

ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΖΕΥΞΕΙΣ

7^ο Εξάμηνο

Σώζος Κώστας

Πολλαπλή και τυχαία πρόσβαση

- Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης
 - Frequency division multiple access (FDMA)
 - Time division multiple access (TDMA)
 - Code division multiple access (CDMA)
 - Space division multiple access (SDMA)
 - Non Orthogonal multiple access (NOMA)
- Προεκχώρηση και κατ' αίτηση εκχώρηση
- Τυχαία πρόσβαση

Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Στα σύγχρονα δορυφορικά δίκτυα ο δορυφορικός αναμεταδότης είναι ο κόμβος που συνδέει ένα μεγάλο αριθμό διεσπαρμένων σε πολλά σημεία επίγειων σταθμών με αμφίδρομες ζεύξεις. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες ποικίλλουν από βασικές έως υπηρεσίες κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Στη γενική περίπτωση διακρίνονται δύο είδη προβλημάτων:

- Η πρόσβαση στον επίγειο σταθμό από πολλούς χρήστες.
- Η πρόσβαση στον δορυφορικό αναμεταδότη από πολλούς επίγειους σταθμούς.

Το πρώτο πρόβλημα αντιμετωπίζεται από τις γνωστές μεθόδους πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας σε επίγεια συστήματα. Το δεύτερο πρόβλημα, που αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα δορυφορικά συστήματα, **επιλύεται με την επιλογή του κατάλληλου συστήματος πολλαπλής πρόσβασης**. Γενικά, το σύστημα πολλαπλής πρόσβασης πρέπει να βελτιστοποιεί τις παρακάτω παραμέτρους του δορυφορικού συστήματος:

- την εκπεμπόμενη ισχύ από τον δορυφόρο,
- το εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων,
- τη δυνατότητα πολλαπλών διασυνδέσεων,
- την προσαρμογή του συστήματος σε πιθανή επέκταση του συστήματος ή αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης,
- το κόστος της παρεχόμενης λύσης,
- την πολυπλοκότητα του επίγειου σταθμού

Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Υπάρχουν τέσσερα βασικά συστήματα πολλαπλής πρόσβασης που εκχωρούν αποκλειστικούς δορυφορικούς διαύλους (ορθογώνιους) σε πολλαπλούς χρήστες ή αντίστοιχα που εκχωρούν αποκλειστικούς δορυφορικούς διαύλους από πολλαπλούς επίγειους σταθμούς σε έναν δορυφορικό αναμεταδότη:

- η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access),
- η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access),
- η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) και
- η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου SDMA (Spatial Division Multiple Access).

Επίσης υπάρχουν σχήματα που εκχωρούν διαύλους σε πολλαπλούς χρήστες αλλά όχι με απόλυτη αποκλειστικότητα (ορθογωνιότητα). Αυτά αναφέρονται ως Non orthogonal multiple access (NOMA).

Υπάρχουν τέλος οι τεχνικές τυχαίας πρόσβασης (Random division multiple access).

Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Η απόκτηση πρόσβασης καθορίζεται και από δύο δευτερεύουσες μεθόδους, που υλοποιούνται μαζί με μία ή περισσότερες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, για να παρέχουν πρόσβαση στον αναμεταδότη. Οι δευτερεύουσες αυτές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- τη σταθερή εκχώρηση (fixed assignment, FA) ή προ-εκχώρηση (pre-assigned, PA) από την οποία προκύπτει η αντίστοιχη **προ-εκχωρημένη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης PAMA (Pre- Assigned Multiple Access)**,
- τη δυναμική εκχώρηση (dynamic assignment, DA) από την οποία προκύπτει η αντίστοιχη **κατ' αίτηση εκχώρηση τεχνική πολλαπλής πρόσβασης DAMA (Demand Assigned Multiple Access)**.

Στην περίπτωση της PAMA, ο αναμεταδότης εκχωρείται στον μεμονωμένο χρήστη, είτε μόνιμα για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του δορυφόρου ή τουλάχιστον για μεγάλες περιόδους. Η προ-εκχώρηση μπορεί να αφορά μια ορισμένη ζώνη συχνοτήτων, χρονοσχισμή ή κώδικα. Όταν, όμως, χρησιμοποιείται μία ζεύξη με προ-εκχωρημένα κανάλια σπάνια, αυτή η ζεύξη δεν είναι μόνο δαπανηρή για τον χρήστη, αλλά και μη αποδοτική.

Η DAMA επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιραστούν μία κοινή ζεύξη, όπου κάθε χρήστης χρειάζεται μόνο να θέσει ένα αίτημα προς τον σταθμό ελέγχου, όταν απαιτεί τη σύνδεση που θα χρησιμοποιηθεί. Η ζεύξη του καναλιού ολοκληρώνεται μόνο όπως αιτήθηκε ο χρήστης και η συχνότητα του καναλιού εκχωρείται από τις διαθέσιμες συχνότητες εντός της ζώνης συχνοτήτων του αναμεταδότη. Η μέθοδος είναι αποδοτική για τους χρήστες, καθώς πρέπει να πληρώσουν για τη χρήση της χωρητικότητας του αναμεταδότη μόνο για το χρονικό διάστημα που πραγματικά χρησιμοποιήθηκε.

FDMA

Στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (FDMA) **εκχωρείται ένα μέρος του συνολικού εύρους ζώνης του δορυφορικού αναμεταδότη σε κάθε φέρον που προέρχεται από έναν επίγειο σταθμό.** Το μέγεθος του εύρους ζώνης που εκχωρείται εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης στον δίαυλο, καθώς και από τον τύπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Κάθε επίγειος σταθμός έχει αποκλειστική χρήση της ζώνης συχνοτήτων του.

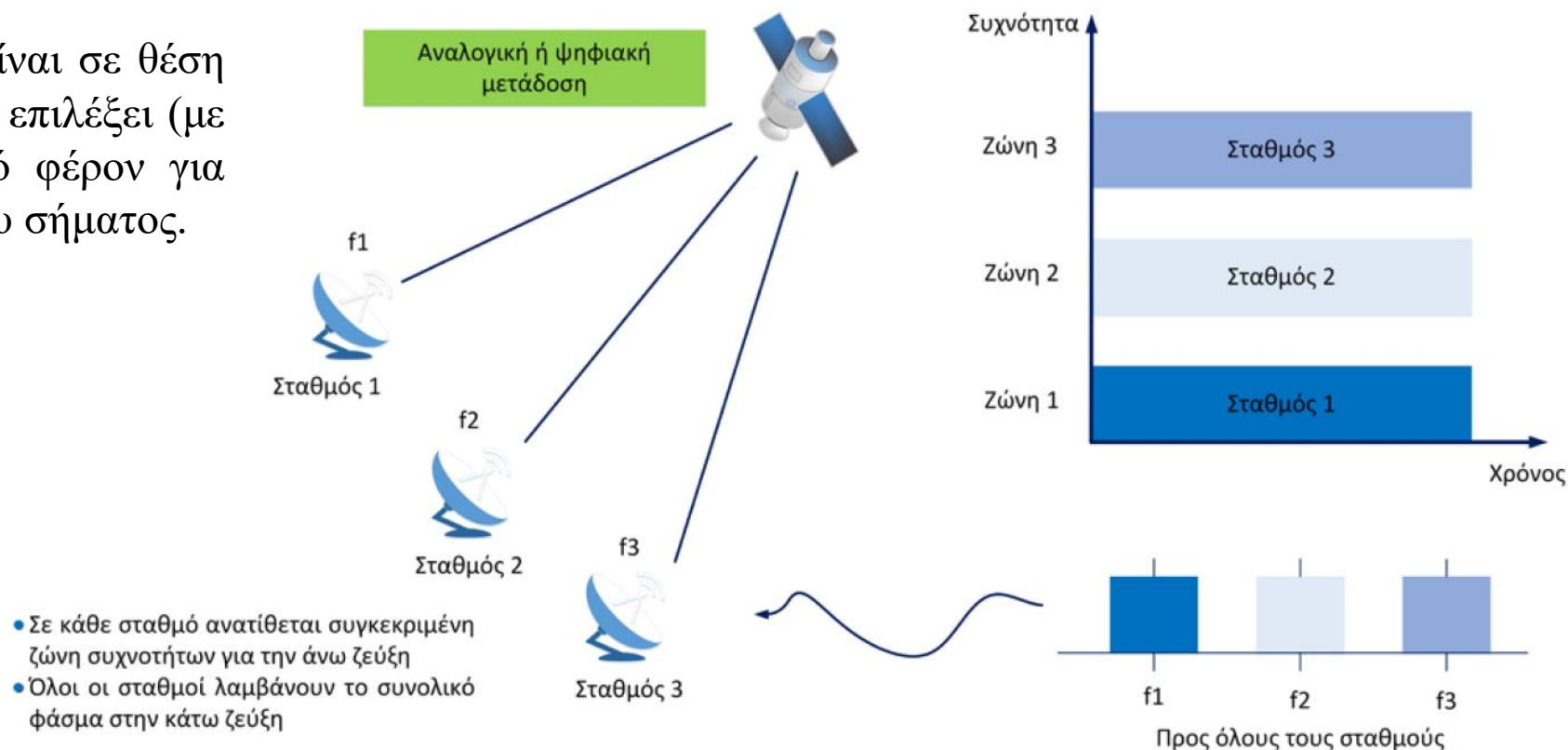
Πολλαπλά σήματα βασικής ζώνης διαμορφώνουν διαφορετικές φέρουσες συχνότητες, που ονομάζονται υποφορείς (subcarriers), και το πολυπλεγμένο σήμα στη συνέχεια διαμορφώνει ένα σχετικά υψηλότερης συχνότητας φέρον, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται από τον επίγειο σταθμό. Ομοίως, άλλοι σταθμοί μπορούν να έχουν παρόμοια πολυπλεγμένα σήματα με διαίρεση συχνότητας με διαφορετική, όμως, τελική συχνότητα φέροντος. Αυτά τα πολυπλεγμένα σήματα, λόγω των διαφορετικών τελικών συχνοτήτων των φερόντων τους, είναι σε θέση να έχουν πρόσβαση στον δορυφόρο ταυτόχρονα.

Στα συστήματα FDMA υπάρχουν και **ζώνες φύλαξης (guard bands)** μεταξύ των καναλιών επικοινωνίας, που **χρησιμοποιούνται για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των συχνοτήτων του χρήστη.** Μέτρο του διαχωρισμού των καναλιών είναι ο λόγος ισχύος φέροντος σήματος προς την ισχύ του σήματος παρεμβολής. Ένας τυπικός κανόνας για αποφυγή παρεμβολών είναι ο λόγος αυτός να είναι μεγαλύτερος από 20dB.

FDMA

Η παρουσία των πολλαπλών carriers στον τελικό HPA του αναμεταδότη απαιτεί τη λειτουργία back-off για την αποφυγή του θορύβου ενδοδιαμόρφωσης. Το φάσμα πολλαπλών φερόντων διέρχεται μέσω του δορυφορικού αναμεταδότη και το πλήρες φάσμα FDMA μεταδίδεται στην κάτω ζεύξη.

Ο σταθμός λήψης θα πρέπει να είναι σε θέση να λάβει το πλήρες φάσμα και να επιλέξει (με κατάλληλο φίλτρο) το επιθυμητό φέρον για την αποδιαμόρφωση ή τη λήψη του σήματος.



FDMA

Τα σχήματα μετάδοσης, που χρησιμοποιούνται στα συστήματα FDMA, διακρίνονται σε συστήματα SCPC και σε MCPC. Στα συστήματα SCPC τα σήματα του δικτύου μεταδίδονται σε διαφορετικά κανάλια, διαμορφώνοντας το καθένα διαφορετικό φέρον. Οι χρήστες μπορούν να παρέχουν αναλογικά ή ψηφιακά σήματα και η διαμόρφωση, ομοίως, μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή.

