

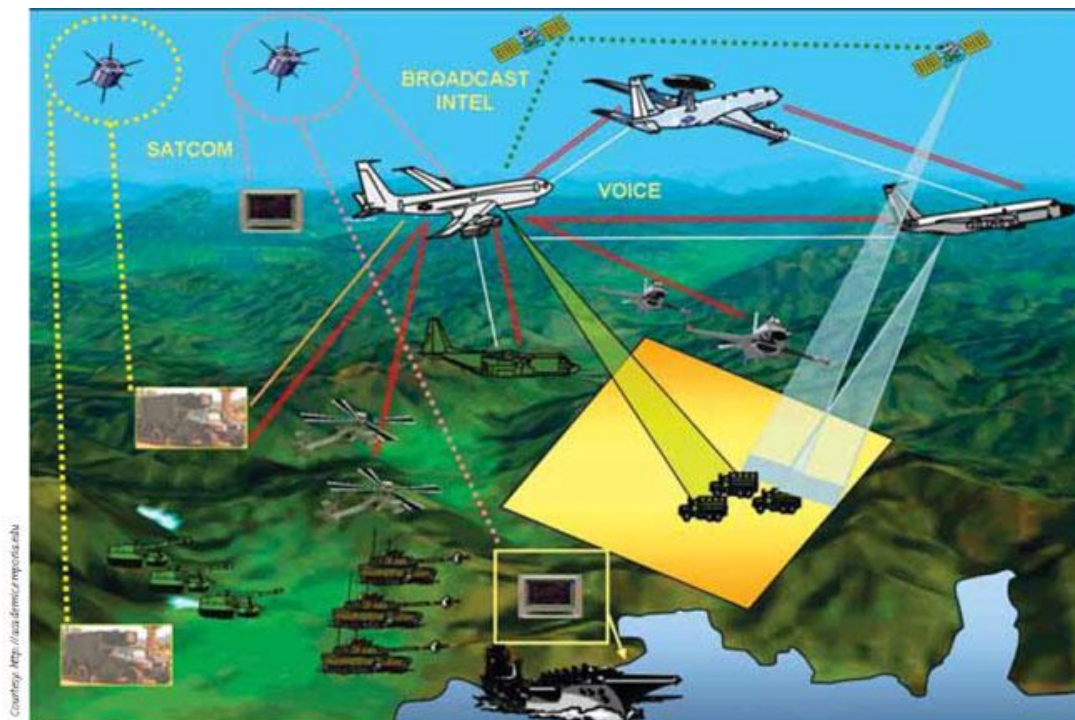


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση Λειτουργίας Ασύρματων Αεροναυτικών
Δικτύων Ανταλλαγής Τακτικών Δεδομένων
(Link-16)

Πέγκος Αθανάσιος (ΑΜ:2015517)



Σεπτέμβριος 2017

Ανάλυση Λειτουργίας Ασύρματων Αεροναυτικών Δικτύων Ανταλλαγής Τακτικών Δεδομένων (Link-16)

Πέγκος Αθανάσιος

Η παρούσα διπλωματική εργασία υποβάλλεται
σαν μέρος των απαιτήσεων του μεταπτυχιακού διπλώματος
εξειδίκευσης ραδιοηλεκτρολογίας και ηλεκτρονικού αυτοματισμού
του τμήματος Φυσικής.

Σεπτέμβριος 2017

Συγγραφέας : _____

Πέγκος Αθανάσιος.

Επιβλέπων
καθηγητής :

Δρ. Τζανακάκη Άννα,

Καθηγήτρια.

Αφιερώνεται στις γυναίκες της ζωής μου...

....ξέρουν αυτές.

*Start spreading the news I am leaving today
I want to be a part of it New York, New York
These vagabond shoes Are longing to stray
Right through the very heart of it New York, New York
I want to wake up in a city That doesn't sleep
And find I'm king of the hill Top of the heap
These little town blues Are melting away
I'll make a brand new start of it In old New York
If I can make it there I'll make it anywhere
It's up to you New York, New York*

"Theme from New York"

Frank Sinatra, 1979.

Περιεχόμενα

Abstract

Σύνοψη

Κεφάλαιο πρώτο: Εισαγωγή

- 1.1. Ο Πόλεμος στην εποχή της πληροφοριακής υπεροχής
- 1.2. Ο Δικτυοκεντρικός Πόλεμος ως μέρος του Πληροφοριακού πολέμου

Κεφάλαιο δεύτερο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ LINK-16

- 2.1. Εισαγωγή
- 2.2. Περιγραφή Τακτικού Δικτύου Link16 (L-16)
- 2.3. Μετάδοση ψηφιακών δεδομένων μέσω ζεύξεων
- 2.4. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΥ LINK-16
- 2.5. Σειρές μηνυμάτων J (J-series)

Κεφάλαιο τρίτο: TDMA ΚΑΙ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ JTIDS

- 3.1. Εισαγωγή
- 3.2. Αρχιτεκτονική του TDMA frame
 1. Burst αναφοράς
 2. Burst κυκλοφορίας
 3. Χρόνος ασφαλείας
- 3.3. Η Επεξεργασία Σήματος της τεχνικής TDMA
- 3.4. Η Εφαρμογή του TDMA στο JTIDS του Link-16
- 3.5. Μηνύματα Link-16
- 3.6. Τα δεδομένα
- 3.7. Το εσωτερικό της σχισμής χρόνου
- 3.8. Τα όρια στην συσκευασία δεδομένων
- 3.9. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ JTIDS ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ
- 3.10. ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LINK-16

Κεφάλαιο τέταρτο: ΚΩΔΙΚΑΣ REED-SOLOMON (R-S)

- 4.1. Εισαγωγή
- 4.2. Πεπερασμένα Πεδία
- 4.3. Προσθήκη στο πεδίο επέκτασης $GF(2^m)$
- 4.4. Το πεδίο επέκτασης $GF(2^3)$
- 4.5. Μια απλή δοκιμή για να διαπιστώσετε εάν ένα πολυώνυμο είναι πρωτότυπο
- 4.6. Κωδικοποίηση Reed-Solomon
- 4.7. Αποκωδικοποίηση Reed-Solomon

Κεφάλαιο πέμπτο: Επίλογος

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abstract

Today's fast-moving aeronautical theater requires the use of wireless data exchange networks with minimal human operator employment whose reflexes do not allow the guidance of weapons systems, sensors and commands in a multitude of collaborating platforms, which may be aircraft, ships, Vehicles and land units in vast geographical areas such as the entire Greek territory along with the neighboring countries and the Eastern Mediterranean. To this end, ADRs use wireless networks that evolve technologically with the gradual introduction of emerging network technologies. The TADIL-J or Link-16 type network is an aeronautical wireless data exchange network whose physical layer is implemented in the L-Band with Frequency Hopping (Time Division Multiple Access) FH-TDMA with Reed-type detection and correction code - Solomon and CPSM (Continuous Phase Shift Keying). The frequency hopping FH is done with CCSK (Cyclic Code Shift Keying) and the upper layers are implemented with the Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS) architecture. In this diploma, a comprehensive analysis of the performance of the network is carried out in the light of the principles of Network Centric Warfare and an examination of the future possibilities of developing and extending the network in relation to the interface with other military or political networks And weapon platforms mainly in the field of air defense. More specifically, the features of the Link 16 network are presented, the advantages of the network compared to existing systems, the series of messages, their operational use and the way of transmission of information within the network are analyzed. It also presents the types of units participating in the network and the rules for the participation of these units as well as the synchronization of the units in the network and the retransmission of the information. The third chapter of the paper discusses how Link-16 works, that is, it describes the JTIDS communications architecture known as TEMA (time slots, sets = recurrence rate number RRN), general data structures supported by the network architecture (fixed format, free text, headers, Reed-Solomon encoding and RTTs) to encode these data to carrier for transmission over time slots (CCSK, CPSM, pulses and frequency hopping). The fourth chapter describes the Reed-Solom code, which is a bug fix code, as well as the reason why this code was chosen. Finally, in the fifth chapter a preview of what has been mentioned in the previous chapter and a few conclusions are made.

Σύνοψη

Το σημερινό ταχέως εξελισσόμενο θέατρο αεροναυτικών επιχειρήσεων απαιτεί την χρήση ασυρμάτων δικτύων αυτόματης ανταλλαγής δεδομένων μάχης με ελαχιστοποίηση της απασχόλησης του ανθρώπινου χειριστή του οποίου τα ανακλαστικά δεν επιτρέπουν την καθοδήγηση οπλικών συστημάτων, αισθητήρων και εντολών σε μια πολλαπλότητα συνεργαζομένων πλατφορμών που μπορεί να είναι αεροσκάφη, πλοία, οχήματα και μονάδες εδάφους σε ευρύτατους γεωγραφικούς χώρους όπως πχ είναι όλη η ελληνική επικράτεια μαζί με τις όμορες χώρες και την Ανατολική Μεσόγειο. Για τον σκοπό αυτό οι ΕΕΔ χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα τα οποία εξελίσσονται τεχνολογικά με την βαθμιαία εισαγωγή αναδυόμενων τεχνολογιών δικτύων. Το δίκτυο τύπου TADIL-J* ή Link-16 είναι αεροναυτικό δίκτυο ασύρματης ανταλλαγής τακτικών δεδομένων του οποίου το φυσικό στρώμα υλοποιείται στην L-Band με σύστημα FH-TDMA (Frequency Hopping - Time Division Multiple Access) με κώδικα ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων τύπου Reed-Solomon και διαμόρφωση CPSM (Continuous Phase Shift Keying). Η αναπήδηση συχνότητας FH γίνεται με CCSK (Cyclic Code Shift Keying) και τα ανώτερα στρώματα υλοποιούνται με την αρχιτεκτονική JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System). Στην παρούσα διπλωματική γίνεται συνολική ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου (performance analysis) υπό το πρίσμα των αρχών του Δικτυοκεντρικού Πολέμου (Network Centric Warfare) και εξέταση των μελλοντικών δυνατοτήτων εξέλιξης και επέκτασης του δικτύου όσον αφορά την διεπαφή (interface) με άλλα στρατιωτικά ή πολιτικά δίκτυα και πλατφόρμες οπλικών συστημάτων κυρίως στον χώρο της αεράμυνας. Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τον χαρακτήρα του πολέμου ο οποίος είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον τρόπο που οι κοινωνίες είναι οργανωμένες, καθώς και με το αξιακό τους σύστημα. Έτσι επιχειρείται μία ποιοτική ανάλυση των δικτυοκεντρικών επιχειρήσεων στο σύγχρονο θέατρο επιχειρήσεων. Η ανάλυση αυτή εδράζεται στη θεωρία της «Στρατιωτικής Επανάστασης» με στόχο να αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο οι Ένοπλες Δυνάμεις έχουν επιτύχει να αλλάξουν το πολεμικό πρότυπο από το νεωτερικό στο μετα-νεωτερικό, μία μορφή του οποίου είναι ο δικτυοκεντρικός πόλεμος. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των τακτικών δικτύων που είναι μέρος του δικτυοκεντρικού πολέμου. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου Link 16, αναλύονται τα πλεονεκτήματα του δικτύου σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα, αναφέρονται οι σειρές των μηνυμάτων, η επιχειρησιακή τους χρήση και ο τρόπος μετάδοσης των πληροφοριών μέσα στο δίκτυο. Επίσης, παρουσιάζονται τα είδη των μονάδων που συμμετέχουν στο δίκτυο και οι κανόνες συμμετοχής των μονάδων αυτών καθώς και ο συγχρονισμός των μονάδων στο δίκτυο και η αναμετάδοση των πληροφοριών. Το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύει περισσότερο τον τρόπο λειτουργίας του Link-16, δηλαδή, περιγράφει την αρχιτεκτονική επικοινωνιών JTIDS γνωστή ως TEMA (time slots=χρονικές περιόδους, sets=σύνολα και αριθμός ρυθμού επανάληψης (recurrence rate number RRN), τις γενικές δομές δεδομένων που υποστηρίζονται από την αρχιτεκτονική δικτύου (σταθερή μορφή, ελεύθερο κείμενο, κεφαλίδες, κωδικοποίηση Reed-Solomon και RTTs) για την κωδικοποίηση αυτών των δεδομένων σε φορέα για μετάδοση κατά τη διάρκεια των χρονικών θυρίδων (CCSK, CPSM, παλμοί και αναπήδηση συχνότητας). Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του κώδικα Reed-Solomon, ο οποίος είναι ένας κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων, καθώς αναφέρεται και ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος κώδικας. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια προεπισκόπηση των όσων

αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαιο και παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν.

ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τρόπος με τον οποίο διεξάγεται ο πόλεμος σε κάθε εποχή υφίσταται σημαντικές αλλαγές οι οποίες είναι εναρμονισμένες κάθε φορά με τις ευρύτερες κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές αλλαγές. Η τεχνολογική πρόοδος αποτελεί αναμφισβήτητα την κύρια κινητήρια δύναμη της μετεξέλιξης του πολεμικού προτύπου σε κάθε ιστορική περίοδο. Ιστορικά, σημαντικές τεχνολογικές προόδους εισήχθησαν στα πεδία των μαχών αναμορφώνοντας άρδην τη μορφή του πολέμου. Η μηχανή εσωτερικής καύσης, ο τηλεγράφος, το ραντάρ και το αεριωθούμενο αεροσκάφος αποτελούν λίγες μόνο από τις τεχνολογικές καινοτομίες που άλλαξαν αφενός τον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου και αφετέρου την οργάνωση και δομή των στρατιωτικών οργανισμών. Η ένταξη μίας νέας τεχνολογίας στους στρατούς των χωρών δεν είναι μια στείρα διαδικασία αλλά, αντίθετα, είναι μια διαδικασία πολυδιάστατη που επιφέρει αναδιατάξεις στην δομή και οργάνωση των ενόπλων δυνάμεων άλλες φορές ήπιες ενώ, άλλες πάλι, περισσότερο ουσιαστικές.

Ο τρόπος διεξαγωγής του πολέμου δεν ακολουθεί μία γραμμική πορεία κατά τη διάρκεια της ιστορικής του διαδρομής. Τα όπλα που χρησιμοποιούνται, οι τακτικές στα πεδία των μαχών, αλλά και ο τρόπος οργάνωσης και λειτουργίας των στρατιωτικών οργανισμών διαφοροποιούνται από εποχή σε εποχή καθορίζοντας κάθε φορά ένα νέο στρατιωτικό πρότυπο. Πρόκειται, λοιπόν, για μία συνεχή εξελικτική πορεία η οποία, σε ορισμένες ιστορικές περιόδους, χαρακτηρίζεται από κάποια ορόσημα ευρέων και ουσιαστικών αλλαγών. Αυτές οι περιόδους χαρακτηρίζονται ως «Επαναστάσεις στα Στρατιωτικά Θέματα» (Revolution in Military Affairs - RMA). Ο Καθηγητής Στρατιωτικής Ιστορίας στη United States Military Academy Clifford J. Rogers ορίζει τις Επαναστάσεις στα Στρατιωτικά θέματα ως εξής:

«Οι Επαναστάσεις στα Στρατιωτικά Θέματα (RMA) δηλώνουν μία μεγάλη αλλαγή την οποία εφαρμόζει μία δύναμη στο πεδίο της μάχης και η οποία της δίνει το αποφασιστικό προβάδισμα μέχρι του σημείου που η αντίπαλος δύναμη υιοθετήσει και η ίδια την εν λόγω εξέλιξη.»¹

Κατά τη διάρκεια, δηλαδή, των Επαναστάσεων στα Στρατιωτικά Θέματα εδραιώνεται ένα νέο πολεμικό πρότυπο το οποίο διαφοροποιείται σε σημαντικό βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο έως τότε διεξαγόταν ο πόλεμος. Στο πεδίο της μάχης χρησιμοποιούνται όπλα νέας τεχνολογίας και εφαρμόζονται καινούργιες τακτικές με επίκεντρο την εξέλιξη της τεχνολογίας που λειτουργεί ως κινητήριος δύναμη. Ενδεικτικά, η χρήση του RADAR, των αεριωθούμενων αεροσκαφών ή τα πυρηνικά

όπλα αποτελούν τεχνολογικές προόδους που υιοθετήθηκαν στα πεδία των μαχών και άλλαξαν ριζικά τον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου. Κάθε φορά, οι δυνάμεις που πρώτες ανέπτυξαν και ακολούθησαν το νέο πρότυπο επωφελήθηκαν και αύξησαν συντριπτικά την στρατιωτική τους ισχύ μέχρι του σημείου που και οι υπόλοιπες εκσυγχρονίστηκαν ανάλογα.

Πέρα, όμως, των Επαναστάσεων στα Στρατιωτικά θέματα, οι οποίες αλλάζουν άρδην το πολεμικό πρότυπο, θα πρέπει κανείς να διακρίνει και τις Στρατιωτικές Επαναστάσεις (Military Revolution-MR), οι οποίες δεν περιορίζονται στον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου. Ο όρος Στρατιωτική Επανάσταση χρησιμοποιείται για να δηλώσει εκείνες τις χρονικές περιόδους κατά την οποία η υιοθέτηση του νέου στρατιωτικού προτύπου είχε ευρύτερες κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές συνέπειες. Στο σημείο αυτό σκόπιμο κρίνεται να διασαφηνισθεί ότι ο όρος «επανάσταση» και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για να υπογραμμίσει τις μεγάλες αλλαγές και την ρήξη με το παρελθόν. Έτσι, λοιπόν, μία RMA λαμβάνει χώρα όταν η χρήση νέων τεχνολογιών σε ένα αριθμό στρατιωτικών συστημάτων συνδυάζεται με καινοτόμα επιχειρησιακά δόγματα και με οργανωτική αναδιάρθρωση σε βαθμό ώστε να αλλάζει ριζικά ο χαρακτήρας και η διεξαγωγή του πολέμου². Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται λόγω της RMA βάζουν συχνά τα θεμέλια για μία Στρατιωτική Επανάσταση λόγω των προεκτάσεων που έχουν σε κοινωνικοπολιτικό επίπεδο³.

Σε μία σύντομη ιστορική αναδρομή μπορούμε να διακρίνουμε χρονολογικά την πρώτη στρατιωτική επανάσταση στον 16^ο αιώνα μ.Χ. και είναι γνωστή ως επανάσταση της πυρίτιδας (gunpowder revolution)⁴. Μέχρι τότε τα όπλα που χρησιμοποιούνταν, η καταστροφική ισχύς των οποίων ήταν μικρή σε σχέση με τα πυροβόλα, έδινε το συγκριτικό πλεονέκτημα στις αμυνόμενες δυνάμεις, οι οποίες καλυμμένες πίσω από ισχυρές οχυρώσεις και έχοντας πραγματοποιήσει την κατάλληλη προετοιμασία, ήταν ικανές να αντέξουν σε πολιορκίες επί μακρό χρονικό διάστημα χωρίς διακοπή. Η καταστροφική ισχύς των νέων πυροβόλων είναι τέτοια όμως, που φαινομενικά αρχίζει να αποδίδει το πλεονέκτημα στους επιτιθέμενους. Παρ' όλα αυτά, η αύξηση της ισχύος των επιτιθέμενων δυνάμεων αναγκάζει τις αμυνόμενες δυνάμεις να προβαίνουν σε εκ νέου ενίσχυση του αμυντικού τους εξοπλισμού και το αντίστροφο, με αποτέλεσμα να διατηρείται συνεχώς μία εύθραυστη ισορροπία. Η κατάσταση αυτή είχε ως αποτέλεσμα αφενός μεν τη συγκρότηση πολύ μεγάλων στρατών, αφετέρου δε μία πολύ αργή εξέλιξη των μαχών. Το κόστος, ως αποτέλεσμα, τόσο σε ανθρώπινο δυναμικό, όσο και σε υλικά μέσα ήταν υψηλό. Παράλληλα, όμως, είχε σαν αποτέλεσμα την εδραίωση ηγεμονιών, οι οποίες σταδιακά εξελίχθηκαν σε κράτη με την σημερινή έννοια του όρου, τα οποία μάλιστα χρησιμοποίησαν συχνά την ισχύ που τους έδιναν τα πυροβόλα όπλα για να επιβάλλουν την Αρχή επάνω σε εξεγέρσεις και εσωτερικές διαμάχες. Στα επόμενα

χρόνια ακολούθησαν και άλλες στρατιωτικές επαναστάσεις⁵ μέχρι και τη σημερινή περίοδο.

Σε καμία περίπτωση όσα ειπώθηκαν πιο πάνω δεν υποστηρίζουν ότι κάθε μεγάλη αλλαγή στον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου (RMA) αποτελεί και Στρατιωτική Επανάσταση (MR). Μπορούμε να ορίσουμε κάποια κριτήρια ώστε μία καινοτομία στη διεξαγωγή του πολέμου να χαρακτηριστεί ως Στρατιωτική Επανάσταση. Το **πρώτο κριτήριο** είναι ο βαθμός στον οποίο η καινοτομία που εισάγεται ανατρέπει την ισορροπία άμυνας και επίθεσης. Το **δεύτερο κριτήριο** είναι ο βαθμός ευκολίας υιοθέτησης της συγκεκριμένης αλλαγής από μία άλλη δύναμη. Η ανατροπή της ισορροπίας των δυνάμεων εφόσον η καινοτομία υιοθετηθεί από όλους τους δρώντες της διεθνούς σκηνής είναι το **τρίτο κριτήριο** και, τέλος, το **τέταρτο** είναι οι ανακατατάξεις που προκαλούνται στο εσωτερικό της χώρας.

Η θεωρία της Στρατιωτικής Επανάστασης αναδεικνύει ένα κεντρικό ερώτημα, στο οποίο οι αναλυτές απαντούν με εντελώς διαφορετικό τρόπο: αυτό είναι το ζήτημα της σημασίας που διαδραματίζει η τεχνολογική ανάπτυξη για την αλλαγή του πολεμικού προτύπου. Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη οδηγεί αξιωματικά σε αλλαγή του πολεμικού προτύπου ή απαιτούνται επιπλέον στοιχεία ώστε να πραγματοποιηθεί μια RMA; Οι τεχνολογικές καινοτομίες είναι χωρίς αμφιβολία προαπαιτούμενο για μία «επανάσταση». Ο Hundley τονίζει, όμως, ότι: «Χωρίς επιχειρησιακή σκέψη, ακόμα και τα καλύτερα οπλικά συστήματα δεν μπορούν να επιφέρουν επανάσταση σε τίποτα»⁶. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με την μία άποψη, η τεχνολογική πρόοδος έχει τον πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση του πολεμικού προτύπου. Το παράδειγμα των ΗΠΑ αποδεικνύει έμπρακτα τη δύναμη της τεχνολογίας στο να επηρεάζει την ισχύ του κράτους, την στρατιωτική κουλτούρα και πρακτική, και, εν τέλει, το στρατιωτικό πρότυπο.

Οι σκεπτικιστές αντιτάσσουν, όμως, ότι ιστορικά οι περισσότερες RMA που έχουν καταγραφεί οφείλονται κυρίως σε κοινωνικοπολιτικούς λόγους και όχι μόνο στην τεχνολογική ανάπτυξη. Σύμφωνα με τον Krepinevich, οι τεχνολογικές καινοτομίες κάθε εποχής αποτελούν μόνο το ένα από τα τέσσερα προαπαιτούμενα στοιχεία που συντελούν σε μία ουσιαστική μεταβολή στον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου, ώστε αυτή να μπορεί να χαρακτηριστεί ως «επαναστατική». Τα υπόλοιπα τρία στοιχεία είναι η ανάπτυξη των συστημάτων, η επιχειρησιακή καινοτομία και η οργανωτική προσαρμογή στα νέα δεδομένα. Κάθε ένα από αυτά αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη των υπολοίπων⁷.

Εν κατακλείδι, σε κάθε εποχή η υιοθέτηση μιας νέας τεχνολογίας από το στρατό δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι οδηγεί εξ ορισμού σε μία RMA. Θα πρέπει κάθε φορά να συνεκτιμούνται περισσότερα στοιχεία που αφορούν στις ευρύτερες αλλαγές που πραγματοποιούνται σε επίπεδο τόσο οργάνωσης και λειτουργίας του στρατού αλλά και σε επίπεδο στρατιωτικής νοοτροπίας και κουλτούρας. Μία νέα τεχνολογία

αποτελεί απλώς μία απαραίτητη προϋπόθεση για την αναδιοργάνωση του πολεμικού προτύπου. Δεν αποτελεί, όμως, την μόνη και αναγκαία συνιστώσα.

Στον 21^ο αιώνα, η έκρηξη της ανάπτυξης και χρήσης των τεχνολογιών της πληροφορικής έχει δημιουργήσει νέα δεδομένα σε κάθε τομέα. Η λεγόμενη «επανάσταση της πληροφορίας» αναμορφώνει τον τρόπο οργάνωσης και λειτουργίας κάθε κοινωνικής δραστηριότητας. Η εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) και, περισσότερο, η δικτυακή λειτουργία αυτών αναμορφώνει μία σειρά δραστηριοτήτων που εκτείνονται από το προσωπικό – καθημερινό επίπεδο του κάθε χρήστη έως, σε ευρύτερο επίπεδο, τον τρόπο οργάνωσης και λειτουργίας των κρατών. Ο τρόπος διεξαγωγής του πολέμου αλλάζει για ακόμα μία φορά λόγω της χρήσης της τεχνολογίας της δικτύωσης των H/Y, οι οποίοι αποτελούν πλέον το πιο νευραλγικό μέρος κάθε οπλικού συστήματος. Ο στόχος του λεγόμενου Δικτυοκεντρικού πολέμου είναι τα διαφορετικά οπλικά συστήματα που αναπτύσσονται σε αέρα, θάλασσα και ξηρά να ανταλλάσουν αυτοματοποιημένα δεδομένα με την όσο το δυνατό πιο περιορισμένη εμπλοκή των χρηστών τους. Με αυτό τον τρόπο, όλοι οι μαχητές έχουν κοινή αντίληψη για την κατάσταση στο θέατρο των επιχειρήσεων ανά πάσα στιγμή και επιτυγχάνουν να μεγιστοποιήσουν την μαχητική τους ισχύ.

Το Δικτυοκεντρικό πολεμικό πρότυπο δίνει έμφαση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός στρατού ο οποίος απαιτείται, πλέον, να αναπτύσσει τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες ώστε να αξιοποιεί τις νέες τεχνολογίες της πληροφορικής με στόχο την κάλλιστη αξιοποίηση της Πληροφορίας. Η Πληροφορία ανάγεται, στη σύγχρονη πραγματικότητα, ως κεντρικής σημασίας παράμετρο παρά το γεγονός ότι ιστορικά είχε καθοριστικό ρόλο στη διεξαγωγή του πολέμου. Σήμερα, όμως, αποκτά νέα διάσταση χάρις στα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας των πληροφοριών. Η Πληροφορία μετατρέπεται με τη βοήθεια τους σε πακέτο ψηφιακών δεδομένων το οποίο μέσω των δικτύων των H/Y διαχέεται σε όλα τα οπλικά συστήματα αυτοματοποιημένα, άμεσα και σε αληθή χρόνο. Για το λόγο αυτό, η σύγχρονη εποχή έχει χαρακτηριστεί, όχι άδικα, η εποχή της Πληροφορίας (Information Age) η οποία έρχεται ως συνέχει της Βιομηχανικής εποχής (Industrial Age). Ο Δικτυοκεντρικός πόλεμος εντάσσεται, ουσιαστικά, ως μέρος του λεγόμενου Πληροφοριακού πολέμου ο οποίος αποτελείται από μία σειρά στρατιωτικών επιχειρήσεων με στόχο την κάλλιστη αξιοποίηση των πληροφοριών σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. Επιχειρήσεις Ηλεκτρονικού Πολέμου, Ψυχολογικές Επιχειρήσεις, Κυβερνοπόλεμος).

