιδανικών Καναλιών:** Σε περιβάλλοντα με κινούμενους χρήστες ή με ταχεία μεταβολή καναλιού, η OFDM μπορεί να δυσκολευτεί να παρακολουθήσει τις αλλαγές στο κανάλι, κάτι που οδηγεί σε απώλεια της ποιότητας του σήματος. Η OFDM είναι ευαίσθητη σε διαλείψεις (fading) και ταχεία διακύμανση καναλιού.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα του OFDM, όπως η αποδοτική χρήση του φάσματος και η ανθεκτικότητα στην πολυδιάδοση, υπάρχουν διάφορα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν, καθώς η ανάπτυξη νέων τεχνικών βελτιστοποίησης και αντιστάθμισης αυτών των προβλημάτων συνεχίζεται, καθιστώντας το OFDM μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες σε σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών, όπως το LTE και το Wi-Fi. [4], [5]

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Τεχνολογία FilterBankMultyCarrier.

3.1 Βασικά στοιχεία του FBMC: (FilterBankMultyCarrier)

Η μετάδοση βασισμένη σε πολυμεταφορέα με φίλτρο (FBMC) εισάγει τράπεζες φίλτρων στο σχήμα OFDM για να αποφύγει το κυκλικό πρόθεμα CP, για να βελτιώσει την ευελιξία του συστήματος και να αντιμετωπίσει μερικούς περιορισμούς της OFDM. Η τράπεζα φίλτρου μπορεί να σχεδιαστεί με διαφορετικές ιδιότητες για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της επικοινωνίας, όπως η μείωση της απώλειας ισχύος της πλευρικής ζώνης και η αύξηση της φασματικής απόδοσης. Χρησιμοποιείται σε τηλεπικοινωνίες και ασύρματες επικοινωνίες. Η FBMC αποτελεί εναλλακτική λύση στην OFDM και προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις σε φάσμα και χαμηλή παρεμβολή. Είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης που διαχωρίζει το φάσμα σε πολλά επιμέρους κανάλια (υποφέροντα) χρησιμοποιώντας φίλτρα με στενή ζώνη πλάτους και κάθε υποφέρων έχει σχήμα κυματομορφής που ελαχιστοποιεί την παρεμβολή στα γειτονικά κανάλια.[5]



Εικόνα 4: FBMC Input Signal

Λόγω της χρήσης φίλτρων, το FBMC μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των υποφερόντων, επιτρέποντας πιο πυκνή συσκευασία καναλιών και έχουμε καλύτερη αποδοτικότητα φάσματος. Είναι πιο ανθεκτικό σε σφάλματα χρονισμού σε σύγκριση με το OFDM.

Από τις βασικές λειτουργίες του FBMC είναι ότι χρησιμοποιεί φίλτρα για να δημιουργήσει τις κυματομορφές των υποφερόντων, χρησιμοποιείται το σχήμα φίλτρου όπως το φίλτρο με RootRaisedCosineFilter και δεν απαιτείται κυματομορφή κυκλικού προθέματος (CP), κάτι που μειώνει την απώλεια ενεργειακής αποδοτικότητας, όπως γίνεται στο OFDM.

3.2 Πλεονεκτήματα της FBMC

Η FBMC (FilterBankMulti-Carrier) είναι μια τεχνολογία πολυκαναλικής διαμόρφωσης που προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες όπως η OFDM (OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing). [5], [6]

Πρώτα από όλα:

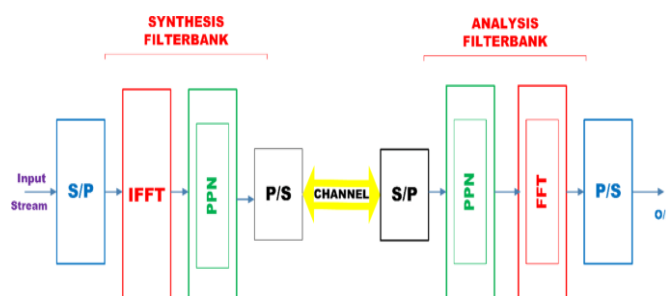
- Έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος, γιατί χρησιμοποιεί φίλτρα με στενή ζώνη πλάτους για κάθε υποφέρων, τα οποία περιορίζουν την

εκπομπή ενέργειας εκτός της επιθυμητής ζώνης συχνοτήτων. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος και μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των καναλιών.

- Τα φίλτρα στην FBMC μειώνουν την παρεμβολή μεταξύ των υποφερόντων και των γειτονικών καναλιών, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών.
- Η FBMC είναι πιο ανθεκτική σε σφάλματα χρονισμού σε σύγκριση με την OFDM, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση κυκλικού προθέματος (CyclicPrefix). Αυτό μειώνει τις απώλειες ενέργειας και βελτιώνει την απόδοση σε συστήματα με κινητικότητα.
- Η FBMC παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε κανάλια με χαμηλή λαμβάνουσα ισχύ (Signal-to-NoiseRatio, SNR), κάνοντάς την ιδανική για ασύρματα περιβάλλοντα και επικοινωνίες σε απομακρυσμένες περιοχές.
- Δεν χρειάζεται κυκλικό πρόθεμα, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας και βελτιώνοντας την απόδοση του φάσματος. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη αποδοτικότητα στις μεταδόσεις.
- Λόγω της αποδοτικότερης χρήσης του φάσματος και της μειωμένης παρεμβολής, η FBMC μπορεί να επιτύχει υψηλότερη απόδοση δεδομένων σε σύγκριση με την OFDM.
- Παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε μη-γραμμικά κανάλια, όπως αυτά που συναντώνται σε δορυφορικές επικοινωνίες και ασύρματα δίκτυα, λόγω των ιδιοτήτων των φίλτρων που χρησιμοποιεί.
- Είναι ευέλικτη και μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες εφαρμογές και περιβάλλοντα, από δίκτυα 5G και IoT μέχρι δορυφορικές επικοινωνίες και έξυπνες πόλεις.
- Η στενή ζώνη πλάτους των φίλτρων της FBMC μειώνει την παρεμβολή από όμορους χρήστες, βελτιώνοντας την απόδοση σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα.
- Και τέλος, είναι λιγότερο ευαίσθητη στις διεργασίες διάυλου σε σύγκριση με την OFDM, προσφέροντας καλύτερη απόδοση σε πολυδιαδρομικά κανάλια.

3.3 Σχεδιασμός πρωτότυπου φίλτρου

Η ψηφιακή μετάδοση βασίζεται στη θεωρία Nyquist: όπου η απόκριση παλμού του φίλτρου μετάδοσης πρέπει να διασχίσει τον άξονα των μηδενικών σε όλα τα πολλαπλάσια της περιόδου συμβόλου. Αυτή η συνθήκη μεταφράζεται στον τομέα της συχνότητας με τη συνθήκη συμμετρίας σχετικά με τη συχνότητα αποκοπής που είναι το ήμισυ του ρυθμού συμβόλων. Ένας απλός τρόπος για να σχεδιάσουμε ένα φίλτρο Nyquist, είναι να θεωρήσουμε την απόκριση συχνότητας του φίλτρου ως το ημιτονοειδές του sinc. Η παγκόσμια μορφή φίλτρου Nyquist γενικά χωρίζεται σε δυο μέρη: ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης και ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης. [5], [6]



Μια σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το σχεδιασμό του πρωτότυπου φίλτρου είναι η ισχύς του θορύβου περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα είναι η υπολειπόμενη ισχύς παρεμβολής λόγω της μη ορθογωνικότητας των φορέων πέρα από τα γειτονικά υποκανάλια. Μπορεί να μετρηθεί για παράδειγμα, φορτώνοντας όλα τα υποκανάλια αλλά μερικά με μη συσχετισμένα σήματα ισχύος μονάδας και μετρώντας την ισχύ του σήματος στα μη φορτωμένα υποκανάλια.

Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα

- **Αυξημένη Αποδοτικότητα Φάσματος:** Το FBMC επιτρέπει τη μετάδοση περισσότερων δεδομένων ανά μονάδα φάσματος.
- **Μειωμένη Παρεμβολή:** Τα προσεκτικά σχεδιασμένα φίλτρα μειώνουν την παρεμβολή μεταξύ των φερόντων, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος.
- **Ευελιξία:** Μπορεί να προσαρμοστεί για διάφορες εφαρμογές και περιβάλλοντα επικοινωνίας.

Η κύρια διαφορά μεταξύ FBMC και OFDM είναι η επιλογή πρωτότυπου φίλτρου. Έτσι το OFDM χρησιμοποιεί ένα ορθογώνιο φίλτρο παραθύρου και το FBMC χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο φίλτρο σχεδιασμένο με την αρχή θεωρίας Nyquist, το οποίο μπορεί να μειώσει σημαντικά το πρόβλημα της φασματικής διαρροής του OFDM. Συνοψίζοντας, ο σχεδιασμός ενός πρωτότυπου φίλτρου FBMC απαιτεί μια καλά καθορισμένη διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλων μεθόδων, την ανάλυση και την βελτιστοποίηση για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση και αποδοτικότητα.

3.4 Ανάλυση πομπού (transmitter) και δέκτη (receiver)

Η τεχνολογία FBMC (Filter Bank Multicarrier) αποτελεί μια προηγμένη τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται σε επικοινωνίες για την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων. Ενσωματώνει φίλτρα που περιορίζουν τη διαστρωμάτωσή τους για να μειώσουν την παρεμβολή μεταξύ των διαφορετικών καναλιών. Η αρχιτεκτονική πομπού (transmitter) FBMC μετατρέπει δεδομένα σε πολλαπλά κανάλια πολυπλεξίας με χρήση φίλτρων τράπεζας (filterbanks). Η αρχιτεκτονική του πομπού συνήθως περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. **Πολυπλεξία Δεδομένων:** Τα δεδομένα εισόδου διαχωρίζονται σε διαφορετικά κανάλια μέσω πολυπλεξίας συχνότητας.
2. **Modulation:** Κάθε κανάλι υποβάλλεται σε διαμόρφωση, συνήθως με χρήση μεταβολής πλάτους ή φάσης.
3. **Filter Bank:** Χρησιμοποιούνται φίλτρα για να περιορίσουν τη διαστρωμάτωσή τους, μειώνοντας τις παρεμβολές μεταξύ των καναλιών.
4. **Συνδυασμός:** Τα πολυπλεγμένα και διαμορφωμένα σήματα συνδυάζονται σε ένα ενιαίο σήμα εξόδου.
5. **Μετατροπή Αναλογικού Σήματος:** Το συνδυασμένο σήμα μπορεί να μετατραπεί σε αναλογική μορφή για μετάδοση.

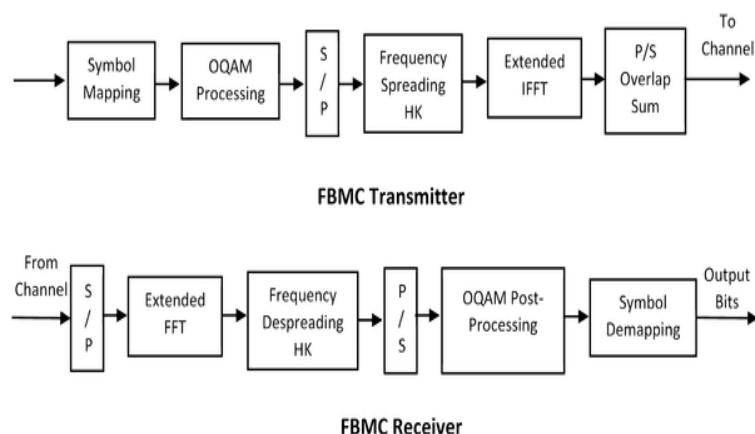
Καθώς επίσης τα **Φίλτρα Τράπεζας** που χρησιμοποιεί καθορίζουν την απόδοση της πολυπλεξίας και την ποιότητα του σήματος. Γίνεται αξιολόγηση με την επίδραση των φίλτρων στις παρεμβολές και την αντοχή του σήματος. Επιπροσθέτως, θα εξετάζει τις

τεχνικές διαμόρφωσης και την αποδοτικότητα τους σε σχέση με την ταχύτητα μετάδοσης και την ποιότητα σήματος. [5], [6], [7]

Για την αρχιτεκτονική του δέκτη (receiver) FBMC αναλαμβάνει την ανάκτηση των δεδομένων από το ληφθέν σήμα. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. **Ανίχνευση Σήματος:** Το ληφθέν σήμα ανιχνεύεται και απομονώνεται από θόρυβο.
2. **Ανάλυση Συχνότητας:** Το σήμα χωρίζεται σε διαφορετικά κανάλια μέσω φίλτρων τράπεζας.
3. **Αναδιαμόρφωση:** Τα απομονωμένα κανάλια υποβάλλονται σε αναδιαμόρφωση για την αποκατάσταση των δεδομένων.
4. **Συνδυασμός Δεδομένων:** Τα δεδομένα από τα διάφορα κανάλια συνδυάζονται για την ανακατασκευή του αρχικού σήματος.

Στην ανάλυση στοιχείων στην FBMC θα εξετάζεται η ικανότητα των φίλτρων να αποκαθιστούν τα δεδομένα χωρίς σημαντική παραμόρφωση και θα γίνεται ανάλυση των μεθόδων αναδιαμόρφωσης και των επιπτώσεών τους στην ποιότητα των δεδομένων. Η παρακάτω απεικόνιση δίνει μεγάλη σημασία σε όλα τα παραπάνω:

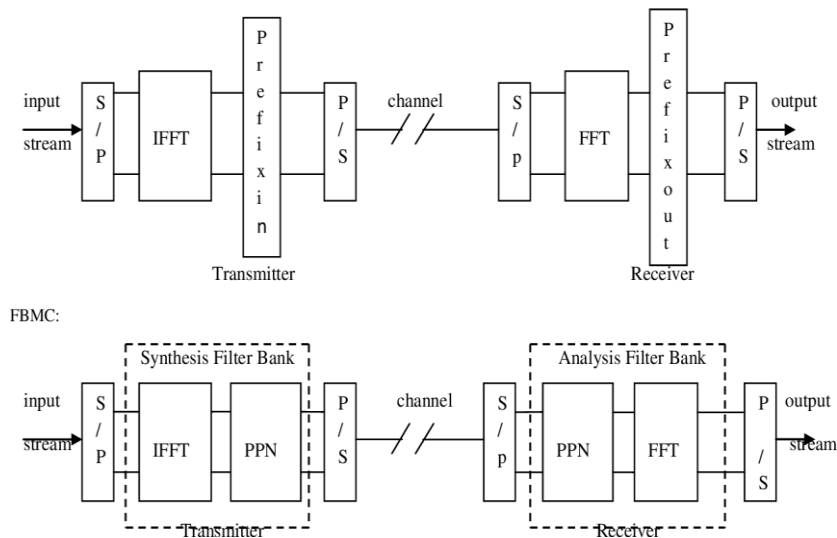


Εικόνα 6: Πομπός και δέκτης στην FBMC

3.5 Διαφορές FBMC και OFDM

Οι τεχνικές πολυμεταφορέων έχουν υπάρξει οι πιο δελεαστικές για την ανάπτυξη συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Για το 5G η OFDM και η διαμόρφωση πολλαπλών φορέων Τράπεζας Φίλτρων (FBMC) είναι οι κυρίαρχοι ανταγωνιστές κυματομορφών.

Η εξέλιξη του διαδικτύου και η αυξανόμενη ζήτηση χρηστών υψηλής ταχύτητας δεδομένων, έχουν δώσει στα δίκτυα δυναμικής πρόσβασης φάσματος (DSA), ευρεία προσοχή τα τελευταία χρόνια. Στα δίκτυα DSA, πολλαπλοί κόμβοι συναγωνίζονται να χρησιμοποιούν ένα κοινό φάσμα συχνοτήτων. Η τεχνική OFDM με κυκλικό πρόθεμα (CP-OFDM) που χρησιμοποιεί ένα ορθογώνιο σύνολο υποφορέων είναι μακράν η πιο διαδεδομένη περίπτωση συστημάτων πολυμεταφορέων που έχουν προβλεφθεί για το σκοπό καλής χρήσης των διάφορων υποσυνόλων αυτών των υποφορέων μεταξύ κόμβων εγκατεστημένων DSA. Η αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ σημάτων των διαφόρων χρηστών είναι αποτέλεσμα της έλλειψης συγχρονισμού. [5], [7]



Εικόνα 7: Πομπός και δέκτης στην FBMC και σύνθεση και ανάλυση πρώτου τύπου φίλτρου

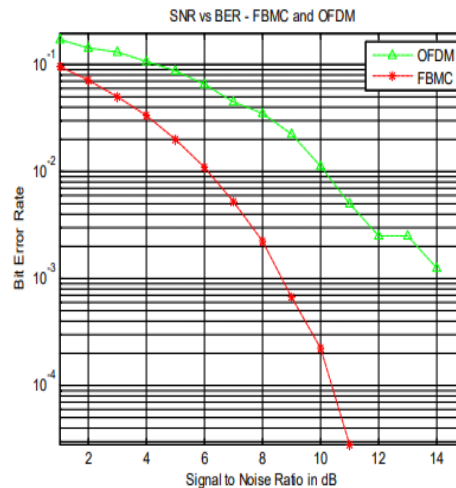
Μειώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του εύρους ζώνης. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της OFDM είναι πως ξεπερνά ένα νέο σύστημα επικάλυψης της FBMC που προσφέρει βελτιωμένη φασματική διαμόρφωση των υποφορέων από το σύστημα OFDM. Αυτό επιτυγχάνεται από το σχεδιασμό του πρωτότυπου φίλτρου, το οποίο συντομεύει την εξίσωση στην έλλειψη CP και έχει μια πρόσθετη αποτελεσματική φασματική χρήση με μείωση παρεμβολών μεταξύ των υπομεταφορέων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται σημαντικές διαφορές μεταξύ FBMC και OFDM:

Ιδιότητα	OFDM	FBMC
Κυκλικό πρόθεμα-επέκταση	Απαιτείται κυκλικό πρόθεμα στο OFDM και αυτό θυσιάζει το εύρος ζώνης	Δεν απαιτείται το κυκλικό πρόθεμα και διατηρεί το εύρος ζώνης
Πλαϊνοί λοβοί	Μεγάλοι και παρεμβαλλόμενοι πλαϊνοί λοβοί	Χαμηλοί πλαϊνοί λοβοί
Συγχρονισμός	Για σωστή ανίχνευση, πολλαπλή πρόσβαση ακύρωση παρεμβολής (MAI) πρέπει να εκτελεστεί στο δέκτη	Το MAI καταστέλλεται λόγω εξαιρετικός εντοπισμός συχνότητας των υπομεταφορέων
Φαινόμενο Doppler	Εξαιρετικά ευαίσθητο στη συχνότητα φορέα, αντισταθμίζεται	Λιγότερο ευαίσθητο και ως εκ τούτου αποδίδει σημαντικά με τη αύξηση της κινητικότητας των χρηστών
Συστήματα MIMO	Υψηλή ευελιξία	Περιορισμένη ευελιξία
Ανίχνευση φάσματος	Ανίχνευση υποβαθμισμένου φάσματος, απόδοση λόγω φασματικής διαρροής, πρόβλημα στο OFDM	Ανίχνευση υψηλού φάσματος

Υπολογιστική πολυπλοκότητα	Πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα	Πολύ υψηλή πολυπλοκότητα
----------------------------	---------------------------	--------------------------

Συνοψίζοντας, ενώ το OFDM έχει γίνει το στάνταρ σε πολλές εφαρμογές λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς του, το FBMC προσφέρει βελτιώσεις σε τομείς όπως η απόδοση του φάσματος και η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, αν και με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην υλοποίηση. Αυτές οι διαφορές καθορίζουν την επιλογή της τεχνολογίας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η χρήση των τεχνικών OFDM και FBMC εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά που προσφέρουν αυτές οι τεχνολογίες.



Εικόνα 8: Διάγραμμα BER και SNR, σύγκριση FBMC με OFDM

Στο παραπάνω διάγραμμα BER με SNR για τα συστήματα FBMC και OFDM παρατηρούμε ότι το FBMC έχει λιγότερα σφάλματα κατά τη μετάδοση για παράδειγμα όταν SNR=6dB το FBMCσύστημα έχει 1BitErrorστα 100 που θα σταλθούν, ενώ το OFDMθα έχει 50 BitErrors στα 100. [21]

Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές μπορούμε να τις καταγράψουμε παρακάτω ως εξής:

Εφαρμογές που μπορούν να πραγματοποιηθούν με OFDM:

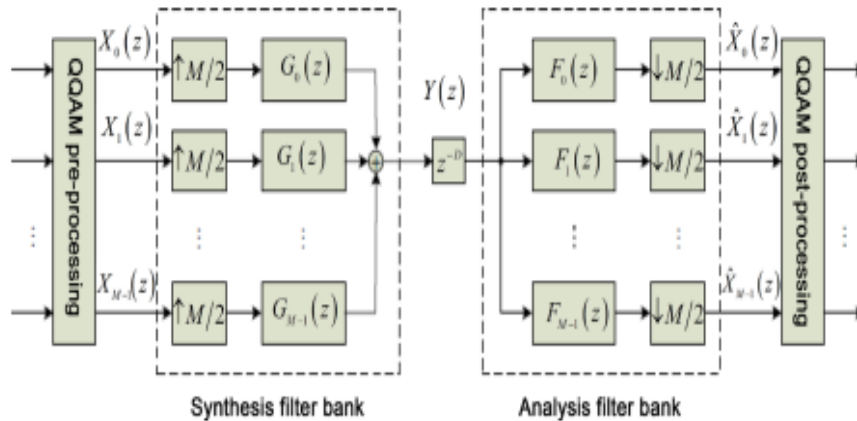
1. **Κινητά Δίκτυα (4G, 5G):** Το OFDM χρησιμοποιείται ευρέως στα δίκτυα LTE και NR (NewRadio) για την παροχή υψηλών ταχυτήτων και αξιόπιστων συνδέσεων κινητής τηλεφωνίας.
2. **Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax):** Οι τεχνολογίες Wi-Fi χρησιμοποιούν OFDM για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος και την παροχή υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων.
3. **Δίκτυα Ραδιοεπικοινωνιών (DAB, DVB-T):** Το OFDM χρησιμοποιείται στην ψηφιακή ραδιοφωνία (DigitalAudioBroadcasting - DAB) και την ψηφιακή τηλεόραση (DigitalVideoBroadcasting - Terrestrial - DVB-T) για την αξιόπιστη μετάδοση σημάτων σε ασύρματα περιβάλλοντα.
4. **Powerline Communication (PLC):** Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν την υπάρχουσα ηλεκτρική καλωδίωση για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιούν OFDM για τη μετάδοση σημάτων μέσω των ηλεκτρικών γραμμών.
5. **Ασύρματες Επικοινωνίες (WiMAX):** Οι ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες όπως το WiMAX (WorldwideInteroperability for Microwave Access) χρησιμοποιούν OFDM για την παροχή ασύρματης πρόσβασης σε δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις.

Εφαρμογές που μπορούν να πραγματοποιηθούν με FBMC

1. **5G και Beyond 5G Δίκτυα:** Το FBMC εξετάζεται για μελλοντικές γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας λόγω της βελτιωμένης απόδοσης φάσματος και της ανθεκτικότητας σε παρεμβολές.
2. **Επικοινωνίες σε Θορυβώδη Περιβάλλοντα:** Το FBMC είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα με υψηλή παρεμβολή και θόρυβο, όπως βιομηχανικές επικοινωνίες και επικοινωνίες σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.
3. **Εφαρμογές Αισθητήρων και IoT:** Στις εφαρμογές IoT (Internet of Things), όπου οι συσκευές επικοινωνούν σε συνθήκες χαμηλής ισχύος και θορυβώδη περιβάλλοντα, το FBMC προσφέρει πλεονεκτήματα λόγω της αποδοτικότητας φάσματος και της ανθεκτικότητας σε παρεμβολές.
4. **Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστερήσης:** Σε εφαρμογές όπου η καθυστέρηση είναι κρίσιμη, όπως η τηλεϊατρική ή τα αυτόνομα οχήματα, το FBMC μπορεί να προσφέρει βελτιώσεις λόγω της χαμηλότερης παρεμβολής και της βελτιωμένης απόδοσης.

3.5 Διαμόρφωση μεταπολυπλέκτη του πολλαπλού φορέα τράπεζας φίλτρων

Ο πυρήνας του συστήματος FBMC είναι η διαμόρφωση του μεταπολυπλέκτη (transmultiplexer- TMUX), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9: Μεταπολυπλέκτης FBMC

Τα κύρια μπλοκ σε αυτή τη μορφή απεικόνισης είναι η προεπεξεργασία OQAM, η τράπεζα φίλτρων σύνθεσης, η τράπεζα φίλτρων ανάλυσης και η μετά επεξεργασία OQAM. Το κανάλι μετάδοσης συνήθως παραλείπεται κατά την ανάλυση και σχεδιασμό συστημάτων (TMUX), καθώς το πρόβλημα ισοστάθμισης καναλιού ελέγχεται ξεχωριστά. Οι τράπεζες φίλτρων σύνθεσης και ανάλυσης είναι φυσικά τα βασικά συστατικά. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το πεδίο των φίλτρων τραπεζών είναι πολύ ευρύ. Οι τράπεζες μπορούν να χωριστούν σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα με την επιλογή των φίλτρων πρωτοτύπων, τις λειτουργίες διαμόρφωσης και τις επιθυμητές ιδιότητες[7]. Η διαμόρφωση του MCFBMC είναι μια περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί ακριβή σχεδιασμό των φίλτρων και των διαδικασιών επεξεργασίας για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα **βασικά στοιχεία** που χρειάζονται χωρίζονται ως εξής:

1. **Φίλτρα Ανάλυσης (AnalysisFilters):** Χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν το εισερχόμενο σήμα σε διάφορες συχνότητες. Κάθε φίλτρο είναι σχεδιασμένο να περνάει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων (ζώνη).
2. **Αποπολυπλεξία (Demultiplexing):** Διαχωρισμός των πολυπλεγμένων σημάτων σε επιμέρους κανάλια. Χρησιμοποιούνται φίλτρα ανάλυσης για την απομόνωση κάθε συχνότητας.
3. **Φίλτρα Σύνθεσης (SynthesisFilters):** Συνδυάζουν τα διαχωρισμένα σήματα πίσω σε ένα ενιαίο σήμα. Κάθε φίλτρο είναι σχεδιασμένο να περνάει το αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων που προορίζεται να συνδυαστεί.
4. **Πολυπλεξία (Multiplexing):** Συνδυασμός των επιμέρους σημάτων σε ένα πολυπλεγμένο σήμα.

Διαδικασία Διαμόρφωσης:

Η διαδικασία διαμόρφωσης αναφέρεται στην εφαρμογή μιας τεχνικής ή μεθόδου για να αλλάξουμε ένα σήμα με σκοπό να το προσαρμόσουμε σε μια συγκεκριμένη ανάγκη ή περιβάλλον. Στην περίπτωση ενός μεταπολυπλέκτη του πολλαπλού φορέα τράπεζας φίλτρων (MCFBM), η διαδικασία διαμόρφωσης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Σχεδιασμός Τράπεζας Φίλτρων:** Επιλέγονται τα φίλτρα ανάλυσης και σύνθεσης, τα οποία συνήθως είναι τμήματα παραθύρων, όπως το παράθυρο Hamming ή το παράθυρο Kaiser. Η επιλογή των φίλτρων εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος.
2. **Δειγματοληψία:** Το εισερχόμενο σήμα δειγματοληπτείται για να αντιστοιχιστεί στις απαιτήσεις της τράπεζας φίλτρων.
3. **Μετασχηματισμός σε Χρόνο-Συχνότητα:** Το σήμα περνάει από τα φίλτρα ανάλυσης για να διαχωριστεί σε πολλαπλά κανάλια συχνοτήτων.
4. **Επεξεργασία Σήματος:** Τα διαχωρισμένα σήματα μπορούν να υποστούν επεξεργασία, όπως συμπίεση, εξάλειψη θορύβου, ή ενίσχυση.
5. **Σύνθεση και Πολυπλεξία:** Τα επεξεργασμένα σήματα περνούν από τα φίλτρα σύνθεσης για να συνδυαστούν πίσω σε ένα ενιαίο σήμα, το οποίο πολυπλέκεται για μετάδοση ή αποθήκευση.

Η διαδικασία διαμόρφωσης είναι κρίσιμη για τη λειτουργία και την απόδοση ενός MCFBM, καθώς καθορίζει πώς το σήμα θα υποστεί επεξεργασία για να μεταδοθεί, να αναλυθεί ή να αποθηκευτεί αποτελεσματικά και αξιόπιστα. [6], [7]

Εφαρμογές:

Στην περίπτωση του μεταπολυπλέκτη του πολλαπλού φορέα τράπεζας φίλτρων (MCFBM), οι εφαρμογές αφορούν τα πεδία όπου αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει συγκεκριμένα προβλήματα ή να προσφέρει βελτιώσεις. Οι εφαρμογές του MCFBM είναι πολλές και ποικίλες, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και βιομηχανιών. Κάθε εφαρμογή αξιοποιεί τις μοναδικές δυνατότητες του MCFBM για τη διαχείριση, την επεξεργασία και τη μετάδοση σημάτων με τρόπο που βελτιώνει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων επικοινωνίας και επεξεργασίας σήματος.