Στα συστήματα MCPC κάθε επίγειος σταθμός πολυπλέκει σήματα βασικής ζώνης που προορίζονται για διάφορους άλλους επίγειους σταθμούς. Το πολυπλεγμένο σήμα διαμορφώνεται και εκπέμπεται στο εύρος ζώνης που έχει εκχωρηθεί στον εκπεμπόμενο σταθμό. **Οι λαμβάνοντες επίγειοι σταθμοί αποσπών τα φέροντα που περιέχουν δεδομένα, τα οποία προορίζονται γι' αυτούς με τη βοήθεια ενός RF φίλτρου.** Στην έξοδο του αποδιαμορφωτή έχουμε ένα πολυπλεγμένο σήμα, που περιέχει κανάλια τόσο για τον συγκεκριμένο σταθμό όσο και για άλλους. Ένα φίλτρο βασικής ζώνης χρησιμοποιείται για να απομονώσει το επιθυμητό τμήμα του εύρους του σήματος βασικής ζώνης και στη συνέχεια ένας αποπολυπλέκτης απομονώνει τα ξεχωριστά κανάλια.

FDMA



(α)

Ένα κανάλι ανά φέρον
Ένα φέρον ανά αναμεταδότη



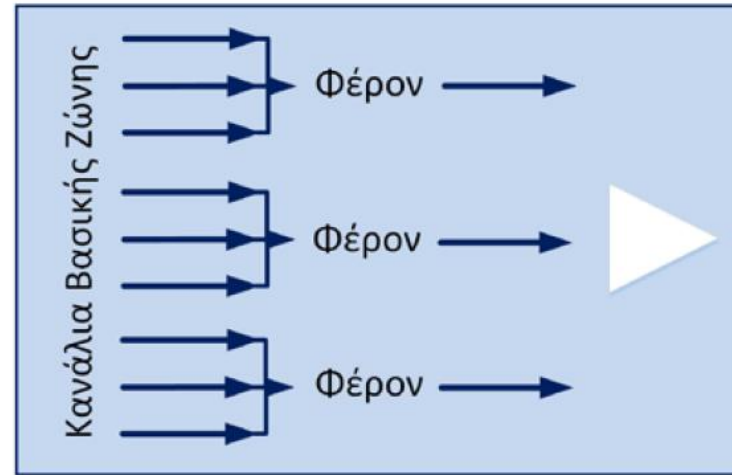
(β)

Ένα κανάλι ανά φέρον
Πολλαπλά φέροντα ανά αναμεταδότη



(γ)

Πολλαπλά κανάλια ανά φέρον
Ένα φέρον ανά αναμεταδότη



(δ)

Πολλαπλά κανάλια ανά φέρον
Πολλαπλά φέροντα ανά αναμεταδότη

- Κανάλι Βασικής Ζώνης → αναλογική ή ψηφιακή πηγή
- Φέρον → Φέροντα σήματα με διαμορφωμένη ραδιο-συχνότητα RF (αναλογική ή ψηφιακή διαμόρφωση)
- ➡ → Δορυφορικός αναμεταδότης

FDMA

Η τεχνική FDMA είναι πιο χρήσιμη για εφαρμογές, όπου ένα κανάλι πλήρους χρόνου επιθυμεί συνεχή μετάδοση (TV broadcasting). Είναι λιγότερο ακριβό να υλοποιηθεί με την τεχνική αυτή, αλλά ενδεχομένως κάνει **αναποτελεσματική χρήση του φάσματος, διότι μπορεί να υπάρξουν «νεκροί χρόνοι» σε ένα ή περισσότερα κανάλια, όταν δεν υπάρχουν μεταδόσεις.**

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι **κάθε δίαυλος μοιράζεται τους πόρους του αναμεταδότη, κυρίως την ισχύ του**, με αποτέλεσμα να επωφελείται από ένα μόνο μέρος αυτών. Επίσης, η ταυτόχρονη ενίσχυση πολλών σημάτων από τον αναμεταδότη έχει ως αποτέλεσμα τη **δημιουργία προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης**, επιδεινώνοντας την ποιότητα της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης και τον λόγο σήματος-προς- θόρυβο. Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής FDMA περιλαμβάνονται η **απλότητα των επίγειων σταθμών και το γεγονός ότι δεν απαιτούνται πολύπλοκες τεχνικές συγχρονισμού.**

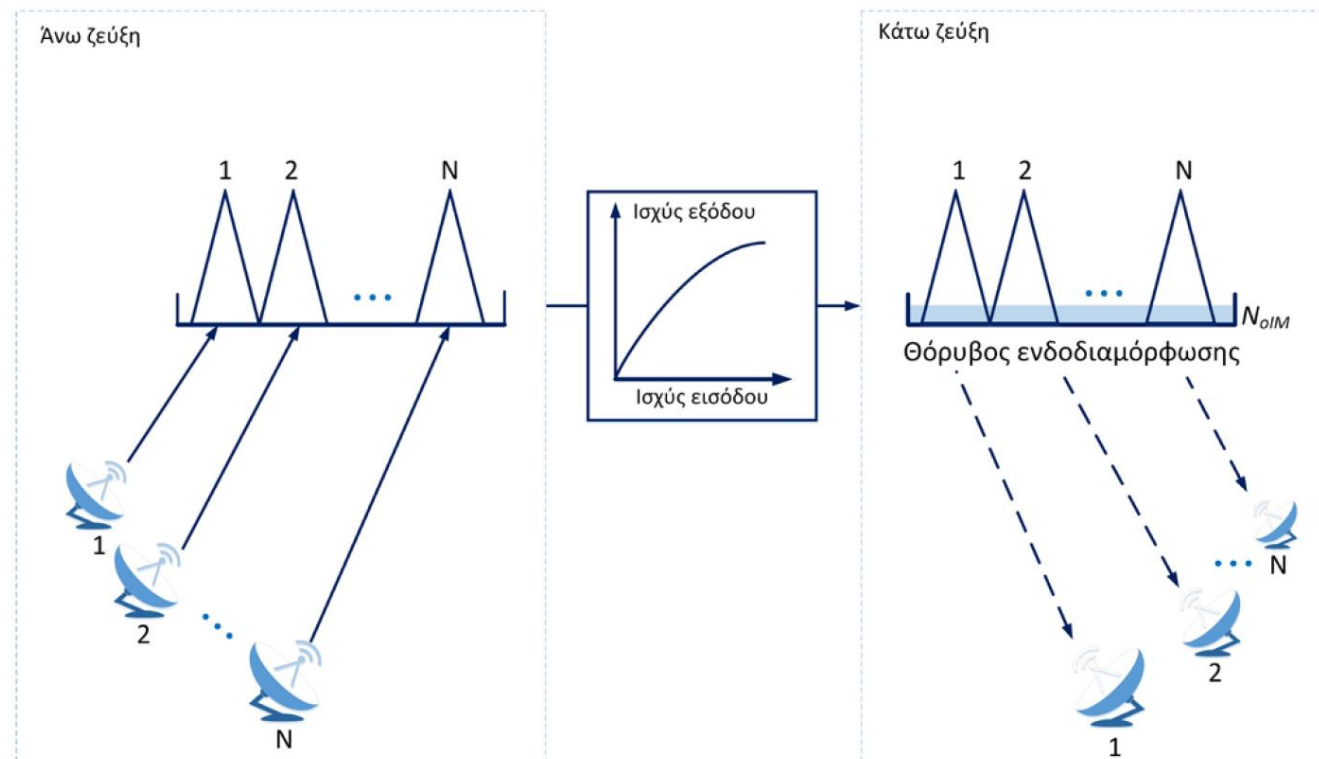
Ένα σύστημα FDMA μπορεί να είναι είτε **power-limited** είτε **bandwidth-limited**, όσον αφορά τον αριθμό των φερόντων που μπορούν να έχουν πρόσβαση στον δορυφόρο. **Ο μέγιστος αριθμός των φερόντων που μπορούν να έχουν πρόσβαση στον αναμεταδότη δίνεται από τον λόγο $n = B_{TR} / B_c$, όπου B_{TR} είναι το συνολικό εύρος ζώνης του αναμεταδότη και B_c είναι το εύρος ζώνης του φέροντος.** Εάν η EIRP είναι επαρκής για να καλύψει τις απαιτήσεις C/N, τότε το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει n φορείς και λέγεται ότι είναι bandwidth-limited. **Στην περίπτωση που η EIRP είναι ανεπαρκής, ο αριθμός των φερόντων που μπορούν να έχουν πρόσβαση στον δορυφόρο είναι μικρότερος από n .** Το σύστημα στην περίπτωση αυτή είναι power-limited.

FDMA

Τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης μεταδίδονται στην κάτω ζεύξη μαζί με το επιθυμητό φέρον, αλλά καμία χρήσιμη πληροφορία δεν μπορεί να εξαχθεί απ' αυτά. Δρουν ως θόρυβος, καθώς ένα τμήμα της συνολικής ισχύος των προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης εμπίπτει στο εύρος ζώνης του επίγειου σταθμού που είναι συντονισμένο στο επιθυμητό φέρον. Μπορούν να μοντελοποιηθούν ως λευκός θόρυβος με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος N_{oIM} , που δίνεται από:

$$N_{oIM} = \frac{N_{IM}}{B_N}, \quad (W / Hz)$$

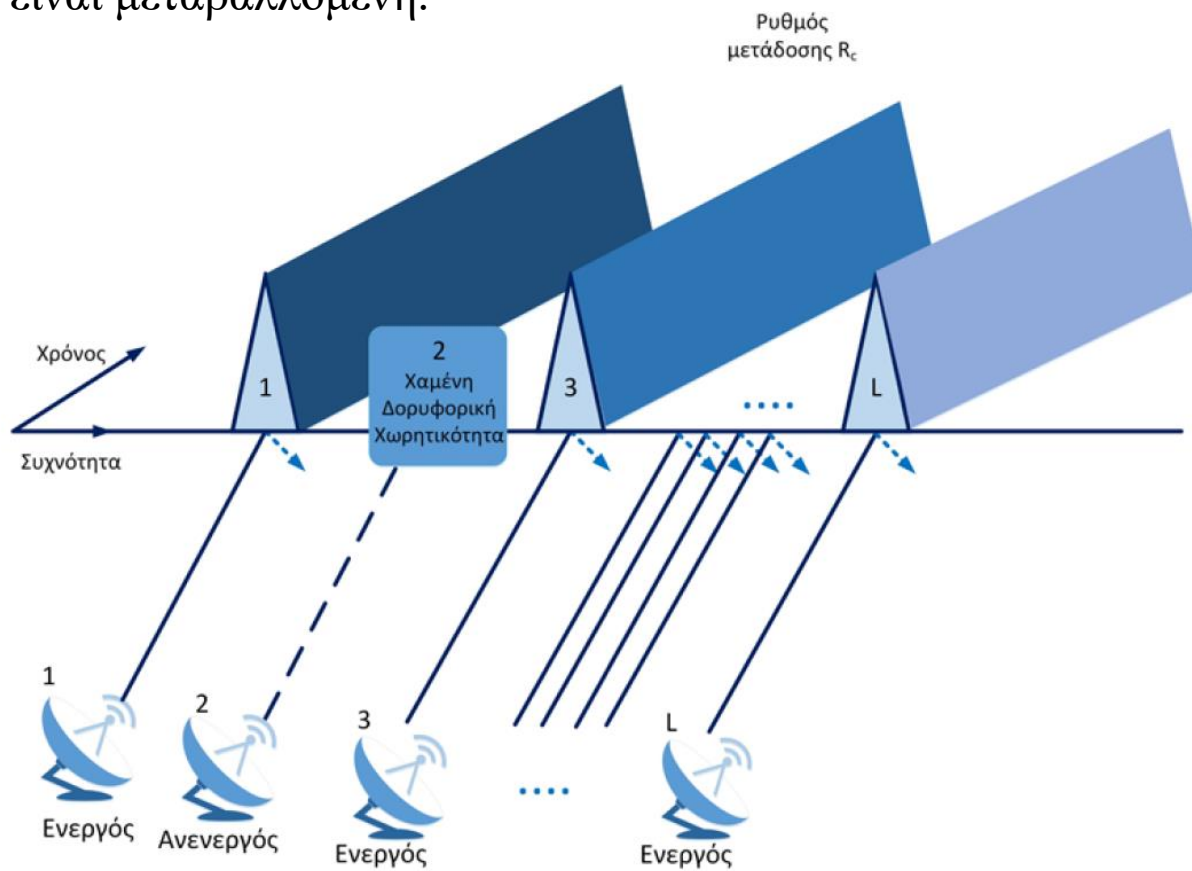
όπου N_{IM} είναι η ισχύς ενδοδιαμόρφωσης στην έξοδο του αναμεταδότη μέσα στο B_N εύρος ζώνης θορύβου του επίγειου σταθμού.