Στην Ελλάδα, οι Ένοπλες Δυνάμεις (ΕΔ) έχουν επενδύσει τα τελευταία χρόνια στη δικτύωση των δυνάμεων σε διακλαδικό επίπεδο διότι έχουν κατανοήσει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που μπορούν να αποκομίσουν από το Δικτυοκεντρικό πόλεμο. Για το λόγο αυτό αφενός προωθούν την αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων συστημάτων, ώστε να αποκτήσουν δυνατότητες δικτύωσης, αφετέρου δε στις προδιαγραφές των υπό προμήθεια νέων οπλικών συστημάτων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση των σύγχρονων δικτύων. Παρά το γεγονός ότι ήδη από τη

δεκαετία του 1980 ορισμένες μονάδες του Συστήματος Αεροπορικού Ελέγχου (ΣΑΕ) είχαν δυνατότητα διασύνδεσης με το Νατοϊκό αεροφερόμενο σύστημα εγκαίρου προειδοποίησης και ελέγχου (E3), οι δικτυοκεντρικές επιχειρήσεις έχουν κερδίσει νέα ώθηση η οποία σηματοδοτείται από την επιχειρησιακή ένταξη του Αεροφερόμενου Συστήματος Εγκαίρου Προειδοποίησης και Ελέγχου (ΑΣΕΠΕ) στο οπλοστάσιο των ΕΔ.

Το ΑΣΕΠΕ αποτελεί το πρώτο οπλικό σύστημα που απέκτησαν οι ΕΔ το οποίο διαθέτει τις πιο σύγχρονες δυνατότητες δικτύωσης με μια σειρά οπλικών συστημάτων σε αέρα, θάλασσα και ξηρά που αυτή τη στιγμή χρησιμοποιεί το ΝΑΤΟ. Από το 2008, έτος έναρξης της επιχειρησιακής αξιοποίησης του ΑΣΕΠΕ σε διακλαδικό επίπεδο, έχουν σημειωθεί αλματώδεις πρόοδοι σε ότι αφορά στην προμήθεια νέων οπλικών συστημάτων με σύγχρονες δυνατότητες διασύνδεσης. Συγκεκριμένα, η προμήθεια των νέων F-16ADV (Block-52) με εξοπλισμό LINK-16 (L-16), η εγκατάσταση του απαραίτητου υλικοτεχνικού εξοπλισμού στα Κατευθυνόμενα Βλήματα (K/B) Patriot και η διασύνδεση των αντιαεροπορικών συστημάτων μικρού και μέσου βεληνεκούς (CROTALE, ΒΕΛΟΣ, ΧΩΚ) στο Σύστημα Αεροπορικού Ελέγχου (ΣΑΕ) αποτελούν μερικές από τις εξελίξεις των τελευταίων δέκα ετών. Επιπρόσθετα, η προσπάθεια αναβάθμισης του ΣΑΕ αποτελεί σημαντική πρόοδο ώστε οι τρεις νευραλγικές μονάδες (1^ο, 2^ο και 3^ο Κέντρο Ελέγχου Περιοχής (ΚΕΠ)) να αποτελούν κόμβους συγκέντρωσης των διαφορετικών πληροφοριών από όλα τα οπλικά συστήματα σε διακλαδικό επίπεδο με τη χρήση διαφορετικών δικτύων και διαβίβαση των πληροφοριών αυτών στα ανώτερα επίπεδα διοίκησης και ελέγχου.

Το σημερινό ταχέως εξελισσόμενο θέατρο αεροναυτικών επιχειρήσεων απαιτεί την χρήση ασυρμάτων δικτύων αυτόματης ανταλλαγής δεδομένων μάχης με ελαχιστοποίηση της απασχόλησης του ανθρώπινου χειριστή του οποίου τα ανακλαστικά δεν επιτρέπουν την καθοδήγηση οπλικών συστημάτων, αισθητήρων και εντολών σε μια πολλαπλότητα συνεργαζομένων πλατφορμών που μπορεί να είναι αεροσκάφη, πλοία, οχήματα και μονάδες εδάφους σε ευρύτατους γεωγραφικούς χώρους όπως πχ είναι όλη η ελληνική επικράτεια μαζί με τις όμορες χώρες και την Ανατολική Μεσόγειο. Για τον σκοπό αυτό οι Ελληνικές ένοπλες δυνάμεις χρησιμοποιούν ασύρματα δίκτυα τα οποία εξελίσσονται τεχνολογικά με την βαθμιαία εισαγωγή αναδυόμενων τεχνολογιών δικτύων. Το δίκτυο τύπου TADIL-J (Tactical Digital Information Link J) ή Link-16 είναι αεροναυτικό δίκτυο ασύρματης ανταλλαγής τακτικών δεδομένων του οποίου το φυσικό στρώμα υλοποιείται στην L-Band με σύστημα FH-TDMA (Frequency Hopping - Time Division Multiple Access) με κώδικα ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων τύπου Reed-Solomon και διαμόρφωση CPSM (Continuous Phase Shift Keying). Η αναπήδηση συχνότητας FH γίνεται με CCSK (Cyclic Code Shift Keying) και τα ανώτερα στρώματα υλοποιούνται με την αρχιτεκτονική JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System).

1.1. Ο Πόλεμος στην εποχή της Πληροφοριακής υπεροχής

Η υιοθέτηση νέων τεχνολογικών εξελίξεων από τους στρατιωτικούς οργανισμούς οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στον τρόπο διεξαγωγής του πολέμου⁸. Ο χαρακτήρας του πολέμου υφίσταται με αυτό τον τρόπο συνεχείς αλλαγές μέσα στην ιστορία. Ο μηχανισμός με τον οποίο συνδέεται το στρατιωτικό πρότυπο με το χαρακτήρα του πολέμου, αλλά και με τις ευρύτερες κοινωνικές αλλαγές, περιγράφηκε αναλυτικά και στο ιστορικό του πλαίσιο στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα ακόλουθα υποκεφάλαια θα εξηγηθεί ο αντίστοιχος μηχανισμός στη σύγχρονη εποχή.

Κύριο χαρακτηριστικό του 21^{ου} αιώνα είναι η επανάσταση της πληροφορίας η οποία επηρεάζει ριζικά κάθε έκφανση της κοινωνικής, οικονομικής και πολιτικής ζωής⁹. Τα αποτελέσματα αυτής της αλλαγής έχουν οδηγήσει σε μια κοινωνία η οποία είναι βασισμένη στην πληροφορία και στα συστήματα επεξεργασίας αυτής. Η εξέλιξη αυτή έχει ως επακόλουθο τη ριζική αλλαγή στον χαρακτήρα του πολέμου για ακόμη μία φορά μέσα στην ιστορία. Τα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας της πληροφορίας όπως οι δορυφόροι, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν πλέον την κινητήριου δύναμη των μεταμορφώσεων στο χαρακτήρα του σύγχρονου πολέμου.

1.2. Ο Δικτυοκεντρικός Πόλεμος ως μέρος του Πληροφοριακού πολέμου

Διαχρονικά, η τεχνολογία και ο πόλεμος είναι στοιχεία αναπόφευκτα αλληλένδετα, χωρίς, όμως, αποκλειστικά η πρώτη να προσδιορίζει τον τρόπο διεξαγωγής του δεύτερου. Σήμερα, η μεγάλη πρόοδος της επιστήμης της πληροφορικής επηρεάζει άμεσα τόσο τη σχεδίαση των νέων οπλικών συστημάτων, όσο και τον έλεγχο και διοίκηση των σύγχρονων στρατιωτικών οργανισμών. Στη σύγχρονη εποχή, η εκτίμηση της μαχητικής ισχύος ενός κράτους με βάση στοιχεία όπως ο πληθυσμός του, η γεωγραφική του θέση, το μέγεθος του οπλοστασίου του ή η δύναμη της οικονομίας του δεν αποτελούν πια τα μοναδικά κριτήρια. Η δυνατότητα του να επιτύχει πληροφοριακή υπεροχή (Information Superiority) στο σύγχρονο θέατρο επιχειρήσεων αποτελεί πλέον καθοριστικό παράγοντα στρατιωτικής ισχύος. Με τον όρο πληροφοριακή υπεροχή εννοούμε την ικανότητα των ένοπλων δυνάμεων να συλλέγουν, επεξεργάζονται και να διανέμουν μία αδιάκοπη ροή πληροφοριών ενώ παράλληλα εκμεταλλεύονται ή μειώνουν την ικανότητα του εχθρού να κάνει το ίδιο¹⁰.

Μέσα σε αυτό το νέο πλαίσιο, ο χαρακτήρας του πολέμου αλλάζει για άλλη μια φορά για να μετασχηματιστεί στο λεγόμενο Πληροφοριακό Πόλεμο (Information

Warfare)¹¹. Στον Πληροφοριακό Πόλεμο δίνεται κυρίαρχη βαρύτητα στην πληροφορία, η οποία θεωρείται ως ένα από τα κέντρα ισχύος ενός σύγχρονου κράτους. Τα συστήματα συλλογής, επεξεργασίας και διανομής της έχουν για το λόγο αυτό ιδιαίτερη βαρύτητα για την εθνική ασφάλεια ενός κράτους. Οι Gongora και Riekhoff διευκρινίζουν ότι ο Πληροφοριακός Πόλεμος δεν αποτελεί από μόνος του αυτόνομο εργαλείο και διακρίνουν επτά επιμέρους επιχειρήσεις καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους για την διαχείριση της πληροφορίας¹²:

- (α) Επιχειρήσεις ενάντια στο Σύστημα Ελέγχου και Διοίκησης του εχθρού (Command and Control Warfare (C2W),
- (β) Επιχειρήσεις που στοχεύουν στο σύστημα συγκέντρωσης πληροφοριών του εχθρού,
- (γ) Επιχειρήσεις Ηλεκτρονικού Πολέμου,
- (δ) Ψυχολογικές επιχειρήσεις, στις οποίες η πληροφορία χρησιμοποιείται ώστε να επηρεαστεί η κρίση τόσο των φίλων δυνάμεων όσο και των εχθρικών ή των ουδετέρων,
- (ε) Επιχειρήσεις προσβολής των ηλεκτρονικών υπολογιστών του εχθρού, («Hacker Warfare»),
- (στ) Επιχειρήσεις οικονομικού πληροφοριακού πολέμου, όπως είναι για παράδειγμα η διοχέτευση συγκεκριμένων πληροφοριών για την απόκτηση οικονομικής κυριαρχίας και τέλος
- (ζ) στον Κυβερνοπόλεμο (Cyberwarfare), ένα σενάριο φουτουριστικών σεναρίων.

Ο δικτυοκεντρικός πόλεμος αποτελεί, λοιπόν, μέρος του Πληροφοριακού Πολέμου. Οι δικτυοκεντρικές επιχειρήσεις ορίζονται ως οι ενέργειες που στοχεύουν στην εκμετάλλευση της ανθρώπινης και τεχνικής δικτύωσης όλων των στοιχείων μιας κατάλληλα εκπαιδευμένης κοινής δύναμης, ενσωματώνοντας πλήρως τις συλλογικές δυνατότητες, τη γνώση, την εμπειρία, την ενημέρωση, την ανώτερη λήψη αποφάσεων για να επιτευχθεί υψηλού επιπέδου ευελιξία και αποτελεσματικότητα στο σύγχρονο πολύπλοκο, αβέβαιο και δυναμικό τοπίο πολέμου¹³. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει την δικτύωση όλων των δυνάμεων με σκοπό τη χρησιμοποίηση όλων των στοιχείων που απορρέουν από αυτές, μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών και μια προσπάθεια διάθεσης των στοιχείων αυτών στα χαμηλότερα επίπεδα.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται συνολική ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου (operations analysis) υπό το πρίσμα των αρχών του Δικτυοκεντρικού Πολέμου (Network Centric Warfare) και εξέταση των μελλοντικών δυνατοτήτων εξέλιξης και επέκτασης του δικτύου όσον αφορά την διεπαφή (interface) με άλλα στρατιωτικά ή

πολιτικά δίκτυα και πλατφόρμες οπλικών συστημάτων κυρίως στον χώρο της αεράμυνας.

ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ LINK-16

2.1. Εισαγωγή

Στην εποχή της κυριαρχίας της πληροφορίας ο τρόπος διεξαγωγής των στρατιωτικών επιχειρήσεων αλλάζει για ακόμη μία φορά μέσα στην ιστορία του πολέμου. Η δικτύωση όλων των οπλικών συστημάτων με στόχο την αυτοματοποιημένη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των μαχητών αποτελεί πλέον προτεραιότητα κάθε σύγχρονου στρατιωτικού οργανισμού. Τα βασικά στοιχεία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διοίκησης και ελέγχου είναι:

Οι αισθητήρες που συγκεντρώνουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση, την κίνηση και την όλη δραστηριότητα των εχθρικών και φιλικών δυνάμεων.

Τα συστήματα ναυτιλίας που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης των διάφορων μονάδων.

Τα κέντρα διοίκησης όπου συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται οι πληροφορίες και στη συνέχεια δίνονται οδηγίες για την περαιτέρω συνέχιση των επιχειρήσεων.

Οι επικοινωνιακές ζεύξεις μεταξύ των αισθητήρων και των κέντρων διοίκησης καθώς και μεταξύ των κέντρων διοίκησης και των διάφορων μονάδων ώστε να επιτρέπεται η μετάδοση των πληροφοριών και των διάφορων εντολών.

Είναι προφανές λοιπόν ότι ο ρόλος των επικοινωνιών, είναι πολύ σημαντικός στην όλη δομή ενός συστήματος διοίκησης και ελέγχου. Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε στρατηγικά (strategic) και τακτικά (tactical). Τα στρατηγικά συστήματα διοίκησης και ελέγχου έχουν ως κύριο στόχο την έγκαιρη προειδοποίηση μιας χώρας στην περίπτωση επίθεσης, ενώ τα τακτικά στοχεύουν στη χρήση των επιχειρησιακών δυνάμεων κατά τη διάρκεια των πολεμικών επιχειρήσεων. Τα πρώτα χαρακτηρίζονται από μεγάλες, δυσκίνητες εγκαταστάσεις των οποίων η θέση και τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά, ενώ τα δεύτερα χαρακτηρίζονται από ευκίνητες μονάδες και μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα σε οποιαδήποτε μεταβολή κατά τη διάρκεια μιας σύρραξης. Λόγω των απρόβλεπτων εξελίξεων που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια των τακτικών επιχειρήσεων, είναι ουσιώδες να υπάρχει πλήρης επικοινωνία μεταξύ της διοίκησης και των μονάδων καθώς και μεταξύ των μονάδων ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα εναντίον του εχθρού.

Οι ζεύξεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα διοίκησης και ελέγχου είναι ψηφιακές. Αυτό συμβαίνει γιατί η ψηφιακή τεχνολογία που εφαρμόζεται στους αισθητήρες και στα ηλεκτρονικά συστήματα διοίκησης και ελέγχου καθιστά υποχρεωτική τη δυνατότητα μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων κόμβων ενός δικτύου (αεροσκάφη, πλοία, μονάδες στρατού ξηράς). Στα τελευταία 20 χρόνια η ανάπτυξη των ψηφιακών ζεύξεων δεδομένων (Digital Data Links, DDL), έχει επικεντρωθεί στη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ των μονάδων διοίκησης και ελέγχου. Η πολυσύνθετη μορφή των σημερινών, αλλά πολύ περισσότερο των μελλοντικών πεδίων μαχών, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για λήψη πληροφορίας σε "πραγματικό χρόνο" και την ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων ηλεκτρονικού πολέμου (Electronic Warfare, EW), έχουν όπως είναι προφανώς ξεπεράσει τις ικανότητες των σημερινών συστημάτων DDL που βρίσκονται σε υπηρεσία στις χώρες μέλη του NATO αλλά και εκτός αυτού. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών, ικανό να αντιστέκεται στα ηλεκτρονικά αντίμετρα (**Electronic Coimtermeasures Resistant Communication System, ERCS**), και να παρέχει ασφαλή μετάδοση πληροφοριών μεταξύ όλων των μονάδων που εμπλέκονται σε αεροπορικές επιχειρήσεις. Επιπλέον το NATO έχει εκδηλώσει το ενδιαφέρον του για ένα **Πολυλειτουργικό Σύστημα Διανομής Πληροφοριών (Multi-functional Information Distribution System, MIDS)**. Το σύστημα που ανταποκρίνεται στις παραπάνω απαιτήσεις είναι το **Κοινό Σύστημα Τακτικών Πληροφοριών (Joint Tactical Information System, JTIDS)** και έχει αναπτυχθεί για να εκπληρώσει τις ανάγκες των αμερικανικών δυνάμεων. Αποτελεί δε το αποτέλεσμα των πολύτιμων εμπειριών που αποκτήθηκαν όσον αφορά τη λειτουργία του δικτύου διοίκησης και ελέγχου στον πόλεμο του Περσικού Κόλπου και στον πόλεμο στην Σερβία . Το JTIDS έχει σχεδιαστεί με στόχο τη μεγάλη χωρητικότητα του δικτύου, την ασφάλεια, την ευελιξία, τη μετάδοση σε "πραγματικό χρόνο", την προστασία σε ηλεκτρονικό πόλεμο και την ικανότητα επιβίωσης (*επιβιωσιμότητα*) των ολοκληρωμένων συστημάτων επικοινωνίας.

Το Link-16 είναι μια ζεύξη δεδομένων που χρησιμοποιείται από τις δυνάμεις του NATO στα πλαίσια των θεάτρων επιχειρήσεων από το 1994 και έχει δοκιμαστεί στον πόλεμο του Κόλπου και στον πόλεμο της Σερβίας με μεγάλες επιτυχίες. Η ζεύξη δεδομένων Link-16 λειτουργεί με τις βασικές αρχές πάνω στις οποίες βασίζονται παλαιότερες ζεύξεις δεδομένων όπως το Link-11 και το Link-4A αλλά έχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες σε σχέση με αυτές.

Το NATO χρησιμοποιεί την ονομασία Link-16 όταν αναφέρεται στην τακτική ψηφιακή ζεύξη πληροφοριών TADIL J (Tactical Digital Information Link). Το Link-16 είναι επομένως συνώνυμο με το TADIL J και χρησιμοποιεί το κοινό σύστημα διανομής τακτικών πληροφοριών JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System). Ο όρος JTIDS αναφέρεται στα εξαρτήματα επικοινωνίας του Link-16 και ταυτίζεται με το πολυλειτουργικό σύστημα διανομής πληροφοριών MIDS (Multifunctional Information Distribution System) που χρησιμοποιεί το NATO.

Η ζεύξη δεδομένων **Link-16**, που αποτελεί τη νέα μορφή ζεύξεων δεδομένων για το NATO χρησιμοποιεί το σύστημα **JTIDS** που μεταξύ των άλλων περιλαμβάνει: λογισμικό για το τερματικό τύπου **Class 2**, ολοκληρωμένα υπολογιστικά συστήματα, ράδιο βοηθήματα και κυματομορφή μεγάλης χωρητικότητας, ασφαλή και με ικανότητα αποφυγής παρεμβολών.

Το Link-16 χρησιμοποιεί για την μετάδοση πληροφοριών **μηνύματα των σειρών J** που έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την αρχιτεκτονική του JTIDS. Βασίζονται κατά κύριο λόγο στο αμερικανικό πρότυπο μηνυμάτων που χρησιμοποιεί το σύστημα **TADIL-J (Tactical Digital Information Link)**, όρος συνώνυμος του Link-16. Η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται από τα αμερικανικά ένοπλα σώματα πλην του Ναυτικού, που υιοθετεί τον όρο Link-16, όπως ακριβώς και με τα συνώνυμα TADIL-A με Link 11, TADIL-B με Link-1 1B και TADIL-C με το Link-4A. Η Ελλάδα επιθυμεί να εισάγει το νέο αυτό τρόπο διασύνδεσης των μονάδων, ως κύριο, στα πλαίσια του προγράμματος του NATO ACCS και για τον λόγο αυτό γίνεται η ανάλυση του συστήματος στις επόμενες παραγράφους.

Συνοπτικά η νέα αρχιτεκτονική στην οποία στηρίζεται η δομή του JTIDS επομένως και το Link-16 παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες-λειτουργίες:

- Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο σε τακτικό επίπεδο (real time)
- Ακριβής γνώση της θέσης του συμμετέχοντος
- Ασφάλεια
- Ευκινησία
- Ηλεκτρονικά αντίμετρα και αντίσταση σε αυτά
- Επιβιωσιμότητα
- Υψηλή χωρητικότητα δεδομένων και μεγάλο ρυθμό

εκπομπής τους (από 57 Kbps έως 115 Kbps)

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί λεπτομερώς η ζεύξη δεδομένων Link-16 ενώ θα μελετηθεί η αρχιτεκτονική και η λειτουργία του παραπάνω συστήματος. Στόχος είναι η σε βάθος κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μεταδίδονται τα δεδομένα και του τρόπου συντονισμού των συμμετεχόντων στο δίκτυο, υπό την αιγίδα του Link-16.

2.2. Περιγραφή Τακτικού Δικτύου Link16 (L-16)

Το Link16 είναι ένα σύστημα ψηφιακής ζεύξης δεδομένων που δημιουργήθηκε με σκοπό να υποστηρίζει επιχειρησιακές ανάγκες επικοινωνίας, ναυτιλίας και αναγνώρισης φίλου- εχθρού. Χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή κοινών τακτικών δεδομένων χρησιμοποιώντας συνδυασμό των VHF/UHF

συχνοτήτων με αντιπαραβολικές ικανότητες. Το Link16 είναι ένα σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας, σχεδιασμένο για την ανταλλαγή σταθερών και προκαθορισμένων μηνυμάτων και την υλοποίηση δικτύων φωνής με τη χρήση των JTIDSclass-2 ή MIDS Terminals. Είναι το πιο σύγχρονο από τα τακτικά ψηφιακά δίκτυα και τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

1. Πλήρως Δικτυακό (Netted), αφού παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης επικοινωνίας και ταυτόχρονης ενημέρωσης των συμμετεχόντων στο δίκτυο

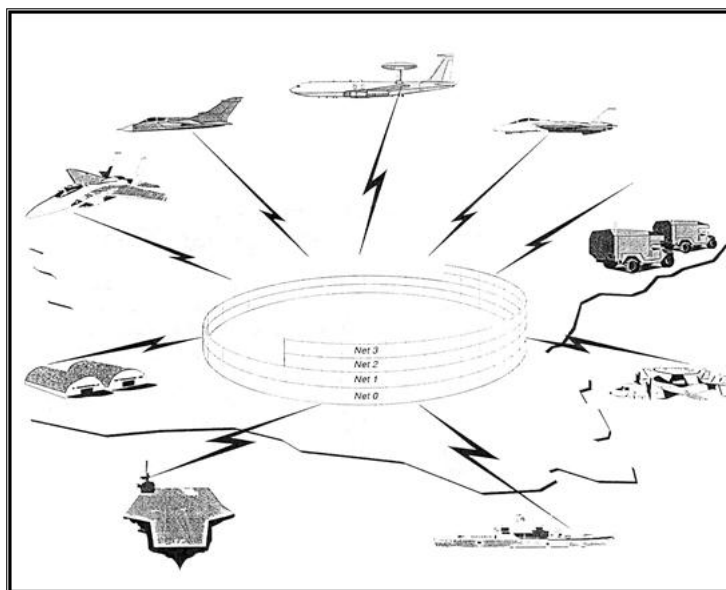
2. Μη Κομβικό (Nodeless), διότι δεν απαιτείται η ύπαρξη κομβικού σταθμού (Network Control Station)

3. Μεγάλης χωρητικότητας (High-Capacity), διότι έχει τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου πληροφοριών

4. Πολλαπλών Λειτουργιών (Multifunctional), διότι υποστηρίζει διαφορετικά είδη επιχειρησιακών απαιτήσεων

5. Ασφαλές (Secure), διότι διασφαλίζεται η προστασία και το Απόρρητο των πληροφοριών με την αυτόματη κρυπτογράφηση και την προηγμένη επεξεργασία των σημάτων (Advanced Signal Processing)

6. Ανθεκτικό σε περιβάλλον Ηλεκτρονικού Πολέμου (ECM Resistant)



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική δομή L-16

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του L-16 στηρίζεται στην αρχιτεκτονική Time Division Multiple Access (TDMA). Είναι ένα σύστημα ακρόασης στο οποίο κάθε πλατφόρμα που συμμετέχει έχει συγκεκριμένη μονάδα χρόνου εντός της οποίας διαβιβάζει οποιαδήποτε πληροφορία διαθέτει (εικόνα αέρος, επιφανείας, πληροφορίες ΗΠ κ.α.) περισσότερη ανάλυση θα γίνει στο επόμενο

κεφάλαιο. Ο καθορισμός των χρόνων εντός των οποίων κάθε οπλικό σύστημα διαβιβάζει τις πληροφορίες του περιγράφεται στη διαταγή διασύνδεσης (OPTASK LINK). Ένα ακόμη βασικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής του δικτύου είναι η λειτουργία NPG (Net Participation Groups). Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει σε ένα συγκεκριμένο χρήστη του δικτύου να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες όποτε αυτός το θελήσει.

Με άλλα λόγια το NPG επιτρέπει τη λειτουργική ομαδοποίηση των μηνυμάτων του L-16 που παρέχει σε αυτό το πρωτόκολλο τις εξής δυνατότητες διαβίβασης πληροφοριών: έλεγχος Α/Φ και οπλικών συστημάτων και ανάθεση αποστολών, διάθεση πληροφοριών TACAN, δυνατότητα πλοήγησης, εκπομπή και λήψη φωνής, συνεχής αναφορά της γεωγραφικής θέσης και ταυτότητας των εμπλεκομένων, επίγειου, θαλάσσιου και υποβρύχιου χώρου, πληροφορίες ηλεκτρονικού πολέμου. Τέλος, οι μονάδες που διαθέτουν το Link16 είναι τα τρία ΚΕΠ, η 380Μ.ΑΣΕΠΕ, η 335Μ (διαθέτει F16 plus advanced) και τα δύο Κέντρα Συντονισμού Πληροφοριών 1ο και 2ο ICC (Information Coordination Centre) των Κ/Β Patriot.

2.3. Μετάδοση ψηφιακών δεδομένων μέσω ζεύξεων

Οι ζεύξεις ψηφιακών δεδομένων που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί από το ΝΑΤΟ πριν την καθιέρωση του JTIDS μπορούν να διακριθούν σε τρεις τύπους ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων :

1. **Από σημείο σε σημείο (Point-to-Point).** Στη σύνδεση από σημείο σε σημείο κάθε συμμετέχοντας συνδέεται απευθείας μόνο με κάποιον άλλο συμμετέχοντα ενώ οι μονάδες κατά τεκμήριο είναι σταθερές σε κάποιο σημείο.
2. **Εκπομπής (Broadcast).** Μόνο μία μονάδα κάθε φορά έχει τη δυνατότητα εκπομπής των δεδομένων της προς όλα τα άλλα μέλη που συμμετέχουν στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.
3. **Δικτυωμένη (Netted).** Διάφορες μονάδες μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους στα πλαίσια ενός ευέλικτου δικτύου.