- ο **Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα:** Χρησιμοποιούνται για την απομόνωση και τον συνδυασμό καναλιών σε επικοινωνιακές γραμμές.
- ο **Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος:** Χρησιμοποιούνται για τη διαχωρισμό και την ανάλυση σημάτων σε διαφορετικές συχνότητες για διάφορες επεξεργασίες.

- ο **Ακουστική Μηχανική**: Χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση ήχου σε ακουστικά συστήματα και εφαρμογές μουσικής τεχνολογίας.

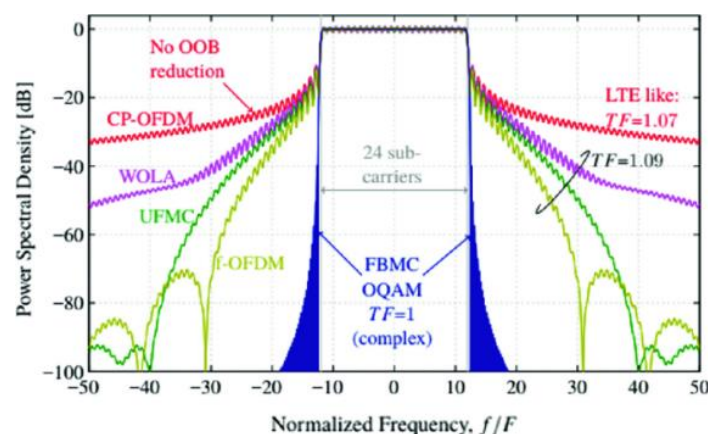
4ο Κεφάλαιο – Πλαίσιο συστήματος Filter Bank Multicarrier – Offset Quadrature Amplitude Modulation.

4.1 Μετατόπιση τετραγωνικού πλάτους διαμόρφωσης - OQAM: (Offset Quadrature Amplitude Modulation).

Η Μετατόπιση Τετραγωνικού Πλάτους Διαμόρφωσης (Offset Quadrature Amplitude Modulation - OQAM) είναι μια παραλλαγή της κλασικής διαμόρφωσης QAM (Quadrature Amplitude Modulation), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα πολυμεταφορέων όπως το FBMC (Filter Bank Multicarrier). Η OQAM σχεδιάστηκε για να βελτιώσει τη φασματική αποδοτικότητα και να μειώσει το Inter-Symbol Interference (ISI) και το Inter-Carrier Interference (ICI). Η OQAM είναι μια τεχνική διαμόρφωσης που προέρχεται από την κλασική QAM με μια βασική διαφορά: στη OQAM, τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των συμβόλων διαμορφώνονται και μεταδίδονται με χρονική μετατόπιση (offset). Η χρονική μετατόπιση αυτή επιτρέπει την εναλλακτική εκπομπή πραγματικών και φανταστικών τμημάτων, εξαλείφοντας τη συμβολή τους στην ίδια χρονική στιγμή. [7], [8]

QAM: Στην κλασική QAM, τα σύμβολα διαμορφώνονται σε δύο άξονες (πραγματικός και φανταστικός) ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να εκπέμπονται την ίδια στιγμή τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό τμήμα του σήματος.

OQAM: Στην OQAM, τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των συμβόλων μετατοπίζονται στον χρόνο, έτσι ώστε το πραγματικό μέρος του συμβόλου να εκπέμπεται σε μια χρονική στιγμή, ενώ το φανταστικό μέρος εκπέμπεται με χρονική μετατόπιση μισού συμβόλου. Αυτή η μετατόπιση μειώνει τις παρεμβολές (ISI και ICI).



Εικόνα 10: Φάσμα της FBMC στην OQAM

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία της OQAM, ας δούμε πώς εξελίσσεται η διαδικασία έχει κάποια βασικά βήματα.

- ο **Διαχωρισμός σε Πραγματικό και Φανταστικό Μέρος**: Ένα σύμβολο QAM αποτελείται από δύο μέρη: το πραγματικό (in-phase) και το φανταστικό (quadrature). Στην OQAM, αυτά τα δύο μέρη μεταδίδονται χωριστά.

- **Χρονική Μετατόπιση (Offset):** Στην OQAM, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του σήματος μεταδίδονται με χρονική μετατόπιση μισής περιόδου συμβόλου. Αυτή η χρονική μετατόπιση εξασφαλίζει ότι τα δύο μέρη του σήματος δεν αλληλεπικαλύπτονται άμεσα, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές.
- **Συμβολική Εναλλαγή:** Στην OQAM, σε κάθε χρονικό βήμα μεταδίδεται είτε το πραγματικό είτε το φανταστικό μέρος ενός σήματος, και αυτό αλλάζει σε κάθε συμβολική χρονική περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα μεταδίδει τα πραγματικά μέρη σε μια χρονική στιγμή, και στη συνέχεια τα φανταστικά μέρη με χρονική καθυστέρηση μισού συμβόλου. [7]

Υπάρχουν κάποια πλεονεκτήματα όπου η OQAM προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την κλασική QAM, ειδικά σε συστήματα πολυμεταφορέων όπως το FBMC:

- **Μείωση Παρεμβολών (ISI και ICI):** Με τη χρονική μετατόπιση των πραγματικών και φανταστικών τμημάτων των συμβόλων, η OQAM ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων (ISI) και μεταξύ των υπό-μεταφορέων (ICI). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συστήματα πολυμεταφορέων με στενά φίλτρα, όπως το FBMC, όπου η διαμόρφωση OQAM συνδυάζεται άψογα με τη φιλτραρισμένη δομή των υπό-μεταφορέων.
- **Βελτίωση της Φασματικής Αποδοτικότητας:** Χάρη στη μετατόπιση των πραγματικών και φανταστικών τμημάτων, η OQAM επιτρέπει πιο αποδοτική χρήση του φάσματος σε σχέση με την παραδοσιακή QAM. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επιτύχει υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων χωρίς να απαιτεί επιπλέον εύρος ζώνης.
- **Αποδοτική Χρήση του Χρόνου:** Επειδή στην OQAM δεν απαιτείται CyclicPrefix (CP), όπως στην OFDM, η διαμόρφωση OQAM αποφεύγει το overhead που προκαλεί το CP. Αυτό βελτιώνει την καθαρή ταχύτητα δεδομένων και καθιστά την OQAM ιδιαίτερα κατάλληλη για συστήματα όπου η φασματική και χρονική αποδοτικότητα είναι κρίσιμη.
- **Καλύτερη Αντοχή σε Κανάλια με Πολυδιόδευση:** Η OQAM έχει καλύτερη αντοχή σε κανάλια με πολυδιόδευση (multipath) σε σχέση με τη συμβατική QAM, καθώς η χρονική μετατόπιση των συμβόλων βοηθά στη μείωση των παρεμβολών που προκαλούνται από τις πολλαπλές διαδρομές του σήματος.

Υπάρχουν όμως κάποια μειονεκτήματα της OQAM, παρά τα πλεονεκτήματά της.

- **Υπολογιστική Πολυπλοκότητα:** Η υλοποίηση της OQAM είναι πιο περίπλοκη από υπολογιστική άποψη σε σχέση με την απλή QAM. Η διαχείριση της χρονικής μετατόπισης των πραγματικών και φανταστικών τμημάτων και η ανάγκη για ακριβή συγχρονισμό χρόνου αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος.
- **Συγχρονισμός:** Ο συγχρονισμός των πραγματικών και φανταστικών τμημάτων του σήματος είναι πιο κρίσιμος στην OQAM. Μικρά λάθη συγχρονισμού μπορεί να οδηγήσουν σε παρεμβολές και απώλεια της απόδοσης του συστήματος.
- **Υποστήριξη MIMO:** Η OQAM έχει δυσκολότερη υλοποίηση όταν συνδυάζεται με συστήματα MIMO (MultipleInputMultipleOutput), σε σύγκριση με την OFDM που υποστηρίζει MIMO πιο εύκολα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σύνθετη δομή του σήματος στην OQAM, η οποία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για να εφαρμοστεί σωστά στα συστήματα MIMO. [7], [8], [9], [11]

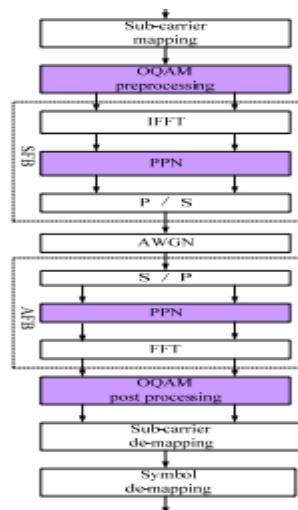
Ωστόσο η OQAM χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως:

- **Ασύρματα Δίκτυα:** Χρησιμοποιείται σε τεχνολογίες όπως τα Wi-Fi και LTE για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας και τη βελτίωση της ποιότητας της επικοινωνίας.
- **Δορυφορικές Επικοινωνίες:** Σε περιβάλλοντα όπου η διαθεσιμότητα του φάσματος είναι περιορισμένη και απαιτείται υψηλή αποδοτικότητα.
- **Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών:** Σε εφαρμογές όπως τα ψηφιακά ραδιόφωνα και τηλεοράσεις.

Συνοψίζοντας, η OQAM αποτελεί μια εξελιγμένη τεχνική διαμόρφωσης που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή QAM, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις για φασματική αποδοτικότητα και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές.

4.2 Πλαίσιο συστήματος FBMC-OQAM - (System framework)

Το FBMC-OQAM (Filter Bank Multicarrier–Offset Quadrature Amplitude Modulation) είναι ένα σύστημα πολυμεταφορέα που χρησιμοποιείται κυρίως σε σύγχρονα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα λόγω των πλεονεκτημάτων του σε σχέση με άλλα συστήματα πολυμεταφορέα, όπως το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Το FFT χρησιμοποιείται για γρήγορη υλοποίηση του συστήματος OFDM και ο αλγόριθμος FFT χρησιμοποιείται επίσης για γρήγορη εφαρμογή του FBMC-OQAM. Διασπορά της συχνότητας-FFT (FS-FFT) και Δίκτυο Πολυφασικής φάσης-FFT- (PPN-FFT) είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχήματα γρήγορης υλοποίησης του FBMC-OQAM. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι χαμηλότερη από το FS-FFT, επειδή το PPN-FFT μπορεί να καταστείλει αποτελεσματικά το ISI χωρίς επέκταση συχνότητας και κυκλικό πρόθεμα. Επομένως, αυτό το έγγραφο χρησιμοποιεί το PPN-FFT ως γρήγορη υλοποίηση μέσω από το σύστημα FBMC-OQAM υπό αυτή την περίπτωση. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το μοντέλο συστήματος FBMC-OQAM. [8], [9], [11]



Εικόνα 11: FBMCPPN

Το σύστημα FBMC-OQAM αποτελείται κυρίως από τέσσερα μέρη: προεπεξεργασία OQAM, επεξεργασία θέσης OQAM, SFB και Τράπεζα φίλτρων ανάλυσης (AFB). Το FBMC-OQAM μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες καναλιού και απαιτήσεις επικοινωνίας. Η ευελιξία στην επιλογή φίλτρων και παραμέτρων διαμόρφωσης το καθιστά κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές. Μπορεί να χρησιμοποιείται εκτενώς για την υλοποίηση των φίλτρων και

τη διαμόρφωση OQAM. Οι προηγμένοι αλγόριθμοι DSP επιτρέπουν την αποτελεσματική εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών σε πραγματικό χρόνο. Ο συγχρονισμός και η διόρθωση σφαλμάτων μέσα από προηγμένες τεχνικές συγχρονισμού χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της ευθυγράμμισης των σημάτων μεταξύ πομπού και δέκτη. Όπως επίσης, οι τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων ενσωματώνονται για να αντιμετωπίζουν τα λάθη που προκύπτουν κατά τη μετάδοση. Το FBMC-OQAM συνδυάζει την υψηλή αποδοτικότητα φάσματος και την ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, καθιστώντας το ιδανικό για απαιτητικές εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών. Η κατανόηση του πλαισίου λειτουργίας του είναι κρίσιμη για την αξιοποίησή του σε σύγχρονα δίκτυα.

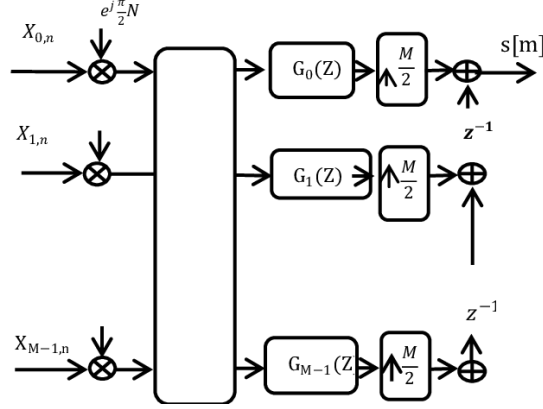
4.3 Πομπός (Transmitter)

Στο σύστημα FBMC-OQAM, ο πομπός (transmitter) πραγματοποιεί για την προετοιμασία και την αποστολή των δεδομένων μέσω του καναλιού επικοινωνίας. Κάποια από τα βασικά στοιχεία και τα βήματα λειτουργίας του πομπού σε ένα σύστημα FBMC-OQAM:

1. Δομή του Πομπού: Με την Είσοδο Δεδομένων (Data Input), όπου τα δεδομένα που πρόκειται να μεταδοθούν εισάγονται στον πομπό και ακόμη μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως ψηφιακά δεδομένα, ήχοι ή βίντεο. Τα δεδομένα εισόδου διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας την OQAM. Στη διαμόρφωση OQAM, τα δεδομένα διαχωρίζονται σε πραγματικά και φανταστικά μέρη, και αυτά μετατοπίζονται χρονικά ώστε να μειωθεί η παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων (ISI). Ακόμη στην ανάλυση φίλτρων, η διαμορφωμένη σειρά δεδομένων περνά μέσα από ένα σύνολο φίλτρων (filterbank) για να δημιουργηθούν τα σήματα υποφερουσών (subcarrier signals). Έτσι τα φίλτρα αυτά είναι σχεδιασμένα να περιορίζουν το φάσμα κάθε υποφερουσας για να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές μεταξύ τους (ICI).

2. Λειτουργία του Πομπού: Τα δεδομένα εισόδου κωδικοποιούνται και ομαδοποιούνται σε σύμβολα OQAM. Η κωδικοποίηση αυτή γίνεται έτσι ώστε κάθε σύμβολο να περιέχει τόσο πραγματικά όσο και φανταστικά μέρη, με την κατάλληλη χρονική μετατόπιση. Εδώ τα σύμβολα OQAM διαχωρίζονται σε πολλαπλές υποφερουσες συχνότητες χρησιμοποιώντας φίλτρα ανάλυσης. Και κάθε φίλτρο απομονώνει μία συγκεκριμένη υποφερουσα και εξασφαλίζει ότι το σήμα της είναι καθαρό και χωρίς παρεμβολές από άλλες υποφερουσες. Όσο για τη συχνότητα χρόνου τα σήματα των υποφερουσών τοποθετούνται σε ένα πλέγμα χρόνου-συχνότητας, διασφαλίζοντας ότι κάθε σύμβολο είναι σωστά χρονικά και φασματικά ευθυγραμμισμένο. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την ελάχιστη παρεμβολή και τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Επιπροσθέτως για την σύνθεση του σήματος, τα σήματα των υποφερουσών συντίθενται σε ένα ενιαίο σήμα εξόδου. Η σύνθεση αυτή πραγματοποιείται μέσω του synthesis filter bank, που είναι η αντίστροφη διαδικασία της ανάλυσης φίλτρων.

3. Προετοιμασία και Μετάδοση: Για την προετοιμασία Σήματος (Signal Preparation), το συντεθειμένο σήμα μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, όπως προσαρμογή ισχύος και προσθήκη πιλότων για συγχρονισμό. Ακόμη οι πιλότοι χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης στον δέκτη. Τώρα ότι έχει να κάνει με τη μετάδοση, το προετοιμασμένο σήμα εκπέμπεται μέσω του καναλιού επικοινωνίας και η εκπομπή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ασύρματων ή ενσύρματων μέσων, ανάλογα με την εφαρμογή. Ο πομπός FBMC-OQAM παρέχει υψηλή αποδοτικότητα φάσματος και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, καθιστώντας τον ιδανικό για σύγχρονα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα. Η προσεκτική διαμόρφωση και η χρήση φίλτρων εξασφαλίζουν ότι το σήμα που εκπέμπεται είναι καθαρό και μπορεί να αποδιαμορφωθεί εύκολα από τον δέκτη.



Εικόνα 12: Δομή του πομπού στην FBMC

Η συγκεκριμένη διαδικασία εργασίας του αποστολέα στο σύστημα FBMC-OQAM περιγράφεται ως εξής: αρχικά μετά την κωδικοποίηση καναλιού και την αντιστοίχιση συμβόλων σειριακών δεδομένων υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιείται το OQAM για τη διαμόρφωση με σύμβολα. Ο σκοπός της προεπεξεργασίας OQAM είναι η διατήρηση της ορθογωνικότητας μεταξύ των υποφορέων. Η προεπεξεργασία επεξεργάζεται πολύπλοκα σύμβολα σε πραγματικό και εικονικό μέρος και συμπλέκει μισό σύμβολο χρονικό διάστημα για να γίνουν σύμβολα μετάδοσης. Οι τυχόν υποφορείς είναι ορθογώνια κατανομή στο χρόνο δειγματοληψίας και παρακείμενους υποφορείς. Στη συνέχεια, η λειτουργία IFFT πραγματοποιείται στη μετάδοση με σύμβολα και στη συνέχεια φιλτράρονται οι πρωτότυπες τράπεζες φίλτρων με διαφορετικές μετατοπίσεις. Τέλος, το συνθετικό με τα σήματα στον τομέα του χρόνου υπερτίθενται, αποστέλλονται και έτσι αντιλαμβάνεται τη διαμόρφωση του γρήγορου για την τεχνολογία πολλαπλών φορέων. [7], [8], [9]

Στην εικόνα, το M αντιπροσωπεύει τον αριθμό των υποφορέων και το $h(t)$ την κρουστική απόκριση του πρωτοτύπου φίλτρου. Το σήμα του αποστολέα αναπαρίσταται ως:

$$x_{m,n} = a_{m,n} + j \times b_{m,n} \quad (1)$$

Το πραγματικό μέρος και το φανταστικό μέρος του σήματος FBMC-OQAM είναι ορθογώνια στο $T/2$, όπου το T είναι το περίοδο μετάδοσης σήματος. Μετά από διαμόρφωση από πρωτότυπες τράπεζες φίλτρων και M υποφορείς, η έξοδος το σήμα εκφράζεται ως:

$$x_{m,n}(t) = [a_{m,n}h(t) + j \times b_{m,n}h(t - \frac{T}{2})]e^{j2\pi\frac{m}{M}(t-nM)} \quad (2)$$

Τέλος, το σήμα εξόδου του πομπού FBMC-OQAM εκφράζεται ως:

$$(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_n [a_{m,n}h(t) + j \times b_{m,n}h(t - \frac{T}{2})]e^{j2\pi\frac{m}{M}(t-nM)} \quad (3)$$

4.4 Δέκτης (receiver)

Ο δέκτης (receiver) στο σύστημα FBMC-OQAM είναι υπεύθυνος για την λήψη και την επεξεργασία των σημάτων που εκπέμπονται από τον πομπό. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την αποδιαμόρφωση, τη διόρθωση σφαλμάτων και την αναδόμηση των αρχικών δεδομένων. Ακολουθούν τα βασικά στοιχεία και τα βήματα λειτουργίας του δέκτη σε ένα σύστημα FBMC-OQAM:

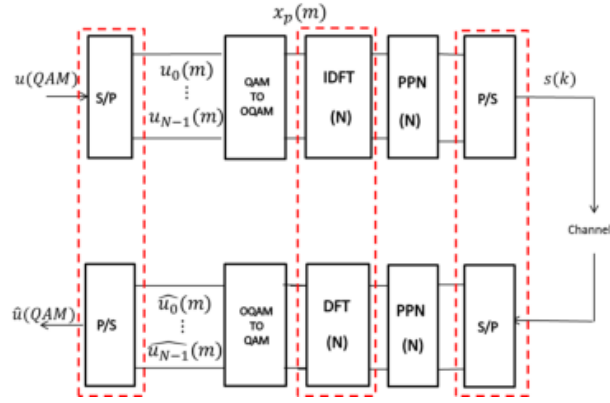
1. Δομή του Δέκτη: σχετικά με τη λήψη σήματος (SignalReception), ο δέκτης λαμβάνει το σήμα από το κανάλι επικοινωνίας και το σήμα αυτό μπορεί να περιέχει παρεμβολές και θόρυβο από το κανάλι μετάδοσης. Για την ανάλυση των φίλτρων, το λαμβανόμενο σήμα περνάει μέσω ενός συνόλου φίλτρων (filterbank) για να διαχωριστούν οι υποφέρουσες συχνότητες και κάθε φίλτρο απομονώνει μία συγκεκριμένη υποφέρουσα, εξασφαλίζοντας ότι το σήμα της είναι καθαρό και χωρίς παρεμβολές από άλλες υποφέρουσες.

2. Λειτουργία του Δέκτη: ως αφορά τη χρονοδιασπορά και την εξαγωγή υποφερουσών (Time – Frequency Lattice Extraction), τα σήματα των υποφερουσών τοποθετούνται σε ένα πλέγμα χρόνου-συχνότητας, διασφαλίζοντας ότι κάθε σύμβολο είναι σωστά χρονικά και φασματικά ευθυγραμμισμένο. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την ελάχιστη παρεμβολή και τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Σχετικά με την αποδιαμόρφωση OQAM (OQAM Demodulation), τα διαχωρισμένα σήματα των υποφερουσών αποδιαμορφώνονται χρησιμοποιώντας την αντίστροφη διαδικασία της OQAM διαμόρφωσης.

Έτσι η αποδιαμόρφωση αυτή περιλαμβάνει την εξαγωγή των πραγματικών και φανταστικών μερών των σημάτων και την αναδόμηση των αρχικών δεδομένων. Ακόμη για τη διόρθωση σφαλμάτων, εφαρμόζονται τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων για να αντιμετωπιστούν τα λάθη που προκύπτουν κατά τη μετάδοση και οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν κωδικοποιήσεις όπως οι κωδικοποιήσεις Hamming, Reed-Solomon ή οι αλγόριθμοι Turbo και LDPC.

3. Αναδόμηση και Απόδοση Δεδομένων: για το συγχρονισμό, οι πιλότοι που περιλαμβάνονται στο σήμα χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης και συγχρονισμού στον δέκτη και είναι κρίσιμος για την ακριβή ευθυγράμμιση των σημάτων. Για την αναδόμηση δεδομένων μετά την αποδιαμόρφωση και τη διόρθωση σφαλμάτων, τα αρχικά δεδομένα αναδομούνται και τα δεδομένα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες μορφές πληροφορίας, όπως κείμενο, ήχο ή βίντεο.

Επιπροσθέτως για την απόδοση των δεδομένων τα τελικά δεδομένα αποδίδονται στο σύστημα εξόδου, που μπορεί να είναι μια οθόνη, ένας ήχος ή μια μονάδα αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνει τη λήψη και επεξεργασία του σήματος. Ο δέκτης FBMC-OQAM έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίζει την υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία της μετάδοσης, ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλές παρεμβολές και θόρυβο. Οι προσεκτικές διαδικασίες ανάλυσης, αποδιαμόρφωσης και διόρθωσης σφαλμάτων διασφαλίζουν ότι τα αρχικά δεδομένα ανακτώνται με ακρίβεια και αξιοπιστία.



Εικόνα 13: Δομή του δέκτη στην FBMC

Στη διαδικασία του δέκτη στο FBMC-OQAM, χρησιμοποιείται επίσης ένα σύνολο πρωτότυπων φίλτρων, τα οποία έχουν την ίδια απόδοση με τα πρωτότυπα φίλτρα, τον πομπό και είναι συμμετρικά. Πρώτα από όλα το αρχικό σήμα φιλτράρεται από πρωτότυπες τράπεζες φίλτρων με διαφορετικές αντισταθμίσεις. Στη συνέχεια, το αρχικό σήμα ανακτάται από το FFT και το OQAM. Η μετεπεξεργασία του OQAM είναι να πάρει το πραγματικό μέρος του σήματος που διαμορφώθηκε στον υποφορέα και στη συνέχεια να ανακατασκευάσει το πραγματικό σήμα στο μιγαδικό σήμα μέσω της αμοιβαίας μετατροπής του πραγματικού αριθμού και του μιγαδικού αριθμού.

Υποθέτοντας ότι το κανάλι μετάδοσης είναι γκαουσιανός λευκός θόρυβος, (Gaussian Noise-AWGN), $\eta(t)$ υποδηλώνει με βάση τον GaussWhiteNoise, L_n δηλώνει τη μέγιστη καθυστέρηση και το σήμα εισόδου του δέκτη μπορεί να υποδηλωθεί σαν:

$$r(t) = \sum_{\tau}^{L_n-1} h(\tau) s(t - \tau) + \eta(t) \quad (4)$$

Μετά την επεξεργασία από το AFB στο άκρο λήψης, το αντίστοιχο σήμα αποδιαμόρφωσης μπορεί να είναι αυτό που λαμβάνεται, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως:

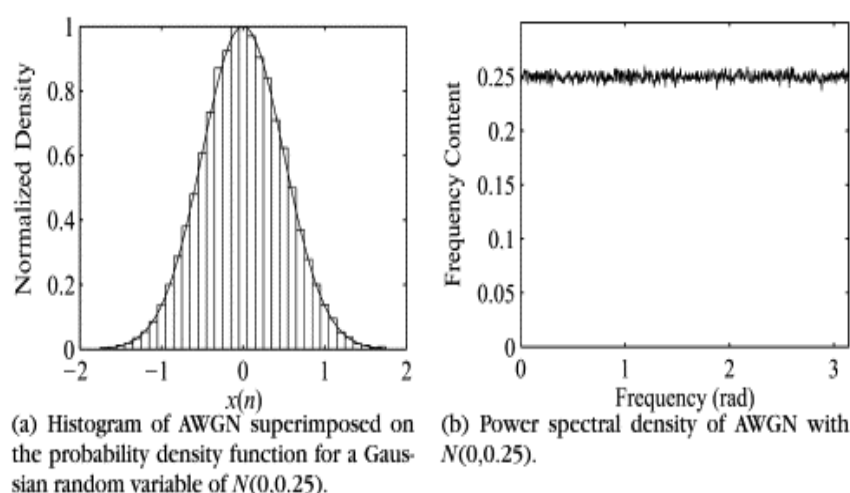
$$y_{m,n} = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} r(t) h(t - \frac{nM}{2}) e^{-\frac{j2\pi t}{M}} j^{-(m+n)} \quad (5)$$

Όταν ο αριθμός των υποφορέων είναι μεγάλος, το σύστημα γρήγορης υλοποίησης του συστήματος FBMC-OQAM με βάση το PPN-FFT μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα και είναι εύκολο να εφαρμοστεί. [7], [8], [9]

5ο Κεφάλαιο – Γκαουσιανός Λευκός Θόρυβος και επίδραση σε σύστημα FBMC.

5.1 Γκαουσιανός Λευκός Θόρυβος - Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Εξ ορισμού, ο θόρυβος είναι μια ανεπιθύμητη διαταραχή που συνοδεύει το λαμβανόμενο σήμα και μπορεί να παραμορφώσει τις πληροφορίες που μεταφέρονται. Ο γκαουσιανός λευκός θόρυβος Gaussian noise (AWGN) είναι ένα βασικό μοντέλο θορύβου που χρησιμοποιείται στη θεωρία πληροφοριών για να μιμηθεί την επίδραση πολλών τυχαίων διεργασιών που συμβαίνουν στη φύση. Ο θόρυβος μπορεί να προέρχεται τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές, όπως ο θερμικός θόρυβος λόγω της θερμικής ανάδευσης των ηλεκτρονίων στις γραμμές μεταφοράς, σε άλλους ασύρματους πομπούς που παρεμβάλλονται ή ακόμα και σε άλλους αγωγούς. Ο συνδυασμός τέτοιων πηγών θορύβου είναι γνωστό ότι διαθέτει περίπου Gaussian κατανομή, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [12], [13]



Εικόνα 14: α) Ιστόγραμμα AWGN, β) Φασματική πυκνότητα ισχύος του AWGN με $N(0,0.25)$

Στην Εικόνα 14, εμφανίζεται ένα ιστόγραμμα μέσου γκαουσιανού λευκού θορύβου με διακύμανση $\sigma_n^2 = 0,25$, με την αντίστοιχη συνεχή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας να υπερτίθεται σε αυτό. Το συνεχές Gaussian ορίζεται ως:

$$f_{XX} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} e^{-\frac{x - \mu_n^2}{2\sigma_n^2}},$$

όπου μ_n και σ_n^2 είναι ο μέσος όρος και η διακύμανση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορεί δικαιολογημένα να γίνει η υπόθεση ότι ο θόρυβος που εισάγεται από το κανάλι είναι λευκός, πράγμα που σημαίνει ότι ο θόρυβος που λαμβάνεται σε οποιαδήποτε συχνότητα είναι περίπου ο ίδιος. Σε ένα παράδειγμα μέσου λευκού Gaussian θορύβου με διακύμανση $\sigma_n^2 = 0,25$ ακόμα κι αν αυτή η υπόθεση μπορεί να μην ισχύει σε ορισμένες περιπτώσεις, βοηθάει να γίνει η μαθηματική ανάλυση των ψηφιακών συστημάτων επικοινωνίας.