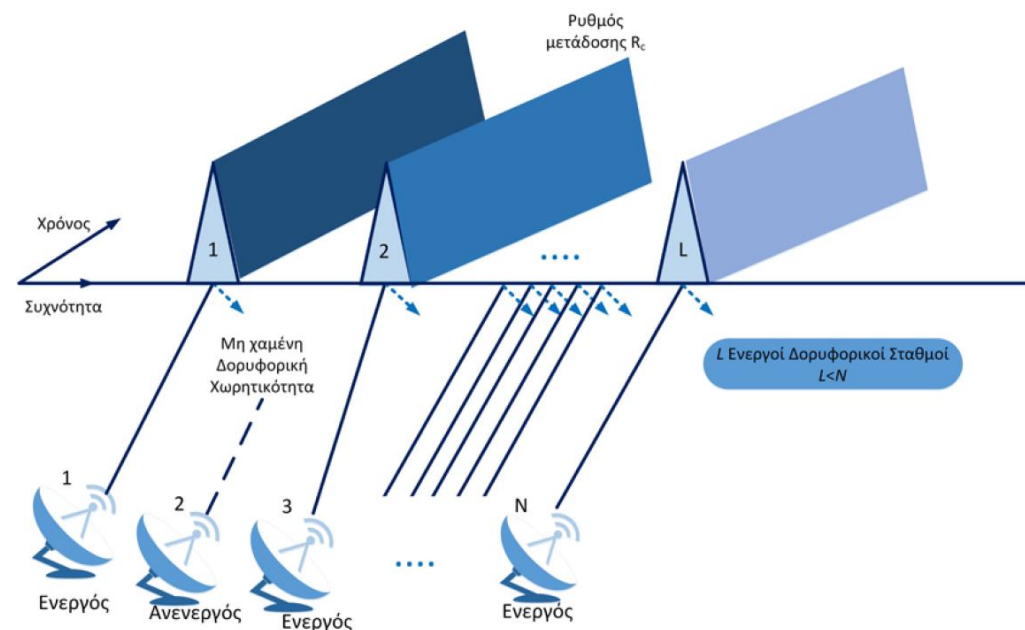
DA- και PA-FDMA

Η **σταθερή εκχώρηση** έχει το πλεονέκτημα της απλής τεχνικής, όπου **δεν υπάρχει ούτε φραγή (blocking) ούτε χρόνος αναμονής** για τη μετάδοση ενός φέροντος. Ωστόσο, η απαιτούμενη χωρητικότητα για το δίκτυο είναι ίση με $c=L \times R$ και είναι ελάχιστα εκμεταλλεύσιμη, εάν η ζήτηση της κίνησης είναι μεταβαλλόμενη.

Φραγή μπορεί να συμβεί σε ένα τερματικό ενός χρήστη, όταν πρέπει αρκετά από τα τερματικά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο να ζητήσουν ταυτόχρονα πρόσβαση και άρα σύνδεση με άλλους τερματικούς σταθμούς του δικτύου, και ο αριθμός των αιτούμενων συνδέσεων υπερβαίνει τη χωρητικότητα του παρεχόμενου δικτύου.



Έστω ότι το δίκτυο περιλαμβάνει N δορυφορικούς σταθμούς, όπου ο καθένας μπορεί να μεταδώσει K φέροντα, και μοιράζονται ένα σύνολο από υποζώνες συχνοτήτων L , **αλλά τώρα ισχύει $L < K \times N$** . Αυτές οι υποζώνες χρησιμοποιούνται από τους ενεργούς δορυφορικούς σταθμούς. Στην περίπτωση που ο αριθμός των φερόντων υπερβαίνει τον αριθμό που μπορεί να υποστηρίξει το διατιθέμενο εύρος ζώνης του δορυφορικού αναμεταδότη, **τότε υπάρχει φραγή στον δορυφορικό σταθμό: κατά τη διάρκεια της κλήσης, κανένα νέο φέρον δεν μπορεί να εκχωρηθεί.**



PCM (Pulse Coded Modulation)

Η Διαμόρφωση Κωδικού Παλμών (PCM) είναι η διαδικασία μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε μια διακριτή ψηφιακή αναπαράσταση, καθιστώντας το κατάλληλο για μετάδοση σε ψηφιακά δίκτυα. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τρία διαδοχικά και κρίσιμα στάδια: τη **Δειγματοληψία (Sampling)**, την **Κβάντιση (Quantization)** και την **Κωδικοποίηση (Encoding)**.

Δειγματοληψία: το αναλογικό σήμα μετράται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η f_s πρέπει να είναι τουλάχιστον $2f_{max}$ του σήματος, σύμφωνα με το Θεώρημα του Nyquist. Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά από διακριτούς παλμούς, όπου το πλάτος κάθε παλμού αντιπροσωπεύει την τιμή του αναλογικού σήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Κβάντιση: αντιστοίχιση των συνεχών τιμών πλάτους των δειγμάτων σε ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών επιπέδων. Δεδομένου ότι τα πλάτη των δειγμάτων μπορεί να πάρουν οποιαδήποτε τιμή, πρέπει να "στρογγυλοποιηθούν" στο πλησιέστερο προκαθορισμένο επίπεδο κβάντισης που εξαρτάται από την ανάλυση που χρειαζόμαστε (αριθμός bits, N). Η στρογγυλοποίηση εισάγει αναπόφευκτα ένα μικρό σφάλμα, γνωστό ως **θόρυβος κβάντισης (Quantization Noise)**. Όσο περισσότερα επίπεδα ποσοτικοποίησης χρησιμοποιούνται (περισσότερα bits), τόσο μικρότερος είναι αυτός ο θόρυβος.

Κωδικοποίηση: αντιστοιχεί κάθε κβαντισμένο επίπεδο σε έναν δυαδικό κώδικα (ένα σύνολο από 0 και 1). Αυτή η τελική δυαδική ακολουθία είναι το ψηφιακό σήμα PCM, παρέχοντας μετάδοση με υψηλή ανοχή σε θόρυβο και παρεμβολές κατά τη μεταφορά του στο δίκτυο.

PCM (Pulse Coded Modulation)

Αν η κβάντιση χρησιμοποιεί n bits ανά δείγμα, τότε ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης είναι:

$$R = n \cdot f_s$$

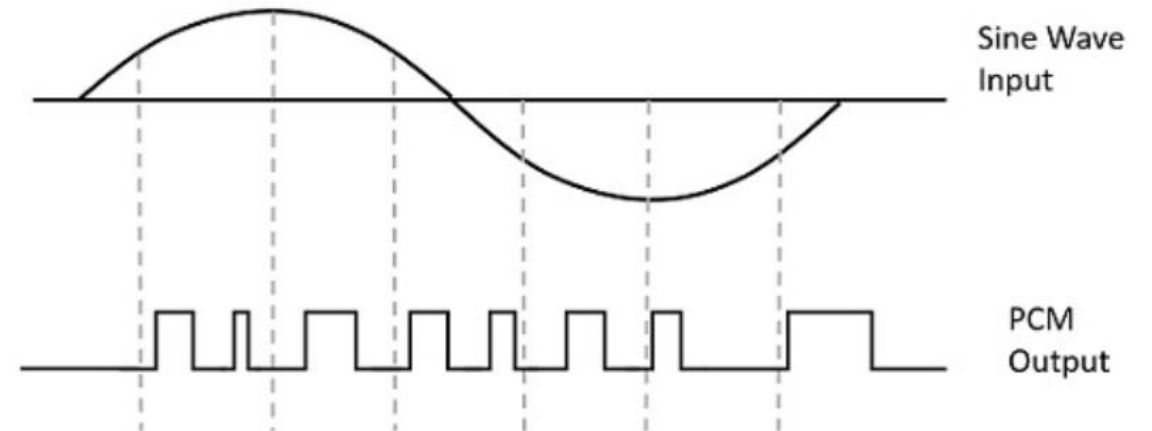
Δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης είναι ανάλογος του ρυθμού δειγματοληψίας και της ανάλυσης.

$$R = n \cdot 2f_{max}$$

Παράδειγμα (τηλεφωνικό κανάλι)

- Bandwidth: $f_{max} = 3.4\text{kHz}$
- Δειγματοληψία: $f_s = 8\text{kHz}$
- Κβάντιση: 8 bits

Ρυθμός μετάδοσης: $R = 8 \cdot 8000 = 64 \text{ kbit/s}$



Σύστημα PCM/SCPC/PSK/FDMA

Μια ιστορική τεχνική που προτάθηκε από την ITU-T και υιοθετήθηκε από τον INTELSAT-IV είναι η SPADE (Single channel per carrier PCM multiple Access Demand assignment Equipment), δηλαδή κατ' αίτηση εκχώρηση ενός μόνο καναλιού ανά φέρον PCM, που ήταν το πρώτο SCPC/PSK/FDMA λειτουργικό σύστημα. Είχε σχεδιαστεί για χρήση στον Intelsat-4 και επόμενους Intelsat δορυφόρους.

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί PCM για την κωδικοποίηση του σήματος βασικής ζώνης και διαμόρφωση φέροντος QPSK. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατόν να φιλοξενήσει ένα φωνητικό κανάλι 64kbps (η φωνή έχει συχνότητες 300-3400 Hz → άρα επιλέχθηκε $f_s=8000$ Hz και $N_{bits}=8$) σε ένα εύρος της τάξης των 38.4kHz, σε σύγκριση με την απαίτηση για 45kHz εύρος ζώνης στην περίπτωση της διαμόρφωσης συχνότητας. Με τη χρήση των 45kHz ανά κανάλι με διαμόρφωση QPSK και με τη ζώνη προστασίας να περιλαμβάνεται μέσα σ' αυτό το εύρος ζώνης, επιτρέπεται στο σύστημα SPADE να χειριστεί 800 κανάλια φωνής μέσα στο εύρος ζώνης των 36MHz του αναμεταδότη.