Αυτά τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσα από τηλεφωνικές γραμμές υψηλής ταχύτητας και μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις συχνότητες των UHF και HF ή δορυφορικών ζεύξεων (SATCOM) κάνοντας χρήση των παρακάτω διαμορφώσεων λειτουργίας:

1. **Μονόδρομη (Simplex).** Οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν ανάμεσα σε δύο μονάδες μόνο κατά τη μία κατεύθυνση κάθε φορά.
2. **Αμφίδρομη (Duplex).** Τα μέλη του δικτύου έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα.
3. **Ημιαμφίδρομη (Semi-duplex).** Οι συμμετέχοντες στο δίκτυο μπορούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν δεδομένα αλλά όχι ταυτόχρονα.

Μορφές και τυποποίηση μηνυμάτων

Οι ψηφιακές ζεύξεις δεδομένων έχουν τη δυνατότητα να διοχετεύσουν ένα πολύ μεγάλο πλήθος μεμονωμένων και ταυτοποιημένων πακέτων δεδομένων τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες και υποκατηγορίες. Όσον αφορά το χώρο των τακτικών επιχειρήσεων, τα δεδομένα ομαδοποιούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. **Συνδυασμένη εικόνα.** Η συνδυασμένη εικόνα μπορεί να υποδιαιρεθεί στους εξείς τομείς: του αέρα, της επιφάνειας, του χώρου κάτω από την επιφάνεια και του ηλεκτρονικού πολέμου.
2. **Διαχείριση αποστολής (Mission management).** Στην ομάδα αυτή τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για το συντονισμό των επιχειρήσεων σε θάλασσα και αέρα.
3. **Διοίκηση και Έλεγχος (Command and Control).** Πρόκειται για την ομάδα δεδομένων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τον τακτικό έλεγχο των μονάδων και των οπλικών συστημάτων του δικτύου διοίκησης και ελέγχου.

Προκειμένου τα υπολογιστικά συστήματα των μονάδων που συμμετέχουν σε ένα **Σύστημα Ζεύξης Τακτικών Δεδομένων (Tactical Data Link System)** να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ και να "μεταφράζουν" τις πληροφορίες σωστά, η μορφή των μηνυμάτων έχει τυποποιηθεί εκ των προτέρων και αυτοί οι τύποι αντιστοιχούν ξεχωριστά σε καθένα από τα είδη ζεύξεως δεδομένων. Έτσι για παράδειγμα έχουμε τη σειρά μηνυμάτων S για το Link-1, τη σειρά M για το Link-11 και την σειρά J για το Link-16. Η εν λόγω τυποποίηση έχει πραγματοποιηθεί με βάση τις επίσημες Συμφωνίες Τυποποίησης του NATO, τα STANAG 5511 και 5516.

2.4. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΥ LINK-16

Τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες που συνθέτουν και διαμορφώνουν την αρχιτεκτονική της ζεύξης δεδομένων Link-16 σε συνδυασμό με τον τύπο των μηνυμάτων που χρησιμοποιεί και τα είδη των αποστολών στα οποία λαμβάνει μέρος, παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 3.1.

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	ΤΥΠΟΣ ΜΗΝΥΜΑΤΟΣ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ
---------------	-----------------	---------------------

TDMA	Σταθερού τύπου (fixed format), σειρές J	Επιτήρηση (surveillance)
Απουσία κόμβων	Ελευθέρου κειμένου (free text) για φωνή	Ηλεκτρονικός πόλεμος
Κρυπτογράφηση μηνυμάτων και εκπομπής	Μεταβλητού τύπου (variable format)	Διαχείριση αποστολής (mission management)
Αναπήδηση συχνότητας (frequency)		Συντονισμός οπλικών συστημάτων
UHF, L* μπάντα συχνοτήτων		Εναέριος έλεγχος
Επικοινωνία στα όρια του ορίζοντα (Line of sight)		Από μαχητικό σε μαχητικό
Ομάδα συμμετεχόντων		Ασφαλή φωνή (secure voice)
Στοιβαγμένα δίκτυα (stacked nets)		Ναυτιλία
		Θετική αναγνώριση ταυτότητας (positive identification)

Πίνακας 2.1 Αρχιτεκτονική, μηνύματα και επιχειρησιακή χρήση της ζεύξης Link-16.

Τα κυριότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής του Link-16 και στα οποία θα πρέπει να σταθούμε αναλυτικότερα είναι:

2.4.1 Απουσία κόμβων (Nodelessness)

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ένας κόμβος είναι κάθε μονάδα που λειτουργεί σ' αυτό και η ύπαρξη της απαιτείται προκειμένου να στηριχθεί και να επεκταθεί ένα δίκτυο, διασφαλίζοντας έτσι την ασφαλή και ακριβή μετάδοση δεδομένων. Αν η μονάδα αυτή για κάποιο λόγο πάψει να λειτουργεί τότε με τη σειρά της η ζεύξη θα καταρρεύσει. Ένα παράδειγμα ζεύξης με την ύπαρξη κόμβων είναι το Link - 11 ενώ αντίθετα , στο Link – 16 οι εν λόγω κόμβοι απουσιάζουν. Κύριος λόγος της έλλειψης κόμβων στο Link - 16 είναι η αρχή λειτουργίας του, η πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου TDMA, βάση της οποίας συγκεκριμένες ομάδες από χρονικές σχισμές (time slots) έχουν εξ αρχής αντιστοιχηθεί καθένα από τους συμμετέχοντες στο δίκτυο με αποτέλεσμα η

λειτουργία μιας μονάδας να μην επηρεάζει τη λειτουργία κάποιας άλλης και κατά συνέπεια τη λειτουργία του δικτύου. Αυτό που πλησιάζει την έννοια του κόμβου στο Link - 16 είναι η μονάδα Κόμβος Χρονικής Αναφοράς (NTR, Nod Time Reference) που χρησιμοποιείται σαν χρονικό σημείο αναφοράς για συνεργαζόμενα μέλη του δικτύου, για την έναρξη λειτουργίας του δικτύου και για το συγχρονισμό κάθε νεοεισερχόμενου μέλους σ' αυτό. Από τη στιγμή όμως που θα εγκατασταθεί ένα σταθερό δίκτυο η λειτουργία του NTR δεν κρίνεται αναγκαία.

2.4.2 Ασφάλεια (Security)

Η ασφάλεια στη μετάδοση των δεδομένων στη ζεύξη Link-16 καθορίζεται κατά κύριο λόγο από δύο μεταβλητές κρυπτογράφησης την **MSEC** και την **TSEC**. Η πρώτη κρυπτομεταβλητή, η MSEC (Message Security), ευθύνεται για τον τρόπο κρυπτογράφησης των μηνυμάτων ώστε το περιεχόμενο τους να μη γίνεται γνωστό σε μη εξουσιοδοτημένους φορείς. Εκτός όμως από την κρυπτογράφηση των δεδομένων θα πρέπει να διασφαλιστεί και η ασφάλεια στην επικοινωνία και στη μετάδοση των μηνυμάτων καθώς οι επιθέσεις ηλεκτρονικού πολέμου (π.χ. παρεμβολές, υποκλοπές) που δέχονται στο σύγχρονο πεδίο μάχης είναι ιδιαίτερες ισχυρές. Η δεύτερη κρυπτομεταβλητή TSEC (Transmission Security) αναλαμβάνει την ασφάλεια εκπομπής των δεδομένων. Καθορίζει λοιπόν, σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους, τη μορφή και το μέγεθος του χρόνου jitter που χρησιμοποιείται για να προστατευθεί το μήνυμα από τις παρεμβολές που απευθύνονται στα καθαρά δεδομένα και τη μορφή του ψευδοτυχαίου θορύβου που εισάγεται που εισάγεται στο μήνυμα καινά γίνει δύσκολο στον εντοπισμό του. Τέλος μαζί με τον **αριθμό δικτύου (net number)** καθορίζει την μορφή και το σχέδιο αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping), που εκτός από τον διαχωρισμό των δικτύων, συμβάλλει ώστε η κυματομορφή του μηνύματος να μεταβάλλεται συνέχεια και να είναι πολύ δύσκολος ο εντοπισμός του από τις εχθρικές δυνάμεις ηλεκτρονικού πολέμου και τις επίδοξες παρεμβολές τους. Στον παρακάτω πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι κρυπτό μεταβλητές και οι λειτουργίες τους.

Κρυπτομεταβλητή	Τύπος ασφάλειας
MSEC TSEC	Κρυπτογράφηση των δεδομένων του μηνύματος Κρυπτογράφηση της κυματομορφής JTIDS που περιλαμβάνει: <ul style="list-style-type: none"> • Jitter • Ψευδοτυχαίος θόρυβος • Σχέδιο αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping pattern)

Πίνακας 2.2 Οι κρυπτομεταβλητές και ο ρόλος τους στην ασφάλεια του Link-16

2.4.3 Ομάδα Συμμετεχόντων Δικτύου (Network Participation Group)

Οι σχισμές χρόνου του δικτύου JTIDS αποδίδονται συνήθως σε μία ή περισσότερες **Ομάδες Συμμετεχόντων Δικτύου (Network Participation Group, NPG)**. Κάθε NPG χαρακτηρίζεται από τη λειτουργία του και από τα επιχειρησιακά του καθήκοντα και κατά συνέπεια από τον τύπο των μηνυμάτων που μεταδίδονται σ' αυτό. Χαρακτηριστικά NPG είναι:

- Επιτήρησης (Surveillance)
- Ηλεκτρονικού πολέμου (Electronic Warfare)
- Διαχείρισης αποστολής (Mission Management)
- Συντονισμού οπλικών συστημάτων (Weapons Coordination)

- Εναέριου ελέγχου (Air Control)
- Από Μαχητικό σε Μαχητικό (Fighter-to-Fighter)
- Ασφαλής φωνής (Secure Voice)
- Ακριβούς εντοπισμού, ταυτοποίησης και κατάστασης συμμετέχοντος (Precise Participant Location, Identification and Status)

Η διαίρεση αυτή του δικτύου σε λειτουργικές ομάδες NPG επιτρέπει στις μονάδες του δικτύου JU να συμμετέχουν μόνο στο NPG του οποίου η λειτουργία και η αποστολή ταυτίζεται με τις δικές του. Προφανώς όλες οι μονάδες C² μπορούν να συμμετέχουν στα παραπάνω NPG με μοναδική εξαίρεση το NPG από Μαχητικό σε Μαχητικό.

2.4.4 Στοιβαγμένα δίκτυα (Stacked Nets)

Πολλές φορές διαφορετικά δίκτυα χρησιμοποιούν το ίδιο σετ σχισμών χρόνου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της **τεχνικής αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping)** βάση της οποίας μεταβάλλεται ψευδοτυχαία και με γρήγορο ρυθμό η συχνότητα εκπομπής της κυματομορφής JTIDS. Λόγω ακριβώς αυτής της αναπήδησης αποτρέπονται οι αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των δικτύων και οι συγκρούσεις διαφορετικών μηνυμάτων και δεδομένων. Είναι γνωστό ότι οι ζεύξεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικές εφαρμογές πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο ασφαλείς. Στο Link -16 μια συγκεκριμένη ομάδα σχισμών χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραπάνω από ένα δίκτυα τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με βάση το διαφορετικό σχέδιο αναπήδησης συχνότητας που τους αποδίδεται. Η μορφή και το σχέδιο της αναπήδησης συχνότητας για κάθε δίκτυο, καθορίζεται από μια μεταβλητή κρυπτογράφησης, την κρυπτό μεταβλητή TSEC, και τον αντίστοιχο αριθμό δικτύου. Τα δίκτυα δε που έχουν την ίδια TSEC και την ίδια MSEC αλλά διαφορετικό αριθμό δικτύου, ονομάζονται **στοιβαγμένα δίκτυα (stacked nets)**. Απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρξουν τέτοιου είδους δίκτυα είναι να είναι καθένα από αυτά *μεταξύ τους ανεξάρτητα (mutually exclusives)*. Τα στοιβαγμένα δίκτυα είναι κυρίως χρήσιμα στον εναέριο έλεγχο και για φωνητικές επικοινωνίες στις οποίες παρέχεται σε καθένα από τα δύο NPG 127 διαφορετικά κανάλια για μετάδοση φωνής. Συννομίζοντας, οι σχισμές χρόνου μπορούν να στοιβαχτούν σε πολλαπλά επάλληλα δίκτυα τα οποία διακρίνονται μεταξύ τους από το διαφορετικό σχέδιο μεταπήδησης συχνότητας που διαθέτει το καθένα.

Σε κάθε σχισμή χρόνου μια μονάδα JU είτε εκπέμπει είτε λαμβάνει δεδομένα στο δίκτυο. Προκειμένου να εφαρμοσθεί η δομή του στοιβαγμένου δικτύου, οι συμμετέχοντες σε κάθε δίκτυο αποκλειστικώς ανεξάρτητοι μεταξύ τους (mutually exclusive), τα στοιβαγμένα δίκτυα είναι ιδιαίτερος χρήσιμα για του σκοπούς Εναέριου Ελέγχου (Air Control) με και για τη μετάδοση Φωνής (ύπαρξη 127 κυκλωμάτων για κάθε ένα από τα δύο NPG φωνής).

Συνοπτική παρουσίαση των νέων δυνατοτήτων της ζεύξης δεδομένων Link-16.

Η σειρά μηνυμάτων J που χρησιμοποιεί το Link-16 επιτρέπει τη μετάδοση όγκου τακτικών πληροφοριών 2 με 3 φορές περισσότερο απ' ότι η σειρά μηνυμάτων M της ζεύξης Link-11. Συγκεκριμένα μέρη των μηνυμάτων έχουν αυξηθεί σε μέγεθος προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των δεδομένων που μεταδίδονται ενώ παράλληλα έχουν εμφανισθεί νέες λειτουργίες και εφαρμογές. Οι περιοχές που έχουν υποστεί τις βελτιώσεις και τις αλλαγές είναι:

- Ο αριθμός των συμμετεχόντων (Number of Participants)
- Αριθμός ίχνους (Track Number)
- Ποιότητα ίχνους (Track Quality)
- Ταυτότητα ίχνους (Track Identification)
- Φίλια κατάσταση (Friendly Status)
- Αυξημένη granularity στις μετρήσεις
- Γραμμές και περιοχές (Lines and Areas)
- Γεωδαιτική θέση (Geodetic Position)
- Σχετική ναυτιλία (Relative Navigation)
- Ηλεκτρονικός πόλεμος (Electronic Warfare)
- Σημεία εδάφους και ίχνη (Land Points and Tracks)

Οι κυριότερες από τις παραπάνω βελτιώσεις θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στη συνέχεια.

2.4.5 Αριθμός συμμετεχόντων

Σε κάθε μονάδα JTIDS αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη και μοναδική διεύθυνση. Στη ζεύξη Link - 16 οι διευθύνσεις αυτές είναι πενταψήφιοι οκταδικοί αριθμοί και

ξεκινούν από το 00001 έως το 77777, ενώ στο Link - 11 οι αντίστοιχες διευθύνσεις είναι τριψήφιοι οκταδικοί αριθμοί που ξεκινούν από το 001 και καταλήγουν στο 177. Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η συνεργασία μεταξύ των δύο διαφορετικών ζεύξεων, στις μονάδες διοίκησης και ελέγχου JU αποδίδονται διευθύνσεις κάτω από 00177. Έτσι οι διευθύνσεις από 00001 έως 00177 του Link-16 είναι ισοδύναμες με τις διευθύνσεις από 0001 έως 177 του Link-11 και είναι χαρακτηριστικές και μοναδικές για κάθε μονάδα είτε αυτή είναι PU (Link-11) είτε είναι JU C² (Link-16). Οι μονάδες που δεν είναι διοίκησης και ελέγχου, π.χ. μαχητικά, χρησιμοποιούν μόνο τις διευθύνσεις που ξεκινούν από 00200 και καταλήγουν στην 77776. Η διεύθυνση 77777 προσδιορίζει το διαχειριστή δικτύου Link-16 (Network Manager). Έτσι για παράδειγμα η διεύθυνση 00034 που χρησιμοποιείται στο Link-16, είναι αντίστοιχη της 034 του Link-11. Όταν δε μια μονάδα λειτουργεί και στις δύο ζεύξεις το ίδιο χρονικό διάστημα χρησιμοποιεί την ίδια διεύθυνση και στις δύο ζεύξεις.

2.4.6 Αριθμός ίχνους (Track Number, TN)

Για τον αριθμητικό προσδιορισμό των ίχνων, το Link-16 χρησιμοποιεί ένα αλφαριθμητικό σύστημα πέντε χαρακτήρων, από το 00001 έως το 77777 ή από το 0A000 έως το ZZ777, επιτρέποντας την ύπαρξη 524.284 TN. Στο Link-11 αντίστοιχα το πλήθος των TN είναι μόνο 4.092 στο διάστημα 0001 - 7771. εξαιτίας της ύπαρξης του TDMA στο JTIDS, δεν γίνεται η εν λόγω ζεύξη να λειτουργήσει σε διαμόρφωση δεξαμενής TN, όπως στο Link -11, όπου υπάρχει μια κοινή δεξαμενή από TN στην οποία έχουν πρόσβαση οι διάφορες μονάδες και μπορούν να μοιράζονται κάθε φορά τα TN μεταξύ τους. Αυτό δικαιολογεί και το γεγονός της ύπαρξης μεγάλου πλήθους TN στο Link-16 που απαιτούνται προκειμένου να ικανοποιηθούν οι αυξημένες απαιτήσεις. Τέλος, το ίχνος ή η μονάδα που αναφέρεται σαν TN 00200 στο Link-16 είναι το ίδιο με το ίχνος ή τη μονάδα 0200 στο Link-11.

2.4.7 Ποιότητα ίχνους (Track Quality)

Το Link-16 χρησιμοποιεί μια κλίμακα βαθμολόγησης, από το 0 μέχρι το 15, της ποιότητας στόχου (Track Quality, TQ) που είναι ένα μέγεθος που καθορίζεται από την ακρίβεια της θέσης του ίχνους. Ο υψηλότερος βαθμός TQ αντιστοιχεί σε

ακρίβεια καλύτερης των 50 ποδιών. Στο Link -11η αντίστοιχη κλίμακα φτάνει μέχρι το 7.

2.4.8 Διακρίβωση της ταυτότητας του ίχνους (Track Identification)

Το πεδίο της διακρίβωσης της ταυτότητας στο Link-16 είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Πιο συγκεκριμένα το ID των ίχνων περιλαμβάνει το είδος της πλατφόρμας, τη δραστηριότητα του, τις προδιαγραφές του τύπου του και την εθνικότητα του. Στο Link-11 αντίστοιχα τα πεδία περιορίζονται στην αναγνώριση της ταυτότητας.

2.4.9 Φίλια κατάσταση (Friendly Status)

Τα μηνύματα της σειράς J περιέχουν πολύ περισσότερες πληροφορίες όσον αφορά την κατάσταση κάποιου φίλιου αεροσκάφους οι οποίες προφανώς δεν περιλαμβάνονται στο Link - 11. Αυτές είναι: κατάσταση εξοπλισμού, κανάλια ραντάρ και βλημάτων, διαθέσιμο καύσιμο, ικανότητα πυρός και άλλες δευτερεύουσες.

Οι υπόλοιποι τομείς που έχουν υποστεί βελτίωση σε σχέση με το Link-11 αναφέρονται κατά κύριο λόγο σε πληροφορίες θέσης, ταχύτητας και ταυτότητας ίχνους όπως και ικανότητες π.χ. σχετική ναυτιλία και ηλεκτρονικός πόλεμος. Στο παρακάτω πίνακα 3.3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βελτιώσεις που έχει υποστεί το Link-16 σε σχέση με τον προκάτοχο του

Σύγκριση στην ανταλλαγή πληροφοριών		
	Link-11	Link-16
Διευθύνσεις	001-176	00001-77777
Αριθμός ίχνους	0200-7777	00200-ZZ777
Ποιότητα ίχνους	0-7	0-15
Ταυτοποίηση ίχνους	[D amp	προσδιορισμός τύπου
Πληροφορίες κατάστασης	Περιορισμένες	λεπτομερείς

Ακρίβεια θέσης	500 yds	32 πόδια
Ακρίβεια ταχύτητας	28dmh	2dmh
Γραμμές και περιοχές	όχι	ναι
Πεδίο δράσης	512x512	παγκόσμιο
Σχετική ναυτιλία	περιορισμένη	λεπτομερής
Ηλεκτρονικός πόλεμος	Περιορισμένη	λεπτομερής

Πίνακας 2.3 Σύγκριση επιδόσεων των Link-11 και Link-16.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο μέρος του κεφαλαίου, η ανταλλαγή πληροφοριών με τη μορφή ψηφιακών δεδομένων Μέσω της ζεύξης Link-16 καθορίζεται από το πρότυπο μηνυμάτων της σειράς J. Εκτός όμως από την σειρά J, υπάρχει και μια άλλη σειρά μηνυμάτων, αυτά των σειρών N. Τα μηνύματα της σειράς N εφαρμόζονται στο Μοντέλο 5 του Link -16 και ανταλλάσσονται μεταξύ των TDS Model-5 και C2P Model-5. Τα μηνύματα αυτά περιέχουν τακτικές πληροφορίες που έχουν κανονικοποιηθεί προκειμένου να είναι ανεξάρτητες από το είδος της ζεύξης που χρησιμοποιείται κάθε φορά για τη μετάδοση ή τη λήψη τους. Με άλλα λόγια το Μοντέλο-5 είναι η πλήρης και πιο άρτια εφαρμογή του Link - 16. Αντίθετα στο Μοντέλο-4 τα δεδομένα έρχονται μέσω των ζεύξεων Link - 11 και Link - 4A και μετατρέπονται στο C2P στην κατάλληλη μορφή για το Link -16. Τέλος τα μηνύματα των σειρών N επιτρέπουν τη μετάδοση λεπτομερέστερων αναφορών και πληροφοριών.

2.5. Σειρές μηνυμάτων J (J-series)

Όπως όλες οι ζεύξεις τακτικών δεδομένων, έτσι και το Link-16 μεταφέρει τις πληροφορίες με τη βοήθεια συγκεκριμένου και ειδικού τύπου μηνυμάτων που πληρεί τις ανάλογες απαιτήσεις της ζεύξης.

Τα μηνύματα αυτά είναι γνωστά ως μηνύματα των σειρών J και είναι αυτά που ανταλλάσσουν μεταξύ τους οι μονάδες TADIL - J. Η δομή των μηνυμάτων αποτελείται από διάφορα πεδία (fields) καθένα από τα οποία με τη σειρά του

αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό bit που μπορούν να κωδικοποιηθούν σύμφωνα με τα κατάλληλα σχέδια για να στείλουν τις πληροφορίες με ασφάλεια.

Κάθε μια σειρά μηνυμάτων J προσδιορίζεται από **μια ετικέτα και μια υποετικέτα (label and sublabel)**. Η ετικέτα αποτελείται από 5 bit με αποτέλεσμα να έχω 32 πιθανές ετικέτες ενώ παράλληλα τα 3 bit των υποετικετών εισάγουν οκτώ υποκατηγορίες για καθένα από τους 32 τύπους. Συνολικά λοιπόν έχουμε 256 πιθανές διαφορετικές σειρές μηνυμάτων J. Στο σύνολο αυτών περιλαμβάνονται τύποι μηνυμάτων όμοιοι με τις σειρές M για φίλια κατάσταση, επιτήρηση, ηλεκτρονικό πόλεμο και ενεργοποίησης όπλων αλλά και σειρές όμοιες με τις σειρές V και R-στον πίνακα αναφέρονται με λεπτομέρεια όλοι οι τύποι των μηνυμάτων J.

Στα συστήματα επί των πλοίων, η συσκευή C2P παράγει μηνύματα των σειρών J από τα κανονικοποιημένα δεδομένα των σειρών N που λαμβάνονται από τα τακτικά συστήματα. Επίσης το C2P έχει τη δυνατότητα να προωθήσει δεδομένα μεταξύ των δύο διαφορετικών ζεύξεων Link-16 και Link-11. Στα εναέρια συστήματα που δεν υπάρχει το C2P, τα μηνύματα των σειρών J επεξεργάζονται κατευθείαν από τους υπολογιστές των αεροσκαφών.

ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

TDMA ΚΑΙ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ JTIDS

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA), πρώτα γενικά όπως αυτή βρίσκει γενικές εφαρμογές και στη συνέχεια ειδικότερα ποιες παραμέτρους έχει αυτή στο Link-16, που την κάνουν να ξεχωρίζει από τις άλλες χρήσεις της. Αξίζει να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη τεχνική δεν χρησιμοποιείται για πρώτη φορά, αφού ήδη οι εφαρμογές της είναι πολλές και σημαντικές (ψηφιακά τηλέφωνα κ.ά.).

3.2. Αρχιτεκτονική του TDMA frame

Στο δίκτυο TDMA κάθε πομπός μεταφέρει ένα ή περισσότερα πακέτα (bursts) στους διάφορους αποδέκτες. Τα bursts αναφοράς μαζί με τα bursts κυκλοφορίας αποτελούν το frame, το οποίο είναι ουσιαστικά η περίοδος εκπομπής. Η δομή τους φαίνεται στο σχήμα 3.1. Οι όροι, που αναφέρθηκαν θα επεξηγηθούν στη συνέχεια.

1. Burst αναφοράς:

Κάθε frame κανονικά αποτελείται από 2 bursts αναφοράς, τα RB1 και RB2. Το πρωτεύον burst αναφοράς (RB1 ή RB2) εκπέμπεται από ένα σταθμό του δικτύου, που ονομάζεται σταθμός πρωτεύοντος. Το δευτερεύον burst αναφοράς (RB2 ή RB1 αντίστοιχα) εκπέμπεται από τον λεγόμενο σταθμό δευτερεύοντος και διασφαλίζει την αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών του δικτύου. Τα bursts αναφοράς δεν μεταφέρουν πληροφορία κυκλοφορίας και χρησιμοποιούνται ως χρονικές αναφορές για όλους τους χρήστες του δικτύου. Το δεύτερο RB παίζει το ρόλο δικλείδας ασφαλείας, εφ' όσον οι σταθμοί κυκλοφορίας TDMA λαμβάνουν τη χρονική αναφορά απ' το πρωτεύον RB ή απ' το δευτερεύον, αν υπάρχει βλάβη στον πρωτεύοντα σταθμό αναφοράς.

2. Burst κυκλοφορίας:

Τα bursts κυκλοφορίας (TBs) εκπέμπονται απ' τους σταθμούς κυκλοφορίας και μεταφέρουν ψηφιακή πληροφορία. Κάθε σταθμός πιθανόν να εκπέμψει 1 ή περισσότερα TBs σε κάθε TDMA frame, τα οποία τοποθετεί σε αυτό σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο, που καθορίζει την πολιτική εκπομπής των TBs. Το μήκος του TB είναι ανάλογο του μεγέθους της πληροφορίας, που μεταφέρει και δύναται να μεταβληθεί εφ' όσον απαιτηθεί. Το γεγονός ότι το TB κάθε σταθμού λαμβάνει συγκεκριμένη θέση στο frame έχει σαν συνέπεια κάθε σταθμός κυκλοφορίας να μπορεί να αναγνωρίζει την προέλευση των TBs. Επίσης υποβοηθείται ο συγχρονιστής του δικτύου, ώστε να μην επικαλύπτονται τα bursts διαφορετικών σταθμών.