Το κανάλι AWGN είναι ένα μοντέλο καναλιού επικοινωνίας που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων επικοινωνίας. Αυτό το μοντέλο προϋποθέτει ότι το μόνο είδος θορύβου που επηρεάζει το σήμα κατά τη μετάδοση είναι

λευκός θόρυβος Gaussian, ο οποίος προστίθεται στο σήμα [12],[13]. Διάφορα χαρακτηριστικά του AWGN Καναλιού:

Προσθετικός θόρυβος, επειδή προστίθεται σε οποιοδήποτε σήμα που μπορεί να είναι και εγγενής στο σύστημα πληροφοριών.

Λευκός θόρυβος (White), αναφέρεται στην ιδέα ότι έχει ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα ισχύος σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων για το σύστημα πληροφοριών. Είναι μια αναλογία με το λευκό χρώμα που μπορεί να πραγματοποιηθεί με ομοιόμορφες εκπομπές σε όλες τις συχνότητες στο ορατό φάσμα. Η "λευκότητα" του θορύβου αναφέρεται στο γεγονός ότι έχει σταθερή πυκνότητα φάσματος ισχύος (Power Spectral Density, PSD) σε όλες τις συχνότητες. Δηλαδή, κάθε συχνότητα περιέχει την ίδια ισχύ θορύβου, όπως το λευκό φως που περιέχει όλες τις ορατές συχνότητες του φωτός σε ίσα επίπεδα.

Γκαουσιανός θόρυβος, αναφέρεται στη στατιστική κατανομή του θορύβου, η οποία ακολουθεί την κανονική (Gaussian) κατανομή. Αυτό σημαίνει πως οι τιμές του θορύβου κατατάσσονται με βάση την κανονική καμπύλη, με τις περισσότερες τιμές να είναι κοντά στον μέσο όρο και λίγες τιμές να απέχουν πολύ από αυτόν.

Ο λευκός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) είναι ιδιαίτερα σημαντικός στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της επεξεργασίας σήματος, καθώς αποτελεί ένα βασικό μοντέλο θορύβου που συναντάται σε πολλά πρακτικά συστήματα

Το AWGN χρησιμοποιείται συχνά ως μοντέλο καναλιού στο οποίο η μόνη βλάβη στην επικοινωνία είναι μια γραμμική προσθήκη ευρείας ζώνης λευκού θορύβου με σταθερή φασματική πυκνότητα (που εκφράζεται ως watt ανά hertz του εύρους ζώνης) και μια Gaussian κατανομή πλάτους. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την εξασθένηση, την επιλεκτικότητα συχνότητας, την παρεμβολή, τη μη γραμμικότητα ή τη διασπορά. Ωστόσο, παράγει απλά και πρακτικά μαθηματικά μοντέλα που είναι χρήσιμα για την απόκτηση εικόνας σχετικά με την υποκείμενη συμπεριφορά ενός συστήματος πριν ληφθούν υπόψη αυτά τα άλλα φαινόμενα. [12], [13]

Το κανάλι AWGN είναι ένα καλό μοντέλο για πολλές δορυφορικές συνδέσεις επικοινωνίας. Δεν είναι καλό μοντέλο για τους περισσότερους επίγειους συνδέσμους λόγω πολλαπλών διαδρομών, αποκλεισμού εδάφους, παρεμβολών κ.λπ. Ωστόσο, για τη μοντελοποίηση επίγειων μονοπατιών, το AWGN χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση του θορύβου υποβάθρου του υπό μελέτη καναλιού, επιπλέον του αποκλεισμού πολλαπλών διαδρομών, εδάφους, παρεμβολές, ανάγλυφο εδάφους και αυτοπαρεμβάσεις που συναντούν τα σύγχρονα ραδιοφωνικά συστήματα στην επίγεια λειτουργία.

5.2 Χωρητικότητα καναλιού

Το κανάλι AWGN αντιπροσωπεύεται από μια σειρά εξόδων Y_i σε ευρετήριο συμβάντων διακριτού χρόνου i . Το Y_i είναι το άθροισμα των εισόδων X_i και ο θόρυβος Z_i , όπου Z_i είναι ανεξάρτητο και πανομοιότυπα κατανομημένο και αντλείται από μηδενική κανονική κατανομή με διακύμανση N (ο θόρυβος).

$$\begin{aligned} Z_i &\sim \mathcal{N}(0, N) \\ Y_i &= X_i + Z_i. \end{aligned}$$

Η χωρητικότητα του καναλιού είναι άπειρη εκτός εάν ο θόρυβος N είναι μη μηδενικός και είναι επαρκώς βεβαιωμένος. Ο πιο συνηθισμένος περιορισμός στην είσοδο είναι ο λεγόμενος περιορισμός "ισχύς", που απαιτεί ότι για μια κωδική λέξη που μεταδίδεται μέσω του καναλιού, έχουμε:

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 \leq P,$$

όπου P αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ισχύ καναλιού. Επομένως, η χωρητικότητα καναλιού για το κανάλι με περιορισμό ισχύος δίνεται από:

$$C = \max \{I(X; Y) : f \text{ s.t. } E(X^2) \leq P\}$$

Όπου f είναι η διανομή του X . Αναπτύξτε το $I(X; Y)$, γράφοντάς το με όρους διαφορικής εντροπίας:

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= h(Y) - h(Y | X) \\ &= h(Y) - h(X + Z | X) \\ &= h(Y) - h(Z | X) \end{aligned}$$

Αλλά το X και το Z είναι ανεξάρτητες, επομένως:

$$I(X; Y) = h(Y) - h(Z)$$

Η αξιολόγηση της διαφορικής εντροπίας ενός Gaussian δίνει:

$$h(Z) = \frac{1}{2} \log(2\pi e N)$$

Επειδή τα X και Z είναι ανεξάρτητα και το άθροισμά τους δίνει Y :

$$E(Y^2) = E((X + Z)^2) = E(X^2) + 2E(X)E(Z) + E(Z^2) \leq P + N$$

Από αυτό το όριο, συμπεραίνουμε από μια ιδιότητα της διαφορικής εντροπίας ότι:

$$h(Y) \leq \frac{1}{2} \log(2\pi e(P + N))$$

Επομένως, η χωρητικότητα καναλιού δίνεται από το υψηλότερο δυνατό όριο στην αμοιβαία πληροφορία:

$$I(X; Y) \leq \frac{1}{2} \log(2\pi e(P + N)) - \frac{1}{2} \log(2\pi e N)$$

Όπου το $I(X; Y)$, μεγιστοποιείται όταν: $X \sim N(0, P)$

Έτσι η χωρητικότητα C για το κανάλι AWGN δίνεται από:

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N} \right)$$

Η Μαθηματική περιγραφή του AWGN: Το μαθηματικό μοντέλο του καναλιού **AWGN (Additive White Gaussian Noise)** είναι ένα θεμελιώδες εργαλείο στη θεωρία της πληροφορίας και των τηλεπικοινωνιών. Αυτό το μοντέλο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού επηρεάζεται από τον θόρυβο, ο οποίος είναι **πρόσθετος, λευκός και γκαουσιανός**. Το σήμα που λαμβάνεται σε ένα κανάλι AWGN, $y(t)$, είναι το άθροισμα του σήματος που μεταδίδεται, $x(t)$, και του θορύβου $n(t)$. [22]

Η βασική μαθηματική εξίσωση είναι: $y(t)=x(t)+n(t)$

- $y(t)$: Το σήμα που λαμβάνεται από το κανάλι.
- $x(t)$: Το σήμα που μεταδίδεται από την πηγή.
- $n(t)$: Ο πρόσθετος θόρυβος του καναλιού (λευκός και γκαουσιανός).

Ο θόρυβος ακολουθεί μια **κανονική κατανομή (Gaussian distribution)** με μέσο όρο μηδέν και διακύμανση σ^2

$$n(t) \sim N(0, \sigma^2)$$

- Ο **μέσος όρος** του θορύβου είναι μηδέν, δηλαδή η τιμή του θορύβου στο χρόνο έχει ίσες πιθανότητες να είναι θετική ή αρνητική.
- Η **διακύμανση** σ^2 (ή ισχύς του θορύβου) καθορίζει την ένταση του θορύβου.

Η κατανομή $N(0, \sigma^2)$ είναι η κλασική κανονική κατανομή με **μέσο όρο 0** και **διακύμανση σ^2** . Οι περισσότερες τιμές του θορύβου θα βρίσκονται κοντά στον μέσο όρο, ενώ ακραίες τιμές θα εμφανίζονται λιγότερο συχνά. [22]

Ένας σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα της μετάδοσης είναι η **σχέση σήματος προς θόρυβο** (Signal – to – Noise Ratio - SNR), που ορίζεται ως:

$$SNR = P_x / P_n$$

Όπου:

- P_x είναι η μέση ισχύς του σήματος.
- P_n είναι η ισχύς του θορύβου, η οποία είναι ίση με τη διακύμανση του θορύβου σ^2

Η SNR συνήθως εκφράζεται σε **decibel (dB)** και υπολογίζεται ως:

$$SNR \text{ (dB)} = 10 \log_{10}(P_x / P_n)$$

Ο θόρυβος $n(t)$ στο AWGN κανάλι θεωρείται ότι έχει σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος $N_0/2$, όπου N_0 είναι η **φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου** σε Watt ανά Hertz. Η συνολική ισχύς του θορύβου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_n = N_0 B$$

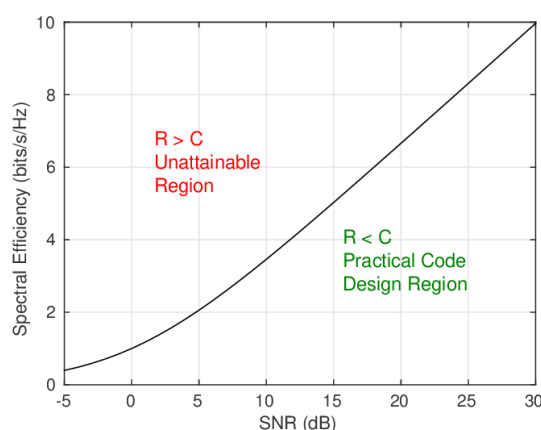
Όπου B είναι το **εύρος ζώνης** του καναλιού σε Hertz.

Για τη χωρητικότητα Shannon για AWGN, η μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού, η οποία καθορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας χωρίς σφάλματα σε ένα κανάλι με AWGN, δίνεται από τον τύπο του Shannon - Hartley:

$$C = B \log_2(1 + P_x / N_0 B)$$

Όπου:

- C είναι η χωρητικότητα του καναλιού σε bits ανά δευτερόλεπτο (bps),
- B είναι το εύρος ζώνης σε Hertz,
- P_x είναι η ισχύς του σήματος σε Watt,
- N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (σε Watt ανά Hertz).



Εικόνα 15: Όριο χωρητικότητας Shannon για κανάλι AWGN

Για τις εφαρμογές του μοντέλου AWGN, το μοντέλο AWGN χρησιμοποιείται εκτενώς σε διάφορους τομείς τηλεπικοινωνιών, όπως:

- **Ασύρματα δίκτυα** (Wi-Fi, 4G/5G),
- **Δορυφορικές επικοινωνίες**,
- **Οπτικά δίκτυα**,
- **Συστήματα ραδιοεπικοινωνίας**,
- **Διαμόρφωση σήματος** και εκτίμηση του BitErrorRate (BER).

Συνοψίζοντας, το μαθηματικό μοντέλο του AWGN καναλιού περιλαμβάνει την πρόσθεση λευκού γκαουσιανού θορύβου στο σήμα που μεταδίδεται, με βασικές παραμέτρους όπως η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου N_0 και η ισχύς του σήματος, που επηρεάζουν την απόδοση και τη χωρητικότητα του καναλιού. [22]

Το AWGN κανάλι, δεν μπορεί να πολλαπλασιαστεί, με Gaussian επειδή ο θόρυβος σε αυτό το κανάλι θα είναι ποσό τυχαία στο κανονικό. Επομένως, δεν μπορεί να προσδιοριστεί το ποσό του θορύβου. Διαφορετικά, όταν το απορριπτικό ποσό της οριστικής θόρυβος θα πάρει ο δέκτης χωρίς κανένα θόρυβο, λευκό γιατί η ισχύς για κάθε συχνότητα είναι ίση. Ως εκ τούτου, σε κάθε συχνότητα, το επίπεδο θορύβου και το πεδίο συχνότητας είναι σταθερά. Στο κανάλι A, η υπόθεση του Gaussian θορύβου είναι να επιτρέπεται σε τρέχουσες αιτίες. Ο θόρυβος ορίζεται μέσω του μπροστινού μέρους. Αυτός ο θόρυβος έχει ενεργειακή φασματική ένταση. Το κανάλι AWGN είναι το τέλειο μοτίβο για επικοινωνία μέσω δορυφόρου. Δεν

είναι το ιδανικό μοντέλο για ληφθέντες συνδέσμους λόγω της επικάλυψης, του πλήθους, του καλυπτικού ανάγλυφου κ.λπ. [12], [13], [22]

Τα συγκεκριμένα συστήματα απαιτούν γνώση της αναλογίας σήματος προς το θόρυβο(SNR) καναλιού. Ο πρόσθετος λευκός Gaussian θόρυβος και η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών υποβαθμίζουν σοβαρά την απόδοση της ασύρματης επικοινωνίας συστήματα. Σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας, το SNR είναι μια από τις παραμέτρους που δίνουν την ποιότητα και το μέτρο των επικοινωνιακών τους συνδέσμων. Τα συστήματα επικοινωνίας απαιτούν γνώση του καναλιού και αναλογία σήματος προς το θόρυβο. Στο κυψελοειδές σύστημα CDMA, το SNR είναι α κρίσιμη παράμετρος εισόδου για ικανοποιητική ισχύ στενού βρόχου έλεγχος απόδοσης.

Οι τεχνικές εκτίμησης SNR για το κανάλι AWGN δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας χωρίς τροποποίηση σε ένα κανάλι που εξασθενεί.

Στην υπερευρεία ζώνη ultra Wide - UWB, ο δέκτης λαμβάνει δεδομένα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ώστε να είναι απαραίτητα για τη μείωση των σφαλμάτων και οριοθετεί από την τιμή BER για να έχει την καλύτερη απόδοση το σύστημα με λιγότερο θόρυβο. Ως εκ τούτου, απαραίτητο είναι να επιλέξουμε το καλύτερο κανάλι με την καλύτερη απόδοση BER σε κατασκευή του πομποδέκτη που παράγει λιγότερο θόρυβο και υψηλή απόδοση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν καλύτερα απόδοση του καναλιού AWGN από το κανάλι που εξασθενεί. Όταν χρησιμοποιούμε το κανάλι AWGN, το σύστημα θα έχει καλύτερη απόδοση, πιο χαμηλό ποσοστό σφάλματος bit (BER) και χαμηλό SNR. Εδώ θα αναλύει την απόδοση του BER με βάση διάφορες τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας και ορισμένες από τις ψηφιακές, όπως σχήματα διαμόρφωσης για σύγκριση μεταξύ AWGN και fading καναλιών. Το κανάλι ξεθωριάσματος χωρίζεται σε Rayleigh και Rician καναλιών.

Ο συγχρονισμός με την ανάπτυξη του στα έμπειρα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας είναι επιτακτική ανάγκη για την εξασφάλιση αποτελεσματικών υπηρεσιών μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο και για τις εφαρμογές και να παρέχει στους χρήστες υπηρεσίες που είναι πιο αποτελεσματικές, οπότε έχουν περισσότερη δύναμη. Ωστόσο, για να επιτευχθεί υπόσχεση χρησιμοποιώντας η καλύτερη τεχνολογία από τις γνωστές τεχνικές ψηφιακής κωδικοποίησης, που έχει πολλές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένης της αποτελεσματικής απόδοσης, το ποσοστό σφάλματος, το κόστος, την απόδοση εύρους ζώνης, ενεργειακή απόδοση κ.λπ. Τα τελευταία χρόνια, το ασύρματο δίκτυο και το κινητό έχουν μεθόδους επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία. Η απόδοση του ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας αφορά τα χαρακτηριστικά του καναλιού ασύρματης διάδοσης. [12], [13], [22]

Επομένως, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η απόδοση του στο ασύρματο κανάλι. Ως εκ τούτου, στο σχεδιασμό του συστήματος και στο στρατηγικό σχεδιασμό μέσω μελέτης συγκριτικά μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων διαμόρφωσης, είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί η ανάλυση εσωτερικού και εξωτερικού καναλιού διάδοσης. Στην παρακάτω ενότητα κάνουμε μελέτη μοντέλου καναλιού που προσδιόρισε το διαφορετικοί τύποι καναλιών AWGN και κανάλια που ξεθωιάζουν (Rayleigh και Rician).

5.3 Επίδραση του AWGN Καναλιού στο σύστημα FBMC-OQAM

Στο σύστημα **FBMC-OQAM**, το κανάλι **AWGN** (Additive White Gaussian Noise) επηρεάζει την ποιότητα μετάδοσης προσθέτοντας τυχαίο θόρυβο στον πολυμεταφορέα. Αυτό

μπορεί να προκαλέσει αύξηση του **Bit Error Rate (BER)**, ιδιαίτερα λόγω της επίδρασης του θορύβου στον διαχωρισμό των φασματικών συνιστωσών.

Το FBMC, αν και βελτιώνει την **φασματική αποδοτικότητα** μέσω φίλτρων υψηλής ακρίβειας, είναι πιο ευάλωτο σε AWGN λόγω της έλλειψης κυκλικής πρόθεσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα όπως το OFDM. Η διαμόρφωση OQAM σε κάθε υποφέρουσα συνιστώσα μπορεί να προσφέρει καλύτερη ανθεκτικότητα στον θόρυβο, αλλά η φύση του AWGN απαιτεί **επεξεργασία σημάτων** και βελτιστοποίηση του συστήματος για την αποφυγή παραμορφώσεων.

Πιο συγκεκριμένα:

- Το FBMC-OQAM αποφεύγει τις φασματικές διαρροές με καλύτερη **φιλτροποίηση** των υπομεταφορέων, ωστόσο, το AWGN επιδρά άμεσα στην **ακρίβεια του χρόνου και φάσης** των σημάτων.
- Οι τεχνικές εξομάλυνσης της επίδρασης του θορύβου περιλαμβάνουν την χρήση **διαμόρφωσης ανθεκτικής σε θόρυβο**, όπως **κωδικοποιήσεις διορθωτικών σφαλμάτων (LDPC, Turbo Codes)**, και **ισοστάθμιση** για την καταστολή του θορύβου.

Η μελέτη της επίδρασης του καναλιού AWGN (Additive White Gaussian Noise) σε ένα σύστημα FBMC-OQAM (Filter Bank Multicarrier – Offset Quadrature Amplitude Modulation) είναι κρίσιμη για την κατανόηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος σε πρακτικά περιβάλλοντα. Για το θεωρητικό υπόβαθρο, το FBMC-OQAM είναι μια τεχνική πολυμεταφορέα που χρησιμοποιεί φίλτρα για να περιορίσει το φάσμα κάθε υποφέρουσας και την OQAM για να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων (ISI) και των υποφερουσών (ICI). Σε αντίθεση με το OFDM, το FBMC δεν χρησιμοποιεί κυματομορφές που επικαλύπτονται πλήρως, γεγονός που το καθιστά πιο αποδοτικό σε περιβάλλοντα με αυστηρόπεριορισμό φάσματος. Το κανάλι AWGN μοντελοποιεί τον θόρυβο που προστίθεται στο σήμα κατά τη μετάδοση, όπου ο θόρυβος έχει λευκό φάσμα (δηλαδή σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος) και ακολουθεί την κανονική κατανομή (Gaussian distribution). Ο θόρυβος προστίθεται γραμμικά στο σήμα:

$$r(t)=s(t)+n(t)$$

όπου $r(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα, $s(t)$ το εκπεμπόμενο σήμα και $n(t)$ ο θόρυβος όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου.

- Από την παρεμβολή του θορύβου ο θόρυβος στο κανάλι AWGN μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις στο λαμβανόμενο σήμα, επηρεάζοντας τόσο τις πραγματικές όσο και τις φανταστικές συνιστώσες των OQAM συμβόλων. Αυτές οι παραμορφώσεις μειώνουν την ποιότητα του σήματος και αυξάνουν τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER). Τα βασικά μέτρα απόδοσης για την αξιολόγηση της επίδρασης του AWGN σε ένα σύστημα FBMC-OQAM είναι η σχέση σήματος προς θόρυβο (SNR) και ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER). **SNR (Signal-to-Noise Ratio):** Είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και δίνεται από τη σχέση:

$$SNR=P_s/P_n$$

όπου P_s είναι η ισχύς του σήματος και P_n η ισχύς του θορύβου. Σε dB, υπολογίζεται ως:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(\text{Ps/Pn})$$

- **BER (Bit Error Rate):** Είναι το ποσοστό των σφαλμάτων bit σε σχέση με τον συνολικό αριθμό bit που μεταδόθηκαν. Το BER επηρεάζεται άμεσα από το SNR.

Η ανάλυση της επίδρασης του καναλιού AWGN στο FBMC-OQAM περιλαμβάνει διάφορα στάδια, όπως παρακάτω:

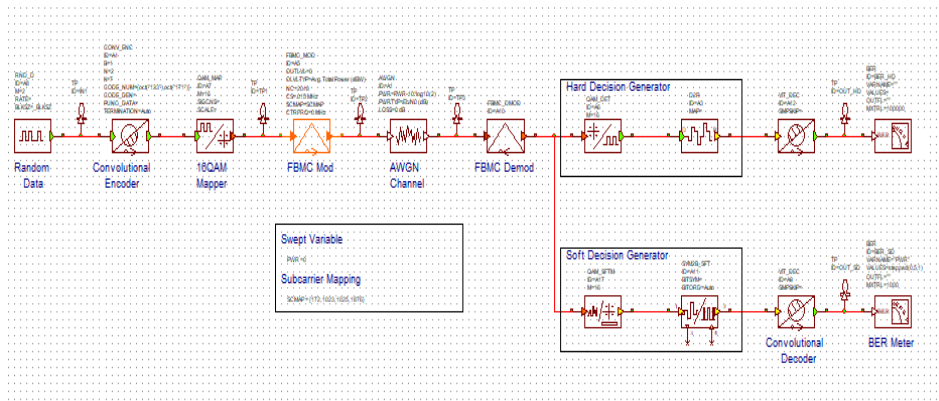
1. **Λήψη Σήματος με Θόρυβο:** για το σήμα που λαμβάνεται στον δέκτη είναι το άθροισμα του εκπεμπόμενου σήματος και του θορύβου και αν το εκπεμπόμενο σήμα είναι $s(t)$, το λαμβανόμενο σήμα είναι $r(t)=s(t)+n(t)$
2. **Αποδιαμόρφωση:** εδώ ο δέκτης πρέπει να αποδιαμορφώσει το σήμα λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία του θορύβου και χρησιμοποιεί τις τεχνικές αποδιαμόρφωσης του FBMC-OQAM, που περιλαμβάνουν την εφαρμογή των φίλτρων ανάλυσης για την εξαγωγή των υποφερουσών και την επεξεργασία του χρόνου-συχνότητας πλέγματος.
3. **Διόρθωση Σφαλμάτων:** οι τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων, όπως η χρήση κωδικοποιήσεων και οι αλγόριθμοι διόρθωσης, βοηθούν στην ανάκτηση των αρχικών δεδομένων παρά την παρουσία του θορύβου και αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή τεχνικών όπως η κωδικοποίηση Hamming, Reed - Solomon ή οι αλγόριθμοι Turbo και LDPC.
4. **Αξιολόγηση Απόδοσης:** η απόδοση του συστήματος αξιολογείται μετρώντας τη σχέση σήματος προς θόρυβο (Signal – to – Noise Ratio - SNR) και τον ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate - BER) και το SNR ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό σφαλμάτων bit.

Το μοντέλο καναλιού AWGN είναι ένα απλό αλλά χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων FBMC-OQAM. Παρά την απλότητά του, παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για το πώς οι διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης επιδρούν στην αντοχή του συστήματος στον θόρυβο και βοηθά στον σχεδιασμό πιο αποδοτικών και αξιόπιστων συστημάτων επικοινωνίας. Η μελέτη της επίδρασης του καναλιού AWGN σε ένα σύστημα FBMC-OQAM παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την αντοχή και την απόδοση του συστήματος σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Μέσω θεωρητικής ανάλυσης, προσομοιώσεων και τεχνικών αντιμετώπισης, μπορούμε να βελτιώσουμε την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των συστημάτων επικοινωνίας που χρησιμοποιούν την τεχνολογία FBMC-OQAM. [13]

6ο Κεφάλαιο – Προσομοίωση συστημάτων FBMC 16, 32, 64 QAM.

6.1 Δημιουργία συστήματος FBMC

Βάση των παραπάνω κεφαλαίων, όπως αναφέραμε για την αξιολόγηση της απόδοσης του FBMC συστήματος για εφαρμογή 5G χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AWR Design Environment της Cadence, στο οποίο δημιουργήσαμε προσομοίωση διαμορφωτή – αποδιαμορφωτή FBMC συστήματος δια μέσω καναλιού AWGN.



Εικόνα 16: Προσομοίωση στο AWR

Η σχεδίαση της προσομοίωσης περιλάμβανε τα εξής στάδια διαμόρφωσης – αποδιαμόρφωσης.

Διαμόρφωση:

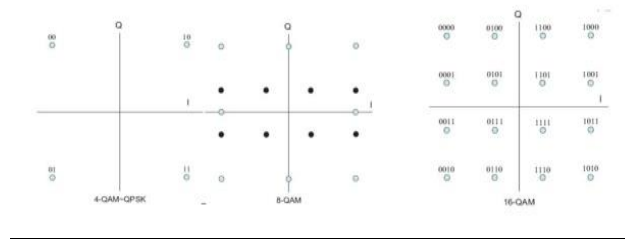
1. Εισαγωγή δεδομένων στο σύστημα διαμόρφωσης **Random Data**. Δημιουργεί μια ψευδοτυχαία αλληλουχία από ψηφιακά σύμβολα και τροφοδοτεί το σύστημα με δεδομένα.
2. Τα δεδομένα στη συνέχεια εισάγονται στο **Convolutiotal Encoder**, τα οποία και κωδικοποιεί πριν αυτά εισαχθούν στο QAMMapper (δυαδικός συνελκτικός κωδικοποιητής).
3. **QAMMapper**, δημιουργεί τους συντελεστές I/QQAM από τα δεδομένα εισόδου (CONV_ENC) σε αναλογική κυματομορφή.
4. ο **FBMC_MOD** προσομοιώνει τον διαμορφωτή FilterBankMulticarrier (FBMC). Μετατρέπει μια ακολουθία σύνθετων συμβόλων σε μια κυματομορφή FBMC (CE) πολλαπλών φορέων.
5. Το **AWGN** υλοποιεί ένα κανάλι Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN).

Αποδιαμόρφωση:

FBMC_DMOD προσομοιώνει τον αποδιαμορφωτή FBMC λαμβάνοντας το σήμα σε μορφή multicarrier FBMC και το μετατρέπει σε κυματομορφή δεδομένων IQ/QAM.

HardDecision Generator

Ορθογώνιοι αστερισμοί QAM (2)



Εικόνα 17: Ορθογώνιοι αστερισμοί στο QAM

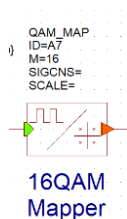
1. Έχει τον **QAM_DET**, όπου δημιουργεί αλληλουχία ψηφιακών ή δυαδικών συμβόλων, αποδιαμορφώνοντας το I/QQAM.
2. D2R, όπου μετατρέπει την ψηφιακή είσοδο σε πραγματική έξοδο.

SoftDecision Generator

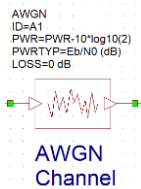
1. QAM softmetrics calculator **QAM-SFTM**, όπου η είσοδος σε αυτό το μπλοκ είναι ένα αποδιαμορφωμένο I/Qσήμα, όπου για κάθε εισαγόμενο δείγμα το QAM_SFTM υπολογίζει κάθε σημείο στον αστερισμό QAM (M-ary).
2. Στη συνέχεια το **SYM2B_SFT**, μετατρέπει το M-ary σε bits.

Τέλος, οι δυο παραπάνω έξοδοι οδηγούνται στο VIT_DEC όπου εκεί γίνεται η αποκωδικοποίηση του δεύτερου σταδίου κατά τη διαμόρφωση και δίνοντας μας τα αρχικά δεδομένα όπως στάλθηκαν.

Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τρία project, 0db, 2db, 4db θορύβου που περιλαμβάνουν τρεις υλοποιήσεις συστημάτων QAM για 16, 32, 64 συμβόλων.



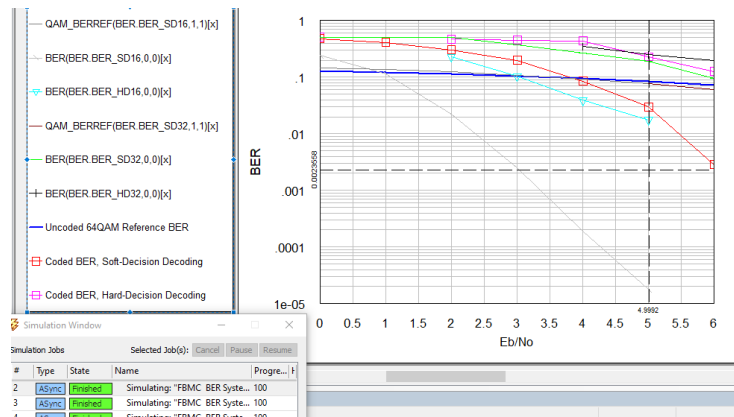
Μέσα σε κάθε σύστημα και στο module QAM Mapper στην παράμετρο M, ορίσαμε το πλήθος συμβόλων όπως στην εικόνα δίπλα.