Σύστημα PCM/SCPC/PSK/FDMA

Ένα πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης SCPC FDMA είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει ως demand assigned, όπου ο φορέας απενεργοποιείται όταν δεν χρησιμοποιείται. Το σύστημα μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ενεργοποίηση φωνής, η οποία χρησιμοποιεί τα στατιστικά στοιχεία των φωνητικών συνομιλιών για να μοιραστεί τον φορέα SCPC με πολλούς χρήστες. Μια τυπική συνομιλία φωνητικού καναλιού είναι ενεργή μόνο περίπου το 40% του χρόνου σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ένας συντελεστής φωνητικής ενεργοποίησης (VA) χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει τη βελτίωση που είναι δυνατή στο δίκτυο. Για παράδειγμα, ένας αναμεταδότης 36MHz έχει περιορισμένη χωρητικότητα εύρους ζώνης 800 καναλιών SCPC, χρησιμοποιώντας απόσταση καναλιών 45 kHz. Τα 800 κανάλια αντιστοιχούν σε 400 ταυτόχρονες συνομιλίες. Μια τυπική προδιαγραφή φωνητικής δραστηριότητας με βάση τη μοντελοποίηση του καναλιού ως ακολουθία δοκιμών Bernoulli με εφαρμογή της διωνυμικής κατανομής θα είναι: η πιθανότητα ότι περισσότερα από 175 από τα 400 διαθέσιμα κανάλια θα περιέχουν ενεργή ομιλία σε οποιαδήποτε κατεύθυνση είναι μικρότερη από 0.01 (< 1%). Ο συντελεστής φωνητικής δραστηριότητας είναι τότε

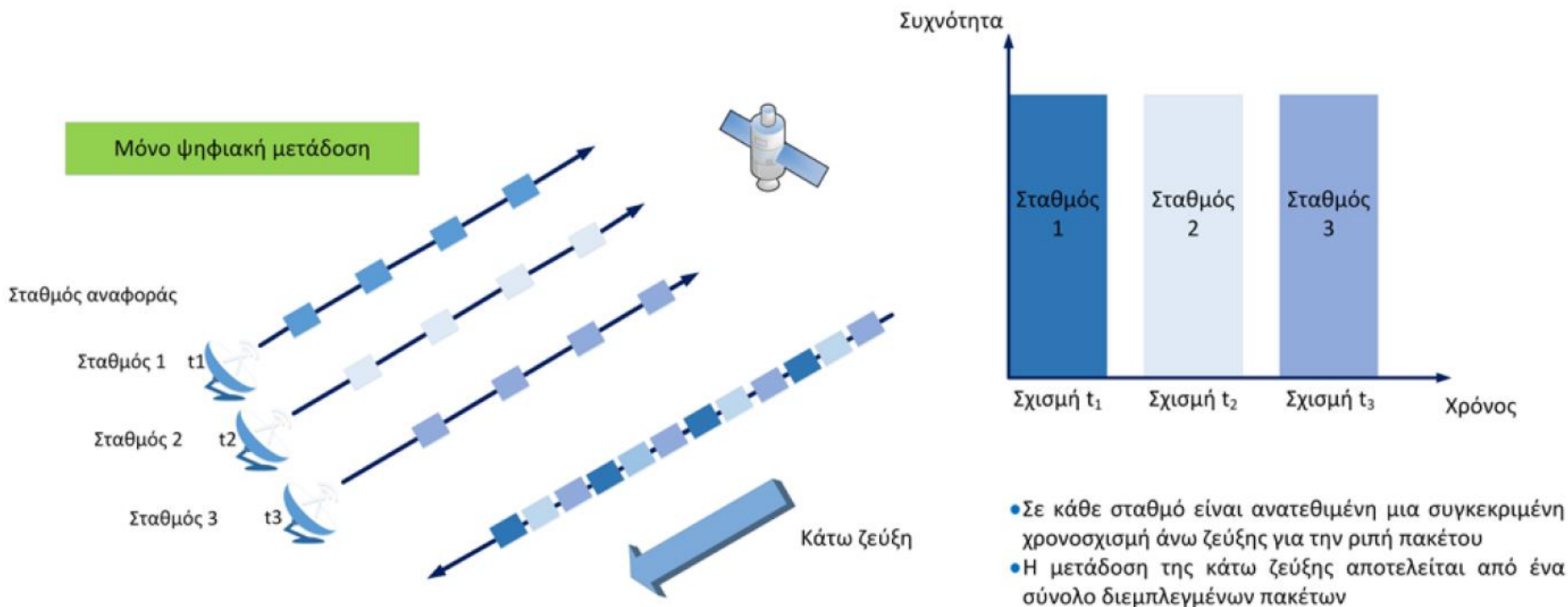
$$VA = 10 \log \left(\frac{800}{175 \times 2} \right) = 10 \log \left(\frac{800}{350} \right) = 10 \log(2.3) = 3.6 \text{ dB}$$

Ο συντελεστής VA εφαρμόζεται για την αύξηση της χωρητικότητας όταν αυτή είναι περιορισμένης ισχύος. Αν η συνολική EIRP για τον αριθμό των καναλιών μοιράζεται σε N κανάλια, χρησιμοποιώντας το VA μπορεί να μοιραστεί σε $VA \cdot N$.

TDMA

Στην TDMA (Time Division Multiple Access), σε κάθε επίγειο σταθμό εκχωρείται το συνολικό εύρος ζώνης του αναμεταδότη διαδοχικά για ένα προκαθορισμένο και περιορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ονομάζεται χρονοσχισμή. Αυτό σημαίνει ότι κάθε επίγειος σταθμός χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα μετάδοσης και, εφόσον κάθε χρονική στιγμή εκπέμπεται ένα και μόνο σήμα, **αποφεύγεται η παρεμβολή του ενός σήματος με τα γειτονικά του**. Επιπλέον, η ύπαρξη μιας και μοναδικής φέρουσας συχνότητας αποτρέπει τη δημιουργία γινομένων ενδοδιαμόρφωσης και συνεπώς, ο ενισχυτής του αναμεταδότη μπορεί να λειτουργεί στην περιοχή κόρου.

Η TDMA χρησιμοποιείται μόνο για ψηφιακά σήματα. Τα αναλογικά σήματα θα πρέπει να μετατρέπονται σε ψηφιακά πριν μεταδοθούν, ενώ και η διασύνδεση με επίγεια αναλογικά συστήματα καθίσταται πολύπλοκη.



TDMA

Μία βασική απαίτηση του συστήματος TDMA είναι ότι όλοι οι επίγειοι σταθμοί, καθώς και ο αναμεταδότης, αποτελούν τμήματα ενός συστήματος, τα οποία **θα πρέπει να είναι συγχρονισμένα**, έτσι ώστε να μην υπάρχουν χρονικές επικαλύψεις μεταξύ των σημάτων που στέλνονται από κάθε σταθμό. Σε κάθε επίγειο σταθμό εκχωρείται περιοδικά μια **χρονοσχισμή**, μέσα στην οποία **ο σταθμός εκπέμπει μία ριπή πληροφορίας (burst)**. Το σύνολο των χρονοσχισμών αποτελεί το **χρονικό πλαίσιο (frame)** του δορυφορικού αναμεταδότη. Μεταξύ των διαδοχικών ριπών στο πλαίσιο τοποθετείται ένα μικρό χρονικό διάστημα φύλαξης ***Guard Interval***, το οποίο χρησιμεύει, ώστε να μη δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ σημάτων που αντιστοιχούν σε γειτονικές χρονοσχισμές.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της TDMA είναι ότι το πλάνο μετάδοσης είναι ευκολότερο να σχεδιαστεί ή να τροποποιηθεί (ίδια φίλτρα, ίδιος αριθμός αναμεταδοτών κλπ). Η διαχείριση της χωρητικότητας του συστήματος είναι απλούστερη και πιο ευέλικτη από ό,τι στο FDMA.

Στον αντίποδα, ένα σύστημα TDMA απαιτεί συγχρονισμό σε παγκόσμιο επίπεδο (μεταξύ των επίγειων σταθμών), γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα των επίγειων σταθμών.

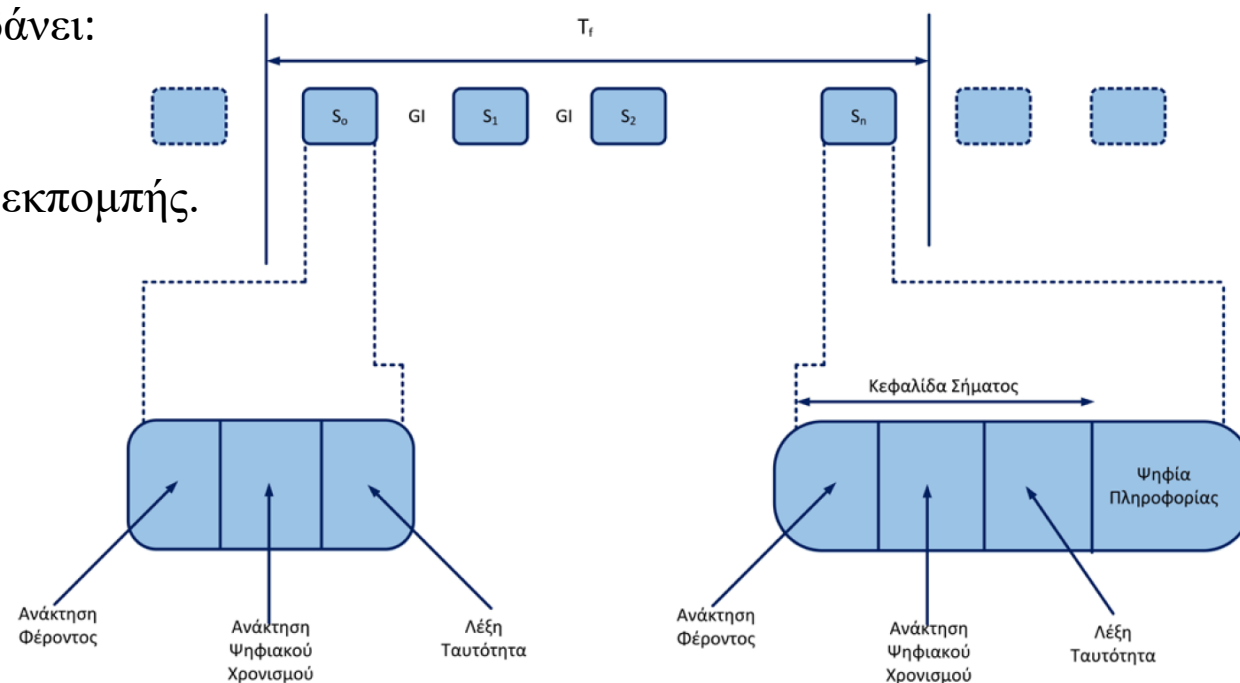
TDMA

Η πρώτη χρονοσχισμή S_0 του πλαισίου, που ονομάζεται και **σχισμή αναφοράς**, δεν περιέχει πληροφορία, αλλά **χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του πλαισίου**, που εκπέμπεται από τον επίγειο σταθμό αναφοράς ή ελέγχου. Οι υπόλοιπες χρονοσχισμές μέσα στο πλαίσιο εκπέμπονται από τους άλλους σταθμούς του συστήματος και αποτελούνται από δύο τμήματα.

Το πρώτο τμήμα είναι η κεφαλίδα (header ή preamble) του σήματος και περιέχει τα σήματα συγχρονισμού, έτσι ώστε ο επίγειος σταθμός προορισμού να ενεργοποιηθεί κατά τη διάρκεια της χρονικής στιγμής και να λειτουργήσει ο αποκωδικοποιητής του. Η κεφαλίδα του σήματος περιλαμβάνει:

- Τα σύμβολα ανάκτησης φάσης του φέροντος.
- Τα σύμβολα για την ανάκτηση του ψηφιακού χρονισμού.
- Τα σύμβολα της λέξης ταυτότητας του επίγειου σταθμού εκπομπής.

Το δεύτερο κατά σειρά τμήμα της χρονοσχισμής περιέχει την προς μετάδοση πληροφορία. Το μέρος του frame το οποίο δεν μεταφέρει χρήσιμη πληροφορία ονομάζεται **overhead**.