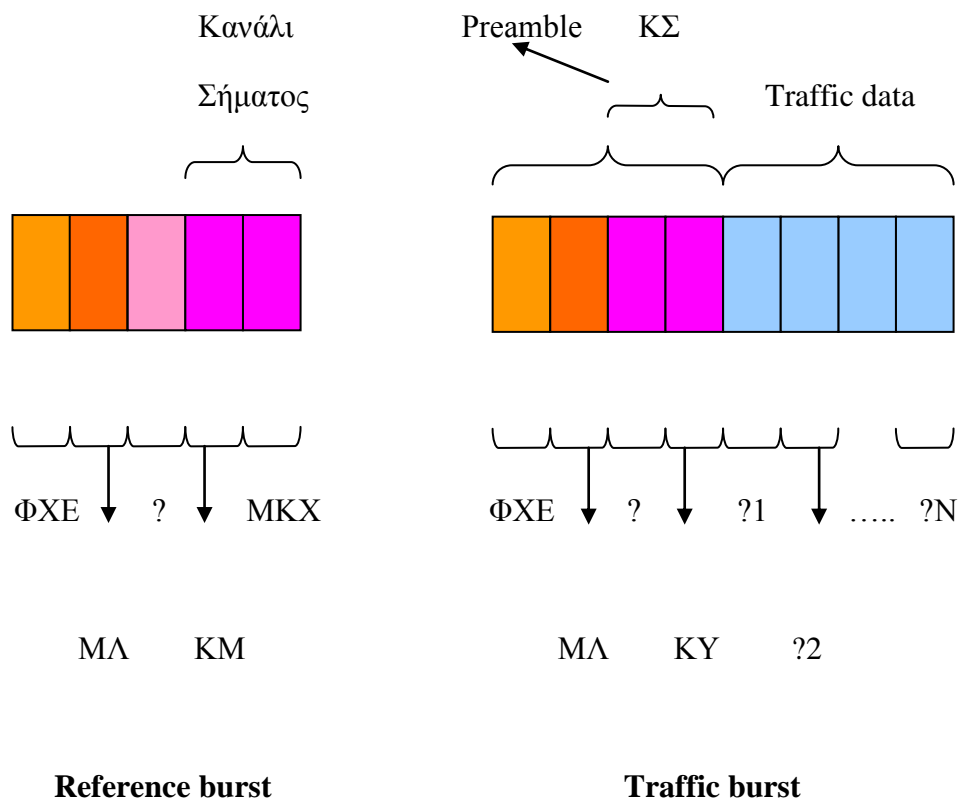
3. Χρόνος ασφαλείας:

Για να αποφεύγουμε την πιθανότητα επικάλυψης απαιτείται ένας χρόνος ασφαλείας. Αυτό οφείλει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να γίνονται αισθητές οι διαφορές στην ακρίβεια χρόνου εκπομπής. Κατά τη διάρκεια του guard time δεν έχουμε εκπομπή πληροφορίας.

Το μήκος του TDMA frame επιλέγεται τέτοιο, ώστε $0,75 < T_f < 20$ msec για φωνητικές ζεύξεις. Συνήθως είναι μια πολυπλεξία των 0,125 msec, η οποία ισούται με την περίοδο δειγματοληψίας του PCM (συχνότητα δειγματοληψίας=8000 Hz). Το μήκος του frame είναι σταθερό για κάθε σύστημα TDMA. Ωστόσο εάν απαιτηθεί, μπορεί να μεταβληθεί, μεταβάλλοντας τον αριθμό των bits σε κάθε frame και αποθηκεύοντας αυτόν τον αριθμό στη μνήμη του δικτύου. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τη δομή ενός burst.

4. Αρχιτεκτονική του TDMA Burst:

Η αρχιτεκτονική του TDMA burst φαίνεται πολύ παραστατικά στο σχήμα 3.1. Στο burst κυκλοφορίας των bits, που μεταφέρουν πληροφορία προηγείται μια ομάδα bits, η οποία ονομάζεται preamble και χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του burst και μεταφορά πληροφοριών διοίκησης και ελέγχου. Στο reference burst περιέχεται μόνο το προοίμιο (preamble), δηλαδή όχι traffic data. Το προοίμιο αποτελείται από 3 μέρη: τον φορέα και χρονικό επανατάκτη, τη μοναδική λέξη και το κανάλι σημάτων.



ΦΧΕ=Φέρον και Χρονικός Επανατάκτης

ΜΛ=Μοναδική Λέξη

ΚΜ=Κανάλι Management

ΜΚΧ=Μεταφορά Καναλιού Χρόνου

ΚΥ=Κανάλι Υπηρεσίας

Σχήμα 3.1 : Συστατικά burst αναφοράς και burst κυκλοφορίας

5. Φέρον και χρονικός επανατάκτης:

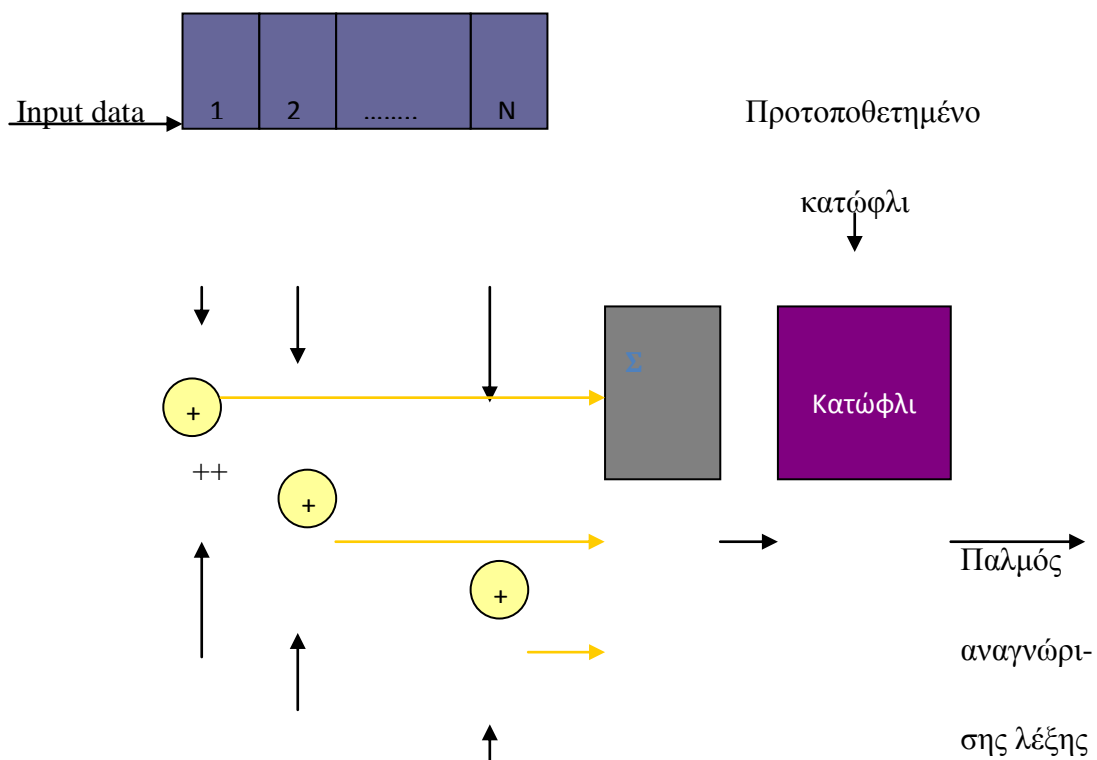
Κάθε burst ξεκινά με μία ακολουθία bits ή συμβόλων, τα οποία βοηθούν τον αποδιαμορφωτή του σταθμού να αποκαλύψει τη φάση του φορέα και να ενεργοποιήσει το ρολόι συγχρονισμού των bits ή των συμβόλων για αποδιαμόρφωση πληροφορίας. Κανονικά το μήκος του φορέα και χρονικού επανατάκτη εξαρτάται από

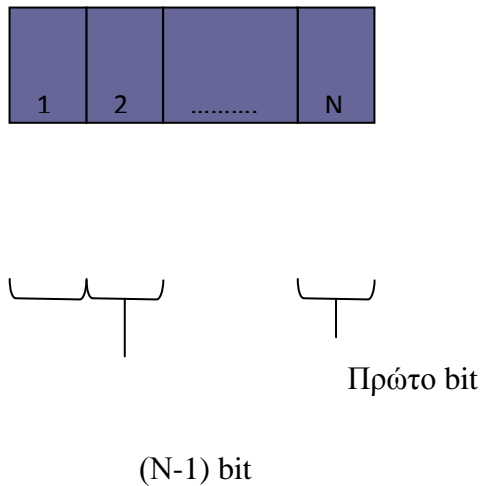
τον λόγο φέροντος προς θόρυβο στην είσοδο του αποδιαμορφωτή και τη μέγιστη απόσταση εντοπισμού στόχου (αβεβαιότητα συχνότητας φέροντος) . Ένας μεγάλος λόγος φέροντος προς θόρυβο σε συνδυασμό με μικρή απόσταση εντοπισμού απαιτούν μικρή ακολουθία φέροντος και χρονικού επανατάκτη.

6. Μοναδική λέξη:

Η μοναδική λέξη παρέχει το χρόνο λήψης του frame, το οποίο επιτρέπει στον σταθμό να εγκλωβίσει τη θέση ενός traffic burst στο frame. Η μοναδική λέξη στο burst κυκλοφορίας μαρκάρει το χρόνο εμφάνισης του burst κυκλοφορίας και παρέχει τον συγχρονισμό του burst, που επιτρέπει στο σταθμό να εξάγει μόνο τα επιθυμητά subbursts μέσα στο burst κυκλοφορίας. Η λέξη είναι μια ακολουθία άσπων και μηδενικών (1 και 0) για την αύξηση της διακριβωτικής ικανότητας.

Στον αποδιαμορφωτή, η λέξη εισέρχεται στον διακριβωτή, όπως ο ψηφιακός συσχετιστής του σχήματος, όπου συσχετίζεται με ένα αποθηκευμένο σχέδιο του εαυτού του.





Σχήμα 3.2 : Σκαρίφημα σύνδεσης συσχετιστή με το κατώφλι εντοπισμού

Ο συσχετιστής αποτελείται από 2 καταγραφείς N-σταδίων (όπου N είναι το μήκος της λέξης), N αθροιστές, ένα συνολικό αθροιστή και ένα κατώφλι εντοπισμού. Κάθε στάδιο του καταγραφέα προωθείται στον αντίστοιχο αθροιστή, του οποίου η έξοδος είναι το 0, όταν το bit ή το σύμβολο στο συγκεκριμένο στάδιο είναι σε συμφωνία με το αποθηκευμένο bit ή σύμβολο της λέξης στην ίδια θέση. Η έξοδος κάθε αθροιστή καταλήγει στον συνολικό αθροιστή και το αποτέλεσμα (άθροισμα) συγκρίνεται με ένα προτοποθετημένο κατώφλι απ' το κατώφλι εντοπισμού. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ της λαμβανόμενης και της προτοποθετημένης λέξης. Ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός λαθών ονομάζεται κατώφλι εντοπισμού ϵ . Όταν τα λάθη συσχετισμού είναι ίσα ή λιγότερα από το 'ε', είναι δυνατός ο εντοπισμός της λέξης.

Ο εντοπισμός της λέξης συμβαίνει τη στιγμή της λήψης του τελευταίου bit ή συμβόλου της λέξης και χρησιμοποιείται για να μαρκάρει τον χρόνο λήψης του frame (Receive Frame Timing – RFT), αν η λέξη ανήκει στο πρωτεύον burst αναφοράς, ή να μαρκάρει τον χρόνο λήψης του burst (Receive Burst Timing – RBT), αν η λέξη

ανήκει στο burst κυκλοφορίας. Η θέση κάθε burst στο frame εξαρτάται από τον receive frame timing και τη θέση κάθε subburst σε ένα traffic burst εξαρτάται από τον burst's receive burst timing. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ακριβής εντοπισμός μιας λέξης είναι μεγίστης σημασίας σε ένα σύστημα TDMA. Για παράδειγμα, όταν η λέξη ενός burst κυκλοφορίας χαθεί τότε όλο το burst κυκλοφορίας χάνεται. Αυτό προκαλεί θόρυβο ή κενά σε μια φωνητική εκπομπή. Στην εκπομπή πληροφοριών ένα block χάνεται και κατά συνέπεια το bit error rate αυξάνεται. Ένας λανθασμένος εντοπισμός του πρωτεύοντος burst αναφοράς ενεργοποιεί τον λανθασμένο RFT και κατά συνέπεια λανθασμένο χρόνο εκπομπής frame (Transmit Frame Timing –TFT), με αποτέλεσμα την εκπομπή χωρίς συγχρονισμό και εμφάνιση επικάλυψης με τα άλλα bursts του εκπομπού. Μια λέξη μπορεί να χαθεί, όταν ο θόρυβος του καναλιού προκαλεί περισσότερα από 'ε' λάθη στην ακολουθία της λαμβανόμενης λέξης, κάνοντας τον αριθμό των bits ή συμβόλων, που βρίσκονται σε ασυμφωνία, να υπερβεί το κατώφλι εντοπισμού 'ε'. Γενικά, για μια δοθείσα λέξη, η αύξηση του κατωφλιού εντοπισμού 'ε' μειώνει την πιθανότητα απώλειας εντοπισμού, αλλά αυξάνει την πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού. Ανάλογα μειώνοντας τα 'ε' για να βελτιώσουμε την πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού, αυξάνουμε την πιθανότητα απώλειας του στόχου.

Η απώλεια της λέξης δεν συμβαίνει συχνά, σε αντίθεση με τον λανθασμένο εντοπισμό. Για να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούμε την 'τεχνική του ανοίγματος'. Η περίοδος του χρόνου ανοίγματος ξεκινά από τον παλμό εντοπισμού της λέξης και ένα frame TDMA. Αργότερα ένα παράθυρο ανοίγματος σχηματίζεται στην αναμενόμενη εμφάνιση του παλμού εντοπισμού της λέξης. Το παράθυρο ανοίγματος επιτρέπει τον εντοπισμό της λέξης μόνο μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το μήκος του παραθύρου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η αβεβαιότητα της ακριβούς θέσης της πλατφόρμας-εκπομπού, που έχει ως αποτέλεσμα την χρονική μετακίνηση της λέξης.

3.3. Η Επεξεργασία Σήματος της τεχνικής TDMA

1.Κανάλι σήματος:

Το κανάλι σήματος του πακέτου αναφοράς αποτελείται γενικά από τα ακόλουθα:

- I. Ένα κανάλι συνδέσεως διάταξης, το οποίο μεταφέρει φωνή (τηλέφωνο) και πληροφορία (τηλέτυπο). Η σύνδεση διάταξης είναι ένας όρος, που χρησιμοποιείται στις τηλεφωνικές ζεύξεις για να περιγράψει ένα κύκλωμα, στο οποίο μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους οι χειριστές (operators) με το προσωπικό συντηρήσεως. Οι χειριστές χρησιμοποιούν τη σύνδεση διάταξης για την τοποθέτηση των τηλεφωνημάτων.
- II. Ένα κανάλι διαχείρισης, το οποίο στέλνεται από τους σταθμούς αναφοράς προς όλους τους σταθμούς κυκλοφορίας μεταφέροντας οδηγίες διαχείρισης του frame, καθώς το σχέδιο χρόνου του burst αλλάζει. Το σχέδιο χρόνου του burst περιγράφει τη συνεργασία μεταξύ των σταθμών. Αναγνωρίζει τα όρια των time slots στο frame, δηλαδή τις θέσεις των burst. Επίσης αναγνωρίζει τη θέση, το μήκος και την πηγή ή τον προορισμό ανταποκρινόμενο στα υποπακέτα (subbursts) των bursts. Το κανάλι επίσης μεταφέρει και μηνύματα παρακολούθησης και ελέγχου στους σταθμούς κυκλοφορίας, όταν ο σταθμός αναφοράς θέλει να αποκτήσει μια αναφορά κατάστασης και/ή έλεγχο της μετατροπής των υποσυστημάτων στους σταθμούς αναφοράς από απόσταση.
- III. Ένα χρονικό κανάλι εκπομπής, που μεταφέρει πληροφορίες απόκτησης και συγχρονισμού στους σταθμούς κυκλοφορίας, στους οποίους δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίσουν το χρόνο εκπομπής του burst, ώστε τα εκπεμπόμενα bursts να φτάνουν στους σταθμούς μέσα στα κατάλληλα time slots στο TDMA frame. Επίσης μεταφέρει τους κώδικες κατάστασης, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα στους σταθμούς κυκλοφορίας να αναγνωρίσουν το πρωτεύον burst αναφοράς και το δευτερεύον αναφοράς.

Το κανάλι σήματος του burst κυκλοφορίας αποτελείται από τα ακόλουθα:

- (α). Ένα κανάλι σύνδεσης διάταξης, το οποίο είναι το ίδιο με εκείνο του burst αναφοράς.

(β). Ένα κανάλι υπηρεσίας, που μεταφέρει την κατάσταση του σταθμού κυκλοφορίας στον σταθμό αναφοράς ή άλλες πληροφορίες, όπως το υψηλό bit error rate και οι συναγερμοί για απώλεια της λέξης σε άλλους σταθμούς κυκλοφορίας.

Εκτός από τα παραπάνω τόσο τα bursts αναφοράς, όσο και τα bursts κυκλοφορίας μπορούν να μεταφέρουν πρόσθετα, που να περιέχουν τον αριθμό αναγνώρισης του frame, τον αριθμό αναγνώρισης του σταθμού και τον τύπο των εκπεμπόμενων bursts (πρωτεύον burst αναφοράς, δευτερεύον burst αναφοράς, burst κυκλοφορίας). Διάφοροι τύποι λέξεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αναγνώριση bursts.

2. Πληροφορία κυκλοφορίας:

Η πληροφορία κυκλοφορίας μεταφέρεται από το burst κυκλοφορίας ακολουθώντας το προοίμιο. Το μήκος ενός subburst κυκλοφορίας εξαρτάται πρωταρχικά από τον τύπο των υπηρεσιών και το συνολικό αριθμό καναλιών, που απαιτούνται για κάθε υπηρεσία, που υποστηρίζεται στο burst. Αυτό το τμήμα περιέχει πληροφορίες από τον χρήστη, που επικοινωνεί με τον χρήστη, που καλείται και μπορεί να είναι φωνή, πληροφορία, βίντεο ή πανομοιότυπα σήματα. Η πληροφορία για κάθε κανάλι εκπέμπεται σαν συνεχές subburst. Το μέγεθος κάθε subburst μπορεί να επιλεγεί να είναι οποιοσδήποτε αριθμός bits για την κατάλληλη προσαρμογή της πραγματικής ταχύτητας της φωνής, της πληροφορίας, του βίντεο ή του πανομοιότυπου σήματος.

3. Επάρκεια του TDMA frame:

Η επάρκεια του TDMA frame εξαρτάται από το ποσοστό του μήκους του frame T_f , που διατίθεται για πληροφορία κυκλοφορίας. Όσο ψηλότερο είναι αυτό το ποσοστό, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επάρκεια του συστήματος. Προς επίτευξη αυτού του σκοπού το επάνω τμήμα του frame (π.χ. χρόνοι ασφαλείας και τα preambles) πρέπει να μειωθεί, αλλά όχι τόσο ώστε να γίνεται δύσκολη η σχεδίαση του συστήματος. Ο χρόνος ασφαλείας μεταξύ των bursts πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να επιτρέπεται μια ανοχή συγχρονισμού, λόγω της αβεβαιότητας της θέσης της πλατφόρμας-φορέα του συστήματος.

Είναι φανερό ότι η επάρκεια του frame μπορεί να αυξηθεί χωρίς να μειωθεί το επάνω τμήμα του, αλλά πολύ απλά αυξάνοντας το μήκος του frame. Όμως αυτό θα

είχε σαν συνέπεια την αύξηση της απαιτούμενης μνήμης για την αποθήκευση της εισερχόμενης πληροφορίας σε ένα συνεχόμενο ρυθμό για ένα frame, για να εκπέμπει πληροφορία σε ένα υψηλότερο burst bit rate και να αποθηκεύει bursts κυκλοφορίας μετατρέποντάς τα σε χαμηλότερη εξερχόμενη πληροφορία.

4. Αρχιτεκτονική του TDMA superframe:

Οι δύο κρίσιμες λειτουργίες σε ένα δίκτυο TDMA είναι ο έλεγχος της θέσης του burst στο frame και η συνεργασία της κυκλοφορίας μεταξύ των σταθμών κατά τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε επαναδιάταξη της θέσης και του μήκους των bursts να μην προκαλεί διακοπή των υπηρεσιών ή επικάλυψη των bursts. Ο έλεγχος της θέσης των burst μπορεί να διεξαχθεί από τον σταθμό αναφοράς χρησιμοποιώντας το χρονικό κανάλι εκπομπής, ενώ η συνεργασία της κυκλοφορίας επιτυγχάνεται μέσω του καναλιού διαχείρισης του burst αναφοράς.

Ο σταθμός αναφοράς πρέπει να 'δώσει' τις διευθύνσεις των σταθμών κυκλοφορίας στο δίκτυο. Για κάθε σταθμό πρέπει να σταλεί και ένα μήνυμα στο χρονικό κανάλι εκπομπής και στο κανάλι διαχείρισης στο burst αναφοράς. Για την όσο το δυνατόν χωρίς λάθη επικοινωνία χρησιμοποιείται και ένα είδος κωδικού.

Για να μειωθεί το μήκος του preamble των bursts αναφοράς και των bursts κυκλοφορίας, ο σταθμός αναφοράς μπορεί να στείλει ένα μήνυμα σε ένα σταθμό σε κάθε frame, αντί για N μηνύματα σε N σταθμούς ($N =$ ο αριθμός των συνολικών σταθμών του δικτύου) σε κάθε frame.

Όλα τα frames τοποθετούνται μέσα σε ένα μεγαλύτερο frame, που ονομάζεται superframe. Για την αναγνώριση των frames σε ένα superframe, ένας αριθμός αναγνώρισης του frame μπορεί να μεταφέρεται στο κανάλι διαχείρισης ή σε ένα ξεχωριστό κανάλι μέσα στο burst αναφοράς για κάθε frame. Κανονικά ο αριθμός αναγνώρισης του frame 1 είναι ο δείκτης του superframe. Εναλλακτικά, διάφορες λέξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα bursts αναφοράς ή τα bursts κυκλοφορίας για να διακρίνουν τον δείκτη του superframe από τους δείκτες του frame.

5. Απόκτηση του frame και συγχρονισμός:

Σε ένα σύστημα TDMA, ένας σταθμός αναφοράς πρέπει να εκτελεί δύο λειτουργίες:

(α). Να λαμβάνει bursts κυκλοφορίας, που προορίζονται για αυτό σε κάθε frame

(β). Να εκπέμπει bursts κυκλοφορίας, που προορίζονται για άλλους σταθμούς σε κάθε frame, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η επικάλυψη με άλλα bursts.

Όπως αναφέρθηκε, ο χρόνος αναφοράς στο σύστημα TDMA παρέχεται από το πρωτεύον burst αναφοράς. Αναγνωρίζοντας τη λέξη του πρωτεύοντος burst αναφοράς, ορίζουμε τον χρόνο λήψης του frame (receive frame timing-RFT) ως τη χρονική στιγμή εμφάνισης του τελευταίου bit ή συμβόλου της λέξης του πρωτεύοντος burst αναφοράς. Ακόμη το τελευταίο bit ή σύμβολο της λέξης του burst κυκλοφορίας ορίζεται ως ο χρόνος λήψης του burst (receive burst timing-RBT). Από τη στιγμή που ο RFT δείχνει την έναρξη του frame, η θέση ενός burst κυκλοφορίας καθορίζεται από τη διαφορά των RBT-RFT. Αυτή η χρονική διαφορά (bits) περιέχεται σε ένα προσχέδιο, που περιλαμβάνεται στη μνήμη του σταθμού κυκλοφορίας.

Κατά ανάλογο τρόπο ορίζουμε τον χρόνο εκπομπής frame (TFT), ο οποίος μαρκάρει την αρχή του frame εκπομπής και τον χρόνο εκπομπής του burst (TBT), ο οποίος μαρκάρει την αρχή εκπομπής του burst κυκλοφορίας. Η θέση του burst κυκλοφορίας σε ένα εκπεμπόμενο frame καθορίζεται από τη διαφορά των TFT-TBT, η οποία περιέχεται στη μνήμη του σταθμού κυκλοφορίας.

Κάθε burst κυκλοφορίας εκπέμπεται στον προβλεπόμενο χρόνο (TBT) με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει την κατάλληλη θέση του στο frame του TDMA. Με αυτόν τον τρόπο τα bursts κυκλοφορίας των διάφορων σταθμών καταλαμβάνουν τις προκαθορισμένες τους θέσεις στο frame του συστήματος, χωρίς να συμβαίνουν επικαλύψεις.

Για την ομαλή και αδιάκοπη λειτουργία του συστήματος πρέπει όλοι οι σταθμοί να εκτελέσουν τις απαραίτητες διαδικασίες για απόκτηση και συγχρονισμό τόσο της εκπομπής όσο και της λήψης.

6. Απόκτηση και συγχρονισμός της λήψης frame:

Για να εισέλθει ένας σταθμός αναφοράς σε ένα σύστημα TDMA, πρέπει να αποκτήσει την λήψη του frame. Αυτή η διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα και στα δυο bursts αναφοράς RB1 και RB2 στο frame παράλληλα ή στο ένα μετά το άλλο και ξεκινά η τεχνική αναζητήσεως της λέξης. Όταν η λέξη ενός burst αναφοράς

ανιχνευθεί, ξεκινά η διαδικασία της τεχνικής παρακολούθησης της λέξης. Κανονικά το burst αναφοράς δηλώνεται σαν αποκτημένο, όταν η λέξη ανιχνευθεί σε 3 συνεχόμενα frames. Αν η λέξη χαθεί σε οποιοδήποτε από τα 3 frames ακολουθώντας τον πρώτο εντοπισμό, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το burst αναφοράς. Στην πράξη η διαδικασία απόκτησης λήψης του frame διαρκεί περίπου 1 sec ή λιγότερο.

Η διαδικασία συγχρονισμού λήψης του frame ξεκινά, αφού το burst αναφοράς δηλώνεται ότι αποκτήθηκε. Χρησιμοποιεί την τεχνική παρακολούθησης της λέξης για να παρακολουθεί περιοδικά το αναγνωρισμένο burst αναφοράς χρησιμοποιώντας ένα στενό άνοιγμα, του οποίου το κέντρο βρίσκεται ένα frame αργότερα από την ανίχνευση της λέξης του burst αναφοράς στο παρόν frame.

Για να επιταχύνουμε την απόκτηση του frame, δηλαδή να αποκτήσουμε το burst αναφοράς, όταν αυτό δηλώνεται 'μη αποκτημένο' ή 'μη συγχρονισμένο' μπορεί να χρησιμοποιηθεί η 'βοηθητική απόκτηση λήψης του frame' στο burst αναφοράς, αν ο χρόνος λήψης του frame από το άλλο burst αναφοράς στο frame είναι διαθέσιμος, δηλαδή αν το άλλο burst αναφοράς είναι συγχρονισμένο. Από τη στιγμή, που η θέση του burst αναφοράς RB1 σχετικά με το burst αναφοράς RB2 είναι γνωστή από το χρονικό σχέδιο του burst, που αποθηκεύεται στον σταθμό αναφοράς, η λέξη ενός burst αναφοράς μπορεί να ανιχνευθεί σε ένα παράθυρο πρόβλεψης κάνοντας χρήση του χρόνου λήψης του frame από το άλλο burst αναφοράς. Κανονικά το burst αναφοράς δηλώνεται αποκτημένο, όταν η λέξη του ανιχνευθεί για 4 συνεχή frames.