Καθώς επίσης και για τη ρύθμιση της ισχύος του θορύβου αλλάξαμε την παράμετρο LOSS αντίστοιχα.

6.2 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 0dB.

Κατά την προσομοίωση των τριών συστημάτων που περιλάμβανε μηδενικό θόρυβο στο κανάλι AWGN, λάβαμε την παρακάτω γραφική παράσταση BER.



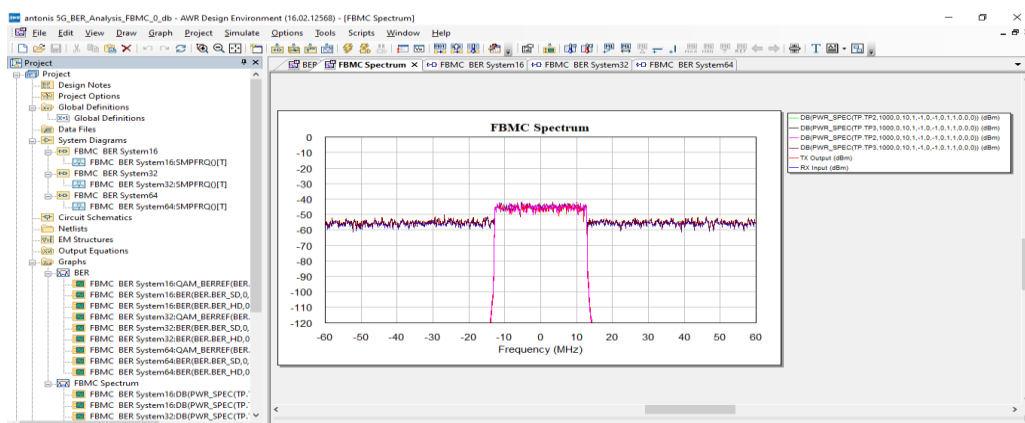
Εικόνα 18: Απεικόνιση FBMC 16,32,64 QAM με 0dB

Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

BER.BER_HD16										BER.BER_HD32										BER.BER_HD64					
SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total						SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total						SWPVAR	Rate	#Errors	Total		
	3	1	0.104	104	1000						1	1	0.497	497	1000						0	0.516	516	1000	
	4	1	0.039	39	1000						2	1	0.462	462	1000						1	0.493	493	1000	
	5	1		0	1000						4	1	0.352	352	1000						3	0.453	453	1000	
	5	2	6.0e-3	12	2000						5	1	0.252	252	1000						4	0.437	437	1000	
	5	3	0.017666666666667	53	3000						6	1	0.2	200	1000						5	0.229	229	1000	
																					6	0.127	127	1000	
BER.BER_SD16										BER.BER_SD32										BER.BER_SD64					
SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total						SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total						SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total	
	0	1	0.243	243	1000						0	1	0.51	510	1000						0	1	0.482	482	1000
	1	1	0.116	116	1000						1	1	0.498	498	1000						1	1	0.413	413	1000
	2	1	0.022	22	1000						2	1	0.505	505	1000						2	1	0.305	305	1000
	3	12	2.5e-3	30	12000						3	1	0.376	376	1000						3	1	0.198	198	1000
	4	105	1.90E+07	20	105000						4	1	0.27	270	1000						4	1	0.085	85	1000
	5	1000	18.0e-6	18	1000000						5	1	0.192	192	1000						5	1	0.03	30	1000
											6	1	0.095	95	1000						6	14	2.86E+10	40	14000

Εικόνα 19: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε 16, 32, 64 QAM με 0dB

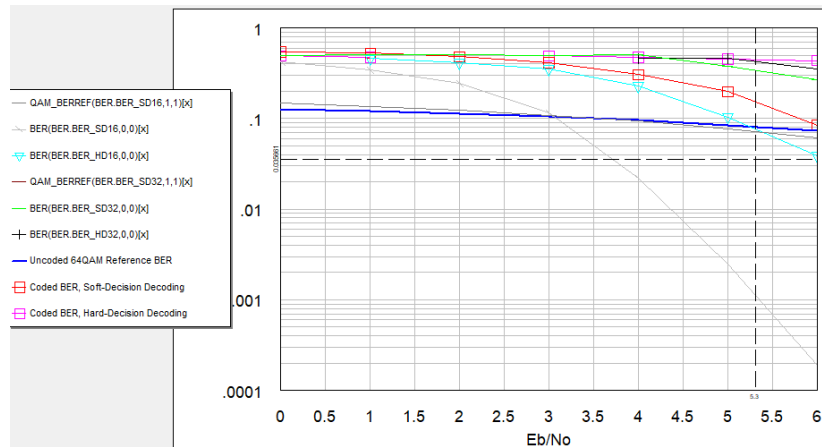
Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα με τη φασματική απεικόνιση του FBMC για 0Db.



Εικόνα 20: Διάγραμμα φασματικής απεικόνισης του FBMC με 0dB

6.3 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 2dB.

Κατά την προσομοίωση των τριών συστημάτων που περιλάμβανε θόρυβο 2dB στο κανάλι AWGN, λάβαμε την παρακάτω γραφική παράσταση BER.



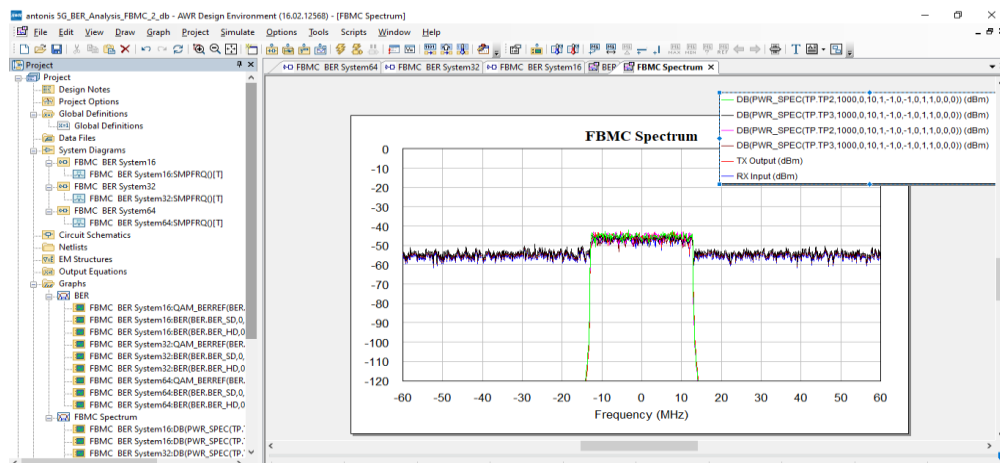
Εικόνα 21: Απεικόνιση FBMC 16,32,64 QAM με 2dB

Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

BER.BER_HD16					BER.BER_HD32					BER.BER_HD64				
SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total	SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total	SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total
1	1	0.459	459	1000	0	1	0.502	502	1000	0	1	0.491	491	1000
2	2	1.0.414	414	1000	4	1	0.462	462	1000	1	1	0.474	474	1000
3	3	1.0.352	352	1000	5	1	0.461	461	1000	3	1	0.493	493	1000
4	4	1.0.229	229	1000	6	1	0.352	352	1000	4	1	0.473	473	1000
5	5	1.0.104	104	1000						5	1	0.453	453	1000
6	6	1.0.039	39	1000						6	1	0.437	437	1000
BER.BER_SD16					BER.BER_SD32					BER.BER_SD64				
SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total	SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total	SWPVAR	Trial#	Rate	#Errors	Total
0	1	0.424	424	1000	0	1	0.491	491	1000	0	1	0.544	544	1000
1	1	0.347	347	1000	1	1	0.511	511	1000	1	1	0.526	526	1000
2	2	1.0.243	243	1000	2	1	0.51	510	1000	2	1	0.482	482	1000
3	3	1.0.116	116	1000	3	1	0.498	498	1000	3	1	0.413	413	1000
4	4	1.0.022	22	1000	4	1	0.505	505	1000	4	1	0.305	305	1000
5	5	12.2.5e-3	30	12000	5	1	0.376	376	1000	5	1	0.198	198	1000
6	6	105.1.90E+07	20	105000	6	1	0.27	270	1000	6	1	0.085	85	1000

Εικόνα 22: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε 16, 32, 64 QAM με 2dB

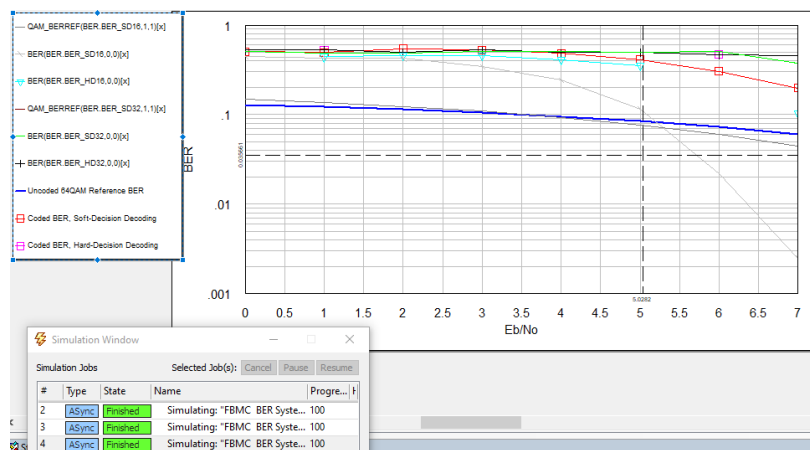
Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα με τη φασματική απεικόνιση του FBMC για 2dB



Εικόνα 23: Διάγραμμα φασματικής απεικόνισης του FBMC με 2dB

6.4 Συστήματα FBMC (16,32,64 QAM) με θόρυβο 4dB.

Κατά την προσομοίωση των τριών συστημάτων που περιλάμβανε θόρυβο 4dBστο κανάλι AWGN, λάβαμε την παρακάτω γραφική παράσταση BER



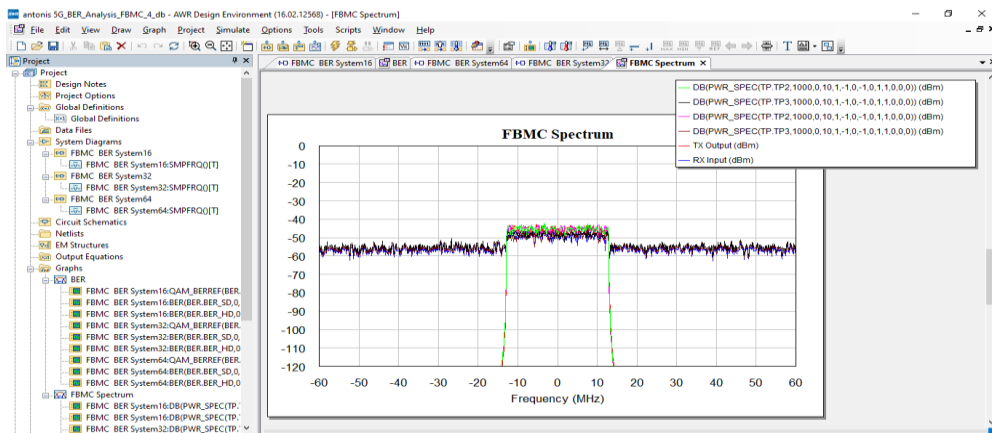
Εικόνα 24: Απεικόνιση FBMC 16,32,64 QAM με 4dB

Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

[illegible]

Εικόνα 25: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε 16, 32, 64 QAM με 4dB

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα με τη φασματική απεικόνιση του FBMC για 4dB



Εικόνα 26: Διάγραμμα φασματικής απεικόνισης του FBMC με 4dB

6.5 Σύγκριση και συμπεράσματα συστημάτων FBMC (16,32,64 QAM).

Για το HD:

- Σε όλες τις περιπτώσεις θορύβου 0, 2, 4 dB το καλύτερο σύστημα είναι με τα 16 QAM, στο οποίο περιορίζεται το σφάλμα μέχρι 10% στα 4dB ενώ στα 2dB είναι 4% στα 0dB θορύβου στα 2%.
- Τα συστήματα 32 και 64 QAM ξεπερνάνε το 20% απωλειών και στην περίπτωση θορύβου 4dB το SNR στο 6 είναι σχεδόν το ίδιο που σημαίνει ότι το HD64 προτείνεται.

Για το SD:

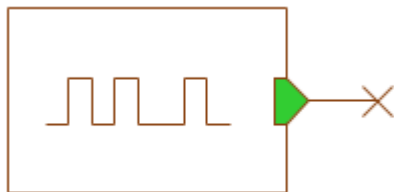
- Και πάλι παρατηρούμε ότι τα συστήματα 16QAM έχουν τις λιγότερες απώλειες και στις τρεις περιπτώσεις θορύβου 0, 2, 4 dB. Ενώ παρατηρούμε ότι για το ίδιο SNR (6), στην περίπτωση θορύβου 2dB το 64QAM έχει 8,5% απώλειες, έναντι του 32QAM που έχει 27% απώλειες.
- Στα 4dB οι απώλειες των 16QAM είναι στο 2%, ενώ και πάλι παρατηρούμε ότι στο 64QAM έχει λιγότερες απώλειες από ότι το 32QAM.

Σύγκριση HD και SD:

Για τις περιπτώσεις 16 και 64 QAM η SD τεχνική δείχνει να είναι καλύτερη (λιγότερες απώλειες) από ότι η HD τεχνική.

Παράρτημα – παράμετροι συμβόλων (modules) που χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα προσομοίωσης.

RANDOMDIGITALSOURCE: RND_D



Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
M	I	Alphabet size	Scalar	2
RATE	R	Symbol rate	Scalar	
*FRMSZ	I	Frame size	Scalar	
*RSEED	I	Random number generator seeds	Scalar	
*RNG	E	Random number generator algorithms		Auto
*BLKSZ	I	Samples per pass	Scalar	_BLKSZ

Εικόνα 27: Παράμετροι RND_D

Λεπτομέρειες παραμέτρων:

M. Το μοντέλο θα δημιουργήσει μια ψευδοτυχαία ακολουθία ακέραιων αριθμών μεταξύ 0 και M-1.

RATE. Ο ρυθμός συμβόλων στην έξοδο του μοντέλου. Εάν αφαιρεθεί κενό, ο ρυθμός συμβόλων είτε θα καθοριστεί από ένα μεταγενέστερο μοντέλο που υποστηρίζει τον καθορισμό ενός ρυθμού συμβόλων, όπως ένα μπλοκ πομπού, είτε θα οριστεί στη ρύθμιση ρυθμού δεδομένων από το παράθυρο διαλόγου “Επιλογές συστήματος”, εάν δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του ρυθμού δεδομένων.

FRMSZ. Χρησιμοποιείται για να καθορίσει πόσα bit ή σύμβολα πρόκειται να ομαδοποιηθούν σε ένα πλαίσιο..

RSEED. Τιμήδιασποράς για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών «Wichmann-Hill, Shuffling» μπορεί να καθοριστούν έως και τέσσερις τιμές. Για τις άλλες γεννήτριες χρησιμοποιείται μόνο η πρώτη τιμή. Εάν αυτό μείνει κενό, θα δημιουργηθεί μια τιμή με βάση έναν κατακερματισμό του ονόματος του μπλοκ και της παραμέτρου ID (εάν το μπλοκ βρίσκεται εντός ενός υποκυκλώματος, χρησιμοποιούνται επίσης οι παράμετροι ID των γονέων). Αυτό γενικά θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές περιπτώσεις του μπλοκ να δημιουργούν διαφορετικές ακολουθίες, αν και δεν είναι εγγυημένο. Εάν αυτό οριστεί σε -1, το seed θα διαφέρει από σάρωση σε σάρωση σε μία μόνο εκτέλεση προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται μια αρχική τιμή διασποράς παρόμοια με αυτή που δημιουργείται από το όνομα του μπλοκ και την παράμετρο ID, με μια μετατόπιση που προστίθεται σε κάθε νέα

σάρωση. Η αλληλουχία των τιμών είναι ντετερμινιστική μεταξύ των εκτελέσεων προσομοίωσης. Εάν αυτό οριστεί σε -2, το seed θα ποικίλλει σε κάθε σάρωση, συμπεριλαμβανομένων μεταξύ των σειρών προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται μια αρχική τιμή παρόμοια με αυτή που δημιουργείται από το όνομα του μπλοκ και την παράμετρο ID, με μια μετατόπιση που βασίζεται στο ρολόι του συστήματος που προστίθεται σε κάθε νέα σάρωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο σπόρος να μεταβάλλεται κάθε φορά που εκτελείται μια σάρωση, υπό την προϋπόθεση ότι κάθε σάρωση διαρκεί περισσότερο από 55 χιλιοστά του δευτερολέπτου, που είναι η περίοδος του ρολογιού του συστήματος. Να σημειωθεί ότι το ρολόι του συστήματος είναι επίσης σε σχέση με την τελευταία φορά που ξεκίνησε ο υπολογιστής και όχι με μια συγκεκριμένη ώρα. [14], [15]

RNG. Καθορίζει τον τύπο της γεννήτριας τυχαίων αριθμών που θα χρησιμοποιηθεί. Οι διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών περιγράφονται στην ενότητα Λεπτομέρειες υλοποίησης.

BLKSZ. Καθορίζει τον αριθμό των δειγμάτων που δημιουργούνται κάθε φορά που επισκέπτεται το μοντέλο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

DATA OUTPUT

Node No.	Type	Purpose
1	Digital	Random Digital Values

Εικόνα 28: Dataoutput

Στοιχεία Υλοποίησης :

Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται από το μοντέλο καθορίζεται από την παράμετρο RNG. Οι παρακάτω είναι οι διάφορες διαθέσιμες επιλογές:

Auto:

Χρησιμοποιεί μια προεπιλεγμένη γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Στο λογισμικό Cadence® Visual System Simulator™ (VSS) για επικοινωνίες και σχεδιασμό συστημάτων ραντάρ v5.1, αυτό είναι το ίδιο με το Wichmann - Hill, Shuffled.

Wichmann - Hill, Shuffled:

Υλοποιεί τον αλγόριθμο Wichmann - Hill, με προαιρετικό ανακάτεμα. Ο αλγόριθμος Wichmann - Hill υποστηρίζει τρεις τιμές. Μπορεί να προστεθεί μια μη μηδενική τέταρτη τιμή για να ενεργοποιηθεί το προαιρετικό ανακάτεμα και να παρέχεται μια τιμή για το ανακάτεμα.

$$S1 = (171 \cdot S1) \bmod(30267)$$

$$S2 = (172 \cdot S2) \bmod(30307)$$

$$S3 = (171 \cdot S3) \bmod(30323)$$

$$I = \text{rem}(S1/30269 + S2/30307 + S3/30323, 1)$$

όπου τα S1, S2 και S3 αρχικοποιούνται με τις τιμές πρώτης, δεύτερης και τρίτης σειράς, αντίστοιχα και ενημερώνονται κάθε φορά που δημιουργείται ένας νέος τυχαίος αριθμός και το $\text{rem}(x,1)$ επιστρέφει το υπόλοιπο του x διαιρούμενο με το 1.

Minimal Standard LCG:

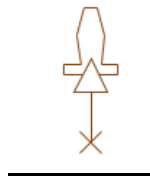
Υλοποιεί τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών "Ελάχιστη" που προτείνεται από τους Park και Miller όπως περιγράφεται στο Numerical Recipes στο C, η οποία χρησιμοποιεί τα ακόλουθα:

$$I_{j+1} = aI_j \text{ mod}(m) \quad a = 7^5 = 16807, m = 2^{31} - 1$$

Ανακατεμένο Minimal Standard LCG:

Υλοποιεί την ανακατεμένη Minimal Standard τυχαία γεννήτρια ran1 που βρέθηκε στο Numerical Recipes στο C, [15]

Test point symbol:



Το TP χρησιμοποιείται για τη λήψη μετρήσεων από εξόδους μπλοκ διαγραμμάτων συστήματος.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	TP1
*ZL	C	Load impedance (set empty for probe)	Resistance	
*RBW	R	Resolution bandwidth	Frequency	
*VBW	R	Video bandwidth	Frequency	
*NFFT	I	Number of FFT bins		
*NAVG	I	Number of FFT averages		
*WINDTYP	E	Windowing type		Auto
*WINDPAR	R	Windowing parameter	Scalar	0.0
*WNDWHN	E	When to window		Auto
*SLDFRC	R	Fraction of window to slide	Scalar	0.5
*SMPSYM	R	Samples per symbol leave empty to use data stream sample rate	Scalar	
*FRQAX	E	Frequency axis scaling		Auto
*YMIN	R	Y axis minimum	Scalar	
*MASK	V	Frequency ranges to mask	Frequency	
*MSKTYP	E	Mask type		Pass-Symmetric
*BUFSZ	I	Maximum buffer size in samples	Scalar	
*OVLFTYP ^[a,LS]	E	Buffer overflow type if auto the setting from the system diagram options will be used		Auto

Εικόνα 29: Παράμετροι testpoint

ZL. Η σύνθετη αντίσταση φορτίου, η οποία μπορεί να είναι οποιοσδήποτε μιγαδικός αριθμός σε ohms. Εάν μείνει κενό, το σημείο δοκιμής λειτουργεί ως μη επεμβατικός ανιχνευτής. Δείτε την ενότητα Συστάσεις για χρήση για περισσότερες σημειώσεις σχετικά με τη χρήση του ZL.

RBW. Το προεπιλεγμένο εύρος ζώνης ανάλυσης για μετρήσεις με βάση το φάσμα. Οι μετρήσεις που βασίζονται στο φάσμα προσεγγίζουν τον αριθμό σημείων για τα FFT από $NFFT = SMPFRQ / RBW$. Είτε αυτό είτε το NFFT μπορεί να ελέγξει την ανάλυση συχνότητας φάσματος.

VBW. Το προεπιλεγμένο εύρος ζώνης βίντεο για μετρήσεις με βάση το φάσμα. Το εύρος ζώνης βίντεο σε έναν αναλυτή φάσματος είναι το εύρος ζώνης του φίλτρου, το οποίο είναι ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης που χρησιμοποιείται συνήθως για την εξομάλυνση της εμφάνισης του φάσματος. Τα μικρότερα εύρη ζώνης έχουν ως αποτέλεσμα πιο ομαλές οθόνες. Οι μετρήσεις που βασίζονται στο φάσμα προσεγγίζουν την επίδραση του φίλτρου χαμηλής διέλευσης εκτελώντας τον μέσο όρο FFT. Ο αριθμός των μέσων όρων ορίζεται από $NAVW = RBW / VBW$. Είτε αυτό είτε το NAVG μπορεί να ελέγξει την εξομάλυνση του φάσματος.

NFFT. Ο προεπιλεγμένος αριθμός FFT για χρήση για μετρήσεις βάσει φάσματος. Είτε αυτό είτε το RBW μπορεί να ελέγξει την ανάλυση συχνότητας φάσματος.

NAVW. Ο προεπιλεγμένος αριθμός μέσων όρων που θα χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις με βάση το φάσμα. Εάν οριστεί στο 0, οι μετρήσεις χρησιμοποιούν αθροιστικό μέσο όρο. Είτε αυτό είτε η VBW μπορεί να ελέγξει την εξομάλυνση του φάσματος.

WNDTYP. Ο προεπιλεγμένος τύπος παραθύρου που πρέπει να εκτελεστεί για τους υπολογισμούς FFT που χρησιμοποιούνται από μετρήσεις βάσει τομέα συχνότητας. Όταν εφαρμόζεται το παράθυρο καθορίζεται από την παράμετρο WNDWHN.

WNDPAR. Η προεπιλεγμένη παράμετρος παραθύρου που χρησιμοποιείται για τον τύπο παραθύρου που έχει επιλεγεί από το WNDTYP.

WNDWHN. Καθορίζει πότε εφαρμόζεται το παράθυρο σε υπολογισμούς FFT. Όταν έχει οριστεί σε Αυτόματο, το παράθυρο δεδομένων εκτελείται μόνο όταν εκτελείται ο μέσος όρος.

SLDFRC. Το προεπιλεγμένο ποσοστό του παραθύρου δεδομένων τομέα χρόνου κατά το οποίο επικαλύπτονται οι μέσοι όροι FFT. Η τιμή 1 υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει επικάλυψη, η τιμή 0,75 υποδηλώνει επικάλυψη 25% και η τιμή 0,5 υποδηλώνει επικάλυψη 50%.

SMPSYM. Το χρησιμοποιούμε για να παρακάμψουμε τον αριθμό των δειγμάτων ανά σύμβολο του σήματος εισόδου. Τα δείγματα ανά σύμβολο χρησιμοποιούνται από διάφορες μετρήσεις για τον προσδιορισμό του αριθμού των δειγμάτων σε ένα σύμβολο δεδομένων.

FRQAX. Καθορίζει εάν ο άξονας συχνότητας των μετρήσεων του φάσματος εμφανίζεται σε μονάδες απόλυτης συχνότητας ή σε μονάδες δοχείων FFT. Εάν έχει επιλεγεί Auto, ο άξονας συχνότητας εμφανίζεται σε μονάδες απόλυτης συχνότητας.

YMIN. Εάν έχει καθοριστεί μια τιμή, αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ως η τιμή «πάτωμα» για τον άξονα y των μετρήσεων του φάσματος. Όλες οι τιμές του άξονα y που είναι κάτω από αυτό το ελάχιστο θα εμφανίζονται ως αυτή η ελάχιστη τιμή. Εάν η επιλογή 'DB' είναι επιλεγμένη στο παράθυρο διαλόγου μέτρησης, τότε αυτή η τιμή είναι σε dB. Αφήστε κενό για να εμφανιστούν οι τιμές του άξονα y ως έχουν.

MASK. Καθορίζει ένα εύρος συχνοτήτων που θα καλυφθούν στις μετρήσεις του φάσματος. Τα εύρη καθορίζονται ως ζεύγη συχνοτήτων, το ένα ως συχνότητα έναρξης και το άλλο ως

συχνότητα λήξης. Αυτές οι τιμές πρέπει να περικλείονται στο '{' '}'. Για παράδειγμα, για να καθορίσετε ένα εύρος μάσκας από 1 GHz έως 1,1 GHz, θα πρέπει να εισαγάγετε '{1, 1,1}' (υποθέτοντας ότι οι μονάδες έργου έχουν οριστεί σε GHz). Η ερμηνεία της μάσκας καθορίζεται από την παράμετρο MSKTYP. Αφήστε το κενό για να μην καλύψετε καμία συχνότητα.

MSKTYP. Καθορίζει πώς θα εφαρμοστούν τα εύρη συχνοτήτων MASK. Οι ακόλουθες επιλογές είναι διαθέσιμες:

Pass-Symmetric: Κάθε ζεύγος συχνοτήτων στην παράμετρο MASK αντιπροσωπεύει εύρη συχνοτήτων που ΔΕΝ θα καλυφθούν. Οι περιοχές συχνοτήτων αντικατοπτρίζονται γύρω από την κεντρική συχνότητα του σήματος.

Pass-Absolute: Κάθε ζεύγος συχνοτήτων στην παράμετρο MASK αντιπροσωπεύει εύρη συχνοτήτων που ΔΕΝ θα καλυφθούν.

Stop-Symmetric: Κάθε ζεύγος συχνοτήτων στην παράμετρο MASK αντιπροσωπεύει εύρη συχνοτήτων που θα καλυφθούν. Οι περιοχές συχνοτήτων αντικατοπτρίζονται γύρω από την κεντρική συχνότητα του σήματος.

Stop-Absolute: Κάθε ζεύγος συχνοτήτων στην παράμετρο MASK αντιπροσωπεύει εύρη συχνοτήτων που θα καλυφθούν.

BUFSZ. Αντικαθιστά τον μέγιστο αριθμό δειγμάτων που αποθηκεύονται από το σημείο δοκιμής. Εάν μείνει κενό, το μέγιστο προσδιορίζεται από το παράθυρο διαλόγου Επιλογές συστήματος.

OVFLTYP. Καθορίζει τι συμβαίνει μετά τη λήψη δειγμάτων BUFSZ στο σημείο δοκιμής. Εάν οριστεί σε "Απόρριψη παλαιότερων", τα πρώτα δείγματα που ελήφθησαν απορρίπτονται, ενώ τα τελευταία δείγματα που ελήφθησαν διατηρούνται. Εάν οριστεί σε "Απόρριψη νεότερου", τα πρώτα δείγματα BUFSZ διατηρούνται, τυχόν νέα δείγματα που ελήφθησαν απορρίπτονται.

Περιορισμοί παραμέτρων και συστάσεις:

Πολλές από τις παραμέτρους ισχύουν μόνο για συγκεκριμένες μετρήσεις και αγνοούνται από άλλες μετρήσεις.