Σταθερή εκχώρηση TDMA

Κάθε δορυφορικός σταθμός μεταδίδει ένα φέρον ριπής μέσα σε μία αποκλειστική χρονοσχισμή. Ο αριθμός των χρονοσχισμών είναι ίσος με τον αριθμό L των δορυφορικών σταθμών. Η θέση και η διάρκεια των ριπών είναι σταθερή, επομένως και η χωρητικότητα του κάθε δορυφορικού σταθμού είναι σταθερή, ανεξάρτητα από τη ζήτηση της κίνησης.

Εάν R_c είναι ο μεταδιδόμενος ρυθμός πληροφορίας, τότε η συνολική χωρητικότητα του δικτύου είναι R_c , και η χωρητικότητα που κατανέμεται σε κάθε δορυφορικό σταθμό είναι R_c/L . Σε περίπτωση που ένας δορυφορικός σταθμός δεν έχει καμία κίνηση να μεταδώσει, τότε η σχισμή παραμένει μη κατειλημμένη, και η αντίστοιχη χωρητικότητα χάνεται για το δίκτυο.

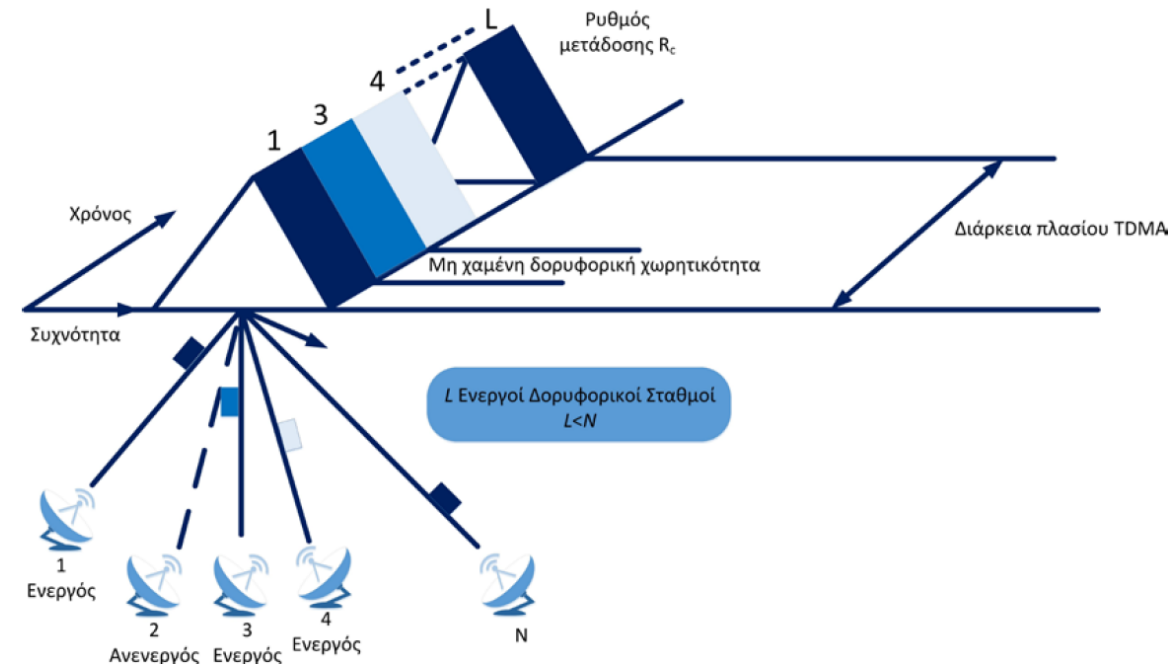
Η σταθερή εκχώρηση έχει το πλεονέκτημα της απλής τεχνικής, όπου δεν υπάρχει ούτε φραγή (blocking) ούτε χρόνος αναμονής για τη μετάδοση ενός φέροντος. Ωστόσο, η συνολική χωρητικότητα του δικτύου είναι ελάχιστα εκμεταλλεύσιμη, εάν η ζήτηση της κίνησης είναι μεταβαλλόμενη.

Η ριπή φέροντος χωρίζεται σε K υπο-ριπές, όπου κάθε μία αντιστοιχεί σε ένα διαθέσιμο κανάλι που είναι προσαρτημένο στα τερματικά των χρηστών. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθούν συγκρίσιμες χωρητικότητες ανά δορυφορικό σταθμό, **η τιμή του R_c πρέπει να αυξηθεί κατά ένα συντελεστή L σε σχέση με το σύστημα FDMA.**

Εκχώρηση κατ' αίτηση TDMA

Οι L χρονοσχισμές του πλαισίου μοιράζονται από N δορυφορικούς σταθμούς, με $L < N$. Κάθε σταθμός, που επιθυμεί να εγκαταστήσει μία ζεύξη, μπορεί να έχει πρόσβαση σε οποιαδήποτε μη κατειλημμένη χρονοσχισμή στο πλαίσιο ή, **αν είναι ήδη ενεργός, μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότάτά του, αυξάνοντας τη διάρκεια της ριπής του**, και στη συνέχεια να υποστηρίξει έναν μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων. Αυτό απαιτεί μια αλλαγή στο χρονοδιάγραμμα των ριπών με δυναμικό τρόπο και είναι κάτι που πραγματοποιείται υπό τον έλεγχο του συστήματος διαχείρισης του δικτύου στον κεντρικό σταθμό (Hub), με σκοπό την προσαρμογή κάθε πλαισίου στις αλλαγές της κίνησης.

Δεδομένου ότι η ζήτηση της κίνησης από όλους τους σταθμούς μπορεί να υπερβαίνει την προσφερόμενη χωρητικότητα R_c , φραγή της ζεύξης μπορεί να προκύψει εξαιτίας του ότι το πλαίσιο TDMA είναι γεμάτο με ριπές φέροντος.



PCM/TDM/PSK/TDMA

Η τεχνική που ορίζεται ως PCM/TDM/PSK/TDMA είναι η πιο συνηθισμένη δομή του δικτύου TDMA, η οποία είναι περισσότερο δημοφιλής σε δίκτυα VSAT. Αποτελείται από μορφοποίηση των σημάτων βασικής ζώνης κατά PCM, πολυπλεξία πηγής κατά TDM και διαμόρφωση BPSK ή QPSK. Η τεχνική PCM/TDM/PSK/TDMA χρησιμοποιεί ένα διαμορφωμένο φέρον που καταλαμβάνει όλο το εύρος ζώνης του αναμεταδότη. Τυπικοί ρυθμοί δεδομένων TDMA, όταν ο αναμεταδότης βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία, είναι:

- 60Mbps (36MHz αναμεταδότης),
- 130Mbps (72MHz αναμεταδότης).

Η περίοδος του πλαισίου TDMA επιλέγεται, ώστε να είναι πολλαπλάσια των 125μs, η οποία είναι η συνήθης περίοδος δειγματοληψίας της PCM (8 kHz). Ένα σημαντικό στοιχείο για τον συγχρονισμό του πλαισίου είναι να διατηρεί μία λέξη ταυτότητα (κωδικολέξη ριπής) στη ριπή αναφοράς και σε κάθε κεφαλίδα ριπής του σταθμού. **Η λέξη ταυτότητα είναι τυπικά μία αλληλουχία από 24 έως 48 bits, η οποία επιλέγεται με σκοπό να αυξηθεί η πιθανότητα σωστής ανίχνευσης.** Είναι η μόνη επαναλαμβανόμενη ακολουθία δυαδικών ψηφίων στο πλαίσιο. Είναι σημαντικό να διατηρηθεί ο συγχρονισμός του δικτύου και να επιτευχθεί η ανάκτηση φέροντος στη διαδικασία PSK αποδιαμόρφωσης.

TDMA

Η απόδοση ενός συστήματος TDMA μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την TDMA *frame efficiency* (η_F)

$$\begin{aligned}\eta_F &= \frac{\text{Number of bits available for traffic}}{\text{Total number of bits in frame}} \\ &= 1 - \frac{\text{Number of overhead bits}}{\text{Total number of bits in frame}}\end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \eta_F = 1 - \frac{n_r b_r + n_t b_p + (n_r + n_t) b_g}{r_T t_F}$$

Όπου,

t_F = χρόνος TDMA frame, σε s

r_T = συνολικό TDMA bit rate, σε bps

n_r = αριθμός bursts αναφοράς

n_t = αριθμός bursts κίνησης

b_r = αριθμός *bits* στο burst αναφοράς

b_p = αριθμός *bits* στην κεφαλίδα του burst κίνησης

b_g = αριθμός *bits* στο guard interval

Ο αριθμός των καναλιών που μπορεί να υποστηρίξει ένα TDMA σύστημα είναι ο λόγος του συνολικού Bitrate, συμπεριλαμβανομένου και του overhead, προς τον απαιτούμενο Bitrate κάθε καναλιού.

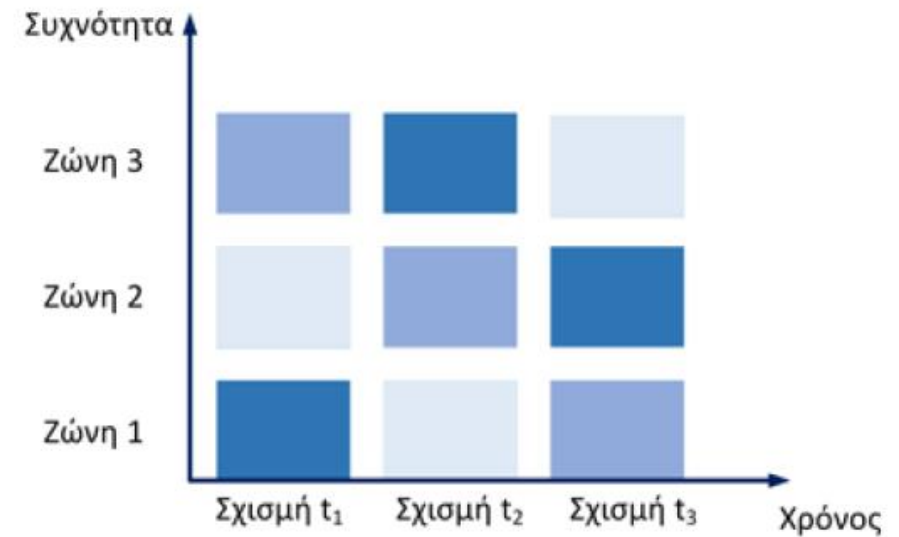
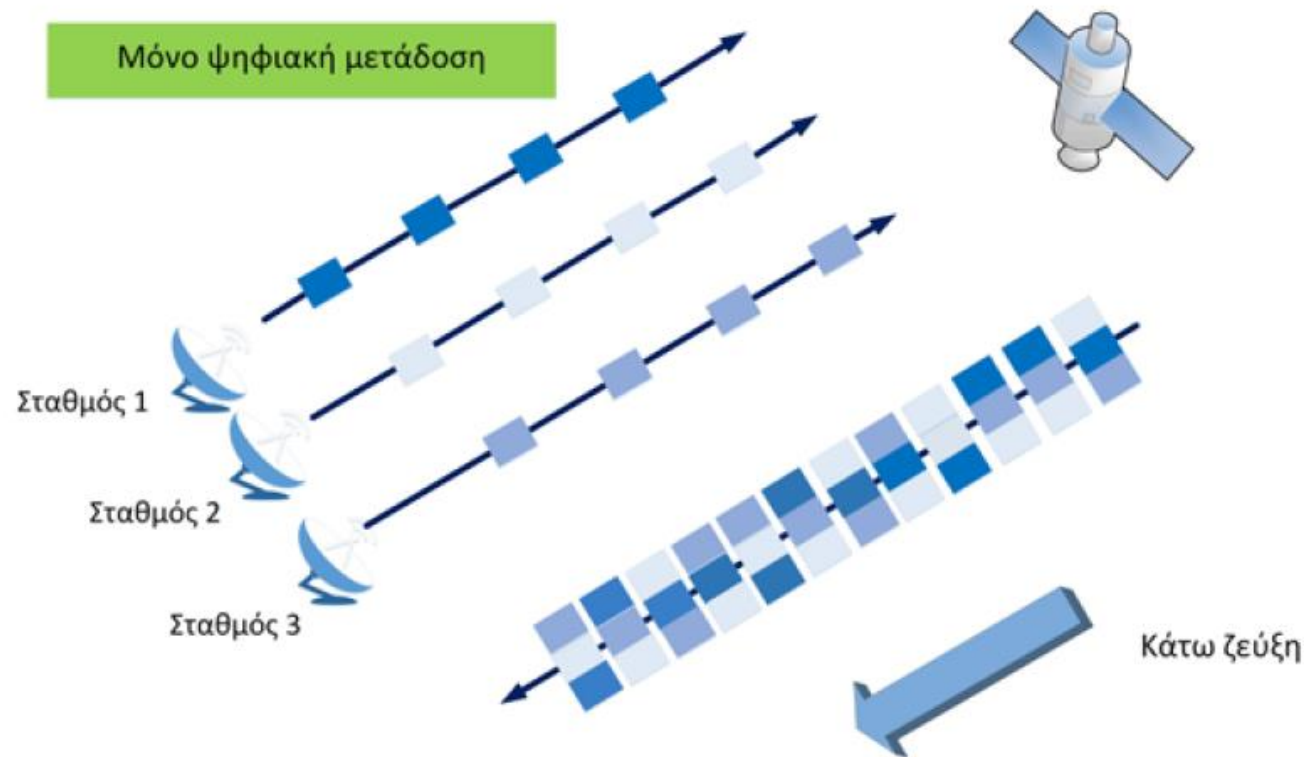
CDMA

Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA) είναι μία τεχνική κατά την οποία δεν υφίστανται περιορισμοί ως προς τη συχνότητα ή τον χρόνο. Τα φέροντα επιτρέπεται να εκπέμπονται συνεχώς, καταλαμβάνοντας ταυτόχρονα όλο το εύρος ζώνης του αναμεταδότη.

Το στενής ζώνης σήμα πληροφορίας πολλαπλασιάζεται με ένα σήμα πολύ μεγάλου εύρους ζώνης, που ονομάζεται σήμα διασποράς (spreading signal). Το σήμα διασποράς είναι μια κωδική ακολουθία ψευδοθορύβου (pseudonoise sequence, PN), η οποία έχει ρυθμό chip (chip είναι η μονάδα χρόνου της κωδικοποίησης, ρυθμός chip=στοιχεία κωδικοποίησης ανά sec), που είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό μετάδοσης του σήματος πληροφορίας.

Όλοι οι χρήστες σε ένα σύστημα CDMA χρησιμοποιούν το ίδιο φέρον και μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα. Αντί για απευθείας μετάδοση του σήματος δεδομένων, το σήμα διαμορφώνεται από μια μοναδική κωδική ακολουθία, η οποία καλείται **ακολουθία υπογραφής (signature sequence)**, και **έχει ανατεθεί σ' αυτόν τον χρήστη**. Με αυτή τη διαμόρφωση, το σήμα εξαπλώνεται σε εύρος ζώνης, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο απ' αυτό που απαιτείται για τη μετάδοσή του. Στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιείται μια κωδική ακολουθία προσαρμογής για την **επανασυμπίεση** του εύρους ζώνης και τη λήψη των αρχικών δεδομένων. Με αυτή τη διαδικασία διασποράς και επανασυμπίεσης, όλες οι άλλες ταυτόχρονες μεταδόσεις στον δίαυλο θα δρουν ως πρόσθετη παρεμβολή στο επιθυμητό σήμα και μπορούν να απομακρυνθούν εντελώς, αν οι κώδικες είναι ορθογώνιοι.

CDMA



- Υβριδικός συνδυασμός FDMA και TDMA
- Σε κάθε σταθμό άνω ζεύξης ανατίθεται χρονοσχισμή και ζώνη συχνότητας με κωδικοποιημένη ακολουθία
- Ο δέκτης κάτω ζεύξης πρέπει να γνωρίζει τον κώδικα για την ανίχνευση

CDMA

Η τεχνική CDMA προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές FDMA ή TDMA:

- **Προστασία Προσωπικών Δεδομένων.** Ο κώδικας διανέμεται μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες, προστατεύοντας την πληροφορία από άλλους χρήστες.
- **Φασματική απόδοση.** Αρκετά CDMA δίκτυα μπορούν να μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, επειδή το μη ανιχνεύσιμο σήμα συμπεριφέρεται ως γκαουσιανός θόρυβος σε όλους τους δέκτες, χωρίς τη γνώση της κωδικής ακολουθίας.
- **Απόδοση καναλιού με διαλείψεις.** Μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας του σήματος είναι διαθέσιμο σε ένα δεδομένο τμήμα της ζώνης συχνοτήτων ανά πάσα στιγμή, επομένως οι διαλείψεις που είναι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα ή η διασπορά του σήματος θα έχει περιορισμένη επίδραση στη συνολική απόδοση της ζεύξης.
- **Αντοχή σε παρεμβολές.** Λόγω του ότι ένα μικρό μέρος της ενέργειας του σήματος είναι διαθέσιμο σε ένα δεδομένο τμήμα της ζώνης συχνοτήτων σε οποιαδήποτε στιγμή, το σήμα είναι πιο ανθεκτικό σε εκούσια ή ακούσια σήματα που υπάρχουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, μειώνοντας έτσι τις επιδράσεις στην απόδοση της ζεύξης.
- **Δε χρειάζεται συντονισμός μεταξύ των διαφόρων χρηστών.**

Στα συστήματα CDMA, η χωρητικότητα περιορίζεται από παρεμβολές, σε αντίθεση με τα συστήματα TDMA και FDMA, όπου περιορίζεται από το εύρος ζώνης. Η επίδοση του CDMA εξαρτάται από την ικανότητα του δέκτη να διαχωρίζει διευθύνσεις, γεγονός που γίνεται ιδιαίτερα δύσκολο, όταν αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των επίγειων σταθμών που εξυπηρετούνται από το σύστημα. **Γι' αυτό, χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρά VSAT δίκτυα που λειτουργούν στη C-band.**

CDMA

Η επιλογή της κατάλληλης κωδικής ακολουθίας για χρήση στη διαδικασία CDMA είναι κρίσιμη για την επιτυχή υλοποίησή της. Η κωδική ακολουθία πρέπει να ρυθμιστεί, ώστε να αποφευχθεί η μη εξουσιοδοτημένη αποκωδικοποίησή της, αλλά συγχρόνως να είναι αρκετά μικρή σε μήκος για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων, χωρίς την εισαγωγή λανθάνουσας καθυστέρησης (latency) ή προβλημάτων συγχρονισμού. Ο πιο επιτυχημένος τύπος κωδικής ακολουθίας για την τεχνική CDMA, η οποία ικανοποιεί και τα δύο παραπάνω κριτήρια, είναι η ψευδοτυχαία (PN) ακολουθία. Ψευδοτυχαία σημαίνει «μερικώς τυχαία», δηλαδή ακολουθία που φαίνεται ως τυχαία, αλλά έχει ορισμένα μη-τυχαία/ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά.

Ένα ρολόι chip παράγει την ακολουθία PN. Η ακολουθία PN, $p_{PN}(t)$, έχει ρυθμό chip R_{ch} , και περίοδο chip T_{ch} . Η ακολουθία PN προστίθεται κατά modulo-2 στην ακολουθία δεδομένων $m(t)$, για να παραχθεί η ροή των δεδομένων, $e(t)$, δηλαδή

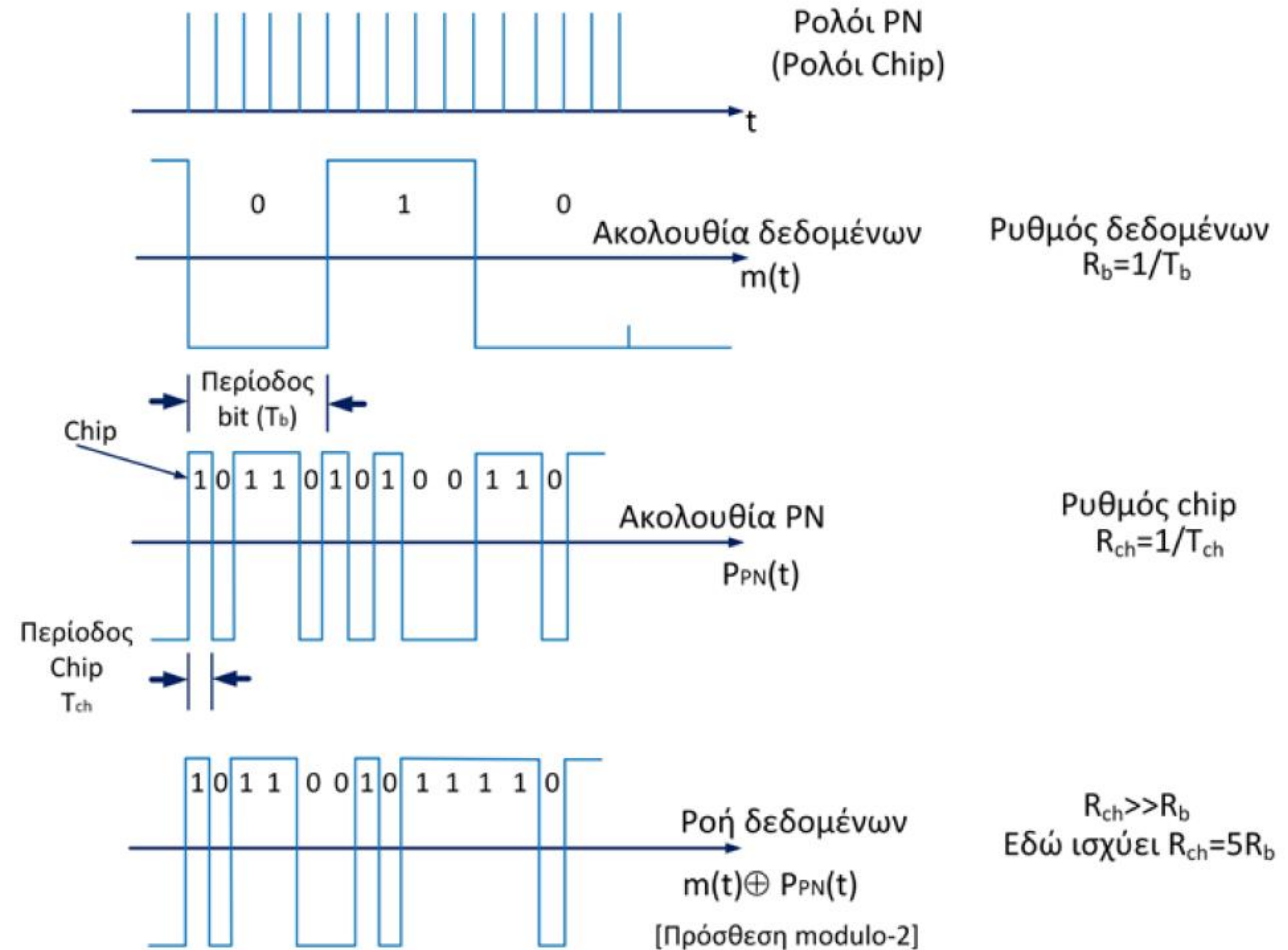
$$e(t) = m(t) \oplus p_{PN}(t)$$

όπου με $\oplus$ συμβολίζεται η λειτουργία του modulo-2.