Ο κώδικας κατάστασης μπορεί να μεταφέρεται είτε από το πρωτεύον, είτε από το δευτερεύον burst αναφοράς. Ο χρόνος λήψης του frame μπορεί να προέρχεται είτε από το πρωτεύον, είτε από το δευτερεύον burst αναφοράς σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

(α).Όταν και το πρωτεύον και το δευτερεύον burst έχουν δηλωθεί συγχρονισμένα, ο χρόνος λήψης του frame πρέπει να προέρχεται από το πρωτεύον. Όταν η λέξη του πρωτεύοντος έχει χαθεί, ο χρόνος προέρχεται από εσωτερικό χρονικό διάστημα για προκαθορισμένο αριθμό frames

(β).Όταν το πρωτεύον δεν έχει χαρακτηριστεί ακόμα συγχρονισμένο (δηλαδή δεν έχει αποκτηθεί ακόμα) ή όταν το πρωτεύον έχει χαρακτηριστεί μη συγχρονισμένο και το δευτερεύον ως συγχρονισμένο, ο χρόνος λήψης του frame είναι δυνατόν να προέρχεται από το δευτερεύον. Όταν η λέξη του δευτερεύοντος έχει χαθεί, ο ζητούμενος χρόνος προέρχεται από το εσωτερικό χρονικό διάστημα για ένα προκαθορισμένο αριθμό frames.

(γ). Όταν το πρωτεύον δεν έχει δηλωθεί συγχρονισμένο ή όταν το πρωτεύον έχει δηλωθεί μη συγχρονισμένο και το δευτερεύον έχει δηλωθεί μη συγχρονισμένο, ο χρόνος λήψης του frame προέρχεται από το εσωτερικό χρονικό διάστημα για έναν αριθμό frames. Μετά ο σταθμός πρέπει να ξεκινήσει την όλη διαδικασία από την αρχή.

Από τη στιγμή που αποκτηθεί και τηρηθεί ο χρόνος λήψης του frame, ο χρόνος λήψης του burst κάθε burst αναφοράς προέρχεται από την αναγνώριση της λέξης εκείνου του burst, χρησιμοποιώντας την τεχνική παρακολούθησης της λέξης με ένα στενό παράθυρο ανοίγματος, που κεντράζεται στην καθορισμένη θέση στο burst αναφοράς. Αυτή καθορίζεται από το χρονικό σχέδιο λήψης του burst. Συνοψίζοντας, το πρωτεύον burst αναφοράς, που εκπέμπεται από τον πρωτεύοντα σταθμό αναφοράς δημιουργεί τη βάση για την απόκτηση και συγχρονισμό του frame όλου του δικτύου TDMA. Όσο το πρωτεύον burst αναφοράς βρίσκεται μέσα στο frame, τη στιγμή της αναγνώρισης του τελευταίου bit ή συμβόλου της λέξης του μαρκάρεται ο χρόνος λήψης του frame.

7. Χρονικό σχέδιο burst:

Το χρονικό σχέδιο burst είναι ένας χάρτης, που δείχνει τις θέσεις και το μήκος των bursts στο frame, καθώς επίσης και τη θέση και μήκος των subbursts μέσα στο burst. Από τη στιγμή που bursts και subbursts μεταφέρουν φωνή, πληροφορία ή βίντεο μεταξύ των σταθμών, το χρονικό σχέδιο του burst είναι αυτό, που καθορίζει την κυκλοφορία σε ένα frame. Αν η συνολική κυκλοφορία του συστήματος TDMA υπερβεί την χωρητικότητα του αναμεταδότη, το δίκτυο πρέπει να λειτουργήσει με περισσότερους αναμεταδότες. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός κυκλοφορίας θα εκπέμπει bursts σε περισσότερους από έναν αναμεταδότες και ίσως να απαιτείται να λαμβάνει bursts από περισσότερους του ενός αναμεταδότες. Σε ένα τέτοιο δίκτυο το χρονικό σχέδιο burst καθορίζει την κυκλοφορία στους αναμεταδότες και τον χρόνο της καθορισμένης κυκλοφορίας σε ένα frame.

Ένα τυπικό χρονικό σχέδιο burst αποτελείται από τα παρακάτω:

(α). Πληροφορία μηνύματος:

- Αναγνώριση του χρονικού σχεδίου burst
- Αναγνώριση του σταθμού κυκλοφορίας
- Αριθμός των εκπεμπόμενων bursts

- Αριθμός των λαμβανόμενων bursts
 - (β). Πληροφορία του burst :
 - Αναγνώριση του burst
 - Εκπομπή-λήψη της σημαίας
 - Αναγνώριση του αναμεταδότη
 - Θέση του burst
 - Αριθμός των εκπεμπόμενων-λαμβανόμενων subbursts
 - (γ). Πληροφορία του subburst:
 - Αναγνώριση εκπεμπόμενων-λαμβανόμενων subbursts
 - Θέση του subburst
 - Μήκος του subburst

3.4. Η Εφαρμογή του TDMA στο JTIDS του Link-16

Το δίκτυο JTIDS στηρίζεται στην αρχιτεκτονική της πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου (TDMA) παρέχοντας πολλαπλά, ανεξάρτητα μεταξύ τους δίκτυα που λειτουργούν ταυτόχρονα. Σε κάθε επικοινωνιακό κύκλωμα και σε κάθε συμμετέχοντα σ' αυτό, αντιστοιχείται συγκεκριμένη χρονική περίοδος στη διάρκεια της οποίας η μονάδα εκπέμπει ή λαμβάνει δεδομένα. Επίσης το TDMA είναι ένα σύστημα που επιτρέπει σε όλους τους χρήστες JTIDS του δικτύου να έχουν πρόσβαση στη ζεύξη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο χωρίς να είναι αναγκαία η ύπαρξη κάποιου ελεγκτή ή διαχειριστή που θα αποφασίζει κάθε φορά την πρόσβαση στο δίκτυο.

3.4.1. Η διαίρεση του χρόνου

Το μέγεθος πάνω στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία του TDMA είναι ο χρόνος. Έτσι κάθε εικοσιτετράωρο διαιρείται από τα τερματικά JTIDS σε 112,5 **εποχές (epochs)** με διάρκεια 12,8 λεπτά η κάθε μία. Επιπλέον κάθε εποχή αποτελείται με τη σειρά της σε 98.304 **σχισμές χρόνου (time slots)** με διάρκεια 1/128 δευτερόλεπτα ή 7,8125 msec η κάθε μία . Προκειμένου οι σχισμές χρόνου να διαμοιραστούν ομαλά σε κάθε χρήστη, χωρίζονται εξίσου σε τρεις **ομάδες** ή **σετ A, B και C**. Κάθε μια ομάδα περιέχει 32.768 σχισμές που αριθμούνται αντίστοιχα από το 0 μέχρι το 32767, αριθμός που καλείται δείκτης σχισμής (slot index). Για παράδειγμα στην ομάδα A έχουμε τις σχισμές A-000 έως A-32767. Οι σχισμές χρόνου κάθε ομάδας συμπλέκονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μια επαναλαμβανόμενη σειρά :

A - 000, B - 000, C-000

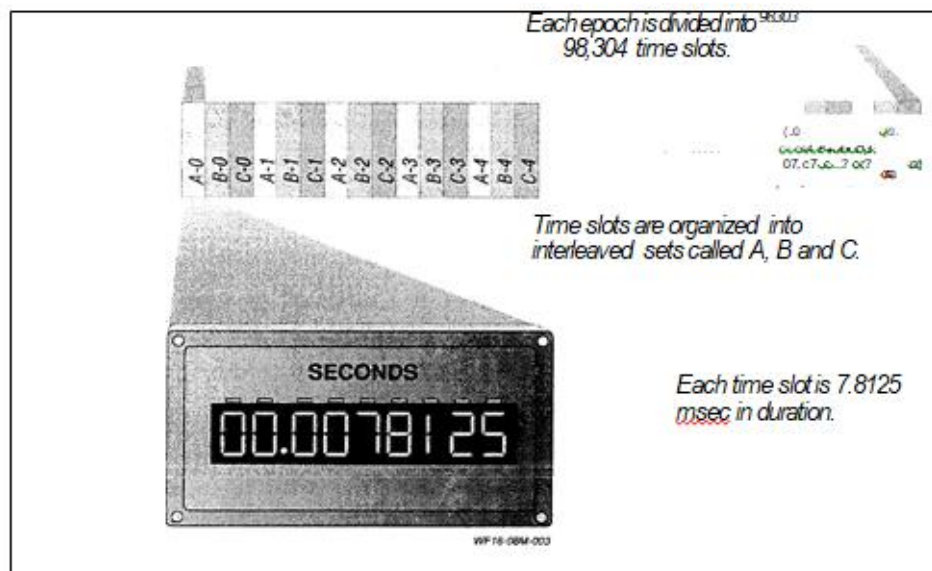
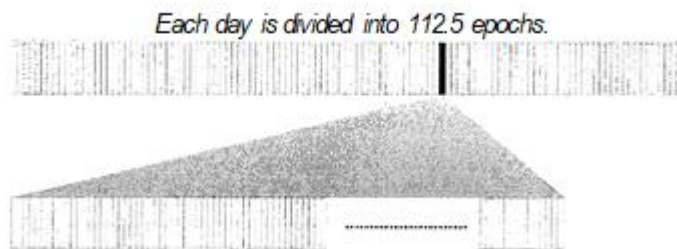
A-001,B-001,C001...

... A-32767, B - 32767, C - 32767

σχηματίζοντας ένα είδος δακτυλίου (σχ 3.2) που 'ξεκινάει' με τη σχισμή A - 000 και καταλήγει στη σχισμή C - 32767.



Κάθε 24ωρη ημέρα χωρίζεται σε διαστήματα των 12 λεπτών 48 δευτερολέπτων που ονομάζονται εποχές



Σχήμα 3.3. Η αρχιτεκτονική JTIDS TDMA διαιρεί μια 24ωρη ημέρα σε εποχές, σύνολα και χρονοθυρίδες

Η εποχή σαν μονάδα μέτρησης είναι αρκετά μεγάλη σε διάρκεια (12,8 λεπτά) δυσκολεύοντας έτσι την περιγραφή της στιγμιαίας ανταλλαγής δεδομένων που

συμβαίνει μέσω της ζεύξης δεδομένων Link - 16. έτσι εισάγεται μια μικρότερη και πιο εύκολα διαχειρίσιμη μονάδα χρόνου, το πλαίσιο χρόνου (frame) και αποτελεί τη βασική επαναλαμβανόμενη μονάδα χρόνου στο δίκτυο JTIDS. Κάθε εποχή λοιπόν χωρίζεται σε 64 πλαίσια διάρκειας 12 δευτερολέπτων το κάθε ένα και περιέχει 1536 σχισμές χρόνου. Οι σχισμές αυτές με τη σειρά τους διαιρούνται σε τρεις ομάδες A, B και C αντίστοιχα, σχηματίζοντας δακτύλιο που αποτελείται από τις σχισμές με την παρακάτω σειρά :

A - 000, B - 000, C- 000

A-001, B - 001, C-001 ...

...A-512, B-512, C512

Η σειρά αυτή επαναλαμβάνεται κάθε 12 δευτερόλεπτα .Το χρονικό διάστημα των 12 δευτερολέπτων είναι αρκετό για την ανανέωση του δικτύου JTIDS καθώς η πλειοψηφία των τακτικών εφαρμογών που απαιτούν ένα ρυθμό ανανέωσης κάτω των 20 δευτερολέπτων. Προκειμένου να αποφευχθούν οι αλληλοπαρεμβολές στην εκπομπή και λήψη δεδομένων μεταξύ των χρηστών του δικτύου, σε κάθε μονάδα JU ορίζεται ένα μπλοκ από σχισμές χρόνου συγκεκριμένης ομάδας, εναρκτήριας σχισμής χρόνου και Αριθμός Ρυθμού Επανάληψης (Recurrence Rate Number, RRN). Η χρονική περίοδος (time slot) είναι η βασική μονάδα πρόσβασης στο δίκτυο JTIDS. Αυτές οι μονάδες, οι χρονικές περίοδοι, αντιστοιχίζονται σε κάθε συμμετέχουσα μονάδα (JTIDS Unit= JU) για συγκεκριμένες λειτουργίες. Μια JU έχει εκχωρηθεί είτε για τη μετάδοση είτε για την λήψη σε κάθε χρονική περίοδο. Μια JU είτε εκπέμπει είτε λαμβάνει σε κάθε χρονική περίοδο. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των slots σε κάθε set μιας εποχής είναι δύναμη του 2. Αυτό δεν είναι σύμπτωση, αλλά συνέπεια της δυαδικής φύσης των υπολογιστών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία και επεξεργασία μηνυμάτων για το Link-16.

n	2 ⁿ
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096
13	8192
14	16384
15	32768

Πίνακας 3.1. Οι δυνάμεις του 2 αντιπροσωπεύονται από 2ⁿ. Οι δυνάμεις του 2 που σχετίζονται με το JTIDS είναι εκείνες όπου το n παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 15.

Η νιοστή δύναμη του 2 υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό 2 από μόνη της για n φορές. Κατά σύμβαση, 2 στην μηδενική δύναμη ορίζεται ως 1. Ο αριθμός 2 ονομάζεται βάση και ο αριθμός n ονομάζεται εκθέτης. Η αντίστροφη λειτουργία, η οποία μετατρέπει τον αριθμό ισχύος πίσω σε έναν εκθέτη, ονομάζεται λογάριθμος στη βάση 2. Έτσι, ο λογάριθμος (στη βάση 2) του 16384 είναι το 14.

Ποσοστό επανάληψης

Ο λογάριθμος του αριθμού των υποδοχών στο μπλοκ χρονοθυρίδων ονομάζεται αριθμός ρυθμού επανάληψης (recurrence rate number RRN). Το ποσοστό επανάληψης υποδεικνύει πόσα χρονικά διαστήματα είναι στο μπλοκ και, δεδομένου ότι είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, πόσο συχνά συμβαίνουν. Το σύνολο των χρονικών θυρίδων στο σετ A είναι 32.768 ή 2¹⁵. Διανέμεται κάθε 3η θυρίδα και αναγνωρίζεται με τη σημείωση A-0-15. Τα μισά από τα slots στο σετ A θα είναι 16.384 χρονοθυρίδες. Θα γινόταν κάθε 6η θέση και θα χαρακτηριζόταν από ένα RRN 14. Τα μισά από αυτά θα εμφανίζονταν κάθε 12η θέση και θα χαρακτηρίζονταν από RRN 13. ΓΕΝΙΚΑ το RRN χρησιμοποιείται για να καθορίσει πόσο συχνά μια JU έχει πρόσβαση στο δίκτυο JTIDS.

Η σχέση μεταξύ RRN και του διαστήματος μεταξύ των σχισμών τόσο στον αριθμό των σχισμών όσο και στον χρόνο παρέχεται στο Σχήμα 5-3. Λάβετε υπόψη ότι ως συνέπεια της δομής των 3 διατρήσεων, 3 είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των

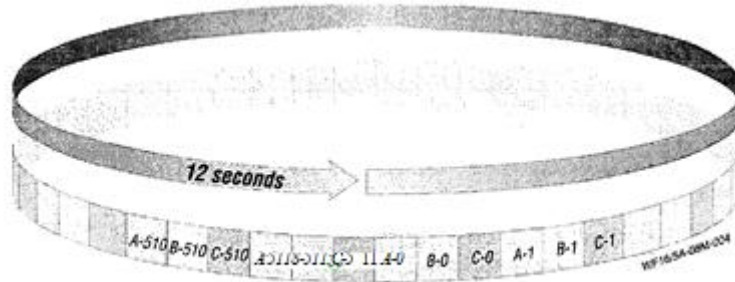
εγκοπών στο ίδιο σετ. Ο χρόνος μεταξύ των slots μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των slots στο διάστημα κατά 7,8125 msec.

RRN	No. Slots Per Epoch	Slot interval		
		(slots)	(time)	
15	32768	3	23.475	m se
14	16384	6	46.8750	
13	8192	12	93.7500	
12	4096	24	187.5000	
11	2048	48	375.0000	
10	1024	96	750.0000	
9	512	192	1.50	sec on ds
8	256	384	3.00	
7	128	768	6.00	
6	64	1536	12.00	
5	32	3072	24.00	
4	16	6144	48.00	
3	8	12288	1.6	mi nu tes
2	4	24576	3.3	
1	2	49152	6.4	
0	1	98304	12.8	

Πίνακας 3.2. Το ποσοστό επανάληψης είναι ο λογάριθμος της βάσης 2 του αριθμού των θυρίδων στο μπλοκ. Δεδομένου ότι οι χρονικές θυρίδες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, τόσο ο αριθμός των σχισμών όσο και το διάστημα μεταξύ τους μπορούν να καθοριστούν από τον αριθμό ρυθμού επανάληψης (RRN).

Πλαίσια (Frames)

Η εποχή των 12,8 λεπτών είναι πολύ δύσκαμπτη χρονική περίοδος για την περιγραφή των ταχέων επικοινωνιών που απαιτούνται από το Link-16, έτσι ορίζεται ένα μικρότερο, περισσότερο διαχειρίσιμο χρονικό διάστημα. Αυτή είναι η βασική επαναλαμβανόμενη μονάδα χρόνου στο δίκτυο JTIDS και ονομάζεται πλαίσιο (frame). Υπάρχουν 64 πλαίσια ανά εποχή. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια 12 δευτερολέπτων και αποτελείται από 1536 χρονοθυρίδες όπου οι 512 ανήκουν στο σετ A, 512 ανήκουν στο σετ B και 512 ανήκουν στο σετ C. Κάθε εποχή χωρίζεται σε 64 πλαίσια. Σε κάθε 12 δευτερόλεπτα ένα πλαίσιο είναι μια πιο εύχρηστη μονάδα χρόνου από την εποχή. Οι χρονικές περιόδους ενός πλαισίου αριθμούνται από 0 έως 511 και διεμπλέκονται σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο έτσι ώστε τα A-0, B-0, C-0 ακολουθούνται από A-1, B-1, C-1 - και προηγούνται τα A-511, B-511, C-511. Τα πλαίσια εμφανίζονται επανειλημμένα, το ένα μετά το άλλο, όσο η σύνδεση είναι λειτουργική. Για το λόγο αυτό, ένα πλαίσιο συχνά απεικονίζεται με ένα δακτύλιο στον οποίο η σχισμή A-0 ακολουθεί τη σχισμή C-511.



Σχήμα 3.4. Ένα πλαίσιο αποτελείται από 1536 χρονικές θυρίδες που ομαδοποιούνται σε παρεμβalλόμενα σύνολα A, B και C, με κάθε σετ να περιέχει 512 χρονικές θυρίδες που αριθμούνται από 0 έως 511.

RRN	No. Slots Per Epoch	Slot interval		
		(slots)	(time)	
15	32768	3	23.475	m se
14	16384	6	46.8750	
13	8192	12	93.7500	
12	4096	24	187.5000	
11	2048	48	375.0000	
10	1024	96	750.0000	
9	512	192	1.50	sec on ds
8	256	384	3.00	
7	128	768	6.00	
6	64	1536	12.00	

Πίνακας 3.3. Δεδομένου ότι 64 πλαίσια περιλαμβάνουν μια εποχή, ο αριθμός των υποδοχών ανά πλαίσιο βρίσκεται διαιρώντας τον αριθμό των υποδοχών ανά εποχή διά 64. Ένα RRN 15 αντιπροσωπεύει κάθε υποδοχή σε ένα σετ: 32.768 στην εποχή, 512 στο πλαίσιο. Επειδή τα τρία σύνολα είναι παρεμβalλόμενα, το διάστημα μεταξύ των slots σε οποιοδήποτε σύνολο είναι στην πραγματικότητα 3 όχι 1.

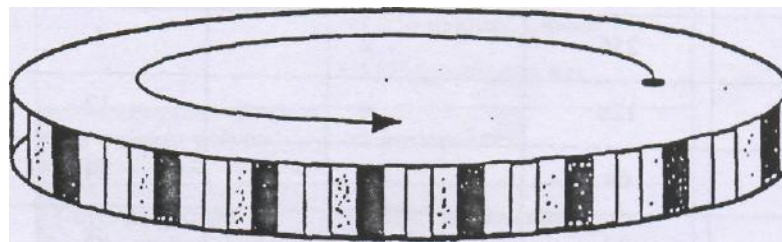
Στον παρακάτω πίνακα προβάλλονται οι αντιστοιχίες στο πεδίο του χρόνου για τη ζεύξη Link-16 (πίνακας 3.4)

1 ημέρα	=24 ώρες =112.5 εποχές
1 εποχή	=12.8 λεπτά =64 πλαίσια =98,304 σχισμές χρόνου =32,767 σχισμές ανά σετ
1 πλαίσιο	=12 δευτερόλεπτα =1,536 σχισμές χρόνου

	=512 σχισμές ανά σετ
128 σχισμές χρόνου	=1 δευτερόλεπτο
1 σχισμή χρόνου	=7.815 milliseconds

Πίνακας 3.4 Οι μονάδες χρόνου και οι αντιστοιχίες τους στο Link-16

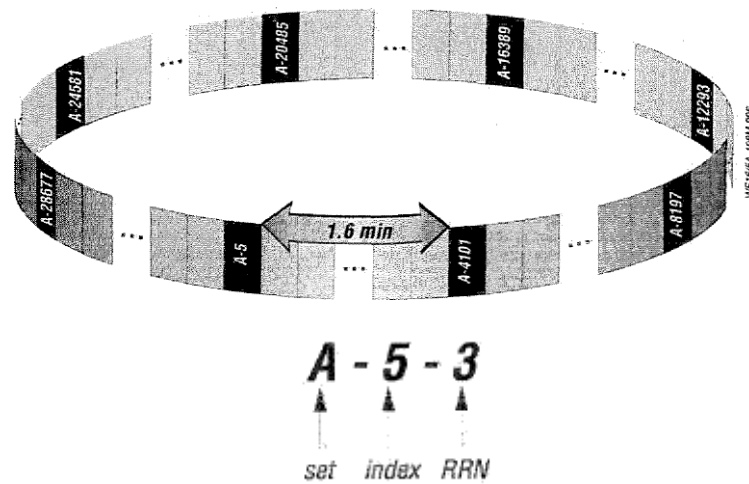
Από το παρακάτω σχήμα (σχ.3.1) βλέπουμε ότι τα TSB είναι ομοιόμορφα τοποθετημένα με αποτέλεσμα να έχουμε την πολύπλεξη των τριών ομάδων στο ίδιο δίκτυο. Τέλος η αρχική σχισμή χρόνου καθορίζει την πρώτη σχισμή χρόνου στην οποία η μονάδα θα αρχίσει να εκπέμπει και το RRN καθορίζει πόσες σχισμές θα έχει η μονάδα σε κάθε πλαίσιο. Η απόδοση των σχισμών χρόνου μπορεί για παράδειγμα να υλοποιηθεί όπως για την ομάδα συμμετεχόντων B όπου έχουμε τη σειρά A - 00002 - 11 ισοδυναμεί με ένα μπλοκ 32 σχισμών αρχίζοντας από τη σχισμή με αριθμό 00002 και περιέχει τις σχισμές A -2, A-18, A-34, A-50, ...,A-498.



Σχήμα 3.5. Πολύπλεξη των ομάδων A, B και C.

3.4.2. Μπλοκ σχισμών χρόνου (Time Slot Block)

Οι σχισμές χρόνου αποδίδονται σε κάθε μονάδα στο δίκτυο με τη μορφή Μπλοκ Σχισμών Χρόνου (Time Slot Block, TSB). Τα TSB προσδιορίζονται από τρεις μεταβλητές : την ομάδα (A, B ή C), τον αριθμό της σχισμής έναρξης ή δείκτη του TSB (από το 0 έως το 32767 για την εποχή ή από το 0 έως το 512 για κάθε πλαίσιο) και τον ρυθμό επανάληψης. Έτσι μέχρι 64 TSB μπορούν να αποδοθούν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ρυθμοί είναι 6, 7 και 8 που αντιστοιχούν σε διάστημα 12, 6 και 3 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6. Οι χρονοθυρίδες εκχωρούνται σε διαστήματα ορίζοντας ένα σύνολο, δείκτη και RRN.

Για παράδειγμα, το TSB A-2-11 αντιπροσωπεύει το διάστημα χρονικών θυρίδων που ανήκουν στο σετ A που λαμβάνουν χώρα κάθε 16η θυρίδα εντός του συνόλου που αρχίζει με τη θέση 2. (Λαμβάνουμε την τιμή 16 για RRN 11 από την Σχήμα 5-5.) Αυτές είναι οι σχισμές A-2, A-18, A-34, A-50, A-66,..., A-498. Γενικά, αντιπροσωπεύονται από την έκφραση $(2 + 16n)$, όπου $n = 0, 1, 2 \dots 31$ για το πλαίσιο 12 δευτερολέπτων. Ομοίως, το TSB B-2-11 περιέχει τις εγκοπές B-2, B-18, B-34, B-50, B-66,..., B-498. Παρατηρούμε ότι μολονότι οι TSB A-2-11 και TSB B-2-11 έχουν τους ίδιους δείκτες αρχικών θυρίδων και τα RRNs, παρόλα αυτά δεν έχουν κοινά slots διαθέσιμα. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι είναι αποκλειστικά. Δηλαδή τα TSB που καθορίζουν διαφορετικά σύνολα είναι αποκλειστικά. Το TSB A-7-11 αντιπροσωπεύει το μπλοκ χρονικών θυρίδων που ανήκουν στο σετ A που λαμβάνουν χώρα κάθε 16η θέση που αρχίζει με τη θυρίδα 7. Αυτές είναι οι σχισμές $(7 + 16n)$, $n = 0$ έως 31: A-7, A-23, A-39, A-55, A-71, ..., A-503. Παρατηρούμε ότι τα TSB A-2-11 και A-7-11 δεν έχουν κοινόχρηστες υποδοχές. Αυτά τα TSB είναι επίσης αποκλειστικά. Τα TSB που έχουν τους ίδιους RRN αλλά διαφορετικούς δείκτες είναι επίσης μοναδικά. Παρατηρούμε ακόμη ότι αν ο δείκτης ενός μπλοκ χρονικού διαστήματος είναι ομοιόμορφος, όλοι οι αριθμοί χρονικών θυρίδων σε αυτό το μπλοκ είναι επίσης ομοιόμορφοι. Εάν ο δείκτης ενός μπλοκ χρονικού διαστήματος είναι αταίριαστος, όλοι οι αριθμοί χρονικών θυρίδων σε αυτό το μπλοκ είναι επίσης αταίριαστοι. Αν ένας δείκτης είναι ομοιόμορφος και ένας δείκτης είναι αταίριαστος, τα TSB είναι αποκλειστικά, ανεξάρτητα από τα RRN τους.

Τώρα εξετάζουμε τα TSBs C-7-11 και C-7-10. Από τα RRNs είναι σαφές ότι το C-7-10 περιέχει μισές φορές περισσότερες θέσεις όπως το C-7-11. Δεδομένου ότι οι σχισμές κατανέμονται ομοιόμορφα, το C-7-10 αποτελείται από κάθε άλλη υποδοχή C-7-11. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα με τον κατάλογο των διαθέσιμων χρόνων:

C-7-11 περιέχει C-7, C-23, C-39, C-55, C-71,..