Οι παράμετροι FRQAX, YMIN, MASK και MSKTYP ισχύουν μόνο για τις μετρήσεις φάσματος PSD, PSDN, PWR_SPEC, V_SPEC και V_SPECN.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Real, Complex, or Digital	Monitored Data

Εικόνα 30: datainputtestpoint

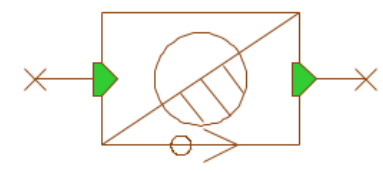
Συστάσεις για χρήση:

Όταν χρησιμοποιείτε το ZL, τα μπλοκ που συνδέονται στον κόμβο εισόδου θα βλέπουν το ZL μόνο εάν έχει ενεργοποιηθεί η μοντελοποίηση αναντιστοιχίας σύνθετης αντίστασης μέσω του πλαισίου διαλόγου Επιλογές συστήματος. Οι μετρήσεις, ωστόσο, χρησιμοποιούν πάντα το ZL εάν καθορίζεται κατά την υπολογιστική ισχύ.

Οι παράμετροι όπως RBW, VBW, NFFT και NAVG χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δημιουργία ρυθμίσεων σε όλο το διάγραμμα συστήματος για αυτές τις παραμέτρους. Για παράδειγμα, για να ορίσετε ένα προεπιλεγμένο RBW 10 kHz, θα μπορούσατε να δημιουργήσετε μια εξίσωση όπως: $RBW_Hz=10e3$

Στη συνέχεια, μπορείτε να το αντιστοιχίσετε στην παράμετρο RBW για όλα τα μπλοκ TP, VNA και VSA. Οποιαδήποτε μέτρηση βάσει φάσματος που αναφέρεται σε ένα από αυτά τα μπλοκ χρησιμοποιεί τη ρύθμιση RBW από προεπιλογή.

Convolutional encoder: CONV_ENC



Ο CONV_ENC είναι ένας δυαδικός συνελκτικός κωδικοποιητής με προαιρετική διάτρηση κώδικα. [16], [17], [18]

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A
B	I	Information bits per codeword	Scalar	1
N	I	Codeword length	Scalar	2
K	I	Constraint length (number of stages)	Scalar	7
CODE_NUM	I	Code generator numerators	Scalar	
CODE_DEN	I	Code generator common denominator (no feedback if empty)	Scalar	
PUNC_DATA	I	Puncturing pattern for encoded data	Scalar	
*PUNC_TAIL	I	Puncturing pattern during termination	Scalar	
*PUNCTYP	E	Interpretation of puncturing patterns		Mask values (0=puncture)
*PUNCORD	E	Ordering of values in puncturing patterns		By code vectors
TERMINATION	E	Code termination mode		Auto
*TAILPUNCMODE	E	Puncturing mode during termination		Auto
*BLKSZ	I	Block size, in bits (used for termination)	Scalar	_BLKSZ

Εικόνα 31: Παράμετροι CONV_ENC

B. Ο αριθμός των bit πληροφοριών ανά κωδική λέξη.

N. Ο αριθμός των bit ανά κωδική λέξη. Εάν μείνει κενό, η τιμή του υπολογίζεται από το CODE_NUM (πρέπει να καθοριστεί το CODE_NUM).

K. Μήκος περιορισμού κώδικα. Καθορίζει τον αριθμό των σταδίων στον καταχωρητή μετατόπισης. Εάν μείνει κενό, έχει ρυθμιστεί να ταιριάζει στο μεγαλύτερο μοτίβο bit σε CODE_NUM και CODE_DEN.

CODE_NUM. Διάνυσμα πολωνύμων που ορίζουν τους αριθμητές των γεννητριών κωδικών. Οι γεννήτριες κώδικα είναι οι συναρτήσεις μεταφοράς μεταξύ των δυαδικών ψηφίων εισόδου (μη κωδικοποιημένα) και των δυαδικών ψηφίων εξόδου (κωδικοποιημένα) κάθε κωδικής λέξης. Ο αριθμός των στοιχείων στο διάνυσμα πρέπει να είναι ίσος με N. Κάθε στοιχείο του διανύσματος αντιπροσωπεύει ένα πολώνυμο και αντιστοιχεί σε ένα από τα κωδικοποιημένα bit της κωδικοποιημένης λέξης εξόδου. Αυτό το πεδίο μπορεί να μείνει κενό, οπότε τα B, N και K χρησιμοποιούνται για την αυτόματη δημιουργία του διανύσματος κωδικολέξεων με βάση τους βέλτιστους κωδικούς. Οι τιμές των B, N και K πρέπει να εμπίπτουν στις ακόλουθες περιοχές:

$1 \leq B \leq 7$ $2 \leq N \leq 8$ $3 \leq K \leq 9$, με περαιτέρω όρια στους επιτρεπόμενους συνδυασμούς B, N και K.

CODE_DEN. Παρονομαστής γεννητριών κωδικών. Υποτίθεται ότι οι παρονομαστές είναι ίδιοι για όλες τις γεννήτριες κώδικα. Το CODE_DEN αντιπροσωπεύει ένα πολώνυμο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δομής του βρόχου ανάδρασης του κώδικα. Εάν μείνει κενό, δεν εφαρμόζεται βρόχος ανάδρασης. Επιπλέον, εάν η δυαδική αναπαράσταση του CODE_DEN αποτελείται από ένα μόνο ακολουθούμενο από $K*B$ 0, ο κώδικας που προκύπτει δεν θα περιέχει βρόχο ανάδρασης. Εάν το CODE_NUM παραμείνει κενό, το CODE_GEN αγνοείται και επιλέγεται μια δομή κώδικα χωρίς ανατροφοδότηση με βάση τις τιμές των B, N και K.

PUNC_DATA. Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα bit που δημιουργούνται κατά την κωδικοποίηση των bit εισόδου τρυπιούνται πριν σταλούν στην έξοδο. Εάν μείνει κενό, δεν εκτελείται τρύπημα. Η ερμηνεία των τιμών καθορίζεται από το PUNCTYP.

PUNC_TAIL. Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα bit που δημιουργούνται κατά τον τερματισμό του κώδικα τρυπιούνται πριν σταλούν στην έξοδο. Η ερμηνεία των τιμών καθορίζεται από το PUNCTYP.

PUNCTYP. Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι τιμές των PUNC_DATA και PUNC_TAIL για τον καθορισμό του μοτίβου διάτρησης: Τιμές μάσκας (0=διάτρηση): Κάθε στοιχείο στο PUNC_DATA/PUNC_TAIL αντιπροσωπεύει ένα bit από τη συνελκτική κωδικοποίηση, με το πρώτο στοιχείο να αντιστοιχεί στο πρώτο bit της παραγόμενης ακολουθίας. Τα στοιχεία που έχουν οριστεί στο 0 υποδεικνύουν bits που δεν θα εξάγονται.

Δείκτες διάτρησης, με βάση το 1: Κάθε στοιχείο στο PUNC_DATA/PUNC_TAIL είναι ένας δείκτης ενός bit της παραγόμενης ακολουθίας, με το πρώτο bit που δημιουργείται να αντιστοιχεί στον δείκτη 1.

Οι δείκτες υποδεικνύουν τις θέσεις των bit που δεν εξέρχονται. Δείκτες διάτρησης, με βάση το 0: Κάθε στοιχείο στο PUNC_DATA/PUNC_TAIL είναι ένας δείκτης ενός bit στην παραγόμενη ακολουθία, με το πρώτο bit που δημιουργείται να αντιστοιχεί στον δείκτη 0.

Οι δείκτες υποδεικνύουν τις θέσεις των bit που δεν θα εξάγονται.

PUNCORD. Καθορίζει την τελική αντιστοίχιση μεταξύ των θέσεων που υποδεικνύονται στο PUNC και των πραγματικών θέσεων bit που πρόκειται να τρυπηθούν:

Ανά διανύσματα κώδικα: Οι θέσεις ομαδοποιούνται σε διανύσματα κώδικα.

Διαδοχική: Υπάρχει μια απευθείας αντιστοίχιση 1:1 στη ροή bit που δημιουργείται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή.

Termination. Καθορίζει εάν και πώς ο κώδικας τερματίζεται μετά την κωδικοποίηση της ροής bit εισόδου:

Auto: Εάν η δομή του κώδικα δεν περιέχει βρόχο ανάδρασης, δεν πραγματοποιείται τερματισμός. Διαφορετικά, ο κωδικός τερματίζεται στη μηδενική κατάσταση.

Να μην τερματιστεί: Δεν πραγματοποιείται τερματισμός.

Τερματισμός σε μηδενική κατάσταση: Αφού ο κωδικοποιητής επεξεργαστεί bits εισόδου BLKSZ, ο καταχωρητής μετατόπισης ξεπλένεται με μηδενικά bit. Τα bit εξόδου που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης προσαρτώνται στα bit εξόδου που δημιουργούνται κατά τη φάση κωδικοποίησης της ροής bit εισόδου. Σε αυτά τα bit εκτελείται επίσης μια λειτουργία διάτρησης που ορίζεται από τα PUNC_TAIL και TAILPUNCMODE.

Tailpuncmode. Καθορίζει εάν και πώς γίνεται διάτρηση της κωδικοποιημένης ροής bit τερματισμού:

Auto: Εάν έχει καθοριστεί PUNC_TAIL, η κωδικοποιημένη ροή bit τερματισμού διατρυπάται με βάση το PUNC_TAIL. Διαφορετικά, το μοτίβο δεδομένων διάτρησης που χρησιμοποιείται για την κωδικοποιημένη ροή bit δεδομένων χρησιμοποιείται επίσης κατά τον τερματισμό.

Χωρίς διάτρηση: Δεν πραγματοποιείται διάτρηση στην κωδικοποιημένη ροή δεδομένων τερματισμού.

Ίδιο με τα δεδομένα: Η κωδικοποιημένη ροή bit τερματισμού διατρυπάται με τον ίδιο τρόπο όπως η κωδικοποιημένη ροή bit δεδομένων.

Ορισμός από PUNC_TAIL: Η κωδικοποιημένη ροή bit τερματισμού τρυπιέται χρησιμοποιώντας το μοτίβο που ορίζεται από το PUNC_TAIL.

BLKSZ. Καθορίζει το μήκος (σε bit) της ροής μπιτ εισόδου, μετά από το οποίο εκτελείται ο τερματισμός του κώδικα. Εάν δεν απαιτείται τερματισμός, το BLKSZ δεν χρησιμοποιείται.

Datainput

Node No.	Type	Purpose
1	Digital	Bits to Encode

Εικόνα32: Data input conv_enc

Data output

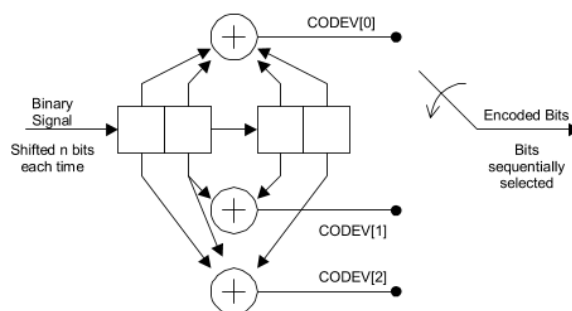
Node No.	Type	Purpose
2	Digital	Encoded Bits

Εικόνα 33: Data output conv_enc

Στοιχεία υλοποίησης: Οι δυαδικές αναπαραστάσεις των CODE_NUM και CODE_DEN ορίζουν πολυώνυμα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συνδεσιμότητας του κωδικοποιητή. Για παράδειγμα, μια καταχώρηση 'oct("133")' στο CODE_NUM (1338 ή 91 δεκαδικά) αντιπροσωπεύει το μοτίβο bit 1011011. Εάν ο κωδικοποιητής δεν περιέχει βρόχο ανάδρασης (π.χ., το CODE_DEN παραμένει κενό), το bit του κώδικα Η λέξη που αντιστοιχεί σε αυτήν την καταχώρηση του CODE_NUM υπολογίζεται ως (modulo 2):

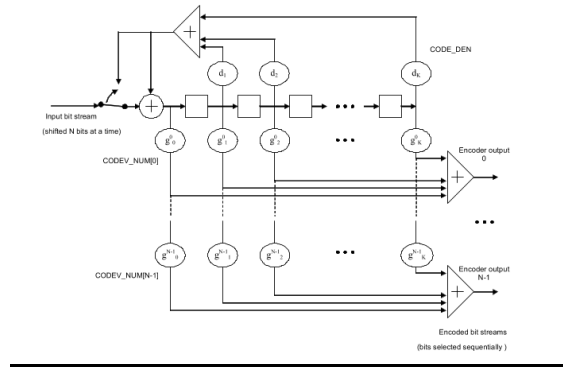
$$\text{codeword} = x[n+6] + x[n+4] + x[n+3] + x[n+1] + x[n]$$

Οι συναρτήσεις εξίσωσης 'oct' και 'hex' μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση της προδιαγραφής των μοτίβων bit. Το παρακάτω απεικονίζει την υλοποίηση ενός κωδικοποιητή ρυθμού 2/3 με K=2 και διανύσματα κώδικα 17oct, 06oct και 15oct.



Εικόνα 34: Υλοποίηση conv_enc

Αναδρομικοί συνελκτικοί κώδικες: Για να διαμορφώσετε το CONV_ENC ως αναδρομικό συνελκτικό κωδικοποιητή, ορίζεται ένας βρόχος ανάδρασης χρησιμοποιώντας CODE_DEN, ενώ η συνδεσιμότητα των εξόδων κωδικοποιητή καθορίζεται από το CODE_NUM. Μια τιμή CODE_DEN με δυαδική αναπαράσταση $\{1, d_1, \dots, d_K\}$, όπου το αριστερό bit αντιπροσωπεύει το πιο σημαντικό bit (MSB) και το δεξιότερο το λιγότερο σημαντικό bit (LSB), ορίζει ένα πολυώνυμο που μπορεί να γραφτεί ως $d(D) = 1 + d_1 D + \dots + d_K D^K$. Η ιη καταχώρηση του CODE_NUM με δυαδική αναπαράσταση $[g_0, g_1, \dots, g_K]$ αποδίδει $g_i(D) = g_0 i D^0 + g_1 i D^1 + \dots + g_K i D^K$. Η δομή ενός γενικού αναδρομικού συνελκτικού κωδικοποιητή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο διακόπτης που είναι συνδεδεμένος στην είσοδο του κωδικοποιητή είναι αρχικά ρυθμισμένος στην κάτω θέση του. Η ροή bit εισόδου τροφοδοτείται στον κωδικοποιητή και υπολογίζει N κωδικοποιημένες ροές bit, οι οποίες στη συνέχεια εξάγονται διαδοχικά για κάθε κωδική λέξη. Εάν έχει καθοριστεί η διάτρηση, αυτό γίνεται στην ακολουθία εξόδου. Εάν η κατάσταση του κωδικοποιητή πρέπει να τερματιστεί στη μηδενική κατάσταση, ο διακόπτης εισόδου γυρίζει στην επάνω θέση και ο κωδικοποιητής λειτουργεί για K βήματα (καταχωρητής μετατόπισης ξεπλένεται με μηδενικά). Η έξοδος μπορεί να τρυπηθεί όπως ορίζεται από τις παραμέτρους διάτρησης. [17], [18]



Εικόνα 35: Αναδρομικός συνελκτικός conv_enc

Κώδικες που δημιουργούνται αυτόματα

Εάν το CODE_NUM μείνει κενό, οι κωδικοί επιλέγονται από πίνακες που βρίσκονται στο [1]. Σημειώστε ότι για αυτό το μπλοκ, το K αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό των σταδίων καταχωρητή μετατόπισης, ενώ στο [1] το K αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σταδίων καταχωρητή μετατόπισης ανά bit.

Υποστηρίζονται οι ακόλουθοι συνδυασμοί B, N και K:

B/N από 1/2, 1/3, 1/4 με K=3 έως 14, συμπεριλαμβανομένων

B/N των 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 με K=3 έως 8, συμπεριλαμβανομένων.

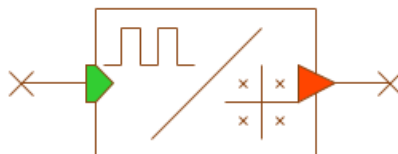
B/N των 2/3, 2/5, 2/7 με K=4,6,8

B/N των 3/4, 3/5, 3/7, 3/8, 4/5, 4/7 με K=6.

B/N της 4/5, 4/7 με K=8.

Οποιοσδήποτε άλλος συνδυασμός B, N και K απαιτεί να καθοριστεί CODE_NUM

QAM Mapper: QAM_MAP



Το QAM_MAP δημιουργεί ένα σύνολο συντελεστών τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους (QAM) από ένα σήμα εισόδου. Οι συντελεστές μπορούν στη συνέχεια να τροφοδοτηθούν σε έναν διαμορφωτή για τη δημιουργία μιας αναλογικής κυματομορφής. Το μπλοκ δέχεται τόσο δυαδικές εισόδους (bits) όσο και M-ary ψηφιακά σύμβολα. Εάν η είσοδος είναι δυαδική, τα bit ομαδοποιούνται σε σύνολα $\log_2 M$ bit πριν αντιστοιχιστούν σε ένα από τα σημεία M στον αστερισμό εξόδου.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
M	I	Number of constellation points (M-ary)	Scalar	16
SIGCNS	C	Signal constellation	Vector	
SCALE	R	Scale factor	Scalar	

Εικόνα 36: Παράμετροι QAMMAP

M. Ο αριθμός των σημείων αστερισμού στον κύκλο. Εάν μείνει κενό, αυτό προσδιορίζεται από το M-ary του σήματος εισόδου (το σήμα δεν πρέπει να είναι δυαδικό). Εάν δεν είναι κενό και το σήμα εισόδου δεν είναι δυαδικό, τότε αυτό πρέπει να ταιριάζει με το M-ary του σήματος εισόδου. Αυτή η τιμή περιορίζεται να είναι δύναμη 2.

SIGCNS. Προαιρετικός αστερισμός σήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Εάν ορίζεται, αυτό πρέπει να είναι ένα διάνυσμα που περιέχει M στοιχεία. Οι αστερισμοί σημάτων μπορούν να δημιουργηθούν αυτόματα για M=16, 32, 64, 128 και 256. Πρόσθετα αρχεία δεδομένων αστερισμού είναι διαθέσιμα στο φάκελο Data\Constel επικοινωνιών και λογισμικού σχεδίασης συστημάτων ραντάρ Cadence VisualSystem Simulator™ (VSS) και ενδέχεται να καθορίζεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση vfile όπως στο:

SIGCNS = vfile("\$Data\Constel\16QAM802_11a.CON")

SCALE. Προαιρετικός συντελεστής κλίμακας. Εάν αφεθεί κενός, ο αστερισμός κανονικοποιείται ώστε να έχει μονάδα ισχύος με τον ακόλουθο συντελεστή κλίμακας:

$$SCALE = \sqrt{\frac{M}{\sum_{i=0}^M |x_i|^2}}$$

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Digital	Input Signal

Εικόνα37: Data input QAM MAP

Data output

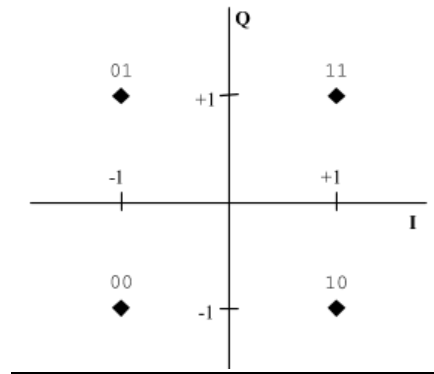
Node No.	Type	Purpose
2	Complex	Modulator Control Signal

Εικόνα 38:Data output QAMMAP

Στοιχεία Υλοποίησης: Το μπλοκ αντιστοιχίζει ψηφιακά σύμβολα M-ary στα σημεία αστερισμού I/Q. Εάν το σήμα εισόδου είναι δυαδικό, τα bit εισόδου $\log_2 M$ ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν ένα ψηφιακό σύμβολο M-ary, με το πρώτο bit που λαμβάνεται να αντιμετωπίζεται ως το πιο σημαντικό bit. Οι αστερισμοί σημάτων που χρησιμοποιούνται για τους αστερισμούς που δημιουργούνται αυτόματα φορτώνονται από αρχεία δεδομένων που βρίσκονται στο φάκελο VSS Data\Constel. Ακολουθούν οι αστερισμοί που δημιουργούνται αυτόματα:

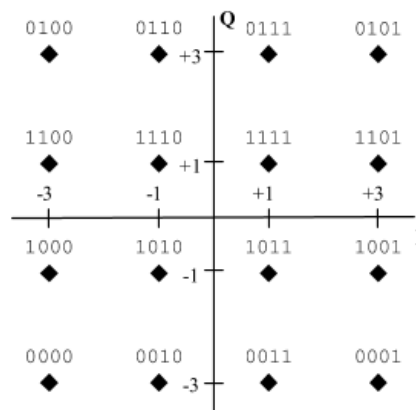
Για **M=2** , Δημιουργείται ένας αστερισμός BPSK, με 1 bit να αντιστοιχεί στο +1 και ένα bit 0 να αντιστοιχεί στο -1.

Για $M=4$, Δημιουργείται ένας αστερισμός QPSK. Ο αστερισμός έχει την ακόλουθη διάταξη (το πιο αριστερό bit είναι το πρώτο bit που ελήφθη):



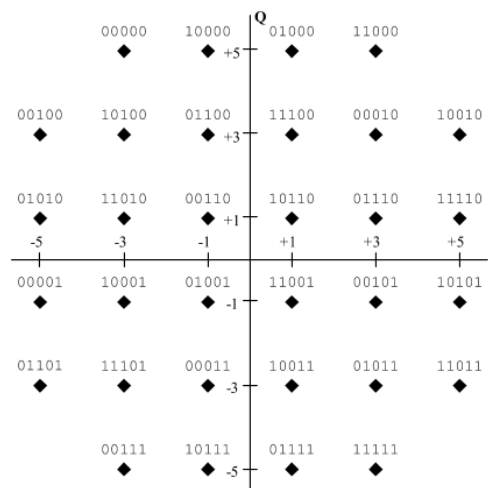
Εικόνα 39: 4QAM

Για $M=16$, Ένας γκρι κωδικοποιημένος τετράγωνος αστερισμός 16-QAM δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel16QAMGray.CON. Έχει την ακόλουθη διάταξη (το αριστερό bit είναι το πρώτο bit που λαμβάνεται):



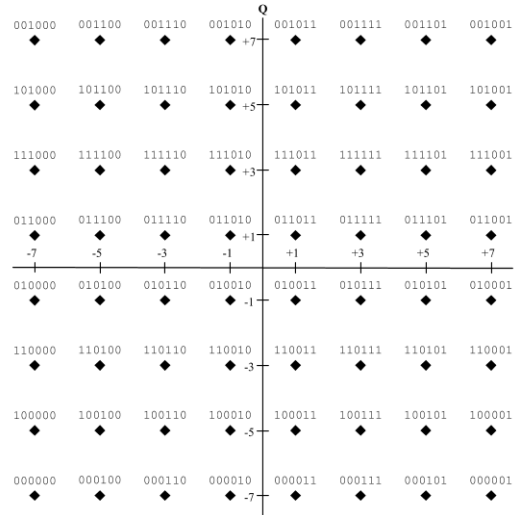
Εικόνα 40: 16QAM

Για $M=32$, Ένας τετράγωνος αστερισμός 32-QAM με τις γωνίες που λείπουν δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel32QAM.CON. Έχει την ακόλουθη διάταξη (το αριστερό bit είναι το πρώτο bit που λαμβάνεται):



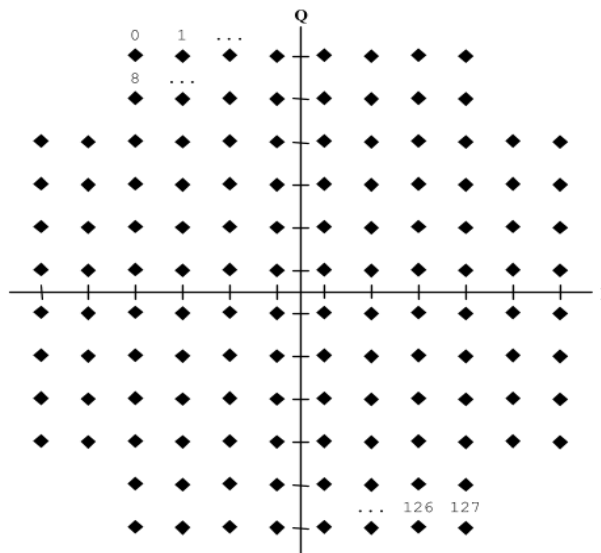
Εικόνα 41: 32QAM

Για $M=64$, Ένας γκρι κωδικοποιημένος τετράγωνος αστερισμός 64-QAM δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel\64QAMGray.CON. Έχει την ακόλουθη διάταξη (το αριστερό bit είναι το πρώτο bit που λαμβάνεται):



Εικόνα 42: 64QAM

Για $M=128$, Ένας τετράγωνος αστερισμός 128-QAM με τέσσερα σημεία από κάθε γωνία που αφήνονται έξω δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel\128QAM.CON. Τα σύμβολα ταξινομούνται από αριστερά προς τα δεξιά, από πάνω προς τα κάτω:

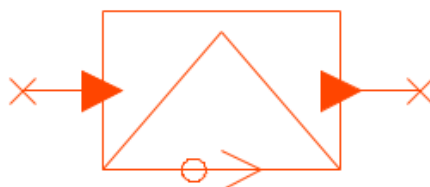


Εικόνα 42: 128QAM

Για $M=256$, Ένας τετράγωνος γκρι κωδικοποιημένος αστερισμός 256-QAM δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel\256QAMGray.CON. Στο αριστερό κάτω σημείο (πιο αρνητικό) εκχωρείται 0.

Για **M=1024**, Ένας τετράγωνος γκρι κωδικοποιημένος αστερισμός 1024-QAM δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αρχείο δεδομένων Data\Constel\1024QAMGray.CON. Στο αριστερό κάτω σημείο (πιο αρνητικό) εκχωρείται 0.

FBMC Modulation Block: FBMC_MOD



ο FBMC_MOD προσομοιώνει τον διαμορφωτή Filter Bank Multicarrier (FBMC) [2]. Μετατρέπει μια ακολουθία σύνθετων συμβόλων σε μια κυματομορφή πολύπλοκου φακέλου FBMC (CE) πολλαπλών φορέων. [19], [20]

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A
OUTLVL	R	Output level (energy or power)	Varies	0
OLVLTYP	E	Output level type		No Scaling
NC	I	Number of subcarriers	Scalar	256
CS	R	Subcarrier spacing	Frequency	
*MSGLEN	I	Message length	Scalar	8
*NULLSYMS	I	Number of null symbol	Scalar	1
*SCMAP	I	Subcarrier assignment vector		
*FCO	I	First channel offset from center frequency	Scalar	0
*PLSTYP	E	Pulse shaping type		PHYDYAS K=8
*ALPHA	R	Pulse shaping roll-off factor	Scalar	0.2
*FC	S	Data file containing custom filter coefficients		
CTRFRQ	R	Center frequency	Frequency	0
*OVRSMF	I	Oversampling factor	Scalar	_SMPSYM
*DIAGDSP	E	Diagnostics to display	N/A	None

Εικόνα 43: Παράμετροι FBMC_MOD

OUTLVL. Καθορίζει τη μέση στάθμη σήματος εξόδου. Η ερμηνεία της τιμής εξαρτάται από το OLVLTYP.

OLVLTYP. Καθορίζει την ερμηνεία του OUTLVL:

Χωρίς κλιμάκωση: Το σήμα FBMC δεν είναι κλιμακωμένο, το OUTLVL δεν χρησιμοποιείται.

Μέση συνολική ισχύς (dBW), Μέση συνολική ισχύς (dBm): Το OUTLVL ερμηνεύεται ως η μέση συνολική ισχύς σε dBW ή dBm. Τα σύμβολα δευτερεύοντος φορέα εισόδου κλιμακώνονται ως εξής:

$$\sqrt{\frac{OUTLVL_{Watts}}{(\# \text{ of active subcarriers}) \times \frac{MSGLEN - NULLSYMS}{MSGLEN}}}$$

όπου το (# των ενεργών υποφορέων) είναι ο αριθμός των ενεργών υποφορέων ανά σύμβολο που καθορίζεται στο SCMAP.

Μέση ισχύς δευτερεύοντος φορέα (dBW), Μέση ισχύς δευτερεύοντος φορέα (dBm): Το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση ισχύς υποφορέα σε dBW ή dBm. Τα σύμβολα δευτερεύοντος φορέα εισόδου κλιμακώνονται ως εξής:

$$\sqrt{\text{OUTLVL}}_{\text{Watts}}$$

NC. Ο συνολικός αριθμός υποφορέων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα σήμα FBMC, συμπεριλαμβανομένων τόσο των ενεργών όσο και των μη ενεργών υποφορέων όπου οι ενεργοί υποφορείς ορίζονται από την παράμετρο εκχώρησης υποφορέων (SCMAP). [19]

CS. Η απόσταση μεταξύ των υποφορέων. Εάν αφεθεί κενό, η απόσταση του δευτερεύοντος φορέα ορίζεται στον ρυθμό δεδομένων του σήματος εισόδου διαιρεμένος με τον αριθμό των υποφερόντων (NC). Εάν έχει καθοριστεί μια τιμή, η πηγή δεδομένων που παράγει το σήμα εισόδου ρυθμίζεται αυτόματα ώστε να παράγει δεδομένα με ρυθμό τέτοιο ώστε ο ρυθμός δεδομένων στην είσοδο στον χαρτογράφο να είναι η απόσταση υποφορέα πολλαπλασιαζόμενη με τον αριθμό των δευτερευόντων φορέων: RATE = CS x NC

MSGLEN. Η διάρκεια του μηνύματος FBMC σε βάθος χρόνου. Το μέγεθος του μπλοκ FBMC είναι NC x MSGLEN. Όταν η παράμετρος PLSTYP έχει οριστεί σε "Root Raised Cosine", χρησιμοποιείται η καθορισμένη παράμετρος MSGLEN. Όταν η παράμετρος PLSTYP έχει οριστεί σε PHYDYAS K=4, K=6 ή K=8, το MSGLEN ορίζεται σε 4, 6 ή 8, αντίστοιχα.