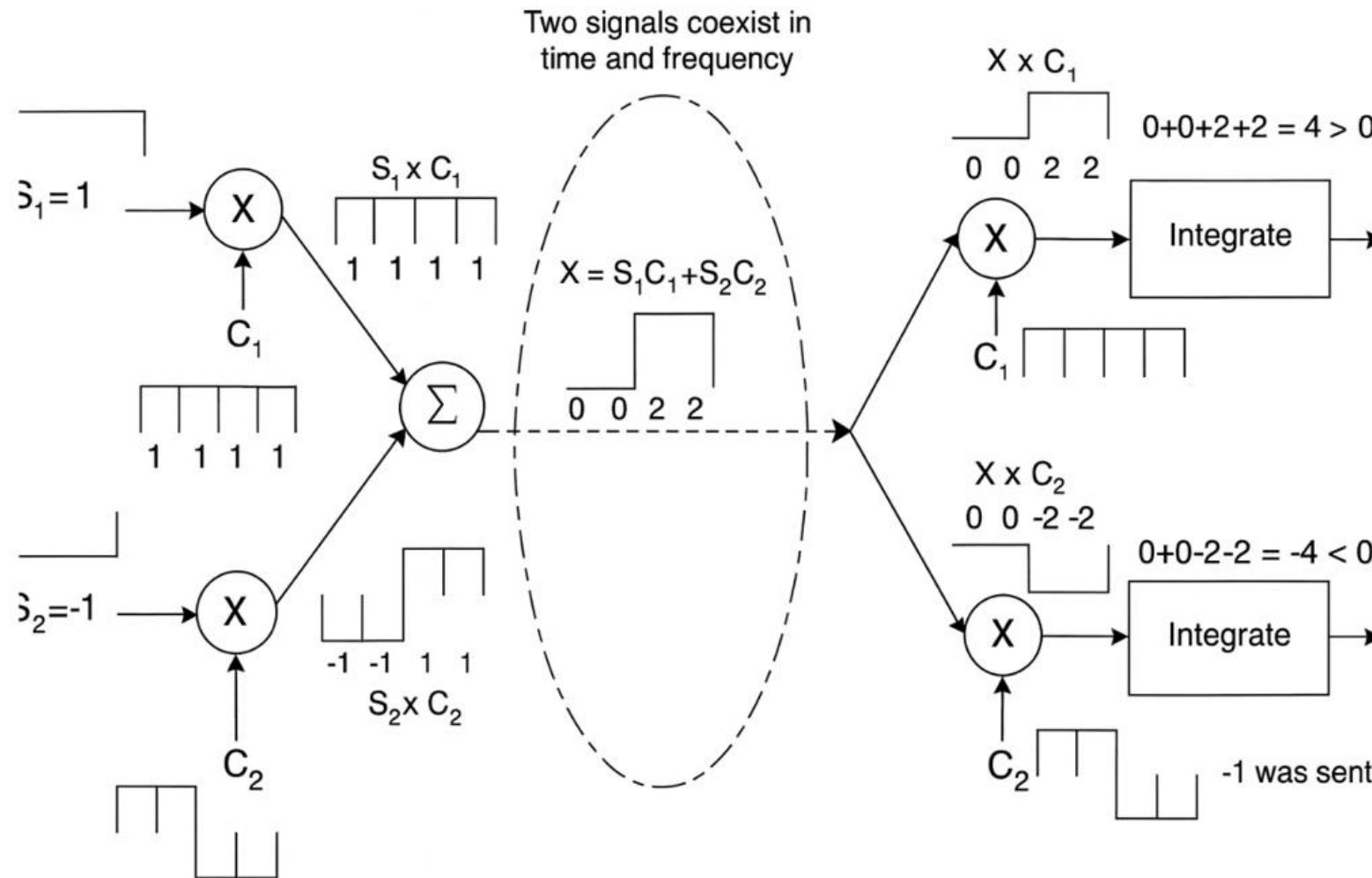
a	b	$a \oplus b$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

CDMA

Η ροή δεδομένων PN που έχει ρυθμό chip, $R_{ch}=1/T_{ch}$, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τον αρχικό ρυθμό δεδομένων, $1/R_{bb} = T$, δηλαδή, $R_{ch} \gg R_b$. Η προϋπόθεση $R_{ch} \gg R_b$ είναι απαραίτητη για την επιτυχή εφαρμογή της CDMA, και είναι ο λόγος που η CDMA αναφέρεται συχνά ως τεχνική εξαπλωμένου φάσματος (spread spectrum), λόγω της διαδικασίας διασποράς του σήματος, επειδή η αρχική ακολουθία δεδομένων «απλώνεται» σε μια πολύ μεγαλύτερη ζώνης συχνοτήτων από το κανάλι μετάδοσης.



CDMA



CDMA

Αν το σήμα πληροφορίας έχει εύρος ζώνης B_{bb} ή αντίστοιχα ρυθμό πληροφορίας R_b και μετατρέπεται σε σήμα με εύρος ζώνης B_{ss} όσο και το εύρος ζώνης της ψευδοτυχαίας ακολουθίας, με $B_{ss} \gg B_{bb}$, τότε ο παράγοντας διασποράς του φάσματος (spreading factor) δίνεται από τη σχέση:

$$SF = \frac{B_{ss}}{B_{bb}} = \frac{R_{ch}}{R_b} = \frac{T_b}{T_c}$$

Έχει αποδειχθεί ότι ο λόγος αυτός είναι περίπου ίσος με το επιτυγχανόμενο κέρδος στον λόγο σήματος προς θόρυβο για την ίδια πιθανότητα σφάλματος και γι' αυτό τον λόγο καλείται και κέρδος επεξεργασίας (processing gain), G_p .

Ο ρυθμός chip επιλέγεται να εξαπλώσει το σήμα πολύ πάνω από το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Μεγάλοι λόγοι διασποράς είναι τυπικοί, για παράδειγμα, σε κινητά δορυφορικά δίκτυα φωνής, το αρχικό σήμα ροής δεδομένων φωνής των 16 kbps μπορεί να εξαπλωθεί σε ένα εύρος ζώνης καναλιού 8MHz. Αυτός αντιστοιχεί σε παράγοντα διασποράς ίσο με 500.

Κέρδος επεξεργασίας CDMA

Η ανάκτηση δεδομένων CDMA είναι δυνατή, επειδή ο θόρυβος ή άλλα σήματα λαμβάνονται ασύμφωνα (incoherently) στον ισορροπημένο αποδιαμορφωτή (balanced desreader), ενώ αντίθετα το επιθυμητό σήμα συνδυάζεται με σύμφωνο (coherently) τρόπο. Το κέρδος επεξεργασίας CDMA είναι η κύρια παράμετρος, που ποσοτικοποιεί την απόδοση του συστήματος.

Έστω μια πηγή δεδομένων με ισχύ P_s (σε Watts) και ρυθμός μετάδοσης R_b (σε bps). Η εισαγωγή του φάσματος διασποράς στη διαδικασία CDMA αυξάνει το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος σε B_{ss} (σε Hz). Η συνολική πυκνότητα ισχύος θορύβου στον δίαυλο, N_t , θα αποτελείται από δύο συνιστώσες: τον συνήθη θερμικό θόρυβο, N_o , και μία συνιστώσα που οφείλεται σε άλλα σήματα εξαπλωμένου φάσματος, N_j , που θεωρούνται ως παρεμβολή (jammers). Η συνολική πυκνότητα ισχύος του θορύβου δίνεται από:

$$N_t = N_o + N_j = N_o + \frac{P_j}{B_{ss}}$$

όπου:

B_{ss} είναι το εξαπλωμένο εύρος ζώνης (σε Hz),

N_o είναι η πυκνότητα θερμικού θορύβου (σε W/Hz),

N_j είναι η πυκνότητα θορύβου άλλων σημάτων που βρίσκονται μέσα στο εύρος ζώνης του εξαπλωμένου φάσματος, που θεωρούνται ως παρεμβολή (σε W/Hz),

P_j είναι η συνολική παρεμβάλλουσα ισχύς κατανεμημένη στο εύρος ζώνης B_{ss} (σε Watts).

Κέρδος επεξεργασίας CDMA

Ο λόγος της ενέργειας ανά bit προς την πυκνότητα θορύβου του σήματος δεδομένων, μετά την συμπίεση, θα είναι:

$$\frac{E_b}{N_t} = \frac{E_b}{N_o + \frac{P_j}{B_{SS}}} = \frac{\frac{P_s}{R_b}}{N_o + \frac{P_j}{B_{SS}}}$$

Για τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα CDMA, η ισχύς της παρεμβολής περιορίζει την απόδοσή τους. Κατά συνέπεια, ισχύει $N_o \ll N_j$ και η προηγούμενη εξίσωση περιορίζεται:

$$\frac{E_b}{N_t} = \frac{\frac{P_s}{R_b}}{\frac{P_j}{B_{SS}}} = \left(\frac{P_s}{P_j} \right) \frac{B_{SS}}{R_b}$$

Ο λόγος P_s/P_j καλείται λόγος σήματος προς παρεμβολή και το κέρδος επεξεργασίας ορίζεται ως B_{SS}/R_b . Το κέρδος επεξεργασίας είναι ένα μέτρο μείωσης του επιπέδου του θορύβου, που παράγεται από τη διαδικασία διασποράς του φάσματος. Αφορά τη βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία συμπίεσης στον συσχετιστή του δέκτη. Μπορεί να αποτυπωθεί στην ανάλυση ζεύξης ως:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{out, dB} = \left(\frac{C}{N} \right)_{in, dB} + 10 \log(G_p)$$

όπου:

$\left(\frac{S}{N} \right)_{out}$ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του συσχετιστή,

$\left(\frac{C}{N} \right)_{in}$ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του συσχετιστή.

Χωρητικότητα CDMA

Η χωρητικότητα του CDMA καθορίζει τον μέγιστο αριθμό των διαύλων, που μπορούν να φιλοξενηθούν σε ένα δίκτυο CDMA για αποδεκτή ανάκτηση του σήματος. Η επιτυχής ανάκτηση του σήματος ορίζεται σε σχέση με τον απαιτούμενο λόγο E_b/N_o , που απαιτείται για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος ρυθμός σφάλματος bit.

Η συνολική ισχύς παρεμβολής, P_j , είναι το άθροισμα όλων των σημάτων παρεμβολής στον δίαυλο CDMA. Εάν υπάρχουν M συνολικά σήματα που παράγονται από αντίστοιχες πηγές και μεταδίδονται στον δίαυλο, με το καθένα να έχει ισχύ μετάδοσης P_s , όπου μόνο το ένα είναι το επιθυμητό σήμα, τότε: $P_j = (M - 1)P_s$

Η συνολική πυκνότητα ισχύος θορύβου, μπορεί να γραφτεί: $N_t = N_o + N_j = N_o + \frac{P_j}{B_{ss}} = N_o + \frac{(M - 1)P_s}{B_{ss}}$

Αφού $P_s = E_b R_b$: $N_t = N_o + \frac{(M - 1)E_b R_b}{B_{ss}}$

Οπότε επιλύοντας ως προς M : $M = 1 + (N_t - N_o) \frac{B_{ss}}{E_b R_b} = 1 + (N_t - N_o) \frac{G_p}{E_b} = 1 + \frac{G_p}{\left(\frac{E_b}{N_t}\right)} \left(1 - \frac{N_o}{N_t}\right)$

Δεδομένου ότι ο δεύτερος όρος είναι $\gg 1$ για ένα λειτουργικό δίκτυο CDMA, μπορούμε να παραμελήσουμε τον όρο «1», και θα έχουμε το τελικό αποτέλεσμα για τη χωρητικότητα του δικτύου CDMA:

$$M = \frac{G_p}{\left(\frac{E_b}{N_t}\right)} \left(1 - \frac{N_o}{N_t}\right)$$

Χωρητικότητα CDMA

$$M = \frac{G_p}{\left(\frac{E_b}{N_t}\right)} \left(1 - \frac{N_o}{N_t}\right)$$

όπου:

G_p είναι το κέρδος επεξεργασίας στο CDMA δίκτυο,

N_o είναι η συνολική πυκνότητα θερμικού θορύβου (σε W/Hz),

N_t είναι η συνολική πυκνότητα θορύβου (σε W/Hz).