C-7-10 περιέχει C-7, C-39, C-71, C-103, C-135,..

Τα TSB που έχουν το ίδιο σετ και δείκτη αλλά διαφορετικά RRNs δεν αλληλοαποκλείονται. Το ένα με το μικρότερο RRN είναι ένα υποσύνολο ενός με το μεγαλύτερο RRN. Τα μπλοκ χρονικού διαστήματος αλληλεπιδρούν σε δομή τύπου δέντρου. Για παράδειγμα, το TSB A-0-15 περιέχει κάθε φορά υποδοχή στο σετ A: A-0, A-1, A-2, A-3 κ.ο.κ. Αν αυτό το μπλοκ διαιρείται στο μισό (RRN, --- 14), τα δύο υποσύνολα που σχηματίζονται έτσι δηλώνονται με A-0-14 και A-1-14. Το TSB A-0-14 περιέχει τις χρονικές θυρίδες: A-0, A-2, A-4, A-6 κ.ο.κ. Το TSB A-1-14 περιέχει A-1, A-3, A-5, A-7 και ούτω καθεξής. Εάν τα μπλοκ αυτά χωριστούν το καθένα στο μισό, το RRN είναι 13. Το TSB A-0-14 περιέχει μπλοκ A-0-13 και A-2-13. Το TSB A-1-14 περιέχει μπλοκ A-1-13 και A-3-13. Αν συνεχίσουμε τη διαδικασία θα δούμε ότι το TSB A-5-12 περιέχει χρονικές θυρίδες που περιέχονται επίσης στα TSBs A-1-13, A-1-14 και A-0-15.

Διάστημα 12 δευτερολέπτων

RRN	Slots/ Frame	Set C TSBs															
15	512	C-0-15															
14	256	C-0-14								C-1-14							
13	128	C-0-13				C-2-13				C-1-13				C-3-13			
12	64	C-0-12	C-4-12	C-2-12	C-6-12	C-1-12	C-5-12	C-3-12	C-7-12								
11	32	C-0-11	C-8-11	C-4-11	C-12-11	C-2-11	C-10-11	C-6-11	C-14-11	C-1-11	C-9-11	C-5-11	C-13-11	C-3-11	C-11-11	C-7-11	C-15-11

RRN	Slots/ Frame	Set B TSBs															
15	512	B-0-15															
14	256	B-0-14								B-1-14							
13	128	B-0-13				B-2-13				B-1-13				B-3-13			
12	64	B-0-12	B-4-12	B-2-12	B-6-12	B-1-12	B-5-12	B-3-12	B-7-12								
11	32	B-0-11	B-8-11	B-4-11	B-12-11	B-2-11	B-10-11	B-6-11	B-14-11	B-1-11	B-9-11	B-5-11	B-13-11	B-3-11	B-11-11	B-7-11	B-15-11

RRN	Slots/ Frame	Set A TSBs															
15	512	A-0-15															
14	256	A-0-14								A-1-14							
13	128	A-0-13				A-2-13				A-1-13				A-3-13			
12	64	A-0-12	A-4-12	A-2-12	A-6-12	A-1-12	A-5-12	A-3-12	A-7-12								
11	32	A-0-11	A-8-11	A-4-11	A-12-11	A-2-11	A-10-11	A-6-11	A-14-11	A-1-11	A-9-11	A-5-11	A-13-11	A-3-11	A-11-11	A-7-11	A-15-11
10	16																
9	8																
8	4																
7	2																
6	1																

Σχήμα 3.7. Τα μπλοκ χρονικής κατανομής αλληλοσυνδέονται σε δομή τύπου δέντρου. Ταυτόχρονη μετάδοση μπορεί να συμβεί όταν οι αναθέσεις των TSB διασταυρώνονται.

Η αλληλεξάρτηση των TSB είναι σημαντική για να θυμόμαστε όταν κάνουμε αναθέσεις time slots στους συμμετέχοντες. Υποθέτουμε ότι το TSB B-196-7 εκχωρείται σε έναν συμμετέχοντα για τις μεταδόσεις του και το B-4-9 εκχωρείται σε ένα άλλο. Εάν οι TSB δεν αλληλοσυμπληρώνονται, οι δύο συμμετέχοντες θα μεταδίδουν ταυτόχρονα. Ένας τρόπος για να προσδιορίσουμε εάν οι TSB είναι μοναδικοί είναι να αναγράψουμε όλα τα time slots στο καθένα. Οι υποδοχές που αντιπροσωπεύονται από RRN 7 εμφανίζονται μέσα σε ένα σετ στα διαστήματα των 256. Έτσι, το TSB B-196-7 περιέχει τους αριθμούς (196 + 256n): B-196 και B-452. Τα slots αντιπροσωπεύονται από RRN 9 σε ένα σύνολο 64 διαστημάτων. Έτσι, το TSB B-4-9 περιέχει τους αριθμούς (4 + 64n): B-4, B-68, B-132, B-196, B-260, B-324, B-388 και B-452. Αυτά τα TSB δεν είναι μοναδικά. Το B-196-7 είναι ένα υποσύνολο του B-4-9.

Ένας άλλος τρόπος να εξεταστεί αυτό είναι να εξεταστεί η οικογένεια TSBs στα οποία ανήκει μια συγκεκριμένη θυρίδα. Για παράδειγμα, η σχισμή A-52 ανήκει στο TSB A-52-6, το οποίο αποτελείται από τη μοναδική υποδοχή. Ανήκει επίσης στα A-52-7, A-52-8, A-52-9, A-20-10, A-4-11, A-4-12, A-O-13 κ.ο.κ. Πώς γνωρίζουμε τον δείκτη για κάθε διαδοχικό RRN; Ο νέος δείκτης είναι ο αρχικός δείκτης. $(52) \bmod 2^{(15-r)}$, όπου r είναι το RRN. Έτσι, το A-52 είναι μέλος του TSB με το RRN 10, έχοντας τον δείκτη $(52 \bmod (2^5)) = 52 \bmod 32 = 20$. Η δομή δικτύου που περιγράφεται μέχρι τώρα αντιπροσωπεύει ένα ενιαίο δίκτυο. Αυτή είναι η αρχιτεκτονική του δικτύου όταν ο τερματικός σταθμός JTIDS έχει ρυθμιστεί είτε στη λειτουργία επικοινωνίας 1 με την κανονική ρύθμιση IPF είτε στη λειτουργία 2. Στη λειτουργία 2 χρησιμοποιείται η συχνότητα 969 MHz και όλα τα μηνύματα αντιστοιχίζονται σε χρονικά διαστήματα στο ενιαίο δίκτυο.

Πρόβλημα: Προσδιορίστε ότι αν δύο TSB εντός του ίδιου συνόλου που ορίζονται από αρχικούς δείκτες των S_0 και S_1 με τα αντίστοιχα RRNs των r_0 και r_1 είναι μοναδικά.

Λύση:

Βήμα 1. Επισημαίνουμε τα TSBs έτσι ώστε το S_0 να αντιστοιχεί στον μεγαλύτερο δείκτη.

Βήμα 2. Υπολογίζουμε το $\frac{S_0 - S_1}{2^{15-r}}$

Συμπέρασμα: Εάν το αποτέλεσμα είναι ένας ακέραιος αριθμός, υπάρχει μια διασταύρωση και τα TSBs δεν είναι μοναδικά.

Παράδειγμα Α: Τα TSBs A-7-12 και A-3-13 είναι μοναδικά;

Βήμα 1. Έστω $S_0 = 7$ και $S_1 = 3$. Στη συνέχεια $r_0 = 12$ και $r_1 = 13$.

Βήμα 2. Υπολογίζουμε: $\frac{7-3}{2^{15-13}} = \frac{4}{2^2} = \frac{4}{4} = 1$

Συμπέρασμα: Ένας ακέραιος. Διασταυρώνονται, επομένως δεν αλληλοαποκλείονται.

Παράδειγμα Β: Τα TSBs B-5-9 και B-7-11 είναι μοναδικά;

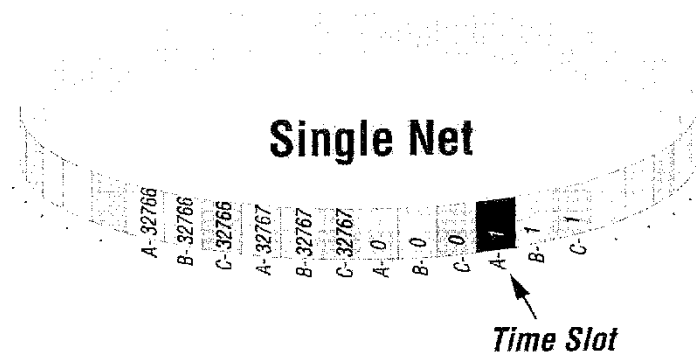
Βήμα 1. Έστω $S_0 = 7$ και $S_1 = 5$. Στη συνέχεια $r_0 = 11$ και $r_1 = 9$

Βήμα 2. Υπολογίζουμε: $\frac{7-5}{2^{15-9}} = \frac{2}{2^6} = \frac{2}{64} = \frac{1}{32}$

Συμπέρασμα: Δεν είναι ένας ακέραιος αριθμός. Αυτά τα TSBs δεν διασταυρώνονται. Είναι μοναδικά.

Μια μέθοδος για να καθορίσετε αν δύο TSBs είναι μοναδικά είναι να απαριθμήσετε όλα τα slots που ανήκουν σε κάθε ένα. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι αυτή που περιγράφεται παραπάνω.

Μια ομάδα συμμετεχόντων που ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους είναι ένα δίκτυο. Η δομή του time slot που συζητήθηκε μέχρι τώρα αντιπροσωπεύει ένα μόνο δίκτυο JTIDS.



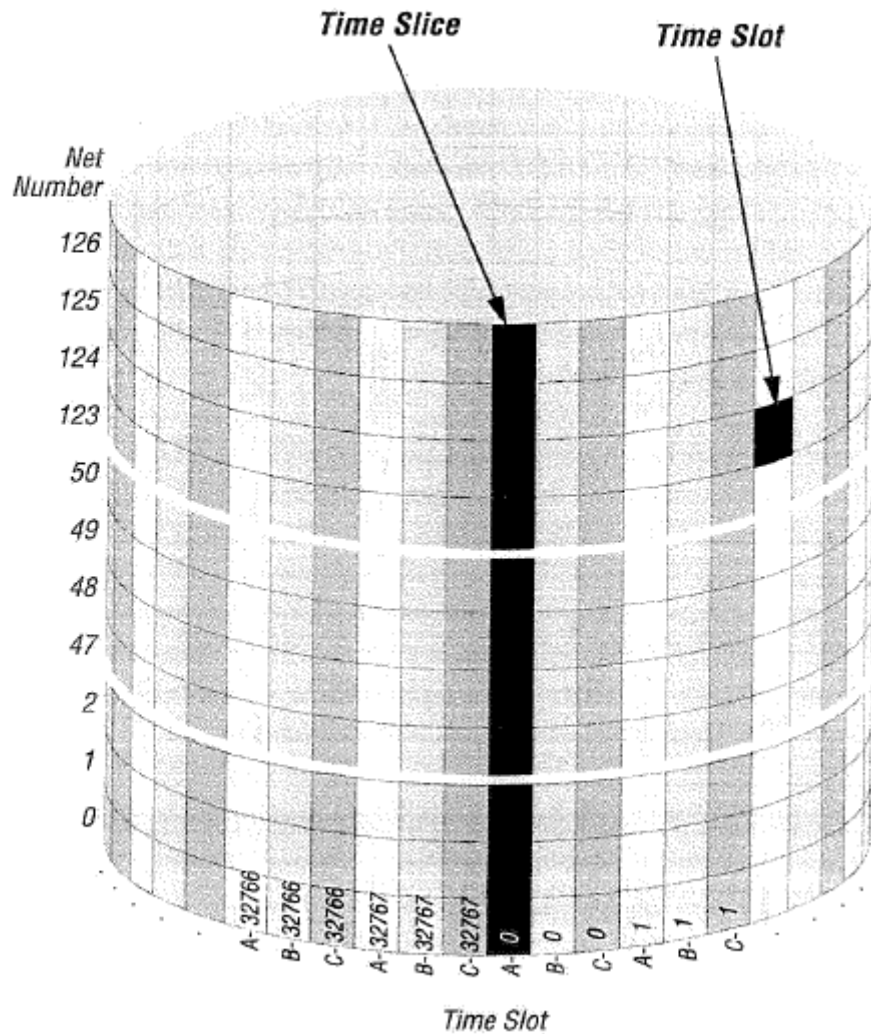
Σχήμα 3.8. Η αρχιτεκτονική του ενός μόνο δικτύου JTIDS χωρίζει κάθε εποχή 12,8 λεπτών σε 98,304 χρονοθυρίδες.

Όπως είναι προφανές τα TSB που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους όπως επίσης και τα TSB που έχουν το ίδιο RRN αλλά διαφορετική σχισμή έναρξης (π.χ. οι σειρές A - 7 - 11 και A - 2 - 11). Αν τώρα ο δείκτης ενός μπλοκ είναι περιττός (όλες οι σχισμές του είναι περιττού αριθμού) και αντίστοιχα ο δείκτης ενός άλλου μπλοκ είναι άρτιος (όλες οι σχισμές του έχουν άρτιο αριθμό) τότε είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα ασχέτως αν έχουν τον ίδιο RRN ή όχι. Για τα TSB B - 7 - 11 και B - 7 -10 παρατηρούμε ότι οι σχισμές του δεύτερου μπλοκ περιλαμβάνονται στο πρώτο καθώς για το B - 7 - 11 έχουμε τις σχισμές B - 7, B - 23, B -34, B - 55, B - 71....και για το B - 7 - 10 έχουμε B - 7, B - 39, B - 71, B - 103... Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα TSB που ανήκουν στην ίδια ομάδα, έχουν τον ίδιο δείκτη αλλά διαφορετικό RRN δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους με το μπλοκ που έχει το μικρότερο TSB να είναι υποσύνολο αυτού με το μεγαλύτερο. Όταν δε ο RRN ενός TSB μειώνεται κατά ένα τότε ο αριθμός των σχισμών μειώνεται στο μισό όπως για παράδειγμα το A - 00001 - 14 θα περιέχει τις μισές σχισμές, 256, από το A - 00001 - 15 και το τερματικό θα μεταδίδει κάθε 6 σχισμές χρόνου ανά πλαίσιο. Αν και το πλαίσιο είναι η χρονική μονάδα η οποία χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των JTIDS δικτύων, δεν επεξεργάζεται από τα τερματικά του δικτύου αλλά αναγνωρίζουν σαν μονάδα χρόνου την εποχή. Έτσι τα TSB εκφράζονται σαν μπλοκ σχισμών χρόνου ανά εποχή. Η δομή του δικτύου που περιγράφηκε προηγουμένως αναφέρεται στη δομή μοναδικού δικτύου (single net) στην περίπτωση αυτή μόνο μια συχνότητα χρησιμοποιείται, τα 969 MHz.

3.4.3. Πολλαπλά δίκτυα

Τα πολλαπλά δίκτυα μπορούν να κατασκευαστούν με "στοίβα"(stacking) αρκετών απλών δικτύων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5-10. Οι χρονικές θυρίδες αυτών των δικτύων συγχρονίζονται έτσι ώστε μια χρονική θυρίδα ενός δικτύου να συμπίπτει ακριβώς με την αντίστοιχη χρονική θυρίδα κάθε άλλου δικτύου. Έτσι, η αρχιτεκτονική πολυδικτύων περιέχει 98.304 φορές "φέτες"(slices) ανά εποχή. Το Link-16 υποστηρίζει πολλαπλά, ταυτόχρονα δίκτυα. Αυτή η πολυδικτυακή αρχιτεκτονική επιτρέπει σε πολλές ομάδες συμμετεχόντων να ανταλλάσσουν μηνύματα ανεξάρτητα από τις άλλες ομάδες, κατά την ίδια χρονική περίοδο. Ο αριθμός δικτύου 7-bit επιτρέπει την κατασκευή ενός δικτύου με έως και 128 δίκτυα. Ένας από αυτούς τους αριθμούς δικτύου ο 127, είναι αποκλειστικός για να υποδεικνύει μια διαμόρφωση στοιβαγμένου δικτύου. Τα υπόλοιπα δίκτυα αριθμούνται από το 0 έως το 126. Σε μια διαμόρφωση στοιβαζόμενου δικτύου, ο χειριστής επιλέγει το δίκτυο που θα χρησιμοποιήσει κατά τη διάρκεια των εργασιών. Σε κάθε δίκτυο έχει εκχωρηθεί ένα μοναδικό πρότυπο μετατόπισης συχνότητας για τις μεταδόσεις του. Αν και είναι θεωρητικά δυνατό να οριστεί ένα δίκτυο που περιέχει 127 δίκτυα, οι στατιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι η λειτουργία περίπου 20 δικτύων ταυτόχρονα στην ίδια γεωγραφική περιοχή μπορεί να προκαλέσει κάποια υποβάθμιση στις επικοινωνίες.

Πολλαπλά Δίκτυα



Σχήμα 3.9. Η αρχιτεκτονική του πολυδικτύου JTIDS με στοιβαγμένες 127 από αυτές τις δομές των μονών δικτύων με τα όρια χρονικών διαστημάτων τους ευθυγραμμισμένα. Αυτή η πολυδικτυακή αρχιτεκτονική μπορεί να γίνει αντιληπτή με τη φαντασία ενός κυλίνδρου με 98.304 φέτες χρόνου (time slices).

3.4.4. Συγχρονισμός

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα συγχρονισμένο δίκτυο, πρέπει να οριστεί ένα μοναδικό τερματικό για την παροχή αναφοράς χρόνου. Αυτός ο τερματικός σταθμός ονομάζεται αναφορά δικτυακού χρόνου (Net Time Reference NTR). Ο χρόνος που διατηρείται από αυτό το καθορισμένο τερματικό καθορίζει τον χρόνο συστήματος του δικτύου JTIDS. Ως αναφορά, ο χρόνος αυτός ορίζει την αρχή και το τέλος των χρονικών θυρίδων και εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση των χρονικών φετών στα πολλαπλά δίκτυα. Περιοδικά, το NTR μεταδίδει ένα καθαρό μήνυμα εισόδου για να βοηθήσει άλλους τερματικούς σταθμούς συγχρονίζοντας με το δίκτυο και έτσι αποκτώντας χρόνο με το σύστημα. Το τερματικό JTIDS συγχρονίζεται αυτόματα με

το χρόνο συστήματος του NTR. Ο συγχρονισμός μιας αυτόματης λειτουργίας του τερματικού JTIDS, επιτυγχάνεται σε δύο στάδια. Ο τραχύς συγχρονισμός, το πρώτο βήμα, επιτυγχάνεται όταν λαμβάνεται επιτυχώς ένα δικτυακό μήνυμα εισόδου. Ο καλός συγχρονισμός, το δεύτερο βήμα, συμβαίνει όταν ο τερματικός σταθμός ανταλλάσσει με επιτυχία τα μηνύματα (Round Trip Timing RTT) με το NTR. Στη συνέχεια, κάθε τερματικό διατηρεί ένα μέτρο της ακρίβειας. Ξέρει το χρόνο του συστήματος, που ονομάζεται Χρόνος Ποιότητας (Qt). Συνεχώς βελτιώνει τις πληροφορίες του σχετικά με το χρόνο του συστήματος, μεταδίδοντας περιοδικά τα μηνύματα (Round Trip Timing RTT) και μετρώντας την ώρα άφιξης (Time Of Arrival TOA) όλων των ληφθέντων μηνυμάτων.

3.4.5. Τα συστατικά της σχισμής χρόνου

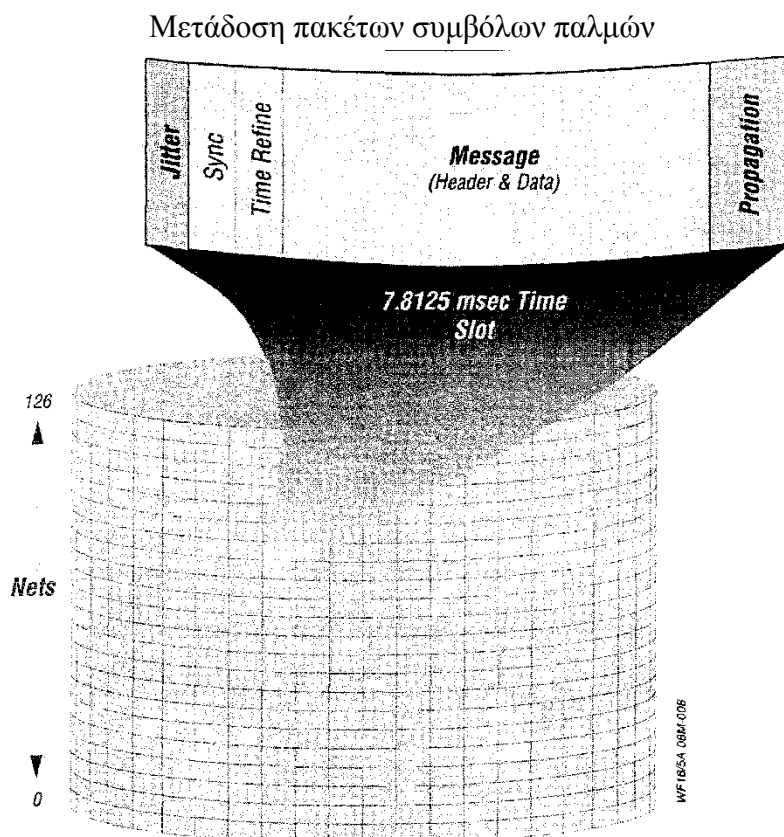
Η βασική μονάδα χρόνου στο δίκτυο JTIDS είναι η σχισμή χρόνου. Όπως έχει αναφερθεί έχει διάρκεια 7,8125 msec και ένα πλαίσιο 12 δευτερολέπτων περιέχει 512 σχισμές ομοιόμορφα κατανομημένες σε τρεις ίσου μεγέθους ομάδες A, B και C. Στη διάρκεια της σχισμής η μονάδα JU είτε θα εκπέμπει είτε θα λαμβάνει δεδομένα άρα μπορούμε να πούμε ότι είναι μια ευκαιρία εκπομπής ή λήψης. Η ίδια η σχισμή ή όπως αλλιώς ονομάζεται παλμός συμβολοπακέτου, αποτελείται από διάφορα μέρη που ξεκινώντας από την αρχή ως το τέλος έχουμε τα ακόλουθα :

- Jitter
- Συγχρονισμού
- Μηνύματος (επικεφαλίδας και δεδομένων)
- Διάδοσης

Η σχισμή ξεκινά με μια καθυστέρηση, ένα νεκρό χρόνο που ονομάζεται jitter και στον οποίο δεν μεταδίδονται παλμοί δεδομένων. Η περίοδος αυτή μεταβάλλεται ψευδοτυχαία ενώ κάθε τερματικό γνωρίζει την περίοδο jitter από σχισμή σε σχισμή χρόνου. Το διάστημα χρόνου jitter δημιουργήθηκε ώστε να αντιμετωπιστεί η επίθεση του παρεμβολέα (jammer) που διοχετεύεται στην έναρξη κάθε εκπομπής δεδομένων στη σχισμή χρόνου ώστε να προκληθούν προβλήματα στην εκπομπή και λήψη των μηνυμάτων όπως και στο συγχρονισμό και στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Σε μερικές περιπτώσεις το jitter απουσιάζει από τη δομή της σχισμής χρόνου προκειμένου να αυξηθεί ο διαθέσιμος χώρος και να μεταδοθεί περισσότερη ποσότητα δεδομένων σε κάθε σχισμή.

Το jitter ακολουθείται από δύο προκαθορισμένης χρονικής διάρκειας παλμούς, τον παλμό συγχρονισμού και τον παλμό βελτίωσης χρόνου (time refinement). Ο ρόλος των παλμών αυτών είναι να επιτρέπουν στον αποδέκτη των δεδομένων να αναγνωρίζει και

να συγχρονίζεται με τους εισερχόμενους παλμούς μηνυμάτων ενώ παράλληλα έχει την ευχέρεια να διορθώνει το ρολόι του. Με άλλα λόγια, τα δεδομένα μεταδίδονται εντός της χρονικής περιόδου ως σειρά πακέτων συμβόλων παλμών που περιέχουν πληροφορίες. Ένα πακέτο συμβόλων παλμών είναι μια περίοδος 13 μικροδευτερολέπτων (μsec) κατά την οποία ο φορέας διαμορφώνεται για 6,4 μsec. Αυτό ακολουθείται από το 6,6 μsec νεκρού χρόνου. Η υποδοχή ξεκινά με καθυστέρηση ή νεκρό χρόνο, που ονομάζεται jitter, στον οποίο δεν υπάρχουν παλμοί που να μεταδίδονται. Η ποσότητα του jitter ποικίλει από time slot σε time slot με ψευδοτυχαίο τρόπο που καθορίζεται από το κρυπτογραφημένο TSEC. Το Jitter συμβάλλει στην αντιπαρεμβολική φύση του σήματος καθιστώντας δύσκολο για έναν παρεμβολέα να γνωρίζει πότε να ενεργοποιήσει το σήμα παρεμβολής. Το Jitter ακολουθείται από δύο σειρές προκαθορισμένων παλμικών συμβόλων που ονομάζονται συγχρονισμός και χρονική βελτίωση. Αυτά τα μοτίβα χρησιμοποιούνται από τον δέκτη για την αναγνώριση και τον συγχρονισμό με το σήμα. Το τμήμα του μηνύματος της μετάδοσης είναι το επόμενο. Αυτοί οι παλμοί φέρουν πληροφορίες κεφαλίδας και δεδομένων.



Σχήμα 3.10. Το time slot περιέχει τα ακόλουθα στοιχεία: jitter, συγχρονισμό, βελτίωση χρόνου, επικεφαλίδα και δεδομένα μηνυμάτων και διάδοση. Κατά τη διάρκεια του συγχρονισμού, του χρόνου βελτίωσης και της κεφαλίδας μηνύματος και των τμημάτων δεδομένων της χρονικής θυρίδας, μεταδίδεται μια ακολουθία συμβόλων που κωδικοποιούνται σε παλμούς που μεταφέρουν πληροφορίες. Τα τμήματα jitter και πολλαπλασιασμού είναι νεκροί χρόνοι στους οποίους δεν μεταδίδονται παλμοί.

Τέλος, το άκρο της υποδοχής χαρακτηρίζεται από μια περίοδο προστασίας, η οποία επιτρέπει τη διάδοση του σήματος. Ο χρόνος φρουράς διάδοσης επιτρέπει μια

κανονική περιοχή 300 ναυτικών μιλίων ή μια εκτεταμένη περιοχή μέχρι 500 ναυτικών μιλίων, ανάλογα με τη ρύθμιση της εμβέλειας του δικτύου. Εν ολίγοις, η αρχιτεκτονική JTIDS TDMA διαιρεί το χρόνο του δικτύου σε εποχές, πλαίσια και χρονικά διαστήματα. Η χρονική θέση είναι η βασική μονάδα πρόσβασης στο δίκτυο. Με διάρκεια 7,8125 .msec: το καθένα, υπάρχουν 128 χρονοθυρίδες κάθε δευτερόλεπτο. Μια JU έχει εκχωρηθεί είτε για τη μετάδοση είτε για τη λήψη σε κάθε χρονική περίοδο. Οι παλμοί που κωδικοποιούνται με πληροφορίες μεταδίδονται κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Είναι δυνατές οι μεταδόσεις από πολλαπλές μονάδες κατά την ίδια χρονική περίοδο.