NULLSYMS. Το μήκος των αρχικών μηδενικών συμβόλων. Όταν NULLSYMS > 0:

Τα πρώτα σύμβολα NULLSYMS από τα σύμβολα MSGLEN ακυρώνονται.

Το μέγεθος του μπλοκ παραμένει NC x MSGLEN, αλλά ο αριθμός των ενεργών υποφορέων (ή ο αριθμός σύνθετων συμβόλων) που καταλαμβάνουν το μπλοκ FBMC είναι (# ενεργών υποφορέων) x (MSGLEN-NULLSYMS)

SCMAP. Η εκχώρηση ενεργού υποφορέα για υποφορείς 0 έως NC-1. Όταν το SCMAP παραμένει κενό ή έχει οριστεί σε -1, όλοι οι δευτερεύοντες φορείς είναι κατειλημμένοι. Όταν ενεργοποιούνται μία ή περισσότερες ομάδες υποφορέων, το SCMAP θα πρέπει να προσδιορίζεται με ένα ζεύγος αριθμών στο { } έτσι ώστε να καθορίζεται το κάτω άκρο του ενεργού υποφορέα και το ανώτερο άκρο του ενεργού υποφορέα. Για μια ανάθεση μεμονωμένου υποφορέα, το SCMAP = {15,15} ενεργοποιεί μόνο τον δευτερεύοντα φορέα 15. Για εκχώρηση πολλαπλών υποφορέων, το SCMAP = {0, 9, 20, 39} ενεργοποιεί 10 υποφορείς 0 έως 9 και 20 υποφορείς 20 έως 39, για ένα σύνολο 30 ενεργών υπομεταφορέων.

FCO. Ο αριθμός των υποφορέων που αντισταθμίζουν τον πρώτο υποφορέα από την κεντρική συχνότητα. Στον πρώτο δευτερεύοντα φορέα εκχωρείται η συχνότητα καναλιού που αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα συν τη μετατόπιση επί της απόστασης του υποφορέα.

PLSTYP. Καθορίζει τον τύπο της κυκλικής διαμόρφωσης παλμού που χρησιμοποιείται στο σήμα FBMC. Υποστηρίζονται τα ακόλουθα σχήματα παλμών:

RootRaisedCosine

PHYDYASK=4

PHYDYASK=6

PHYDYASK=8

Custom: Χρησιμοποιεί τους συντελεστές παλμού που καθορίζονται στο FC. Οι συντελεστές παλμού κανονικοποιούνται εσωτερικά για την ισχύ μονάδας. [20]

ALPHA. Ελέγχει το υπερβολικό εύρος ζώνης ή τον παράγοντα roll-off όταν PLSTYP =Root Raised Cosine.

FC. Οι συντελεστές προσαρμοσμένου φίλτρου που καθορίζονται ως διάνυσμα ή το όνομα του αντικειμένου αρχείου δεδομένων κάτω από τον κόμβο Αρχεία δεδομένων του προγράμματος περιήγησης έργου. Αυτό χρησιμοποιείται μόνο εάν PLSTYP = "Προσαρμοσμένο". Όταν χρησιμοποιείτε αυτήν την επιλογή, η παράμετρος ALPHA δεν χρησιμοποιείται. Οι συντελεστές παλμού κανονικοποιούνται εσωτερικά για την ισχύ μονάδας.

CTRFRQ. Η κεντρική συχνότητα του σήματος εξόδου σύνθετου φακέλου.

OVRSMF. Ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της κυματομορφής αναλογικού μιγαδικού φακέλου κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος συμβόλων εξόδου. Η τιμή OVRSMF εφαρμόζεται στα σύμβολα του σήματος εισόδου, επομένως ο πραγματικός αριθμός δειγμάτων που παράγονται ανά έξοδο μπλοκ FBMC είναι μεγαλύτερος και καθορίζεται από: $N = N_C \times MSGLEN \times OVRSMF$, όπου N ο αριθμός των τμημάτων ανά μπλοκ FBMC εξόδου.

DIAGDSP. Καθορίζει εάν θα εμφανίζονται διαγνωστικές πληροφορίες στο παράθυρο εξόδου κειμένου.

Κανένα: Δεν υπάρχει διαγνωστική οθόνη.

Σχήμα παλμού: Οι συντελεστές φίλτρου που χρησιμοποιούνται στην οθόνη FBMC_MOD.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Complex	Complex input signal

Εικόνα44: Data input fbmc_mod

Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Complex	Modulated signal

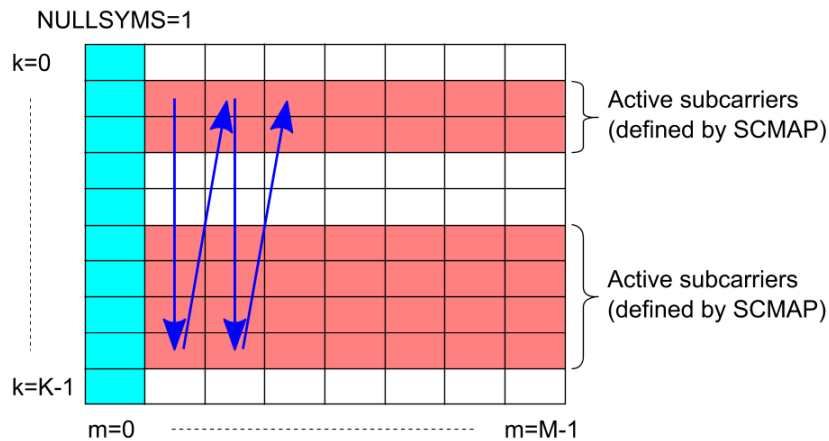
Εικόνα 45: Data output fbmc_mod

Στοιχεία Υλοποίησης

Το σύμβολο FBMC δημιουργείται σύμφωνα με:

$$x[n] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} d_k[m] \tilde{g}_{TX}[n - mN] e^{j\frac{2\pi}{K}(m - \frac{KM-1}{2})} e^{j\frac{\pi}{2}(k+m)}$$

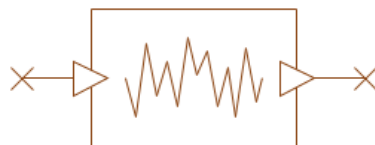
, όπου $x[n]$ είναι το παραγόμενο σήμα FBMC, m είναι ο δείκτης μηνύματος με MSGLEN=M, k είναι ο δείκτης δευτερεύοντος φορέα με NC=K, $d_k[m]$ είναι το σύμπλοκο σύμβολο εισόδου στον δείκτη μηνύματος m και ο δευτερεύων φορέας k , $\tilde{g}_{TX}$ Το $[n]$ είναι το φίλτρο διαμόρφωσης παλμού που ορίζεται από το PLSTYP. Ο τελευταίος εκθετικός όρος αντιπροσωπεύει την επεξεργασία Offset QAM που αλλάζει τη φάση με βάση τη θέση του συμβόλου. Σε αντίθεση με το OFDM, το σήμα FBMC παράγεται σύμφωνα με το μπλοκ δεδομένων χρόνου-συχνότητας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [19], [20]



Εικόνα 46: παραγωγή σήματος fbmc με μπλοκ δεδομένων χρόνου - συχνότητας

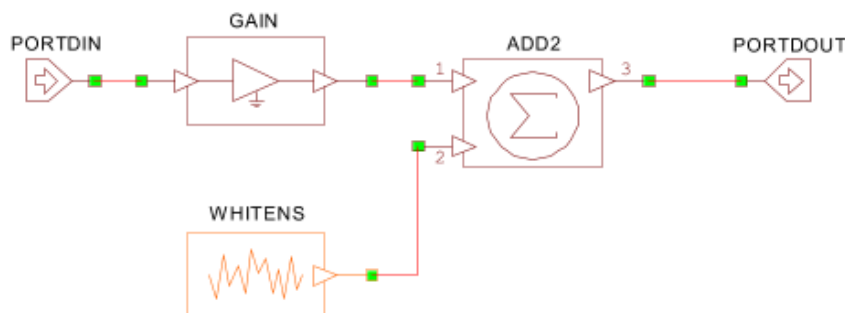
Σε αυτή την περίπτωση τα $NULLSYMS = 1$, με αποτέλεσμα τη μηδενική μετάδοση τη στιγμή $m=0$. Τα σύνθετα σύμβολα εισόδου φορτώνονται στους καθορισμένους ενεργούς φορείς από τον χαμηλότερο δείκτη συχνότητας k έως τον υψηλότερο δείκτη συχνότητας, από τον χαμηλότερο δείκτη μηνύματος m . Υπάρχουν δύο τύποι φίλτρων διαμόρφωσης παλμών: α) RootRaisedCosine με ρυθμιζόμενο συντελεστή roll-off ALPHA, β) Φίλτρα έργου PHYDYAS [3] μήκους 4, 6 και 8. Εάν επιθυμούμε ένα προσαρμοσμένο σχήμα παλμού, μπορούμε να επιλέξουμε $PLSTYP = "Custom"$ με τους πραγματικούς συντελεστές παλμού που καθορίζονται στο αρχείο δεδομένων FC. Εδώ μπορούμε να σημειώσουμε ότι οι συντελεστές παλμού που καθορίζονται στο FC θα πρέπει να είναι $NC \times MSGLEN \times OVRSMR$ με την κορυφή παλμού να εμφανίζεται στο κεντρικό δείγμα.

AWGN Channel



Το AWGN υλοποιεί ένα κανάλι Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN). Αυτό το μοντέλο προσθέτει ανεξάρτητα δείγματα θορύβου Gauss στο σήμα εισόδου του. Σε

ότι έχει να κάνει με την τοπολογία του, αυτό το μοντέλο είναι παρόμοιο με το ακόλουθο υποκύκλωμα, με πρόσθετες επιλογές για τον καθορισμό του επιπέδου ισχύος:



Εικόνα 47: Υποκύκλωμα σε AWGN channel

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
PWR	R	Power level	Varies	0
PWRTYP	E	Power level type		Avg. Power, Symbol
LOSS	R	Transmission loss	dB	0
*NORMF	R	Normalization factor	Scalar	
*RSEED	I	Random number generator seeds	Scalar	
*RNG	E	Random number generator algorithm		Auto

Εικόνα 48: Παράμετροι AWGN channel

PWR. Το επίπεδο εξόδου του προστιθέμενου θορύβου. Η ερμηνεία του εξαρτάται από τη ρύθμιση PWRTYP. Ανατρέξτε στην ενότητα "Συνιστώμενη χρήση και προειδοποιήσεις" για μια λεπτομερή εξήγηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές ρυθμίσεις στο AWGN σχετίζονται με τις αντίστοιχες ρυθμίσεις σε μπλοκ πομπού, εάν τέτοια μπλοκ προηγούνται του AWGN.

PWRTYP. Καθορίζει τον τρόπο ερμηνείας του PWR. Στο παρακάτω N0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος μονής όψης θορύβου, f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος εισόδου και SMPSYM είναι ο αριθμός δειγμάτων ανά σύμβολο από το σήμα εισόδου (ρυθμός δεδομένων = f_s / SMPSYM).

Auto: Η ερμηνεία του PWR θα καθοριστεί από τον πομπό που προηγείται του μπλοκ AWGN στην αλυσίδα προσομοίωσης, εάν υπάρχει τέτοιος πομπός (π.χ. μια πηγή QAM). Εάν δεν βρεθεί πομπός, το PWRTYP θα αντιμετωπίζεται ως "Μέση ισχύς πάνω από f_s (dBW)". Εάν βρεθεί πομπός και η παράμετρος OLVLTY του πομπού έχει ρυθμιστεί είτε σε κανονικοποιημένη ενέργεια συμβόλου είτε σε κανονικοποιημένη ενέργεια bit, το PWRTYP θα αντιμετωπίζεται ως "Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)". Εάν βρεθεί πομπός και η παράμετρος OLVLTY έχει οριστεί σε "Μέση Ισχύς (dBW)", το PWRTYP θα αντιμετωπίζεται ως "Μέση Ισχύς, Σύμβολο (dBW)". Εάν βρεθεί πομπός και η παράμετρος OLVLTY έχει οριστεί σε "Μέση Ισχύς (dBm)", το PWRTYP θα αντιμετωπίζεται ως "Μέση Ισχύς, Σύμβολο (dBm)".

Μέσος όρος Ισχύς, Σύμβολο (dBW), Μέσος όρος. Ισχύς, σύμβολο (dBm): Το PWR είναι η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης του ρυθμού συμβόλων. Οι μονάδες είναι είτε dBW είτε dBm.

$$PWR_{Watts} = N_0 \cdot f_s / SMPSYM \quad \text{for complex signals}$$

$$PWR_{Watts} = \frac{N_0}{2} \cdot f_s / SMPSYM \quad \text{for real signals},$$

Εάν έχει καθοριστεί το NORMF, το SMPSYM αντικαθίσταται από το NORMF. Χρησιμοποιήστε αυτήν τη ρύθμιση για να μετρήσετε Es/N0 όταν η ισχύς του πομπού έχει καθοριστεί ως μέση ισχύς.

Μέσος όρος Ισχύς, Bit (dBW), Μέσο. Ισχύς, Bit (dBm): Το PWR είναι η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης του ρυθμού bit. Οι μονάδες είναι είτε dBW είτε dBm.

$$PWR_{Watts} = N_0 \cdot f_s \cdot k / SMPSYM \quad \text{for complex signals}$$

$PWR_{Watts} = \frac{N_0}{2} \cdot f_s \cdot k / SMPSYM \quad \text{for real signals}$, όπου k είναι ο αριθμός των bit ανά σύμβολο. Εάν έχει καθοριστεί NORMF, το SMPSYM/k αντικαθίσταται από το NORMF. Χρησιμοποιούμε αυτή τη ρύθμιση για να μετρήσουμε το Eb/N0 όταν η ισχύς του πομπού καθορίζεται ως μέση ισχύς.

Μέσος όρος Ισχύς πάνω από fs (dBW), Μέσος. Ισχύς πάνω από fs (dBm): Το PWR είναι η μέση ισχύς θορύβου στο εύρος ζώνης της συχνότητας δειγματοληψίας. Οι μονάδες είναι είτε dBW είτε dBm

$$PWR_{Watts} = N_0 \cdot f_s \quad \text{for complex signals}$$

$PWR_{Watts} = \frac{N_0}{2} \cdot f_s \quad \text{for real signals}$, Εάν έχει καθοριστεί NORMF, το fs αντικαθίσταται από το NORMF.

PSD διπλής όψης (dBW/Hz), PSD διπλής όψης (dBm/Hz): Το PWR είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος διπλής όψης N0/2. Οι μονάδες είναι είτε dBW/Hz είτε dBm/Hz. Εάν ορίζεται NORMF, το fs αντικαθίσταται από το NORMF κατά τον υπολογισμό της μέσης ισχύος.

PSD μονής όψης (dBW/Hz), PSD μονής όψης (dBm/Hz): Το PWR είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος μονής όψης N0. Οι μονάδες είναι είτε dBW/Hz είτε dBm/Hz. Εάν ορίζεται NORMF, το fs αντικαθίσταται από το NORMF κατά τον υπολογισμό της μέσης ισχύος.

Normalized N0/2 (dBW/Hz), Normalized N0/2 (dBm/Hz): Το PWR είναι το PSD διπλής όψης πολλαπλασιασμένο με τη συχνότητα δειγματοληψίας. Οι μονάδες είναι είτε dBW/Hz είτε dBm/Hz.

$PWR_{W/Hz} = \frac{N_0}{2} \cdot f_s$, Εάν έχει καθοριστεί NORMF, το fs αντικαθίσταται από το NORMF. Χρησιμοποιήστε αυτήν τη ρύθμιση είτε για να μετρήσετε Eb/N0 όταν η ισχύς του πομπού

καθορίζεται ως κανονικοποιημένη ενέργεια bit είτε για μέτρηση E_s/N_0 όταν η ισχύς πομπού καθορίζεται ως κανονικοποιημένη ενέργεια συμβόλου.

SNR (dB): PWR είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο σε dB. Το σήμα εισόδου πρέπει να παράγεται από ένα μπλοκ που καθορίζει το επίπεδο ισχύος του σήματος, όπως ένας πομπός ή μια πηγή TONE. Ο θόρυβος μονής όψης PSD που δημιουργείται από το μπλοκ AWGN

υπολογίζεται στη συνέχεια ως: $N_0 = \frac{P_{sig}}{SNR} \cdot \frac{SMPSYM}{f_s}$ *for complex signals*
 $N_0 = \frac{2P_{sig}}{SNR} \cdot \frac{SMPSYM}{f_s}$ *for real signals*, όπου $SNR = 10PWR/10$. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο του σήματος εξόδου είναι τότε PWR, σε dB, εντός του εύρους ζώνης σήματος $DRATE = f_s/SMPSYM$.

E_b/N_0 (dB): PWR είναι η αναλογία bit ενέργειας προς θόρυβο PSD σε dB. Το σήμα εισόδου πρέπει να παράγεται από ένα μπλοκ που καθορίζει το επίπεδο ισχύος του σήματος και τα bit ανά σύμβολο, όπως ένας πομπός. Ο θόρυβος μονής όψης PSD που δημιουργείται από το μπλοκ AWGN υπολογίζεται στη συνέχεια ως:

$N_0 = \frac{P_{sig}}{E_b/N_0} \cdot \frac{SMPSYM}{M \cdot f_s}$, όπου $E_b/N_0 = 10PWR/10$ και M είναι ο αριθμός των bit ανά σύμβολο. Ο λόγος ενέργειας bit προς θόρυβο PSD του σήματος εξόδου είναι τότε PWR, σε dB.

E_s/N_0 (dB): Το PWR είναι το σύμβολο της αναλογίας ενέργειας προς θόρυβο PSD σε dB. Το σήμα εισόδου πρέπει να παράγεται από ένα μπλοκ που καθορίζει το επίπεδο ισχύος του σήματος, όπως ένας πομπός. Ο θόρυβος μονής όψης PSD που δημιουργείται από το μπλοκ AWGN υπολογίζεται στη συνέχεια ως:

$N_0 = \frac{P_{sig}}{E_s/N_0} \cdot \frac{SMPSYM}{f_s}$, όπου $E_s/N_0 = 10PWR/10$. Ο λόγος ενέργειας συμβόλου προς θόρυβο PSD του σήματος εξόδου είναι τότε PWR, σε dB.

LOSS - ΑΠΩΛΕΙΑ. Προαιρετική απώλεια μετάδοσης μέσω του καναλιού.

NORMF. Εάν ορίζεται, αυτή είναι η κλίμακα κανονικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μεταξύ της παραμέτρου PWR και του N_0 . Δείτε την περιγραφή της παραμέτρου PWR_TYP για περισσότερες λεπτομέρειες.

RSEED - ΣΠΟΡΟΙ. Οι σπόροι για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Δείτε το μοντέλο RND_D για λεπτομέρειες σχετικά με τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Εάν αυτό μείνει κενό, θα δημιουργηθεί ένας σπόρος με βάση έναν κατακερματισμό του ονόματος του μπλοκ και της παραμέτρου ID (εάν το μπλοκ βρίσκεται εντός ενός υποκυκλώματος, χρησιμοποιούνται επίσης οι παράμετροι ID των γονέων). Αυτό γενικά θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές περιπτώσεις του μπλοκ να δημιουργούν διαφορετικές ακολουθίες, αν και δεν είναι εγγυημένο. Αλλιώς εάν αυτό οριστεί σε -1, το seed θα διαφέρει από σάρωση σε σάρωση σε μία μόνο εκτέλεση προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται μια αρχική τιμή σποράς παρόμοια με αυτή που δημιουργείται από το όνομα του μπλοκ και την παράμετρο ID, με διαφορετική μετατόπιση που προστίθεται σε κάθε νέα σάρωση. Η αλληλουχία των σπόρων είναι ντετερμινιστική μεταξύ των εκτελέσεων προσομοίωσης.

RNG. Καθορίζει τον αλγόριθμο της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί.

Data Input

Node No.	Type	Purpose
1	Real, Complex	Input Signal

Εικόνα49: Data input AWGN

Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Real, Complex	Modified Signal

Εικόνα 50: Data output AWGN

Στοιχεία Υλοποίησης

Αυτό το μοντέλο προσθέτει πραγματικό ή σύνθετο θόρυβο στο σήμα εισόδου. Ο θόρυβος έχει μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας: $p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(\frac{-\eta^2}{N_0}\right)$, Για πραγματικά σήματα η μέση συνολική ισχύς είναι $N_0/2 \cdot \text{fs}$. Για σύνθετα σήματα η μέση συνολική ισχύς είναι $N_0 \cdot \text{fs}$ λόγω των χωριστών πραγματικών και φανταστικών συνιστωσών.

Συνιστώμενη χρήση και προειδοποιήσεις - Εκτέλεση Μετρήσεων BER/SER

Κατά την εκτέλεση μετρήσεων BER ή SER, το μπλοκ AWGN θα πρέπει να τοποθετείται έτσι ώστε το σήμα εξόδου του να αντιπροσωπεύει την αναλογία σήματος προς θόρυβο που πρόκειται να μετρηθεί. Για παράδειγμα, εάν μετράτε την αναλογία σήματος προς θόρυβο στην είσοδο ενός δέκτη, το μπλοκ AWGN θα πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς πριν από την είσοδο του δέκτη. Ο λόγος σάρωσης σήματος προς θόρυβο, σε SNR, E_b/N_0 ή E_s/N_0 μπορεί στη συνέχεια να καθοριστεί απευθείας στο μπλοκ AWGN. Για να το κάνετε αυτό, ορίστε την παράμετρο PWR στην αναλογία σάρωσης προς θόρυβο και ορίστε την παράμετρο PWRTYP είτε σε "SNR (dB)", " E_b/N_0 (dB)" ή " E_s/N_0 (dB)". Στη συνέχεια, η παράμετρος SWPVAR του μετρητή BER ή SER θα πρέπει να ρυθμιστεί στην ίδια τιμή με την παράμετρο PWR. Ο άξονας x του γραφήματος BER/SER θα αντιστοιχεί στη συνέχεια στον επιθυμητό λόγο σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του μπλοκ AWGN.

Απουσία μπλοκ πομπού

Εάν δεν υπάρχει μπλοκ πομπού (π.χ. πηγή QAM) που προηγείται του μπλοκ AWGN στην προσομοίωση, χρειάζεται μια ρητή ρύθμιση της παραμέτρου PWRTYP του AWGN. Η ρύθμιση σε "Auto" θα έχει ως αποτέλεσμα την προειδοποίηση: "Δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του PWRTYP από την είσοδο, θα χρησιμοποιηθεί Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)". αφού δεν υπάρχει προηγούμενος πομπός που να βοηθά το μπλοκ AWGN να διαμορφώσει αυτόματα το PWRTYP του. Μια παρόμοια προειδοποίηση που λέει "Δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός bit ανά σύμβολο στο σήμα εισόδου, το PWRTYP θα αντιμετωπίζεται ως Μέση Ισχύς, Σύμβολα (dBW)". εκδίδεται όταν η ρύθμιση PWRTYP είναι "Μέση Ισχύς, Bit (dBW)" απουσία πομπού, καθώς δεν υπάρχει τίποτα πριν από το μπλοκ AWGN για να ορίσετε τον αριθμό των bit ανά σύμβολο. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται για τη "Μέση ισχύ, Bit (dBm)". Όλες οι άλλες ρυθμίσεις δεν οδηγούν σε προειδοποιήσεις. Για παράδειγμα, για να ορίσετε τη συνολική ισχύ θορύβου εντός του εύρους

ζώνης δειγματοληψίας, θα ρυθμίσετε το PWRTYP σε "Μέση ισχύς πάνω από fs (dBW)" ή "Μέση ισχύς πάνω από fs (dBm)".

Παρουσία πομπού ρυθμίστηκε σε "AVG. Power (dBm)"

Αναμένεται ότι τις περισσότερες φορές, όταν ένα μπλοκ πομπού (μια πηγή QAM) προηγείται του μπλοκ AWGN σε μια προσομοιωμένη αλυσίδα, το OLVLTYYP αυτού του πομπού θα τίθεται σε "Μέση Ισχύς (dBm)". Σε μια τέτοια περίπτωση, δεν εκδίδονται ποτέ προειδοποιήσεις και οι ρυθμίσεις της παραμέτρου PWRTYP του μπλοκ AWGN λειτουργούν ως εξής:

"Auto" ή "Avg. Power, Symbol (dBm)": ακολουθείται η καμπύλη αναφοράς BER για μια σάρωση E_s/N_0 .

"Μέση Ισχύς, Bit (dBm)": ακολουθείται η καμπύλη αναφοράς BER για μια σάρωση E_b/N_0 .

"Μέση ισχύς πάνω από fs (dBm)": ο χρήστης καθορίζει τη συνολική ισχύ θορύβου σε ολόκληρο το εύρος ζώνης δειγματοληψίας, επομένως το SNR σε ολόκληρο το εύρος ζώνης δειγματοληψίας μπορεί να οριστεί ως: $SNR = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise, total}}} = \frac{E_s / T_{\text{symbol}}}{N_0 \cdot f_s} = \frac{E_s / N_0}{SMPSYM}$, που κάνει το SNR που ορίζεται παραπάνω να είναι ίσο με $(E_s/N_0)_{\text{dB}} - 10 \cdot \log(SMPSYM)$. Σε αυτήν την περίπτωση (δηλαδή, ο πομπός έχει οριστεί σε "Μέση ισχύς (dBm)" και το AWGN έχει οριστεί σε "Μέση ισχύς πάνω από fs (dBm)") το παραπάνω SNR αντιπροσωπεύει την αναλογία ισχύος σήματος προς θόρυβο στο πλήρες εύρος ζώνης του δειγματοληψία και θα εμφανιζόταν σε έναν δέκτη πριν από οποιοδήποτε φιλτράρισμα για απόρριψη θορύβου. Μετά από ένα τέτοιο φιλτράρισμα, το εύρος ζώνης του θορύβου (και επομένως και η ισχύς θορύβου) θα μειωνόταν σαφώς.

"PSD διπλής όψης" ή "PSD μονής όψης": ο χρήστης ρυθμίζει απευθείας το PSD (σημείωση: σε dBW/Hz) έτσι δεν θα ακολουθηθεί καμία καμπύλη αναφοράς BER.

"Normalized $N_0/2$ ": και πάλι, δεν αναμένεται να ακολουθηθούν καμπύλες αναφοράς BER σε αυτήν την περίπτωση. Αυτή η επιλογή προορίζεται κυρίως για χρήση όταν το OLVLTYYP του προηγούμενου μπλοκ πομπού έχει ρυθμιστεί σε "Ενέργεια συμβόλων (dB)" ή "Ενέργεια bit (dB)" για να ακολουθεί τις καμπύλες αναφοράς BER σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως εξηγείται στις παρακάτω παραγράφους.

"SNR (dB)": ακολουθείται η καμπύλη αναφοράς BER για μια σάρωση SNR.

" E_b/N_0 (dB)": ακολουθείται η καμπύλη αναφοράς BER για μια σάρωση E_b/N_0 .

" E_s/N_0 (dB)": ακολουθείται η καμπύλη αναφοράς BER για μια σάρωση E_s/N_0 .

Παρουσία πομπού ρυθμισμένου σε "Ενέργεια συμβόλων (Db)"

Σε αυτήν την περίπτωση, με ένα μπλοκ πομπού παρόν και το OLVLTYYP του ρυθμισμένο σε "Ενέργεια συμβόλων (dB)", φαίνεται ότι ο χρήστης προσπαθεί να ρυθμίσει μια σάρωση E_s/N_0 . Για αυτό, η ρύθμιση PWRTYP του μπλοκ AWGN θα πρέπει να είναι "Auto" ή "Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)". Άλλες ρυθμίσεις θα οδηγήσουν σε προειδοποιήσεις. Ειδικά:

i) εάν το PWRTYP του AWGN έχει ρυθμιστεί είτε σε "Auto" είτε σε "Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)", δεν εμφανίζεται καμία προειδοποίηση και η καμπύλη BER αντιστοιχεί σε αυτή μιας σάρωσης E_s/N_0 .

ii) εάν το PWRTYP έχει ρυθμιστεί σε "Μέση Ισχύς, Bit", "Μέση ισχύ πάνω από fs", "PSD διπλής όψης", "PSD μονής όψης", "SNR (dB)" ή " E_b/N_0 (dB)", για τις μονάδες dBW ή dBm, εκδίδεται η ακόλουθη προειδοποίηση (αν και η προσομοίωση συνεχίζει να εκτελείται): "Ο πομπός φαίνεται να έχει ρυθμιστεί για E_s/N_0 θα πρέπει να έχει ρυθμιστεί σε Auto' ή Normalized $N_0/2$. για E_s/N_0 ."

iii) εάν το PWRTYP του AWGN έχει ρυθμιστεί σε " E_s/N_0 (dB)", δεν εμφανίζεται καμία προειδοποίηση και η καμπύλη BER αντιστοιχεί σε αυτήν μιας σάρωσης E_s/N_0 .