Η χωρητικότητα M δίνει τον μέγιστο αριθμό των διαύλων που μπορούν να φιλοξενηθούν σε ένα σύστημα CDMA. Η αποδεκτή απόδοση ορίζεται συνήθως ως ο λόγος E_b/N_t που απαιτείται για να διατηρηθεί ένας συγκεκριμένος ρυθμός σφάλματος bit για συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης και για συγκεκριμένες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο CDMA.

Άσκηση 1

Ένας αναμεταδότης δορυφορικής επικοινωνίας με ωφέλιμο εύρος ζώνης 40 MHz λειτουργεί με πολλαπλούς φορείς FDMA. Κάθε φορέας FDMA απαιτεί εύρος ζώνης 7.5 MHz και EIRP 15.6 dBw. Η συνολική διαθέσιμη EIRP για τη ζεύξη είναι 23 dBw. Υποθέστε 10% ζώνες φύλαξης (guard bands) και αμελήστε τα περιθώρια υλοποίησης (implementation margins).

(α) Προσδιορίστε τον μέγιστο αριθμό φορέων που μπορούν να έχουν πρόσβαση στην ασύρματη ζεύξη.

(β) Το σύστημα περιορίζεται από το εύρος ζώνης (bandwidth limited) ή από την ισχύ (power limited);

(α) Μέγιστος αριθμός carriers

• Guard bands: 10% της συνολικής $\rightarrow$ διαθέσιμη ζώνη $= 0.9 \cdot B_{tot}$

1. Διαθέσιμη ζώνη μετά τα guard bands

$$B_{avail} = 0.9 \cdot 40 \text{ MHz} = 36 \text{ MHz}$$

2. Μέγιστος αριθμός carriers από το φάσμα

$$N_{BW} = \left\lfloor \frac{B_{avail}}{B_c} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{36}{7.5} \right\rfloor = \lfloor 4.8 \rfloor = 4$$

Άρα από πλευράς φάσματος μπορούμε να τοποθετήσουμε **4 carriers**.

Άσκηση 1

(β) Περιορισμός από ισχύ — έλεγχος

Μετατρέπουμε dBw $\rightarrow$ γραμμική ισχύ (W):

$$P_{tot} = 10^{E_{tot}/10} = 10^{23/10} \text{ W} \approx 199.526 \text{ W}$$

$$P_c = 10^{E_c/10} = 10^{15.6/10} \text{ W} \approx 36.308 \text{ W}$$

Μέγιστος αριθμός carriers από πλευράς ισχύος:

$$N_P = \left\lfloor \frac{P_{tot}}{P_c} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{199.526}{36.308} \right\rfloor = \lfloor 5.495 \rfloor = 5$$

Άρα η ισχύς επιτρέπει **έως 5 carriers**.

Το πραγματικά **μέγιστο πλήθος carriers** είναι το μικρότερο από τα δύο, δηλ. **4 carriers**.

Επομένως **το σύστημα είναι φασματικά (bandwidth) limited όχι power limited**.

Άσκηση 2

Θέλουμε να αξιολογήσουμε την απόδοση του τυπικού δικτύου INTELSAT TDMA, που χρησιμοποιείται για διεθνείς φωνητικές επικοινωνίες. Κάθε πλαίσιο TDMA αποτελείται από δύο bursts αναφοράς ανά frame, με μεταβλητό αριθμό bursts κυκλοφορίας, ανάλογα με τη ζήτηση φορτίου και την κάλυψη της περιοχής εξυπηρέτησης. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση QPSK με συνολικό μήκος frame 120832 σύμβολα. Η preamp σε κάθε ριπή κυκλοφορίας έχει μήκος 280 σύμβολα, το κανάλι ελέγχου και καθυστέρησης έχει 8 σύμβολα και το guard frame είναι 103 σύμβολα. Υπολογίστε την απόδοση πλαισίου για ένα πλαίσιο που αποτελείται από 14 ριπές κυκλοφορίας ανά frame.

QPSK $\Rightarrow$ 2 bits/συμβολο. Μήκος πλαισίου: $N_{frame} = 120\ 832$ σύμβολα.

Αναφέρονται 2 reference bursts ανά πλαίσιο και 14 traffic bursts $\rightarrow$ συνολικά $2 + 14 = 16$ bursts/πλαίσιο.

Preamble (σε κάθε traffic burst) = 280 σύμβολα. Control & delay = 8 σύμβολα. Guard interval = 103 σύμβολα.

1. Σύμβολα ανά burst

$$N_{burst} = \frac{N_{frame}}{16} = \frac{120\ 832}{16} = 7\ 552 \text{ symbols/burst}$$

2. Σύμβολα πληροφορίας (payload) σε κάθε traffic burst:

$$N_{payload_sym} = N_{burst} - (preamble + control + guard) = 7552 - (280 + 8 + 103) = 7552 - 391 = 7161 \text{ symbols}$$

Άσκηση 2

3. Bits payload ανά traffic burst (QPSK $\rightarrow$ 2 bits/σύμβολο):

$$N_{payload_bits} = 7161 \times 2 = 14322 \text{ bits}$$

4. Σύνολο χρήσιμων bits ανά πλαίσιο (14 traffic bursts):

$$N_{useful} = 14 \times 14\,322 = 200\,508 \text{ bits/frame}$$

5. Σύνολο bits στο πλαίσιο (όλα τα σύμβολα $\times$ 2 bits/symbol):

$$N_{total} = 120\,832 \times 2 = 241\,664 \text{ bits/frame}$$

6. Απόδοση (frame efficiency):

$$\eta = \frac{N_{useful}}{N_{total}} = \frac{200\,508}{241\,664} \approx 0.8300$$

Άρα η απόδοση του πλαισίου είναι περίπου **0.83 = 83.0%**.

Άσκηση 2

Προσδιορίστε τη χωρητικότητα του καναλιού φωνής για το πλαίσιο INTELSAT TDMA του προηγούμενου προβλήματος. Το κανάλι φωνής έχει τυπική μορφή PCM (64 kbps) με διαμόρφωση QPSK. Η περίοδος πλαισίου είναι 2 ms. Υποθέστε συντελεστή δραστηριότητας ομιλίας 1.

Χρήσιμα (payload) bits ανά TDMA frame: $N_{useful} = 200\,508 \text{ bits/frame}$

Δίνεται:

- Περίοδος πλαισίου: $T = 2 \text{ ms} = 0.002 \text{ s}$
- Ρυθμός καναλιού φωνής PCM: $64 \text{ kbps} = 64\,000 \text{ bps}$
- Speech activity factor = 1 (δηλαδή δεν γίνεται στατιστική πολυπλεξία)

1. Συνολικός χρήσιμος ρυθμός bit του TDMA καναλιού

$$R_{useful} = \frac{N_{useful}}{T}$$

$$R_{useful} = \frac{200\,508}{0.002} = 100\,254\,000 \text{ bps}$$

Άρα ο χρήσιμος ρυθμός του TDMA frame είναι:

$$R_{useful} = 100.254 \text{ Mbps}$$

2. Αριθμός καναλιών φωνής PCM (64 kbps)

$$N_{voice} = \frac{R_{useful}}{64\,000}$$

$$N_{voice} = \frac{100\,254\,000}{64\,000} = 1566.47$$

Πρέπει να πάρουμε ακέραιο αριθμό: $N_{voice} = 1566$ κανάλια φωνής

Άσκηση 3

Ένα δίκτυο VSAT σε ζώνη Ku αποτελείται από όμοιους τερματικούς σταθμούς που απαιτείται να υποστηρίξουν ρυθμό δεδομένων από κάθε τερματικό 254 kbps. Το δίκτυο λειτουργεί σε TDMA με ρυθμό burst 1.54 Mbps. Η λειτουργία σε αυτόν τον ρυθμό burst απαιτεί κεραία VSAT διαμέτρου 4.2 m ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο E_b/N_0 για αποδεκτή απόδοση. Αν αντί για TDMA χρησιμοποιηθεί FDMA, και υποθεθεί ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του link παραμένουν ίδιες, ποια θα ήταν η διάμετρος της κεραίας VSAT ώστε να παρέχει την ίδια απόδοση με το TDMA link;

$$\frac{E_b}{N_0} \propto \frac{C}{R_b} \propto \frac{D^2}{R_b}.$$

Για να έχουμε την **ίδια** τιμή E_b/N_0 στην περίπτωση FDMA όπως στο TDMA, πρέπει: $\frac{D_{TDMA}^2}{R_{burst}} = \frac{D_{FDMA}^2}{R_{user}}$ όπου $D_{TDMA} = 4.2 \text{ m}$, $R_{burst} = 1.54 \text{ Mbps}$ και $R_{user} = 254 \text{ kbps}$ (ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη). Άρα:

$$D_{FDMA} = D_{TDMA} \sqrt{\frac{R_{user}}{R_{burst}}} = 4.2 \cdot \sqrt{\frac{254 \text{ kbps}}{1540 \text{ kbps}}}$$
$$\frac{254}{1540} \approx 0.164935, \sqrt{0.164935} \approx 0.4061$$
$$D_{FDMA} \approx 4.2 \times 0.4061 \approx 1.71 \text{ m}$$

Άσκηση 4

Ένα δορυφορικό δίκτυο CDMA λειτουργεί με φωνητικά κανάλια των 8 kbps. Ο θόρυβος παρεμβολών είναι 7 dB μεγαλύτερος του θερμικού θορύβου.

(α) Να προσδιοριστεί το κέρδος επεξεργασίας (processing gain) για εύρος ζώνης διασποράς 5.2 MHz.

(β) Ποιος είναι ο μέγιστος αριθμός καναλιών που μπορούν να υποστηριχθούν στο δίκτυο, αν το απαιτούμενο E_b/N_t για αποδεκτή ανάκτηση σήματος είναι 5 dB;

(α) Κέρδος επεξεργασίας (Processing Gain) $PG = \frac{B_{SS}}{R_b}$

όπου $B_{SS} = 5.2 \text{ MHz} = 5.2 \times 10^6 \text{ Hz}$ και $R_b = 8 \text{ kbit/s} = 8 \times 10^3 \text{ Hz}$

$$PG = \frac{5.2 \times 10^6}{8 \times 10^3} = 650$$

Σε dB: $PG_{dB} = 10 \log_{10}(650) \approx 28.1 \text{ dB}$

(β) Μέγιστος αριθμός καναλιών

Για CDMA, ο μέγιστος αριθμός χρηστών προσεγγίζεται από: $M \approx \frac{PG}{\frac{E_b}{N_t}} \left(1 - \frac{N_0}{N_t}\right)$

Απαιτούμενο E_b/N_t : $E_b/N_t = 5 \text{ dB} = 10^{5/10} = 3.162$ και $N_t/N_0 = 7 \text{ dB} = 5$

Άρα: $M = \frac{650}{3.162} \left(1 - \frac{1}{5}\right) \approx 164.45$

Το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει 164 κανάλια.