3.5. Μηνύματα Link-16

Τα μηνύματα Link-16 ανταλλάσσονται κατά τις χρονικές θυρίδες TDMA του δικτύου JTIDS. Κάθε μήνυμα αποτελείται από μια κεφαλίδα μηνύματος και δεδομένα μηνύματος. Η κεφαλίδα του μηνύματος δεν θεωρείται μέρος της δομής του μηνύματος και είναι η ίδια για το JMS και JTIDS. Η κεφαλίδα του μηνύματος καθορίζει τον τύπο δεδομένων και προσδιορίζει τον αριθμό του κομματιού προέλευσης του τερματικού εκπομπής. Έχουν οριστεί τέσσερις τύποι μηνυμάτων:

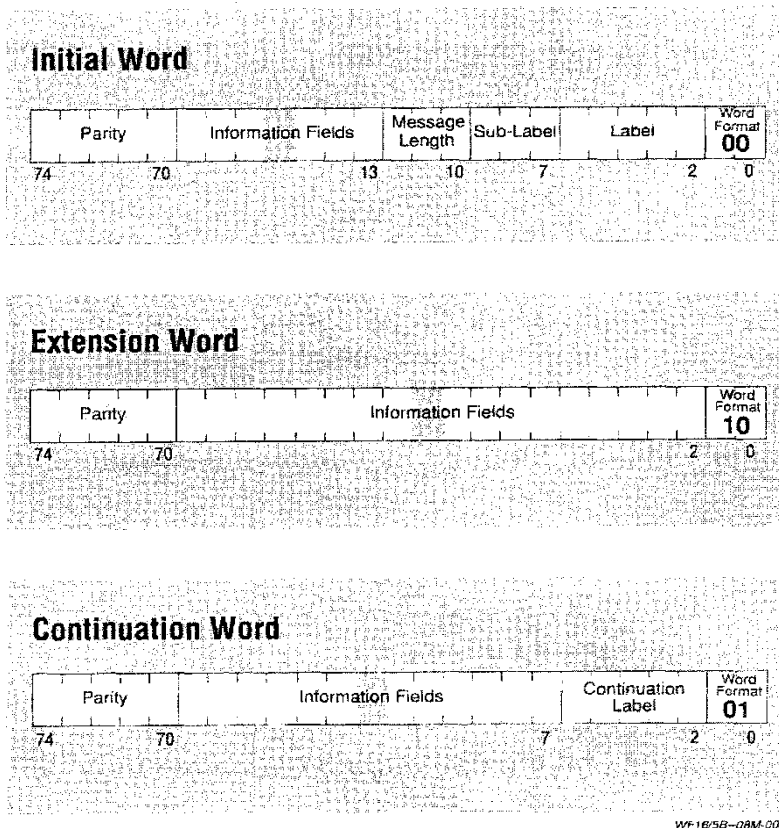
- Σταθερή μορφή
- Μεταβλητή μορφή
- Ελεύθερο κείμενο
- round-trip timing (RTT)

Τα μηνύματα σταθερής μορφής χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή μηνυμάτων της σειράς J. Τα μηνύματα μεταβλητής μορφής παρέχουν έναν γενικό τρόπο ανταλλαγής οποιουδήποτε τύπου μηνυμάτων που ορίζονται από το χρήστη. Τα μηνύματα με ελεύθερο κείμενο χρησιμοποιούνται για ψηφιακή φωνή. Τα RTT μηνύματα χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό. Τα δεδομένα που περιέχονται σε αυτά τα μηνύματα μεταδίδονται πάντα ως μπλοκ 3-λέξεων σταθερού μήκους των 225 bits το καθένα. Αυτά τα μπλοκ 3 λέξεων μπορούν να τοποθετηθούν σε μια χρονική θυρίδα με διαφορετικές πυκνότητες: Standard (ένα μπλοκ 3 λέξεων), Packed-2 (δύο μπλοκ 3 λέξεων) και Packed-4 (τέσσερα μπλοκ 3 λέξεων).

3.5.1. Μηνύματα σταθερής μορφής

Τα μηνύματα σταθερής μορφής αποτελούνται από μία ή περισσότερες λέξεις, μέχρι οκτώ. Κάθε λέξη αποτελείται από 75 bits, εκ των οποίων τα 70 είναι δεδομένα, 4 χρησιμοποιούνται για ελέγχους ισοτιμίας και 1 είναι εφεδρικό. Ορίζονται τρεις τύποι λέξεων: η αρχική λέξη, η λέξη επέκτασης και η λέξη συνέχειας. Τα μηνύματα σταθερής μορφής αποτελούνται από μια αρχική λέξη, μία ή περισσότερες λέξεις επέκτασης και μία ή περισσότερες λέξεις συνέχισης. Εάν υπάρχει ένας ανεπαρκής αριθμός λέξεων 75-bit για να γεμίσει ένα μπλοκ μετάδοσης, το τερματικό τοποθετεί το μπλοκ με λέξεις χωρίς δήλωση (No Statement NS). Η μέτρηση μηνυμάτων στον

κεντρικό υπολογιστή βοηθά στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των NS λέξεων που εισάγονται από το τερματικό. Τα μηνύματα σταθερής μορφής χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή πληροφοριών τακτικής και εντολών μέσω του Link-16. Αυτά είναι τα μηνύματα που συνήθως αναφέρονται ως μηνύματα της σειράς J.



Σχήμα 3.11. Το καθορισμένα JTIDS μηνύματα μορφοποίησης μπορεί να περιέχουν μια αρχική λέξη. Μία ή περισσότερες λέξεις επέκτασης και μία ή περισσότερες λέξεις συνέχισης. Μέχρι 8 λέξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός μόνο μηνύματος της σειράς J.

3.5.2. Έλεγχος ισότητας (Parity Checking)

Τα μηνύματα σταθερής μορφής κωδικοποιούνται πάντοτε για έλεγχο ισότητας. Τα δυαδικά ψηφία 4 έως 18 της κεφαλίδας μηνύματος, τα οποία περιέχουν τον αριθμό κομματιού πηγής, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα δυαδικά ψηφία δεδομένων 210 των 3 λέξεων δεδομένων για τον υπολογισμό τιμής ισότητας 12 bit. Αυτά τα δυαδικά ψηφία κατανέμονται στις θέσεις 71-74 κάθε λέξης 75-bit. Το κομμάτι 70 κάθε λέξης διατηρείται ως εφεδρικό.

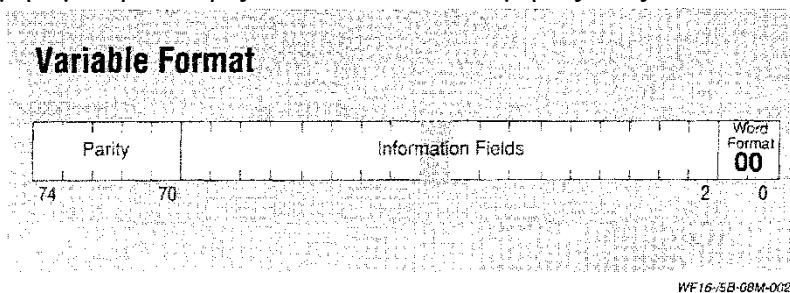
3.5.3. Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων

Τα μηνύματα σταθερής μορφής κωδικοποιούνται πάντα για ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων. Το σχήμα κωδικοποίησης είναι ένας αλγόριθμος γνωστός ως κωδικοποίηση Reed-Solomon (R-S). Δεκαέξι κομμάτια ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων προστίθενται για κάθε 15 bit δεδομένων, έτσι ώστε να γίνουν 15 bits

πραγματικών δεδομένων 31 bits στο μήνυμα. Η κωδικοποίηση R-S μπορεί να ανιχνεύσει και να διορθώσει έως 8 bit κατά λάθος. Η σημείωση (31,15) μερικές φορές χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτόν τον αλγόριθμο κωδικοποίησης. Η κωδικοποίηση R-S μετασχηματίζει επομένως την ακολουθία 75-bit, σε μια ακολουθία 155-bit. Αυτά τα bits στη συνέχεια λαμβάνονται σε ομάδες των πέντε για να δημιουργήσουν 31 σύμβολα. Έτσι, η κωδικοποίηση R-S μετατρέπει κάθε λέξη Link-16 από 75-bit σε μια κωδική λέξη R-S με 31 σύμβολα.

3.5.4. Μηνύματα μεταβλητής μορφής

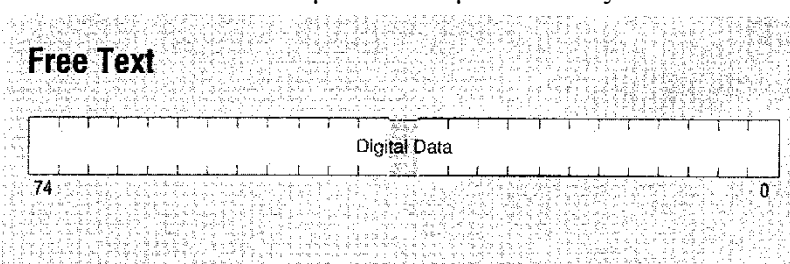
Όπως τα μηνύματα σταθερής μορφής, τα μηνύματα μεταβλητής μορφής αποτελούνται από λέξεις 75-bit. Ωστόσο, τα μηνύματα μεταβλητής μορφής ενδέχεται να διαφέρουν τόσο ως προς το περιεχόμενο όσο και ως προς το μήκος, και τα πεδία εντός του μηνύματος μπορούν να διασχίσουν τα όρια των λέξεων. Οι πληροφορίες στο ίδιο το μήνυμα προσδιορίζουν τα πεδία και το μήκος τους.



Σχήμα 3.12. Τα μηνύματα μεταβλητής μορφής ποικίλλουν ως προς το περιεχόμενο και το μήκος

3.5.5. Μηνύματα ελεύθερου κειμένου

Τα μηνύματα ελεύθερου κειμένου είναι ανεξάρτητα από οποιοδήποτε πρότυπο μηνύματος. Είναι μη μορφοποιημένα και χρησιμοποιούν όλα τα 75 bits στη λέξη δεδομένων και όλα τα 225 bits δεδομένων στο μπλοκ 3 λέξεων.



Σχήμα 3.13. Τα μηνύματα ελεύθερου κειμένου είναι ανεξάρτητα από οποιοδήποτε πρότυπο μηνύματος. Όλα τα δυαδικά ψηφία στη λέξη χρησιμοποιούνται για τα δεδομένα.

Καμία επεξεργασία ισότητας δεν συνδέεται με μηνύματα ελεύθερου κειμένου. Μπορούν ή δεν μπορούν να είναι κωδικοποιημένα με τον Reed-Solomon για διόρθωση σφαλμάτων. Όταν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση R-S, τα 225 bits δεδομένων, αντιστοιχίζονται σε 465 bits για μετάδοση. Όταν η κωδικοποίηση R-S δεν χρησιμοποιείται, όλα τα 465 bits είναι διαθέσιμα για δεδομένα. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται μόνο 450 από αυτά. Αυτό επιτρέπει μια ενιαία αντιστοίχιση

θυρίδων ώστε να είναι συμβατή με τις τυπικές ταχύτητες γραμμών (2400 bits ανά δευτερόλεπτο (bps), 4800 bps, κ.λπ.). Η μορφή μηνύματος ελεύθερου κειμένου χρησιμοποιείται για το Link-16 voice.

RRN	Slots/Frame	Slots/Sec	Bits/Slot	Bits/Sec
13	128	10-2/3	225 (R-S encoded)	2400
			450 (unencoded)	4800

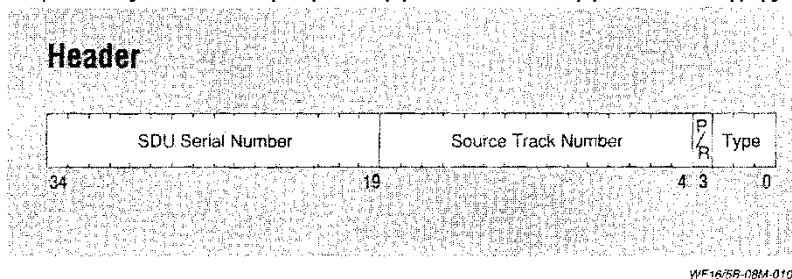
Πίνακας 3.5. Μια ενιαία αντιστοίχιση θυρίδων που περιέχουν ελεύθερα μηνύματα κειμένου μπορεί να υποστηρίξει τυπικές ταχύτητες σειριακής γραμμής.

3.5.6. Συσκευασία μηνυμάτων (Message Packing)

Οι λέξεις μηνύματος μπορούν να ληφθούν σε ομάδες των 3 λέξεων, 6 λέξεων, ή 12 λέξεων για τη δημιουργία μεταδόσεων. Εάν υπάρχει ανεπαρκής αριθμός λέξεων για την ολοκλήρωση μιας ομάδας, το τερματικό συμπληρώνεται με μια λέξη "χωρίς δήλωση". Η επεξεργασία μιας ομάδας 3 λέξεων ονομάζεται μορφή Standard (STD). Η επεξεργασία μιας ομάδας 6 λέξεων ονομάζεται μορφή Packed-2 (P2). Η επεξεργασία 12 λέξεων ονομάζεται μορφή Packed-4 (P4).

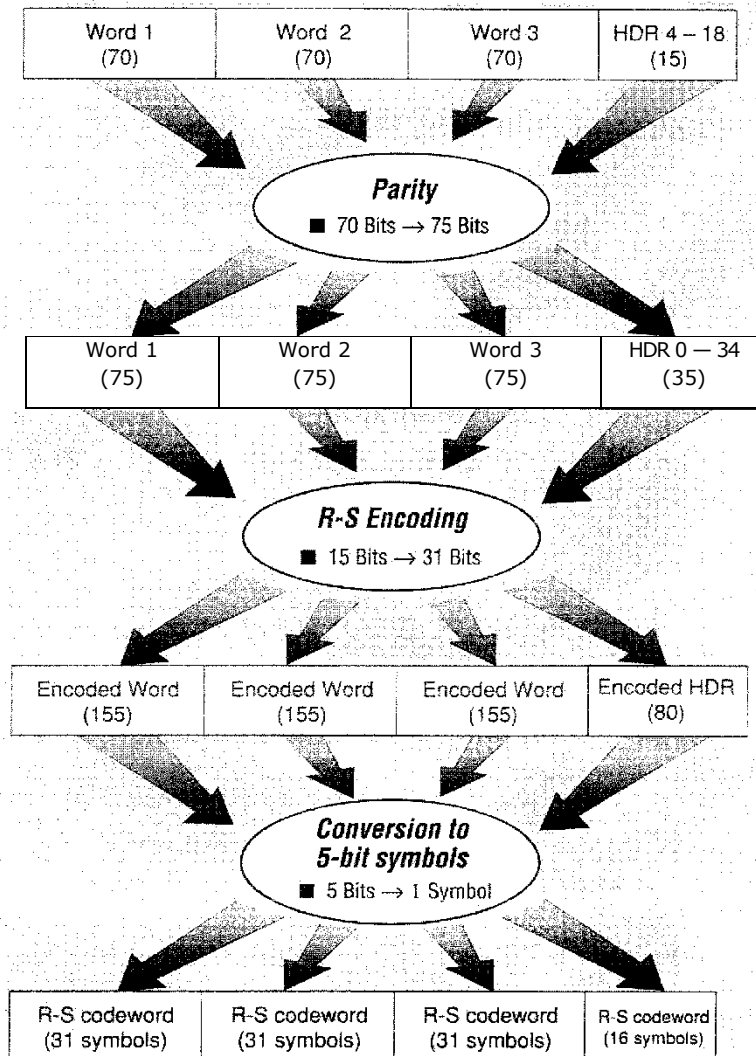
3.5.7. Κεφαλίδα μηνύματος

Η κεφαλίδα του μηνύματος καθορίζει αν το μήνυμα που θα ακολουθήσει είναι σταθερής μορφής, μεταβλητής μορφής ή ελεύθερο κείμενο. Προσδιορίζει αν το μήνυμα είναι κωδικοποιημένο ή μη κωδικοποιημένο και ποια δομή συσκευασίας έχει χρησιμοποιηθεί. Αναγνωρίζει επίσης τον σειριακό αριθμό της μονάδας των δεδομένων ασφαλείας και τον αριθμό κομματιού του τερματικού πηγής.



Σχήμα 3.14. Η κεφαλίδα του μηνύματος καθορίζει τον τύπο των δεδομένων και προσδιορίζει τον αριθμό του κομματιού πηγής του τερματικού μετάδοσης. Τα δυαδικά ψηφία της κεφαλίδας χρησιμοποιούνται επίσης στον υπολογισμό της ισοτιμίας για κάθε ομάδα 3 λέξεων. Το P/R, ο τύπος τροποποιητή bit, παρέχει πληροφορίες συσκευασίας ή αναμετάδοσης.

Η κεφαλίδα του μηνύματος περιέχει 35 bits. Αυτά είναι κωδικοποιημένα με κώδικα R-S, με έναν (16, 7) αλγόριθμο έτσι ώστε τα 35 bits να γίνονται 80 bits. Αυτά λαμβάνονται πέντε κάθε φορά για να σχηματίσουν μια κωδικοποιημένη λέξη κεφαλίδας R-S που περιέχει 16 σύμβολα.



Σχήμα 3.15. Τα δεδομένα υποβάλλονται σε πολλές διαταγμένες πράξεις κατά τη μετατροπή τους από τις λέξεις Link-16 σε πακέτα συμβόλων JTIDS: έλεγχος ισοτιμίας, κωδικοποίηση Reed-Solomon και μετατροπή σε σύμβολα 5-bit. Εδώ η διαδικασία απεικονίζεται για την τυποποιημένη δομή συσκευασίας.

Τα μηνύματα με τη σειρά τους αποτελούνται από δύο κύρια μέρη, την επικεφαλίδα και τα δεδομένα. Η επικεφαλίδα (header) περιέχει πληροφορίες που επιτρέπουν στο τερματικό να μεταφράζει και να επεξεργάζεται σωστά τα δεδομένα που περιέχονται στο κύριο μέρος της σχισμής. Στην επικεφαλίδα βρίσκεται η ταυτότητα του μηνύματος της σχισμής και εκπέμπεται μέσω 16 διπλών παλμών (double pulse) συμβολοπακέτων. Παρακάτω αναφέρονται λεπτομερώς οι πληροφορίες που περιέχονται στην επικεφαλίδα.

1. Αριθμός ίχνους της μονάδας που εκπέμπει τα δεδομένα (source track number of originating unit)
2. Δείκτης αναμετάδοσης (relay indicator)

3. Βαθμός συσκευασίας - ομαδοποίησης του μηνύματος (message packing level)

4. Μορφή μηνύματος, σταθερής ή ελεύθερου κειμένου (message format, fixed or free text)

5. Μονάδα ασφάλειας δεδομένων, πληροφορίες για αποκωδικοποίηση του μηνύματος (secure data unit, information for decryption)

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η επικεφαλίδα προδιαγράφει τον τύπο των δεδομένων και αναγνωρίζει τον αριθμό ίχνους του τερματικού που εκπέμπει.

3.6. Τα δεδομένα

Το πιο ενδιαφέρον τμήμα της σχισμής προφανώς είναι αυτό που περιέχει τα δεδομένα. Τα μηνύματα και κατ' επέκταση τα δεδομένα με τη σειρά τους διακρίνονται σε τέσσερις μορφές :

- Σταθερής μορφής (fixed format)
- Μεταβλητής μορφής (variable format)
- Ελεύθερου κειμένου (free text)
- Round trip timing

Τα μηνύματα σταθερής μορφής χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή μηνυμάτων των σειρών J, τα μηνύματα μεταβλητής μορφής παρέχουν ένα γενικό πλαίσιο ανταλλαγής μηνυμάτων, τα μηνύματα ελεύθερου κειμένου ευθύνονται για την ανταλλαγή φωνής και τέλος τα μηνύματα round trip χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό των μονάδων του δικτύου.

Τα δεδομένα που περιέχονται σε αυτά τα μηνύματα εκπέμπονται πάντα σαν σταθερού μήκους μηνύματα δηλαδή με τη μορφή μπλοκ των 3 λέξεων (συνολικά 225 bit). Οι τρεις λέξεις των δεδομένων μπορούν να "συσκευαστούν" στη διάρκεια μια σχισμής χρόνου στις παρακάτω μορφές : καθιερωμένη (standard, ένα μπλοκ των 3 λέξεων), packed - 2 (δύο μπλοκ των 3 λέξεων), packed - 4 (τέσσερα μπλοκ των 3 λέξεων).

Τα μηνύματα σταθερής μορφής αποτελούνται από μια ή περισσότερες λέξεις (έως οκτώ) ,και κάθε λέξη με τη σειρά της αποτελείται από 75 bit εκ των οποίων τα 70 είναι καθαρά για δεδομένα, 4 για έλεγχο ισοτιμίας και ένα σαν περίσσευμα. Τα μηνύματα σταθερής μορφής κωδικοποιούνται πάντα για τον έλεγχο ισοτιμίας. Τα bits από το 4

μέχρι το 18 της επικεφαλίδας που περιέχει τον αριθμό ίχνους της πηγής δεδομένων, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα 210 bit δεδομένων των 3 λέξεων για τον υπολογισμό μιας 12 bit ποσότητας ισοτιμίας για λόγους ασφάλειας στη μετάδοση. Αυτά τα bit ισοτιμίας διαμοιράζονται στις θέσεις 71 έως 74 για κάθε 75 bit λέξη ενώ το bit 70 λαμβάνεται σαν περίσσευμα. Τα μηνύματα επίσης σταθερής μορφής κωδικοποιούνται επίσης για τον εντοπισμό σφαλμάτων και τη διόρθωση αυτών. Το σχέδιο κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι ένας αλγόριθμος γνωστός με το όνομα Reed -Solomon (R - S) κωδικοποίηση. Έτσι 16 bit εντοπισμού και διόρθωσης σφάλματος προστίθενται για κάθε 15 bit δεδομένων έτσι που τελικά τα 15 bit πραγματικών δεδομένων στο μήνυμα να γίνονται 31. Η κωδικοποίηση R - S μπορεί να εντοπίσει και να διορθώσει σφάλματα που φτάνουν τα 8 bit. Κατά συνέπεια τα 75 bit της λέξης γίνονται 155 τα οποία στη συνέχεια χωρίζονται σε ομάδες των 5 bit δημιουργώντας έτσι 31 σύμβολα. Άρα μια λέξη Link-16 των 75 bit μετατρέπεται σε μια R- S λέξη των 31 συμβόλων. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε ότι την κωδικοποίηση R -S υφίσταται και η επικεφαλίδα του μηνύματος που μετατρέπεται τα 35 που περιέχει αρχικά σε 80. Ο αλγόριθμος R - S που συμβάλει στον εντοπισμό και τη διόρθωση των σφαλμάτων που προκύπτουν στη μετάδοση των δεδομένων, παρεμβάλλει 9 bit για κάθε 7 bit της επικεφαλίδας. Τα 80 bit που προκύπτουν ομαδοποιούνται σε 16 σύμβολα των 5 bit.

Τα μηνύματα μεταβλητής μορφής αποτελούνται και αυτά από λέξεις των 75 bit αλλά ποικίλουν τόσο σε περιεχόμενα όσο και σε μήκος ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως από φορείς όπως ο αμερικανικός στρατός για τα δίκτυα TADIL B.

Τα μηνύματα ελεύθερου κειμένου ή free text είναι ανεξάρτητα από κάθε πρότυπο μηνυμάτων ενώ και τα 75 bit χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μετάδοση δεδομένων. Στα εν λόγω μηνύματα δεν υπάρχει έλεγχος ισοτιμίας παρά μόνο R - S κωδικοποίηση έτσι ώστε τα 225 bit δεδομένα να μετατρέπονται σε 465 bit. Όταν η R - S κωδικοποίηση δεν είναι αναγκαία τότε τα 450 από τα 465bit χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων στη διάρκεια μιας σχισμής χρόνου. Ο ρυθμός αυτός εκπομπής δεδομένων ισοδυναμεί κατά κάποιο τρόπο με τους καθιερωμένους ρυθμούς των γραμμών τηλεπικοινωνίας π.χ. 2400 bps και 4800 bps (σχ.) με αποτέλεσμα τα free text μηνύματα να χρησιμοποιούνται στο δίκτυο Link-16 για τη μετάδοση φωνής.

Τα μηνύματα Round Trip Timing (RTT) ανταλλάσσονται κατά τη διάρκεια μιας και μόνο χρονικής σχισμής και χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό των μονάδων JTIDS και του συνόλου του συστήματος γενικότερα. Αντιπροσωπεύουν έτσι τη μόνη εξαίρεση στον κανόνα ότι τα τερματικά μπορούν είτε να λαμβάνουν είτε να εκπέμπουν στη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής. Τα μηνύματα RRT αποτελούνται από δύο ομάδες μηνυμάτων τα RRT ερώτησης (RRT Interrogation, RRT -1) και RRT απάντησης (RRT Reply) που αντιστοιχούν στην εκπομπή και λήψη.

Τα RRT - I μπορούν είτε να απευθύνονται σε κάποιο συγκεκριμένο παραλήπτη (addressed, RRT - A) τα οποία εκπέμπονται στην ομάδα συμμετεχόντων με την ονομασία NPG 2, είτε εκπομπής (broadcast, RRT - B) που χρησιμοποιούνται αντίστοιχα από την ομάδα NPG 3. Τα RRT - A αποτελούνται από ένα μήνυμα επικεφαλίδα και απευθύνονται στη μονάδα που αναφέρει την υψηλότερη ποιότητα χρόνου (time quality, Q_i). Μεταδίδονται σε συγκεκριμένη χρονική σχισμή και μόνο η εν λόγω μονάδα θα απαντήσει. Απ' την άλλη τα μηνύματα RRT - B περιέχουν το Q_i της μονάδας που εκπέμπει και δεν απευθύνονται σε κάποιο ιδιαίτερο παραλήπτη αλλά σε κάθε τερματικό με υψηλότερο Q_i . Η απάντηση σε ένα RRT - I γίνεται μέσω των μηνυμάτων RRT reply μεταδίδεται στη διάρκεια της ίδιας χρονικής σχισμής με αυτήν της ερώτησης χωρίς να υπάρχει χρόνος jitter και εκπέμπεται 4,215 msec από την εκκίνηση της σχισμής χρόνου του παραλήπτη.

Περιέχει επίσης τη χρονική στιγμή στην οποία ελήφθη το τελευταίο σύμβολο της ερώτησης. Ο χρόνος άφιξης (time of arrival, TOA) μετριέται από την κεραία και αναφέρεται σε μονάδες των 12,5 nanosecond. Το ερωτών τερματικό χρησιμοποιεί το εκπεμπόμενο μέσω του RRT reply TOA σε συνδυασμό με το δικό του υπολογισμένο TOA της απάντησης προκειμένου να διορθωθεί το ρολόι του συστήματος. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ότι το σφάλμα στο σύστημα χρονισμού του τερματικού που στέλνει τα RRT -I είναι τέτοιο ώστε το όριο της σχισμής χρόνου να καθυστερεί κατά E. Το μέγεθος του E μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του TOA του ερωτούντος (TOA_j) όπως αυτό αναφέρεται στην απάντηση και του TOA_r που υπολογίζεται κατευθείαν από το ερωτών τερματικό (λαμβάνει προφανώς υπόψη του το γεγονός ότι η απάντηση μεταδίδεται 4,725 msec μετά από την αρχή της

σχισμής χρόνου). Αναλυτικότερα η μέθοδος του συγχρονισμού μιας μονάδας JU με το χρόνο δικτύου θα παρουσιαστεί στο τελευταίο κεφάλαιο.