Παρουσία πομπού ρυθμίστηκε σε "BIT ENERGY (db)"

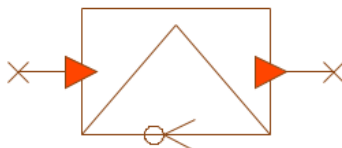
Ομοίως σε αυτήν την περίπτωση, με ένα μπλοκ πομπού να υπάρχει και το OLVLTY του ρυθμισμένο σε "Ενέργεια Bit (dB)", φαίνεται ότι ο χρήστης προσπαθεί να ρυθμίσει μια σάρωση E_b/N_0 . Για αυτό, η ρύθμιση PWRTYP του μπλοκ AWGN θα πρέπει να είναι "Auto" ή "Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)".

i) εάν το PWRTYP του AWGN έχει ρυθμιστεί είτε σε "Auto" είτε σε "Normalized $N_0/2$ (dBW/Hz)", δεν εμφανίζεται καμία προειδοποίηση και η καμπύλη BER αντιστοιχεί σε αυτήν μιας σάρωσης E_b/N_0 .

ii) εάν το PWRTYP έχει οριστεί σε "Μέση ισχύς, Σύμβολο", "Μέση ισχύς πάνω από fs", "PSD διπλής όψης", "PSD μονής όψης", "SNR (dB)" ή " E_s/N_0 (dB)", για τις μονάδες dBW ή dBm, εκδίδεται η ακόλουθη προειδοποίηση (αν και η προσομοίωση συνεχίζει να εκτελείται): "Ο πομπός φαίνεται να έχει ρυθμιστεί για E_b/N_0 θα πρέπει να ρυθμιστεί σε Αυτόματο" ή Κανονικό $N_0/2$ ". για E_b/N_0 ."

iii) εάν το PWRTYP του AWGN έχει ρυθμιστεί σε " E_b/N_0 (dB)", δεν εμφανίζεται καμία προειδοποίηση και η καμπύλη BER αντιστοιχεί σε αυτή μιας σάρωσης E_b/N_0 .

FBMCDemodulation – FBMC_DMOD



Το FBMC_DMOD προσομοιώνει τον αποδιαμορφωτή Filter Bank Multicarrier (FBMC). Λειτουργεί σε μια κυματομορφή δειγματοληψίας δεδομένων Complex Envelope (CE) με θόρυβο για την αποδιαμόρφωση ενός σήματος FBMC πολλαπλών φορέων.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A
*OUTLVL	R	Output level (energy or power)	Varies	
*OLVLTYP	E	Output level type		Auto
*NC	I	Number of carriers	Scalar	
*CS	R	Subcarrier spacing	Frequency	
*MSGLEN	I	Message length	Scalar	
*NULLSYMS	I	Number of null symbol	Scalar	
*SCMAP	I	Subcarrier assignment vector		
*FCO	I	First channel offset from center frequency	Scalar	
*PLSTYP	E	Pulse shaping type		Auto
*ALPHA	R	Pulse shaping roll-off factor	Scalar	
*FC	S	Data file containing custom filter coefficients		
CTRFREQ	R	Center frequency	Frequency	

Εικόνα 51: Παράμετροι FBMC_DMOD

OUTLVL. Καθορίζει τη μέση στάθμη σήματος εξόδου. Η ερμηνεία της τιμής εξαρτάται από το OLVLTYP. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

OLVLTYP. Καθορίζει την ερμηνεία του OUTLVL:

Auto: Η τιμή καθορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα.

Χωρίς κλιμάκωση: Το σήμα FBMC δεν είναι κλιμακωμένο και το OUTLVL δεν χρησιμοποιείται.

Μέση συνολική ισχύς (dBW), Μέση συνολική ισχύς (dBm): Το OUTLVL ερμηνεύεται ως η μέση συνολική ισχύς σε dBW ή dBm. Τα σύμβολα δευτερεύοντος φορέα εισόδου κλιμακώνονται ως εξής: $\sqrt{\frac{OUTLVL_{Watts}}{(\# \text{ of active subcarriers}) \times \frac{MSGLEN - NULLSYMS}{MSGLEN}}}$, όπου το (# των ενεργών υποφορέων) είναι ο αριθμός των ενεργών υποφορέων ανά σύμβολο που καθορίζεται στο SCMAP.

Μέση ισχύς δευτερεύοντος φορέα (dBW), Μέση ισχύς δευτερεύοντος φορέα (dBm): Το OUTLVL ερμηνεύεται ως η μέση ισχύς υποφορέα σε dBW ή dBm. Τα σύμβολα δευτερεύοντος φορέα εισόδου κλιμακώνονται ως εξής: $\sqrt{OUTLVL_{Watts}}$.

NC. Ο συνολικός αριθμός υποφορέων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα σήμα FBMC, συμπεριλαμβανομένων τόσο των ενεργών όσο και των μη ενεργών υποφορέων όπου οι ενεργοί υποφορείς ορίζονται από την παράμετρο εκχώρησης υποφορέων (SCMAP). Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

CS. Η απόσταση μεταξύ των υποφορέων. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

MSGLEN. Η διάρκεια του μηνύματος FBMC σε βάθος χρόνου. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

NULLSYMS. Το μήκος των αρχικών μηδενικών συμβόλων. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

SCMAP. Η εκχώρηση ενεργού δευτερεύοντος φορέα. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή GFDM που παράγει το σήμα εισόδου. Όταν το SCSMAP είναι -1, ενεργοποιούνται όλοι οι υποφορείς. Όταν ενεργοποιούνται μία ή περισσότερες ομάδες υποφορέων, το SCSMAP θα πρέπει να προσδιορίζεται με ένα ζεύγος αριθμών στο { } έτσι ώστε να καθορίζεται το κάτω άκρο του ενεργού υποφορέα και το ανώτερο άκρο του ενεργού υποφορέα. Για μια ανάθεση μεμονωμένου υποφορέα, το SCSMAP = {15,15} ενεργοποιεί μόνο τον δευτερεύοντα φορέα 15. Για εκχώρηση πολλαπλών υποφορέων, το SCSMAP = {0, 9, 20, 39} ενεργοποιεί 10 υποφορείς 0 έως 9 και 20 υποφορείς 20 έως 39, για ένα σύνολο 30 ενεργών υπομεταφορέων.

FCO. Ο αριθμός των υποφορέων που αντισταθμίζουν τον πρώτο υποφορέα από την κεντρική συχνότητα. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου. Στον πρώτο δευτερεύοντα φορέα εκχωρείται η συχνότητα καναλιού που αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα συν τη μετατόπιση επί της απόστασης του υποφορέα.

PLSTYP. Καθορίζει τον τύπο της κυκλικής διαμόρφωσης παλμού που χρησιμοποιείται στο σήμα FBMC. Υποστηρίζονται τα ακόλουθα σχήματα παλμών:

Auto: Καθορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου

Root raised cosine - Ρίζα αυξημένο συνημίτονο

PHYDIAS K=4

PHYDIAS K=6

PHYDIAS K=8

Custom: Χρησιμοποιεί τους συντελεστές παλμού που καθορίζονται στο FC. Οι συντελεστές παλμού κανονικοποιούνται εσωτερικά για την ισχύ μονάδας

ALPHA. Ελέγχει το υπερβολικό εύρος ζώνης ή τον παράγοντα άλφα roll-off όταν PLSTYP = Root Raised Cosine. Εάν είναι κενό, χρησιμοποιείται το φίλτρο Root Raised Cosine, με την τιμή να προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

FC. Οι συντελεστές προσαρμοσμένου φίλτρου που καθορίζονται ως διάνυσμα ή το όνομα του αντικειμένου αρχείου δεδομένων κάτω από τον κόμβο Αρχεία δεδομένων του προγράμματος περιήγησης έργου. Αυτό χρησιμοποιείται μόνο εάν PLSTYP = "Προσαρμοσμένο". Όταν χρησιμοποιείτε αυτήν την επιλογή, η παράμετρος ALPHA δεν χρησιμοποιείται. Οι συντελεστές παλμού κανονικοποιούνται εσωτερικά για την ισχύ μονάδας.

CTRFRQ. Η κεντρική συχνότητα του σήματος εξόδου σύνθετου φακέλου. Εάν είναι κενό, η τιμή προσδιορίζεται από τον διαμορφωτή FBMC που παράγει το σήμα εισόδου.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Complex	Modulated Signal

Εικόνα52: Data input fbmc_dmod

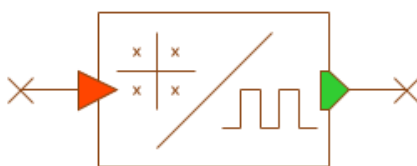
Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Complex	Demodulated Signal

Εικόνα 53: Data output fbmc_dmod

Όσο αφορά τα **στοιχεία υλοποίησης**, το σύμβολο FBMC αποδιαμορφώνεται με αντιστοιχισμένο φίλτράρισμα που ακολουθείται από FFT και αναίρεση της επεξεργασίας Offset-QAM.

QAM Detector – QAM_DET



Το QAM_DET δημιουργεί μια ακολουθία ψηφιακών ή δυαδικών συμβόλων από ένα αποδιαμορφωμένο σήμα I/Q με τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM). Στο πλαίσιο του **FBMC (Filter Bank Multicarrier)** αναφέρεται στον αποδιαμορφωτή (detector) για σήματα διαμορφωμένα με **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)**. Το FBMC είναι μια τεχνολογία πολυμεταφορέα που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με την OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
*M	I	Number of signal levels (M-ary)	Scalar	
*SIGCNS	C	Signal constellation	Vector	
*SCALE	R	Scale factor	Scalar	
*OUTTYP	E	Output type		Auto

Εικόνα 54: Παράμετροι QAM_DET

M. Ο αριθμός των σημείων στον αστερισμό I/Q. Εάν μείνει κενή, η τιμή θα ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει με την παράμετρο M του πομπού που παράγει το σήμα εισόδου. Αυτή η τιμή περιορίζεται να είναι δύναμη 2.

SIGCNS. Προαιρετικός αστερισμός σήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Εάν καθορίζεται, αυτό πρέπει να είναι ένα διάνυσμα που περιέχει M σύνθετα στοιχεία. Εάν είναι άδειο, ο αστερισμός θα προσδιοριστεί από τον πομπό που παράγει το σήμα εισόδου.

SCALE. Προαιρετικός συντελεστής κλίμακας. Εάν μείνει κενό, αυτό θα καθοριστεί από το μπλοκ PAM_MAP που παράγει το σήμα εισόδου. Εάν δεν ανιχνευτεί κανένα μπλοκ, ο

αστερισμός κανονικοποιείται ως προς την ισχύ μονάδας ρυθμίζοντας τον συντελεστή κλίμακας σε:

$$SCALE = \sqrt{\frac{M}{\sum_{i=0}^M |x_i|^2}}$$

OUTTYP. Καθορίζει τον τύπο του σήματος εξόδου.

α) Auto: Το σήμα θα ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει με το σήμα εισόδου στον πομπό.

β) Δυναδικό: Θα δημιουργηθεί ένα δυαδικό σήμα.

γ) M-Ary: Θα δημιουργηθεί ένα ψηφιακό σήμα M-ary, με την παράμετρο M ως μέγεθος αλφαβήτου.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Complex	Demodulated Signal

Εικόνα55: Data input QAM_DET

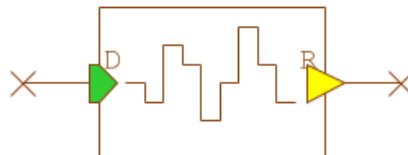
Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Digital	Detected Symbols

Εικόνα 56: DataoutputQAM_DET

Όσο αφορά τα στοιχεία υλοποίησης, η υλοποίηση του αποδιαμορφωτή **QAM_DET** στο πλαίσιο του **FBMC (Filter Bank Multicarrier)** μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές και εργαλεία. Το μπλοκ καθορίζει το πλησιέστερο σημείο αστερισμού σε κάθε σύμβολο εισόδου για να καθορίσει το σύμβολο εξόδου που ανιχνεύτηκε. Εάν το σήμα εξόδου είναι δυαδικό, τα bit εξέρχονται πρώτα με το πιο σημαντικό bit.

Digitaltoarealconverter – D2R



Το D2R μετατρέπει μια ψηφιακή είσοδο σε πραγματική έξοδο. Η ψηφιακή είσοδος μπορεί να είναι $\{0,1,...,M-1\}$, όπου M είναι το μέγεθος του ψηφιακού αλφαβήτου. Αυτό διαφέρει από έναν ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα στο ότι το σήμα εξόδου δεν είναι μια δειγματοληπτική αναλογική κυματομορφή.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
MAP	R	Mapping array	Vector	

Εικόνα 57: Παράμετροι D2R

MAP. Διάνυσμα που ορίζει την τιμή εξόδου για κάθε πιθανή τιμή εισόδου. Ο δείκτης κάθε στοιχείου (0 είναι το πρώτο στοιχείο) στον πίνακα αντιστοιχεί στην τιμή εισόδου για αυτό το στοιχείο που θα εξάγεται. Εάν μείνει κενή, η αντιστοίχιση θα είναι $\{-1,1\}$ για δυαδική είσοδο και $\{0,1,2,...,M-1\}$ για μη δυαδική είσοδο. Εάν ο πίνακας αντιστοίχισης έχει καθοριστεί, πρέπει να περιέχει τουλάχιστον M στοιχεία.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Digital	Digital Input

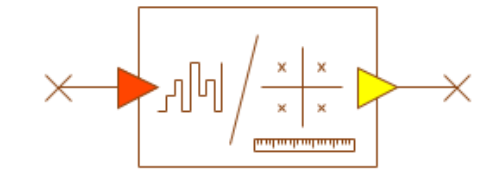
Εικόνα58: Data input D2R

Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Real	Input mapped by MAP

Εικόνα 59: Data output D2R

QAM soft metrics calculator – QAM_SFTM



Τα softmetrics παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία των λαμβανόμενων συμβόλων σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Δεν περιορίζονται μόνο σε δυαδικές αποφάσεις (όπως "0" ή "1"), αλλά δίνουν μια μέτρηση για το πόσο κοντά είναι το λαμβανόμενο σύμβολο σε κάθε πιθανή τιμή. Αυτά τα metrics χρησιμοποιούνται συχνά σε αποκωδικοποιητές (π.χ., Viterbi ή Turbo κώδικες) για να βελτιώσουν την ικανότητα διόρθωσης λαθών. Στην QAM διαμόρφωση, όπου κάθε σύμβολο μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές τιμές (π.χ., σε 16-QAM ή 64-QAM), τα softmetrics μπορούν να βοηθήσουν στην ανάκτηση των δεδομένων όταν το σήμα υπόκειται σε θόρυβο ή παρεμβολές. Ο QAM_SFTM είναι ένας υπολογιστής softmetrics που χρησιμοποιείται για να μετρά την αξιοπιστία των λαμβανόμενων συμβόλων σε συστήματα QAM. Τα softmetrics βοηθούν στην αποκωδικοποίηση και διόρθωση λαθών, προσφέροντας μια εκτίμηση της πιθανότητας για κάθε πιθανό σύμβολο. Υλοποιούνται σε λογισμικό ή υλικό και είναι βασικά στοιχεία σε σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών. Η είσοδος σε αυτό το μπλοκ είναι ένα αποδιαμορφωμένο σήμα I/Q. Για κάθε δείγμα εισόδου, το

QAM_SFTM υπολογίζει μαλακές μετρήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο του υποκείμενου αστερισμού Τετραγωνικής Διαμόρφωσης Πλάτους (QAM) I/Q.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
*M	I	Number of signal levels (M-ary)	Scalar	
*SIGCNS	C	Signal constellation	Vector	
*SCALE	R	Scale factor	Scalar	

Εικόνα 60: Παράμετροι QAMSFTM

M. Ο αριθμός των σημείων στον αστερισμό I/Q. Εάν μείνει κενή, η τιμή θα ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει με την παράμετρο M του πομπού που παράγει το σήμα εισόδου. Αυτή η τιμή περιορίζεται να είναι δύναμη 2.

SIGCNS. Προαιρετικός αστερισμός σήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Εάν καθορίζεται, αυτό πρέπει να είναι ένα διάνυσμα που περιέχει M σύνθετα στοιχεία. Εάν είναι άδειο, ο αστερισμός θα προσδιοριστεί από τον πομπό που παράγει το σήμα εισόδου.

SCALE - ΚΛΙΜΑΚΑ. Προαιρετικός συντελεστής κλίμακας. Εάν μείνει κενό, αυτό θα καθοριστεί από το μπλοκ PAM_MAP που παράγει το σήμα εισόδου. Εάν δεν ανιχνευτεί κανένα μπλοκ, ο αστερισμός κανονικοποιείται ως προς την ισχύ μονάδας ρυθμίζοντας τον

συντελεστή κλίμακας σε:

$$SCALE = \sqrt{\frac{M}{\sum_{i=0}^M |x_i|^2}}$$

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Complex	Demodulated Signal

Εικόνα61: Data input QAM SFTM

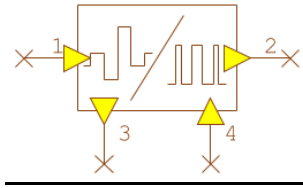
Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Real	Soft Metrics

Εικόνα 62: Data output QAMSFTM

Για κάθε δείγμα εισόδου, το μπλοκ υπολογίζει M softmetrics. Κάθε μέτρηση υπολογίζεται ως η τετραγωνική απόσταση μεταξύ του δείγματος εισόδου και καθενός από τα σημεία στον αστερισμό QAM.

Soft metrics conversion from symbols to bits: SYM2B_SFT



Το SYM2B_SFT αφορά τον μετασχηματισμό των softmetrics που σχετίζονται με τα διαμορφωμένα σύμβολα QAM σε softmetrics που αντιστοιχούν στα bits που κωδικοποιούνται σε κάθε σύμβολο. Ο σκοπός αυτής της μετατροπής είναι να παράσχει σε αποκωδικοποιητές διόρθωσης λαθών πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα κάθε bit να είναι "0" ή "1". Ακόμη μετατρέπει τις μαλακές μετρήσεις ενός συμβόλου M-ary σε μαλακές μετρήσεις δυαδικών bit. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό των **Log - Like lihood Ratios (LLRs)** για κάθε bit βάσει της απόστασης του λαμβανόμενου συμβόλου από τις ιδανικές θέσεις στον αστερισμό. Τα softmetrics που προκύπτουν χρησιμοποιούνται σε αποκωδικοποιητές διόρθωσης λαθών για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος, ειδικά σε θορυβώδη κανάλια.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
BITSYM	I	Bits per symbol	Scalar	
BITORD	E	Bit ordering		Auto
*BITSMCALC	E	Information of bit soft metrics		Auto
*BITSMTYPE	E	Type of bit soft metrics		Differential

Εικόνα 63: Παράμετροι SYM2BSFT

BITSYM. Καθορίζει πόσα bit ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν κάθε σύμβολο. Αντιπροσωπεύει τον λογάριθμο (βάση2) του «μεγέθους αλφαβήτου». Εάν μείνει κενό, πρέπει να οριστεί σε ένα προηγούμενο μπλοκ.

BITORD. Καθορίζει τον τύπο της αντιστοίχισης που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή συμβόλων σε bit.

Auto: Αυτή η επιλογή επιτρέπει στο μοντέλο να διαβάσει την τιμή αυτής της παραμέτρου από ένα μοντέλο "B2SYM" που προηγείται αυτού του μοντέλου στην τοπολογία. Εάν δεν υπάρχει τέτοιο μοντέλο, χρησιμοποιείται φθίνουσα σημασία.

Μείωση: Σειρά φθίνουσας σημασίας, το πρώτο bit έξοδο είναι το πιο σημαντικό bit.

Αύξηση: Σειρά αυξανόμενης σημασίας, το πρώτο bit έξοδο είναι το λιγότερο σημαντικό bit.

Gray: Γκρι αντιστοίχιση, το πρώτο bit έξοδο είναι το πιο σημαντικό bit.

BITSMCALC. Καθορίζει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των softmetrics των bits εξόδου. Εάν ο κόμβος εισόδου 4 δεν είναι συνδεδεμένος, αυτή η ρύθμιση δεν χρησιμοποιείται.

Auto: Προεπιλογές σε εξωτερικό υπολογισμό.

Intrinsic: Οι μετρήσεις softbit στην κύρια έξοδο περιέχουν εγγενείς πληροφορίες. Ανατρέξτε στην ενότητα Λεπτομέρειες υλοποίησης για μια πλήρη περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού softmetric.

Extrinsic: Οι μετρήσεις softbit στην κύρια έξοδο περιέχουν εξωτερικές πληροφορίες.

BITSMTYPE. Προσδιορίζει τον τύπο των μετρήσεων softbit εξόδου:

Διαφορικό: Για κάθε bit, η μαλακή μέτρηση εξόδου αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της ήπιας μέτρησης ενός δυαδικού 0 με την ήπια μέτρηση ενός δυαδικού 1.

Ρητό: Για κάθε bit, αποστέλλονται δύο softmetrics στην έξοδο: η softmetric ενός δυαδικού 0 και η softmetric ενός δυαδικού 1.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Digital	Input soft metrics of M-ary symbol
4	Digital	Input soft metrics of binary bits (optional)

Εικόνα64: Data input SYM2B SFT

Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Digital	Calculated soft metrics of binary bits
3	Digital	Calculated soft metrics of M-ary symbols

Εικόνα 65: DataoutputSYM2BSFT

Όσο αφορά τα στοιχεία υλοποίησης, Σε κάθε βήμα, οι μαλακές μετρήσεις συμβόλων M χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μαλακών μετρήσεων B δυαδικών ψηφίων, όπου $2B=M$. Ο υπολογισμός βασίζεται στην ιδέα μιας δομής Finite State Machine (FSM) που καθορίζει τη σχέση μεταξύ των M-ary συμβόλων (είσοδοι στο FSM) και των δυαδικών bit (έξοδοι FSM). Οι είσοδοι και οι έξοδοι του μπλοκ μπορούν να οριστούν ως εξής:

Κόμβος 1: Εισαγάγετε λογικές μετρήσεις συμβόλων, $SMSI(m)$, $0 \leq m \leq M-1$.

Κόμβος 2: Μαλακές μετρήσεις bit εξόδου, $SMBbO(i)$, $0 \leq i \leq 1$, $0 \leq b \leq B-1$.

Κόμβος 3: Έλεγχοι μετρικών συμβόλων εξόδου, $SMSO(m)$.

Κόμβος 4: Μετρικές softbit εισόδου, $SMBbI(i)$.

Οι μαλακές μετρήσεις εξόδου για κάθε ένα από τα δυαδικά ψηφία εξόδου B υπολογίζονται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω:

Για κάθε bit b , $0 \leq b \leq B-1$, ο αστερισμός των συμβόλων χωρίζεται πρώτα σε δύο ομάδες, με την πρώτη να περιέχει όλα τα σύμβολα των οποίων το bit b είναι 0 και η δεύτερη να περιέχει όλα τα σύμβολα των οποίων το bit b είναι 1.

Εάν ο κόμβος εισόδου 4 δεν είναι συνδεδεμένος, για κάθε ομάδα i , $0 \leq i \leq 1$, οι μετρήσεις μαλακών ψηφίων εξόδου υπολογίζονται ως η ελάχιστη τιμή των μαλακών μετρήσεων εισόδου όλων των συμβόλων που περιέχονται σε κάθε ομάδα.

$$\text{SMB}_b^O(i) = \min_{\substack{0 \leq m \leq M-1 \\ m_b = i}} \{\text{SMS}^I(m)\}, \quad 0 \leq i \leq 1$$
, όπου το m_b αντιπροσωπεύει την τιμή του b -ου bit του m . Η ελαχιστοποίηση εκτελείται χρησιμοποιώντας όλα τα σύμβολα m των οποίων το b -ο bit είναι ίσο με i .

Εάν είναι συνδεδεμένος ο κόμβος εισόδου 4, οι μετρήσεις μαλακών δυαδικών ψηφίων εξόδου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις μαλακές μετρήσεις μπιτ εισόδου αυτού του κόμβου. Οι μαλακές μετρήσεις στον κόμβο 4 θα πρέπει να έχουν τον ίδιο τύπο μορφοποίησης BITSMTYPE με τον κόμβο εξόδου 2. Όταν το BITSMTYPE έχει οριστεί σε Διαφορικό, αντιπροσωπεύουν τη διαφορά μεταξύ της ήπιας μέτρησης του bit που είναι 0 και της soft μέτρησης του ίδιου bit που είναι 1. Σε αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να προστεθούν στα παρακάτω αθροίσματα μόνο εάν το υποκείμενο bit είναι 0. Ομοίως, όταν το BITSMTYPE έχει οριστεί σε Explicit, η μαλακή μέτρηση του δυαδικού 0 ή η μαλακή μέτρηση του δυαδικού 1 θα προστεθεί στο κατάλληλο άθροισμα. ανάλογα με το αν το υποκείμενο bit είναι 0 ή 1, αντίστοιχα.

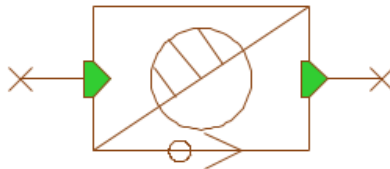
Για εγγενή υπολογισμό:
$$\text{SMB}_b^O(i) = \min_{\substack{0 \leq m \leq M-1 \\ m_b = i}} \left\{ \text{SMS}^I(m) + \sum_{j=0, j \neq b}^{B-1} \text{SMB}_j^I(m_j) \right\}, \quad 0 \leq i \leq 1$$
, ως εκ τούτου, στον εγγενή υπολογισμό όλες οι μετρικές μαλακές δυαδικές ψηφίδες από τη δευτερεύουσα είσοδο χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των μαλακών μετρήσεων bit εξόδου.

Για εξωτερικό υπολογισμό:
$$\text{SMB}_b^O(i) = \min_{\substack{0 \leq m \leq M-1 \\ m_b = i}} \left\{ \text{SMS}^I(m) + \sum_{j=0, j \neq b}^{B-1} \text{SMB}_j^I(m_j) \right\}, \quad 0 \leq i \leq 1$$
, ως εκ τούτου, στον εξωτερικό υπολογισμό δεν χρησιμοποιούνται οι μαλακές μετρήσεις bit από τη δευτερεύουσα είσοδο που αντιστοιχούν στο τρέχον bit (εξαιρούνται από το άθροισμα). Με άλλα λόγια, οποιαδήποτε αργότερη πληροφορία σε ένα δεδομένο bit απορρίπτεται και μόνο οι νέες (υπολογισμένες) πληροφορίες περνούν στην έξοδο.

Όταν το BITSMTYPE έχει οριστεί σε Διαφορικό, η λογιστική μέτρηση εξόδου που αντιστοιχεί στο bit b υπολογίζεται ως: $\text{SMB}_b^O = \text{SMB}_b^O(0) - \text{SMB}_b^O(1)$ ενώ εάν είναι συνδεδεμένοι και ο κόμβος εξόδου 3 και ο κόμβος εισόδου 4, οι μετρήσεις του συμβόλου εξόδου για κάθε τιμή m υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{SMS}^O(m) = \sum_{b=0}^{B-1} \text{SMB}_b^I(m_b), \quad 0 \leq m \leq M-1$$

Viterbi decoder – VIT_DEC



Το VIT_DEC εκτελεί αποκωδικοποίηση Viterbi συνελκτικά κωδικοποιημένων δεδομένων. Το μοντέλο δέχεται δεδομένα πραγματικής αξίας από την έξοδο ενός αποδιαμορφωτή για λειτουργία με λογικές αποφάσεις εισόδου ή ψηφιακά δεδομένα για λειτουργία με σκληρές αποφάσεις εισόδου.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	A1
*B	I	b of rate bin	Scalar	
*CODEV	I	Code vectors	Scalar	
*K	I	Number of stages	Scalar	
*PMEM	I	Path memory length	Scalar	
*PUNC	I	Puncturing pattern	Scalar	
*PUNCTYP	E	Interpretation of PUNC		Auto
*PUNCORD	E	Ordering of values in PUNC		Auto
*DECDLY	E	Decoder delay handling		Output Decoding Delay
SMPSKIP	I	Initial samples to skip	Scalar	

Εικόνα 66: Παράμετροι VITDEC

B. Ο αριθμός των bit πληροφοριών ανά διάνυσμα κώδικα. Εάν μείνει κενό, αυτό καθορίζεται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή που παράγει το σήμα εισόδου.

CODEV. Καθορίζει τα bit εισόδου που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κάθε bit των λέξεων κώδικα. Ο αριθμός των στοιχείων στο διάνυσμα είναι το 'n' του ρυθμού b/n ή ο αριθμός των bit σε μια κωδική λέξη. Κάθε στοιχείο του διανύσματος καθορίζει τα bit του σήματος εισόδου που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός bit της κωδικής λέξης. Για παράδειγμα, η εξίσωση 'oct("133")' (1338 ή 91 δεκαδικά) αντιπροσωπεύει το μοτίβο bit 1011011. Η κωδική λέξη bit που αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή είναι τότε (module 2): κωδική λέξη= $x[n+6]+x[n+4]+x[n+3]+x[n+1]+x[n]$

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τις συναρτήσεις εξίσωσης 'oct' και 'hex' για να απλοποιήσετε την προδιαγραφή των μοτίβων bit. Εάν μείνει κενό, αυτό καθορίζεται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή που παράγει το σήμα εισόδου.

K. Ο αριθμός των σταδίων στο μητρώο βάρδιας. Εάν μείνει κενό, ο αριθμός των σταδίων έχει ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει στο μεγαλύτερο μοτίβο bit στο CODEV.

PMEM. Το μήκος μνήμης διαδρομής για τον αλγόριθμο Viterbi. Εάν μείνει κενό, αυτό ορίζεται στο 5πλάσιο του αριθμού των σταδίων στον καταχωρητή μετατόπισης (K).

PUNC. Εάν δεν είναι κενό, το μοτίβο που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα δημιουργούμενα bit τρυπιούνται πριν την έξοδο. Η ερμηνεία των τιμών καθορίζεται από τοPUNCTYP. Εάν μείνει κενό, αυτό καθορίζεται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή που παράγει το σήμα εισόδου.

PUNCTYP. Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η τιμή του PUNC για τον καθορισμό του μοτίβου διάτρησης:

Auto: Η ρύθμιση καθορίζεται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή που παράγει το σήμα εισόδου.

Τιμές μάσκας (0=διάτρηση): Κάθε στοιχείο στο PUNC αντιπροσωπεύει ένα bit από συνελκτική κωδικοποίηση, με το πρώτο στοιχείο να αντιστοιχεί στο πρώτο bit της παραγόμενης ακολουθίας. Τα στοιχεία που έχουν οριστεί στο 0 υποδεικνύουν bits που δεν θα εξάγονται.

Δείκτες διάτρησης, με βάση το 1: Κάθε στοιχείο στο PUNC είναι ένας δείκτης ενός bit της παραγόμενης ακολουθίας, με το πρώτο bit που δημιουργείται να αντιστοιχεί στον δείκτη 1. Οι δείκτες υποδεικνύουν τις θέσεις των bit που δεν εξέρχονται.

Δείκτες διάτρησης, με βάση το 0: Κάθε στοιχείο στο PUNC είναι ένας δείκτης ενός bit της παραγόμενης ακολουθίας, με το πρώτο bit που δημιουργείται να αντιστοιχεί στον δείκτη 0. Οι δείκτες υποδεικνύουν τις θέσεις των bit που δεν εξέρχονται.

PUNCORD. Καθορίζει την τελική αντιστοίχιση μεταξύ των θέσεων που υποδεικνύονται στο PUNC και των πραγματικών θέσεων bit που πρόκειται να τρυπηθούν:

Auto: Η ρύθμιση καθορίζεται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή που παράγει το σήμα εισόδου.

Ανά διανύσματα κώδικα: Οι θέσεις ομαδοποιούνται σε διανύσματα κώδικα.

Διαδοχική: Υπάρχει μια απευθείας αντιστοίχιση 1:1 στη ροή bit που δημιουργείται από τον συνελκτικό κωδικοποιητή

DECDLY. Καθορίζει εάν η καθυστέρηση που εισάγεται από τον αποκωδικοποιητή, που είναι το μήκος μνήμης διαδρομής PMEM, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην έξοδο.

Καθυστέρηση αποκωδικοποίησης εξόδου: Η καθυστέρηση περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου.

Παράβλεψη καθυστέρησης αποκωδικοποίησης: Η καθυστέρηση δεν περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου. Αυτό επιτρέπει στα μπλοκ προσανατολισμένα στο μπλοκ κατάντη να λειτουργούν σωστά ευθυγραμμισμένα με το αρχικό σήμα. Για παράδειγμα, εάν ο αποκωδικοποιητής ακολουθείται από έναν αποσυμπλεκόμενο μπλοκ, ο αποσυμπλεκόμενος μπλοκ κανονικά θα πρέπει να μπορεί να ευθυγραμμιστεί με το αρχικό μπλοκ. Εάν περιλαμβανόταν η καθυστέρηση του αποκωδικοποιητή, η έναρξη του μπλοκ που λαμβάνεται από τον παρεμβολέα πιθανότατα δεν θα συμπίπτει με την έναρξη του αρχικού παρεμβαλλόμενου μπλοκ.

SMPSKIP. Ο αριθμός των δειγμάτων που απορρίπτονται πριν ξεκινήσει η αποκωδικοποίηση του Viterbi.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Real or Digital	Bits to Decode

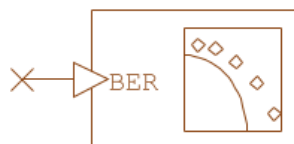
Εικόνα67: Data input VIT DEC

Data output

Node No.	Type	Purpose
2	Digital	Decoded Bits

Εικόνα 68: Data output VIT DEC

BER (Bit Error Rate), Meter, Internal Reference Source: BER



Το BER υπολογίζει το ποσοστό σφάλματος bit (BER) από ένα ψηφιακό σήμα. Αυτό το μπλοκ χρησιμοποιείται με τη μέτρηση BER για να σχεδιάσει το BER. Μπορεί επίσης να μεταφέρει απευθείας τα ποσοστά σφάλματος στο παράθυρο εξόδου κειμένου. Ακόμη καθορίζει αυτόματα το σήμα αναφοράς όταν το σήμα παράγεται από ψηφιακούς πομπούς όπως QAM_SRC, QAM_TX ή QPSK_TX. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, το BER προσπαθεί να προσδιορίσει το σήμα αναφοράς από τις πηγές που παράγουν το σήμα εισόδου. Μπορεί να υπάρχουν φορές που το μπλοκ δεν μπορεί να προσδιορίσει το σήμα αναφοράς, σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε το μπλοκ BER_EXT στη θέση του μπλοκ BER. Το BER είναι ικανό να σαρώσει την προσομοίωση, παράγοντας έξοδο σαρωμένου BER. Μια προαιρετική μεταβλητή που θα σαρωθεί μαζί με τις τιμές για κάθε σάρωση μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους VARNAME και VALUES. Το BER ξεκινά μια νέα σάρωση όταν έχουν εντοπιστεί σφάλματα MNERR ή έχουν υποστεί επεξεργασία τα σύμβολα MXTRIAL*TBLKSZ. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με το μπλοκ SweptVariableControlSWPVAR και το VectorSignalAnalyzerblockVSA για την εκτέλεση πολυδιάστατων σαρώσεων. Η τεκμηρίωση του SWPVAR περιγράφει λεπτομερώς τις πολυδιάστατες σαρώσεις.

Παράμετροι:

Name	Data Type	Description	Unit Type	Default
ID	N	Element ID	Text	BER1
VARNAME	S	Name of variable to sweep	Text	
VALUES	V	Vector of values for VARNAME	Scalar	
*SWPVAR	R	Swept variable	Scalar	
*SWPTYP	E	Swept parameter type	Scalar	Auto
OUTFL	S	Name for optional output file	Scalar	
*OFLFMT	E	Format for optional output file	N/A	Trial blocks, counts
*EXISTS	E	Action to perform if the output file already exists	N/A	Archive and replace
*MNERR	I	Minimum errors per pass	Scalar	10
*TBLKSZ	I	Trial block size	Scalar	5000
*MXTRL	I	Maximum trial blocks per sweep	Scalar	100
*IGNR	I	Initial samples to ignore	Scalar	0
*DLY	I	Initial samples to delay	Scalar	
*NERRACT	E	Not enough errors detected action	N/A	Stop simulation
*DETECT	E	Action when minimum errors detected	N/A	Complete current block
*RPTERR	I	Number of errors required before error rate is output	Scalar	
*TXTOUT	E	Output to text window	N/A	No output

Εικόνα 69: Παράμετροι BER

VARNAME. Το όνομα της προαιρετικής μεταβλητής που θα σαρωθεί. Αυτό θα πρέπει να είναι σε διπλά εισαγωγικά, όπως "A". Πρέπει να υπάρχει μια αντίστοιχη εξίσωση στο διάγραμμα του συστήματος με μια εικονική αριθμητική τιμή που του έχει εκχωρηθεί, όπως "A=0". Για να επηρεαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η μεταβλητή πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος σε ένα ή περισσότερα μπλοκ, είτε απευθείας είτε μέσω άλλων εξισώσεων.

VALUE - ΑΞΙΕΣ. Το διάνυσμα των πραγματικών τιμών που πρέπει να αντιστοιχίσετε στη μεταβλητή που καθορίζεται στο VARNAME για κάθε σάρωση. Το διάνυσμα περικλείεται σε αγκύλες, όπως σε: {0,1,2}. Η ενσωματωμένη συνάρτηση steppped() μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός συνόλου τιμών σε ίση απόσταση.

SWPVAR. Αυτή η παράμετρος προορίζεται για συμβατότητα λογισμικού VisualSystem Simulator™ (VSS) v6.53 προς τα πίσω. Οι παράμετροι VARNAME και VALUES είναι οι προτιμώμενες μέθοδοι για τον καθορισμό της μεταβλητής σάρωσης. Το SWPVAR είναι η μεταβλητή που σαρώνεται, συνήθως η αναλογία σήματος προς θόρυβο. Αυτή είναι η τιμή που απεικονίζεται στον άξονα x από τις μετρήσεις BER. Εάν μείνει κενό, το μπλοκ επιχειρεί να το προσδιορίσει από το σήμα εισόδου. Το σήμα θα πρέπει να διέρχεται είτε από μπλοκ πομπού με παράμετρο ισχύος σάρωσης είτε από μπλοκ λευκού Gaussian θορύβου με παράμετρο ισχύος σάρωσης θορύβου.

SWPTYP. Αυτό χρησιμοποιείται από τις μετρήσεις της καμπύλης αναφοράς BER/SER για να προσδιοριστεί εάν το BER σχεδιάζεται σε σχέση με την ενέργεια των δυαδικών ψηφίων ή την ενέργεια συμβόλων. Εάν οριστεί σε Αυτόματο, ο μετρητής BER επιχειρεί να προσδιορίσει τον τύπο από την παράμετρο OLVLTYP του μπλοκ πομπού/διαμορφωμένου σήματος στη σύνδεση.

OUTFL. Εάν δεν είναι κενό, αυτό είναι το όνομα ενός αρχείου δεδομένων κειμένου που θα δημιουργηθεί και περιέχει τα δεδομένα του μετρητή. Το αρχείο δεδομένων μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί με το μπλοκ BER_FL για την επικάλυψη διαφορετικών καμπυλών BER σε ένα γράφημα.

OFLFMT. Καθορίζει τη μορφή του αρχείου δεδομένων κειμένου που θα δημιουργηθεί:

Δοκιμαστικά μπλοκ, μετρήσεις: Δημιουργείται ένα αρχείο τεσσάρων στηλών, με δεδομένα που γράφονται μετά από κάθε δοκιμαστικό μπλοκ. Η πρώτη στήλη είναι η τιμή σάρωσης, η δεύτερη στήλη είναι ο αριθμός δοκιμής, η τρίτη στήλη είναι ο αριθμός σφαλμάτων και η τέταρτη στήλη είναι ο αριθμός δειγμάτων.

Sweeps, counts: Δημιουργείται ένα αρχείο τριών στηλών, με δεδομένα που γράφονται μετά από κάθε σάρωση. Η πρώτη στήλη είναι η τιμή σάρωσης, η δεύτερη στήλη είναι η καταμέτρηση σφαλμάτων και η τρίτη στήλη είναι η μέτρηση δειγμάτων.

Σάρωση, ποσοστό σφάλματος: Δημιουργείται ένα αρχείο δύο στηλών, με δεδομένα που γράφονται μετά από κάθε σάρωση. Η πρώτη στήλη είναι η τιμή σάρωσης, η δεύτερη στήλη είναι το ποσοστό σφάλματος.

EXISTS. Καθορίζει την ενέργεια που εκτελείται εάν υπάρχει το αρχείο δεδομένων εξόδου:

Αντικατάσταση: Το υπάρχον αρχείο αντικαθίσταται, τα περιεχόμενά του χάνονται.

Αρχειοθέτηση και αντικατάσταση: Το υπάρχον αρχείο μετονομάζεται με "Παλιό" που προστέθηκε πριν από την επέκταση. Εάν υπάρχει ήδη ένα αρχείο με αυτό το όνομα, αντικαθίσταται.

Ασφαλής αρχειοθέτηση και αντικατάσταση: Το υπάρχον αρχείο μετονομάζεται με ".Παλιό" που προστέθηκε πριν από την επέκταση. Εάν υπάρχει ήδη ένα αρχείο με αυτό το όνομα, προστίθενται ψηφία μετά το '.Old' μέχρι να ληφθεί ένα μοναδικό όνομα αρχείου.

MNERR. Ο ελάχιστος αριθμός σφαλμάτων που καταμετρήθηκαν πριν δημιουργηθεί ένας υπολογισμός BER και προωθηθεί η μεταβλητή σάρωσης. Πρέπει να ληφθούν τουλάχιστον δείγματα TBLKSZ πριν από τη διεξαγωγή αυτής της δοκιμής.

TBLKSZ. Ο αριθμός των δειγμάτων σε ένα δοκιμαστικό μπλοκ. Αυτό συνήθως καθορίζει την ανάλυση της στατιστικής.

MXTRL. Ο μέγιστος αριθμός δοκιμαστικών μπλοκ για επεξεργασία σε μια σάρωση. Ο συνολικός αριθμός δειγμάτων που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία ανά σάρωση είναι TBLKSZ*MXTRL.

IGNR. Ο αριθμός των αρχικών δειγμάτων που πρέπει να αγνοηθούν. Το μπλοκ παραλείπει επίσης αυτόν τον αριθμό δειγμάτων στο εσωτερικό σήμα αναφοράς. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένας αριθμός δειγμάτων ίσος με IGNR τόσο από την είσοδο σε αυτό το μπλοκ (πιθανώς αποφάσεις) όσο και από τα σήματα αναφοράς παραλείπονται πριν γίνουν οποιεσδήποτε συγκρίσεις και δεν συμμετέχουν στην καταμέτρηση σφαλμάτων. Χρησιμοποιήστε το για να προσαρμόσετε το χρόνο καθίζησης.

DLY. Ο αριθμός των δειγμάτων με τα οποία καθυστερεί το σήμα εισόδου (πιθανώς οι αποφάσεις) αφού αγνοηθούν τα παραπάνω δείγματα IGNR. Ένας αριθμός δειγμάτων ίσος με DLY παραλείπεται από την ακολουθία εισόδου, αλλά το εσωτερικό σήμα αναφοράς δεν προωθείται. Εάν μείνει κενή, η καθυστέρηση ορίζεται στην καθυστέρηση στατικού σήματος που διαδίδεται ολόκληρης της ζεύξης που συνδέει την πηγή που παρέχει την εσωτερική αναφορά στο μπλοκ BER.

NERRACT. Η ενέργεια που πρέπει να εκτελεστεί εάν εντοπιστούν λιγότερα από σφάλματα MNERR σε δείγματα TBLKSZ*MXTRL.

Διακοπή προσομοίωσης: Εμφανίζεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα και η προσομοίωση σταματά.

Επόμενη σάρωση: Εμφανίζεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα και ξεκινά η επόμενη σάρωση.

Διακοπή προσομοίωσης, χωρίς προειδοποίηση: Η προσομοίωση σταματά, δεν εμφανίζεται προειδοποιητικό μήνυμα.

Επόμενη σάρωση, χωρίς προειδοποίηση: Ξεκινά η επόμενη σάρωση, δεν εμφανίζεται προειδοποιητικό μήνυμα.

DETECT. Η ενέργεια που πρέπει να εκτελεστεί μετά τον εντοπισμό σφαλμάτων MXTRL.

Ολοκληρώστε το τρέχον μπλοκ: Η προσομοίωση σαρώνεται μόλις υποβληθούν σε επεξεργασία τα υπόλοιπα δείγματα στο τρέχον δοκιμαστικό μπλοκ. Τα σφάλματα συνεχίζουν να καταμετρώνται κατά την επεξεργασία του μπλοκ.

Έναρξη επόμενης σάρωσης: Η προσομοίωση σαρώνεται μία φορά μετά την επεξεργασία των δειγμάτων TBLKSZ.

Μην σκουπίζετε: Η προσομοίωση δεν σαρώνεται. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση πολλών μετρήσεων BER/SER σε ένα ενιαίο διάγραμμα συστήματος. Πολλά μπλοκ μετρητών BER/SER μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα ενιαίο διάγραμμα συστήματος. Όλα εκτός από ένα, ωστόσο, θα πρέπει να έχουν ρυθμιστεί το DETACT σε "Donotsweep" για να αποφευχθούν συγκρούσεις στον προσδιορισμό του πότε θα πραγματοποιηθούν σαρώσεις.

RPTERR. Εάν αυτό καθορίζεται και είναι μικρότερο από MNERR, είναι ο ελάχιστος αριθμός σφαλμάτων που πρέπει να μετρηθούν πριν δημιουργηθεί ένα ποσοστό σφάλματος. Εάν αυτό μένει κενό, τότε το ποσοστό σφάλματος θα δημιουργηθεί όταν έχουν καταμετρηθεί τουλάχιστον τα σφάλματα MNERR.

TXTOUT. Καθορίζει τις πληροφορίες που θα εμφανίζονται στο παράθυρο εξόδου κειμένου.

Χωρίς έξοδο: Δεν δημιουργείται έξοδος.

Στατιστικά στοιχεία σάρωσης: Η τιμή της μεταβλητής σάρωσης, το ποσοστό σφάλματος, ο αριθμός σφαλμάτων και τα συνολικά δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία εξάγονται στο τέλος κάθε σάρωσης.

Στατιστικά δοκιμών: Η τιμή της σαρωμένης μεταβλητής, το ποσοστό σφάλματος, ο αριθμός σφαλμάτων και τα συνολικά δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία εμφανίζονται στο τέλος κάθε δοκιμαστικού μπλοκ.

Data input

Node No.	Type	Purpose
1	Digital, Real	Digital Data to be Error Counted

Εικόνα 70: DatainputBER

Όσο αφορά τα στοιχεία υλοποίησης, Αυτό το μπλοκ λειτουργεί συγκρίνοντας τα δείγματα εισόδου με ένα σήμα αναφοράς. Το σήμα αναφοράς βασίζεται στο μπλοκ πηγής που παράγει το σήμα. Εάν το σήμα εισόδου συνδυάζει πολλά σήματα μαζί, το σήμα αναφοράς βασίζεται συνήθως στην κύρια διαδρομή δεδομένων. Τα μπλοκ που συνδυάζουν πολλαπλές εισόδους, όπως το μπλοκ Adder, ADD ή το μπλοκ Combiner, COMB, έχουν μια παράμετρο PRIMINP που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της εισόδου που θα χρησιμοποιηθεί για την κύρια διαδρομή δεδομένων. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το μπλοκ μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Συγκρίνεται το δείγμα εισόδου με το τρέχον δείγμα αναφοράς. Εάν είναι διαφορετικά, αυξήστε τον αριθμό σφαλμάτων.

Εάν έχουν υποστεί επεξεργασία λιγότερα από τα συνολικά δείγματα TBLKSZ, επαναλάβετε το βήμα 3.

Εάν έχουν εντοπιστεί τουλάχιστον σφάλματα MNERR και το DETACT είναι "Startnextsweep", ξεκινήστε μια νέα σάρωση.

Εάν λιγότερα από δείγματα TBLKSZ έχουν υποστεί επεξεργασία στον τρέχοντα βρόχο, επιστρέψτε στο βήμα 3.

Τα δείγματα TBLKSZ έχουν υποστεί επεξεργασία. Εάν έχουν εντοπιστεί σφάλματα MNERR, ξεκινήστε μια νέα σάρωση.

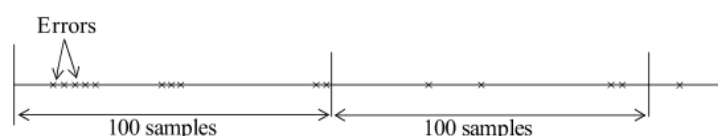
Εάν τα μπλοκ MXTRL έχουν υποστεί επεξεργασία, δεν έχουν εντοπιστεί αρκετά σφάλματα. Εάν το NERRACT πρόκειται να σταματήσει την προσομοίωση, η προσομοίωση σταματά. Εάν πρόκειται να ξεκινήσει η επόμενη σάρωση, ξεκινά η επόμενη σάρωση.

Επαναφέρεται ο μετρητής για δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στο τρέχον μπλοκ και επιστρέφει στο βήμα 3.

Κάθε νέο σκούπισμα ξεκινά στο βήμα 1.

Συστάσεις για χρήση

Χρησιμοποιούμε τα μπλοκ BER και BER_EXT μαζί με τη μέτρηση BER για να εκτελέσετε μετρήσεις ρυθμού σφάλματος bit. Μετά χρησιμοποιούμε τα μπλοκ SER και SER_EXT μαζί με τη μέτρηση BER για να εκτελέσουμε μετρήσεις ποσοστού σφάλματος συμβόλων. Για να εκτελέσουμε μια σάρωση SNR, E_s/N_0 ή E_b/N_0 , χρησιμοποιούμε τις παραμέτρους VARNAME και VALUES για να καθορίσετε τις τιμές SNR, E_s/N_0 ή E_b/N_0 που θα σαρωθούν. Αντιστοιχίζουμε την εξίσωση που καθορίζεται στο VARNAME στην παράμετρο PWR του μπλοκ AWGN και ορίζουμε την παράμετρο PWRTYP του μπλοκ AWGN σε "SNR", " E_s/N_0 " ή " E_b/N_0 ". Επειδή οι μετρήσεις BER και SER είναι στατιστικές μετρήσεις, να είστε προσεκτικοί κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μικρό αριθμό δειγμάτων. Τα MNERR, TBLKSZ, MXTRL και DETACT επηρεάζουν την ταχύτητα προσομοίωσης και την ανάλυση μέτρησης. Γενικά, μικρότερες τιμές για τα MNERR, TBLKSZ και MXTRL καθώς και η ρύθμιση του DETACT σε "Startnextsweep" έχουν ως αποτέλεσμα ταχύτερες προσομοιώσεις. Το MNERR και το DETACT έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην ταχύτητα προσομοίωσης όταν το TBLKSZ είναι μεγάλο. Η μείωση του TBLKSZ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για γρήγορη προώθηση μέσω σαρώσεων που έχουν υψηλό ποσοστό σφάλματος. Το TBLKSZ καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό δειγμάτων που πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία πριν προχωρήσει η σάρωση. Όταν το ποσοστό σφάλματος είναι αρκετά υψηλό, επιτυγχάνεται ο ελάχιστος αριθμός σφαλμάτων εντός του πρώτου δοκιμαστικού μπλοκ. Με ένα μικρότερο TBLKSZ, λιγότερα δείγματα πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία πριν προχωρήσει η σάρωση. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι κατά τη μείωση του TBLKSZ, το MNERR μπορεί να χρειαστεί προσαρμογή. Αυτό συμβαίνει επειδή σε πολλές περιπτώσεις τα σφάλματα συγκεντρώνονται αντί να κατανέμονται ομοιόμορφα στο χρόνο. Όταν συμβαίνει αυτό, το MNERR θα πρέπει να οριστεί μεγαλύτερο από το πρώτο σύμπλεγμα σφαλμάτων για να αποφευχθεί η χρήση πολύ μικρού συνόλου δεδομένων για τον υπολογισμό του ποσοστού σφάλματος. Τα ακόλουθα απεικονίζουν την κατάσταση:



Εικόνα 71: Σύμπλεγμα σφαλμάτων BER

Σε αυτό το παράδειγμα, εμφανίζονται 10 σφάλματα στα πρώτα 100 δείγματα και άλλα 4 σφάλματα στα δεύτερα 100 δείγματα, για ποσοστό σφάλματος $14/200 = 0,07$. Εάν το TBLKSZ έχει οριστεί σε 200, τότε υπολογίζονται και τα 14 σφάλματα και το ποσοστό σφάλματος αναφέρεται ως 0,07. Ωστόσο, εάν το TBLKSZ μειωθεί σε 100, τα αποτελέσματα θα εξαρτηθούν από το MNERR. Εάν το MNERR οριστεί σε λιγότερο από 11, τότε μετά το πρώτο μπλοκ θα έχουν εντοπιστεί σφάλματα MNERR και το ποσοστό σφάλματος θα υπολογιστεί με βάση μόνο το πρώτο μπλοκ και θα αναφέρεται ως $10/100$ ή 0,1. Ωστόσο, εάν το MNERR οριστεί μεγαλύτερο από 10 και μικρότερο από 15, τότε θα συμπεριληφθεί και το δεύτερο μπλοκ 100 δειγμάτων, με το ποσοστό σφάλματος να αναφέρεται ως $14/200$ ή 0,07. Η ρύθμιση MNERR μεγαλύτερο από 14 θα έχει ως αποτέλεσμα τη συμπερίληψη περισσότερων μπλοκ.

Όταν το DETACT έχει οριστεί σε "Ολοκλήρωση τρέχοντος μπλοκ", το TBLKSZ καθορίζει επίσης την αποτελεσματική ανάλυση της μέτρησης BER/SER, καθώς το ποσοστό σφάλματος υπολογίζεται σε πολλαπλάσια δείγματα TBLKSZ. Η μικρότερη τιμή ποσοστού σφάλματος που μπορεί να εντοπιστεί είναι $1/(TBLKSZ * MXTRL)$.

Βιβλιογραφίαπηγών

- [1] [Dimitris Mourtzis, John Angelopoulos, Nikos Panopoulos, 2021], [electronics-10-03175.pdf](#)
- [2] [Jelena Pisarov, Gyula Mester, July 2020], [\(PDF\) IPSI TAR July 2020 - The Impact of 5G Technology on Life in the 21st Century \(researchgate.net\)](#)
- [3] [Δημητρίου Δημήτριος, Διπλωματική Εργασία, 2023], <https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/4372>
- [4] [Parnika Kansal, Ashok Kumar Shankmar, 2017], [Wireless Engineering and Technology - SCIRP](#)
- [5] [Muhammet Colak, Non-orthogonal waveforms for 5G, 2016], [Thesis Report Muhammet Colak | PDF \(slideshare.net\)](#)
- [6] [ShatrungaPsarad Yadav, Filter Bank Multicarrier Modulation Techniques for 5G and Beyond Wireless Communication Systems, 2022], [Filter Bank Multicarrier Modulation Techniques for 5G and Beyond Wireless Communication Systems | European Journal of Electrical Engineering and Computer Science \(ejece.org\)](#)
- [7] [B. Sujitha Gowri, Dr. P. Ramana Reddy, FBMC-New Multicarrier Modulation Technique, 2016], [FBMC-New Multicarrier Modulation Technique \(ijert.org\)](#)
- [8] [Ayush Kumar Agrawal, Manisha Bharti, Analysis of Offset Quadrature Amplitude Modulation in FBMC for 5G Mobile Communication, 2021], https://www.researchgate.net/publication/342640929_Analysis_of_Offset_Quadrature_Amplitude_Modulation_in_FBMC_for_5G_Mobile_Communication

- [9] [Ling Yao, Enliang Wang, Xia Peng, Design and Research on FBMC-OQAM Multicarrier Technology for 5G, 2019], [Design and Research on FBMC-OQAM Multicarrier Technology for 5G - IOPscience](#)
- [10] [Γεώργιος Στουμπής, Διπλωματική Εργασία, 2016], <https://pergamos.lib.uoa.gr/uoa/dl/object/1320522>
- [11] [Anam Mobin, Anwar Ahmad, Performance Analysis of FS-FBMC/OQAM Systems using Companding and Channel Coding Techniques in Rayleigh Fading Channels, 2022], <https://www.ijcaonline.org/archives/volume184/number28/mobin-2022-ijca-922353.pdf>
- [12] [Lenin Gopal, Moh Lim Sim, Performance Analysis of Signal-to-Noise Ratio Estimators in AWGN and Fading Channels, 2008], <https://ieeexplore.ieee.org/document/4814291>
- [13] [Mousa K. Wali, Rashid Ali Fayadh, Performance of AWGN and fading channels on wireless communication systems using several techniques, 2018], [\(PDF\) Performance of AWGN and fading channels on wireless communication systems using several techniques \(researchgate.net\)](#)
- [14] [B. A. Wichmann, I. D. Hill, An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator, 2018], [Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator | Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics | Oxford Academic \(oup.com\)](#)
- [15] [William H. Press, Saul A. Teukolsky and others, The Art of Scientific Computing, 2007], https://assets.cambridge.org/97805218/80688/frontmatter/9780521880688_frontmatter.pdf
- [16] [John J. Proakis, Digital Communications, 2016], ia800309.us.archive.org/13/items/DigitalCommunicationsByJohnProakis4thEdition/Digital-Communications-by-John-Proakis-4th-Edition.pdf
- [17] [Sophia Antipolis, Digital Video Broadcasting (DVB) Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2), 2009], https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.02.01_60/en_302307v010201p.pdf
- [18] [Serge Willenegger, cdma2000 physical layer: An overview, 2000], <https://ieeexplore.ieee.org/document/6596597/authors#authors>
- [19] [RezazadehReyhani, A. Farhang and B. Farhang-Boroujeny, "Circularly Pulse-Shaped Waveforms for 5G: Options and Comparisons," 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), San Diego, CA, 2015, pp. 1-7]
- [20] ^[3] [PHYDYAS project website], www.ict-phydyas.org/
- [21] [Jingying Hu*, Jiajia Yang, Yingdong Chuan and Erlei Li, Performance Analysis of OFDM and FBMC, 2019], <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/677/3/032001/pdf>
- [22] [Adriana-Maria Cuc, Florin Lucian Morgos, Adriana-Marcela Grava and Cristian Grava, Estimation of the Impulse Response of the AWGN Channel with ISI within an Iterative Equalization and Decoding System That Uses LDPC Codes, 2024] <https://www.mdpi.com/1099-4300/26/9/720>