Προκειμένου να προστατευθούν τα μηνύματα από παρεμβολές που έχουν σαν στόχο κυρίως τις επικεφαλίδες του μηνύματος που περιέχουν τις πληροφορίες για τη δομή του μηνύματος και των δεδομένων, χρησιμοποιείται η τεχνική του "ανακατέματος"- εμπλοκής των συμβόλων (symbol interleaving). Έτσι ανάλογα με τον τρόπο "συσκευασίας" και το πλήθος των κωδικοποιημένων λέξεων, τα σύμβολα των 5 bit περιπλέκονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μια προκαθορισμένη ψευδοτυχαία σειρά συμβολών. Το τέλος της σχισμής χρόνου χαρακτηρίζεται από ένα χρονικό διάστημα ασφάλειας, μια περίοδος επιφυλακής, που επιτρέπει την ομαλή και απρόσκοπτη διάδοση του σήματος. Ο χρόνος αυτός διασφαλίζει την κανονική και συνηθισμένη ακτίνα δράσης (ακτίνα εκπομπής) των 300 ναυτικών μιλίων ή μιας πιο εκτεταμένης ακτίνας εκπομπής που φτάνει τα 500 ναυτικά μίλια, ανάλογα με τη δομή του δικτύου.

3.7. Το εσωτερικό της σχισμής χρόνου

Για να μεταδοθούν τα ψηφιακά δεδομένα από μια μονάδα JU σε μια άλλη μέσω ραδιοκυμάτων, μετατρέπουμε το ψηφιακό σήμα σε αναλογικό ενώ το διαμορφώνουμε με τις μεθόδους Cycling Code Shift Keying (CCSK) και Continuous Phase Shift Modulation (CPSM).

Στο CCSK τα σύμβολα των 5 bit της κωδικοποιημένης λέξης των μηνυμάτων αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες σειρές των 32 bit που ονομάζονται chip (πίνακας) και είναι $2^5 = 32$ στο πλήθος. Η επεξεργασία CCSK είναι τέτοια ώστε το αρχικό σύμβολο των 5 bit να μπορεί να προκύψει παρά την παρουσία αρκετών λαθών στην κωδικοποιημένη λέξη chip. Η 32 bit chip σειρά κωδικοποιείται περαιτέρω με τη χρήση της κρυπτομεταβλητής TSEC. Για την αύξηση της ασφάλειας στην εκπομπή των δεδομένων, πραγματοποιείται η λογική πράξη XOR μεταξύ της 32 bit σειράς με μια επίσης 32 bit σειράς ψευδοτυχαίου θορύβου. Το αποτέλεσμα καλείται σύμβολο εκπομπής (transmission symbol). Ο ψευδοτυχαίος θόρυβος συνεχώς μεταβάλλεται και

καθορίζεται από τη κρυπτομεταβλητή TSEC. Αποτέλεσμα όμως αυτής της διαδικασίας είναι να φαίνεται η τελική εκπομπή σαν ασύμφωνος θόρυβος (incoherent noise).

Το συμβολοπακέτο των 5 bit που χρησιμοποιεί το JTIDS για τη μετάδοση δεδομένων εκπέμπεται με παλμούς και παράλληλα από παλμό σε παλμό το τερματικό μεταπηδά με ψευδοτυχαίο τρόπο από συχνότητα σε συχνότητα σε ένα σύνολο 51 συχνοτήτων. Η εκπομπή των παλμών JTIDS πραγματοποιείται με μία από τις παρακάτω μορφές :

1. Μονός παλμός (single pulse)

Η εκπομπή μονού παλμού έχει χρονική διάρκεια 13 μβεο όπου τα δεδομένα εκπέμπονται σε χρονικό διάστημα ίσο με 6,6 usec ακολουθούμενο από 6,6 μsec νεκρού χρόνου. Κάθε παλμό δε περιέχει διαφορετικό συμβολοπακέτο.

2. Διπλός παλμός (double pulse)

Στην εκπομπή των συμβολοπακέτων μέσω διπλών παλμών ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτήν του μονού παλμού με τη μόνη διαφορά ότι γίνεται επί δύο.

Έτσι τα δεδομένα εκπέμπονται δύο φορές σε διαφορετικές συχνότητες μεταξύ τους, παρέχοντας μεγαλύτερη προστασία όσον αφορά πολλαπλών διαδρόμων (multi-path)

παρεμβολές και ηλεκτρονικών αντιμέτρων. Το τίμημα που πληρώνουμε είναι η μείωση της χωρητικότητας της σχισμής χρόνου. Η επικεφαλίδα, το διάστημα συγχρονισμού και τη βελτίωση χρόνου (time refinement) εκπέμπονται πάντα με διπλούς παλμούς για μεγαλύτερη ασφάλεια και σωστή λήψη του σήματος.

Η επικεφαλίδα και τα δεδομένα των μηνυμάτων JTIDS μπορούν να "συσκευασθούν" και να γίνει η εκπομπή τους με διάφορους τρόπους που εξαρτώνται από τις απαιτήσεις που έχουμε όσον αφορά τη χωρητικότητα δεδομένων. Οι ανάλογοι συνδυασμοί είναι οι εξής:

1. Καθιερωμένης μορφής με διπλό παλμό (standard double pulse, STD - DP)
2. Packed-2 με απλό παλμό (packed-2 single pulse, P2SP)
3. Packed-2 με διπλό παλμό (packed-2 double pulse, P2DP)
4. Packed-4 με μονό παλμό (packed-4 single pulse, P4SP)

3.7.1. STD-DP

Η επικεφαλίδα και το τμήμα των δεδομένων για αυτή τη διαμόρφωση αποτελούνται από 109 πεπλεγμένα μεταξύ τους σύμβολα στη διάρκεια μιας σχισμής χρόνου και ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την εκπομπή τους με διπλό παλμό είναι 2,834 msec. Εξάλλου για την καθιερωμένη μορφή μηνυμάτων JTIDS έχουμε τρεις λέξεις δεδομένων των 75 bits η κάθε μία και επικεφαλίδα των 35 bits. Τα 225 συνολικά bits δεδομένων με την κωδικοποίηση R-S γίνονται 465 bits και η επικεφαλίδα αντίστοιχα γίνεται 80 bits. Κατά συνέπεια έχουμε 93 σύμβολα εκπομπής (chip) για τα δεδομένα και 16 σύμβολα εκπομπής (chip) για την επικεφαλίδα, στο σύνολο τους 109.

3.7.2. P2SP

Το μέρος της σχισμής χρόνου που καταλαμβάνουν η επικεφαλίδα και τα δεδομένα εκπέμπεται μέσω 16 συμβόλων διπλών παλμών και 186 συμβόλων απλών παλμών αντίστοιχα. Η επικεφαλίδα δε αποτελείται από 35 κωδικοποιημένα bit, που με τη χρήση του αλγόριθμου R-S γίνονται 80, και τα δεδομένα από 450 κωδικοποιημένα bit που μετατρέπονται αντίστοιχα σε 930 bit R-S που μπορούν σε ελεύθερη μορφή χωρίς κωδικοποίηση να χρησιμοποιηθούν για ανταλλαγή μηνυμάτων ελεύθερου κειμένου για μετάδοση φωνής. Ο χρόνος που απαιτείται για την εκπομπή της επικεφαλίδας και των δεδομένων στη διάρκεια της σχισμής χρόνου είναι 2,834 msec, χρόνος ίσος με αυτόν της δομής STD-DP. Παρατηρούμε ότι αν και η επικεφαλίδα εκπέμπεται περιττά (με διπλούς παλμούς), ο διπλασιασμός της χωρητικότητας των δεδομένων στον εν λόγω συνδυασμό πραγματοποιείται με το να εκπέμπονται τα δεδομένα μόνο μια φορά με 12 λέξεις ανά σχισμή χρόνου ενώ υπολείπεται σε ικανότητα αντίστασης κατά των παρεμβολών (jam-resistant) έναντι του STD-DP.

3.8. ΤΑ ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ο ρυθμός εξυπηρέτησης (throughput), η ακτίνα εκπομπής και η ικανότητα αντίστασης στις παρεμβολές του Link-16 εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τρόπο "συσκευασίας" (packing) των μηνυμάτων. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να εκπέμψουμε σε μια σχισμή χρόνου 3,6 ή 12 λέξεις δεδομένων μαζί. Η ακτίνα δράσης του Link-16

(range) μπορεί να είναι κανονική (normal) ή εκτεταμένη (extended) με τη μεν πρώτη να κυμαίνεται στα 300 ναυτικά μίλια και τη δεύτερη στα 500 ναυτικά μίλια. Η κανονική ακτίνα μπορεί να επιτευχθεί με όλα τα είδη ομαδοποίησης ενώ αντίθετα η εκτεταμένη ακτίνα επιτυγχάνεται μόνο με τη χρήση του STD-DP και P2SP όπου και ελαττώνεται ο χρόνος jitter ώστε να υπάρξει μεγαλύτερος χρόνος για τη διάδοση του σήματος. Επειδή λοιπόν η δομή της σχισμής χρόνου εξαρτάται κατά κάποιο τρόπο από την ακτίνα, όλες οι μονάδες που συμμετέχουν στο δίκτυο πρέπει να έχουν όλα την ίδια ακτίνα δράσης.

Ο βαθμός AJ του δικτύου Link-16 εξαρτάται, εκτός των άλλων, από τη μεταβολή του χρόνου εκκίνησης (jitter) κάθε σχισμής χρόνου αλλά και από την μορφή των παλμών (διπλών ή απλών) με τις οποίες εκπέμπονται τα μηνύματα. Η ικανότητα AJ της εκπομπής μειώνεται καθώς η throughput αυξάνεται, με την P4SP να δίνει το μεγαλύτερο throughput και το μικρότερο χρόνο jitter ταυτόχρονα. Το τερματικό απ' την άλλη είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί το μεγαλύτερο όριο AJ, που του παρέχεται από τη καθιερωμένη δομή "συσκευασίας", όποτε και όπου αυτό είναι δυνατό. Το όριο λοιπόν της AJ ικανότητας υποχωρεί όταν το φορτίο δεδομένων στη σχισμή χρόνου αυξάνεται. Η σειρά προτίμησης για τον τρόπο "συσκευασίας" των λέξεων στα μηνύματα του Link-16 είναι: STD, P2SP, P2DP και P4SP. Η παράμετρος που καλείται Άνω Όριο "Συσκευασίας" (Upper Packing Limit) θέτει άνω όριο στο κατά πόσο το τερματικό μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους όρους της παραπάνω σειράς προτίμησης. Με άλλα λόγια το Άνω Όριο "Συσκευασίας" το όριο του AJ που μπορεί να δοθεί στην διάρκεια κάθε χρονικής σχισμής. Τα τερματικά όμως μπορούν να αγνοήσουν την παράμετρο αυτή για ορισμένες χρονικές σχισμές με τη βοήθεια ειδικών μηνυμάτων, των Terminal Input Message.

Το αμερικάνικο ναυτικό ρυθμίζει τα τερματικά του με ένα Άνω Όριο "Συσκευασίας" που αντιστοιχεί στη δομή P2DP. Καθώς ο φόρτος δεδομένων αυξάνεται το τερματικό μεταβάλλει αυτόματα τη λειτουργία του σύμφωνα με τη καθιερωμένη δομή ενώ απ' την άλλη όταν ο φόρτος δεδομένων μειώνεται η λειτουργία των τερματικών ρυθμίζεται αυτόματα ώστε να εξυπηρετείται η δομή P2. Η δομή P4SP δεν χρησιμοποιείται σε καμιά περίπτωση.

3.9. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ JTIDS ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ

Τρεις είναι οι κύριες διαμορφώσεις στις οποίες λειτουργούν τα JTIDS τερματικά

- Mode-1
- Mode-2
- Mode-4

Mode-1. Η διαμόρφωση αυτή είναι η συνήθης λειτουργία των JTIDS τερματικών. Περιλαμβάνει την τεχνική της αναπήδησης συχνότητας όπως και την χρήση των κρυπτομεταβλητών MSEC και TSEC για την ασφάλεια και τη σωστή εκπομπή των μηνυμάτων.

Mode-2. Στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιείται αναπήδηση συχνότητας ενώ οι περιορισμοί που υπάρχουν σε περίοδο ειρήνης όσον αφορά τη χρήση των σχισμών χρόνου (παρεμβολή στις επικοινωνίες πολιτικής αεροπορίας) εξαλείφονται.

Mode-4. Απουσιάζει η τεχνική της αναπήδησης συχνότητας ενώ η ασφάλεια επικοινωνίας υποβαθμίζεται για να επιτρέπεται στα τερματικά να λειτουργούν σε μια κλασσική ζεύξη δεδομένων.

Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι η Mode-1 καθώς οι δύο άλλες διαμορφώσεις είναι ειδικής φύσεως και παρουσιάζουν μειωμένες δυνατότητες όσον αφορά τη χωρητικότητα, την ασφάλεια και τις επιδώσεις.

3.10. ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LINK-16

Το δίκτυο JTIDS λειτουργεί στην μάντα συχνότητων Lx των UHF που καλύπτει τις συχνότητες από 950 MHz έως 1150 MHz

Οι 51 συχνότητες που χρησιμοποιούνται για την εκπομπή και λήψη δεδομένων με την τεχνική της αναπήδησης συχνότητας, βρίσκονται μεταξύ 969 MHz και 1206 MHz για κάθε 3 MHz του εύρους αυτού. Δυο δευτερεύουσες συχνότητες κεντραρισμένες στα 1030 MHz και 1090 MHz αποκλείονται από το φάσμα λειτουργίας του JTIDS γιατί χρησιμοποιούνται από το σύστημα IFF. Στη διαμόρφωση 1 (mode 1) κάθε παλμός εκπέμπεται σε διαφορετική συχνότητα με βάση κάποια ψευδοτυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό δικτύου και την κρυπτό-μεταβλητή TSEC. Στη διαμόρφωση 2 (mode2) όλοι οι παλμοί εκπέμπονται στα 969 MHz (πίνακας 4.5)

Αριθμός συχνότητας (frequency number)	Συχνότητα (HZ)	Αριθμός συχνότητας (frequency number)	Συχνότητα (HZ)	Αριθμός συχνότητας (frequency number)	Συχνότητα (HZ)
0	969	34	1062	34	1158
1	972	35	1065	35	1161
2	975	36	1113	36	1164
3	978	37	1116	37	1167
4	981	38	1119	38	1170
5	984	39	1122	39	1173
6	987	40	1125	40	1176
7	990	41	1128	41	1179
8	993	42	1131	42	1182
9	996	43	1134	43	1185
10	999	44	1137	44	1188
Π	1002	45	1140	45	1191
12	1005	46	1143	46	1194
13	1008	47	1146	47	1197
14	1053	48	1149	48	1200
15	1056	49	1152	49	1203
16	1059	50	1155	50	1206

Πίνακας 3.6. Συχνότητες λειτουργίας του Link-16.

Όπως έχει αναφερθεί το JTIDS λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων Lx των UHF. Στην ίδια μπάντα όμως λειτουργεί πλήθος συστημάτων της πολιτικής αεροπορίας με κυριότερη αυτή της ραδιοναυτιλίας. Έπειτα από έρευνες διαπιστώθηκε ότι υπάρχει πιθανότητα, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, η λειτουργία του JTIDS να επηρεάζει την ακρίβεια της πληροφορίας που εκπέμπουν τα ράδιο βοηθήματα όπως το TACAN, το DME και το IFF. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος και η

ασφάλεια των πτήσεων, το JTIDS διαθέτει το σύστημα Interference Protection Feature (IPF) που περιορίζει τη λειτουργία του σε περιόδους ειρήνης.

ΤΕΤΑΡΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΚΩΔΙΚΑΣ REED-SOLOMON (R-S)

4.1. Εισαγωγή

Ως γνωστόν υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία κωδίκων, όπου ο καθένας εξηπυρετεί διαφορετικό σκοπό. Παραδείγματος χάρη υπάρχουν κώδικες κρυπτογράφησης, κώδικες ανίχνευσης λαθών, κώδικες συμπίεσης πληροφορίας και κώδικες διόρθωσης λαθών. Εμείς θα ασχοληθούμε με τους τελευταίους. Κώδικας λοιπόν είναι ένα σύνολο από λέξεις, που θα αναφέρονται ως κωδικές λέξεις. Η κωδικοποίηση, είναι η

απεικόνιση ενός μηνύματος που θέλει να στείλει ο πομπός, σε κάποια κωδική λέξη. Το πρόβλημα στην επικοινωνία, είτε είναι επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων, είτε μεταξύ μηχανών είναι ότι η κωδική λέξη δεν φτάνει απαραμόρφωτη στον δέκτη για κάποιους λόγους. Η διόρθωση των λαθών, γίνεται λόγω του πλεονασμού πληροφορίας που περιέχει η κωδική λέξη. Η ουσία στην κωδικοποίηση, είναι ότι ο πομπός εισάγει πλεονάζουσα πληροφορία στα λεγόμενά του, με τρόπο τέτοιο ώστε ο δέκτης να μπορέσει να καταλάβει τι είπε ο πομπός σε περίπτωση θορύβου στο κανάλι. Ο δέκτης λαμβάνει μια απόφαση, για το ποια κωδική λέξη έστειλε ο πομπός, με βάση το τι άκουσε. Κατά κάποιο τρόπο το ίδιο συμβαίνει και στα τακτικά δίκτυα με τα οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία και ποιό συγκεκριμένα με το Link-16. Όσον αφορά τον λόγο που επιλέξαμε να εξετάσουμε την ομάδα κωδίκων Reed-Solomon είναι ότι έχουν μια σημαντική ιδιομορφία σε σχέση με τους υπόλοιπους. Είναι κώδικες που διαχειρίζονται σύμβολα και όχι απλά bits. Σε έναν τέτοιο κώδικα, το κάθε σύμβολο θα μπορούσε να είναι ένα ολόκληρο byte, αφού κάθε σύμβολο είναι μια οχτάδα από bits. Οπότε αν αλλοιωθεί ένα bit ενός συμβόλου, προκαλείται η ίδια καταστροφή με το να αλλοιωθούν όλα τα bits του ίδιου συμβόλου. Η παραπάνω ιδιότητα δείχνει ότι οι κώδικες Reed-Solomon είναι κατάλληλοι για να διορθώνουν σφάλματα θορύβου ο οποίος τείνει να μην είναι λευκός (ομοιόμορφος), αλλά το βάρος του να είναι «μαζεμένο» σε μια περιοχή του διανύσματος. Παράδειγμα τέτοιου θορύβου θα μπορούσε να είναι μια αστραπή σε ένα ασύρματο κανάλι, όπου θα αλλοιώσει μόνο μια συγκεκριμένη χρονική θυρίδα κατά την μετάδοση. Στα τακτικά στρατιωτικά δίκτυα ο χρόνος αντίδρασης των συμμετεχόντων μονάδων αποτελεί τον πρώτο ανασταλτικό στοιχείο που εμποδίζει την επίτευξη του δόγματος του Δικτυοκεντρικού πολέμου. Σύμφωνα με μία μελέτη που παρουσιάζεται στο βιβλίο Network-Centric Warfare: Its origin and future, Articles 98, January 1998 του Vice Admiral Arthur K. Cebrowski, US Navy & John J. Garstka ο χρόνος που απαιτείται για μεταφορά στόχων μεταξύ κόμβων – πλατφορμών του δικτύου για επίτευξη του ανώτερου επιπέδου είναι μικρότερος από 1 δευτερόλεπτο ενώ το Link-16 πραγματοποιεί χρόνους μεγαλύτερους από 1 δευτερόλεπτο και αυτό οφείλεται σε ένα βαθμό στον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το Link-16 τον Reed-Solomon, όπως θα δούμε και στην συνέχεια.

Πιο αναλυτικά οι κώδικες Reed-Solomon (R-S) είναι μη συνδυαστικοί κυκλικοί κώδικες με σύμβολα που αποτελούνται από ακολουθίες m -bit, όπου m είναι οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος που έχει τιμή μεγαλύτερη από 2. Οι κώδικες R-S (n ,

k) σε σύμβολα m-bit υπάρχουν για όλα τα n και k για τα οποία

$$0 < k < n < 2^m + 2 \quad (4.1)$$

Όπου k είναι ο αριθμός των συμβόλων δεδομένων που κωδικοποιούνται και n είναι ο συνολικός αριθμός των κωδικών συμβόλων στο κωδικοποιημένο μπλοκ. Για τον πιο συμβατικό κώδικα R-S (n, k)

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t) \quad (4.2)$$

Όπου t είναι η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων συμβόλων του κώδικα, και n - k = 2t είναι ο αριθμός των συμβόλων ισοτιμίας. Ένας εκτεταμένος κώδικας R-S μπορεί να κατασκευαστεί n = 2M ή με n = 2M+1, αλλά όχι περισσότερο.

Οι κώδικες Reed-Solomon (R-S) επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή ελάχιστη απόσταση κώδικα για κάθε γραμμικό κώδικα με το ίδιο μήκος εισόδου και εξόδου του κωδικοποιητή.

Για τους μη δυαδικούς κώδικες, ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο κωδικών λέξεων (ανάλογα με την απόσταση Hamming) ως τον αριθμό των συμβόλων στον οποίων διαφέρουν οι ακολουθίες.

Για τους κώδικες Reed-Solomon η ελάχιστη απόσταση κώδικα δίνεται από

$$d_{min} = n - k + 1 \quad (4.3)$$

Ο κώδικας είναι ικανός να διορθώνει οποιονδήποτε συνδυασμό t ή λιγότερων σφαλμάτων, όπου t είναι η ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων ενός κώδικα που ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός

των εγγυημένων διορθωτικών σφαλμάτων ανά κωδική λέξη και δίνεται από την σχέση :

$$t = \left\lfloor \frac{d_{min}-1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor \quad (4.4)$$

όπου [x] σημαίνει ότι ο μεγαλύτερος ακέραιος αριθμός δεν πρέπει να υπερβαίνει το x.

Η εξίσωση (5.4) δείχνει ότι για την περίπτωση των κωδικών R-S, τα διορθωτικά σφάλματα των συμβόλων t απαιτούν όχι περισσότερο από 2t

σύμβολα ισοτιμίας. Η εξίσωση (5.4) προσφέρεται για την ακόλουθη διαισθητική συλλογιστική. Κάποιος μπορεί να πει ότι ο αποκωδικοποιητής έχει n - k σύμβολα πλεονάσματος για να δαπανήσει που είναι διπλάσια

από την ποσότητα διορθώσιμων σφαλμάτων. Για κάθε σφάλμα χρησιμοποιείται ένα πλεονάζον σύμβολο για να εντοπίσει το σφάλμα και ένα άλλο χρησιμοποιείται για να βρει τη σωστή τιμή του. Η δυνατότητα διόρθωσης-διαγραφής του κώδικα είναι:

$$\rho = d_{min} - 1 = n - k \quad (4.5)$$

Ταυτοχρόνως η δυνατότητα διόρθωσης - σφαλμάτων και η δυνατότητα διόρθωσης - διαγραφής εκφράζονται από την σχέση:

$$2\alpha + \gamma < d_{min} < n - k \quad (4.6)$$

Όπου α είναι ο αριθμός των προτύπων συμβόλων σφάλματος που μπορούν να διορθωθούν και γ είναι ο αριθμός των προτύπων συμβόλων διαγραφής που μπορούν να διορθωθούν.

Ένα πλεονέκτημα των μη γραμμικών κωδικών όπως είναι και ο κώδικας Reed-Solomon μπορεί να φανεί με την ακόλουθη σύγκριση. Εξετάζουμε ένα δυαδικό κώδικα $(n, k) = (7, 3)$.

Ολόκληρη η σειρά αριθμών n περιέχει $2^n = 2^7 = 128$ n -σειρές από όπου $2^k = 2^3 = 8$ είναι κωδικές λέξεις. Στη συνέχεια θεωρούμε έναν μη δυαδικό κώδικα $(n, k) = (7, 3)$ όπου κάθε σύμβολο περιλαμβάνει $m = 3$ bits. Ο χώρος n -αριθμών ανέρχεται σε $2^{nm} = 2^{21} = 2,097,152$ n -αριθμούς εκ των οποίων $2^{km} = 2^9 = 512$ είναι κωδικές λέξεις. Όταν ασχολούμαστε με μη δυαδικά σύμβολα, το καθένα αποτελείται από m bit, και μόνο ένα μικρό κλάσμα από πιθανόν n -σειρές είναι κωδικές λέξεις. Αυτό το κλάσμα μειώνεται με αυξανόμενες τιμές m . Το σημαντικό σημείο εδώ είναι ότι, όταν χρησιμοποιείται ένα μικρό κλάσμα του χώρου n -σειρών για κωδικές λέξεις, μπορεί να δημιουργηθεί ένα μεγάλο d_{min} .

.Οποιοσδήποτε γραμμικός κώδικας είναι ικανός να διορθώνει τα πρότυπα διαγραφής συμβόλων $n - k$ εάν τα $n - k$ σύμβολα διόρθωσης τυχαίνει να είναι και σύμβολα ισοτιμίας. Ωστόσο, οι κωδικές R-S έχουν την αξιοσημείωτη ιδιότητα ότι είναι σε θέση να διορθώσουν οποιοδήποτε σύνολο $n - k$ συμβόλων διόρθωσης εντός του μπλοκ. Οι κωδικές R-S μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να έχουν οποιοσδήποτε πλεονασμούς. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα μιας υψηλής ταχύτητας εφαρμογής αυξάνεται με πλεονασμό. Έτσι, οι πιο ελκυστικοί κωδικές R-S έχουν υψηλούς ρυθμούς κώδικα (χαμηλό πλεονασμό).

4.2. Πεπερασμένα Πεδία

Προκειμένου να κατανοηθούν οι αρχές κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης μη γραμμικών κωδικών, όπως είναι οι κωδικές Reed-Solomon (R-S), είναι απαραίτητο να επιχειρήσουμε στην περιοχή των πεδίων που είναι γνωστά ως πεδία Galois (GF). Για κάθε πρωτεύοντα αριθμό p υπάρχει ένα πεδίο πεδίου που δηλώνεται $GF(p)$, το

οποίο περιέχει στοιχεία p . Είναι δυνατό να επεκταθεί ο $GF(p)$ σε ένα πεδίο στοιχείων pm , το οποίο ονομάζεται πεδίο επέκτασης $GF(p)$ και δηλώνεται με $GF(pm)$, όπου m είναι μη θετικός ακέραιος. Σημειώστε ότι το $GF(pm)$ περιέχει ως υποσύνολο τα στοιχεία του $GF(p)$. Τα σύμβολα από το πεδίο επέκτασης $GF(2m)$ χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κωδικών Reed-Solomon (R-S).

Το δυαδικό πεδίο $GF(2)$ είναι υποπεδίο του πεδίου επέκτασης $GF(2m)$, με τον ίδιο τρόπο που το πεδίο πραγματικού αριθμού είναι υποπεδίο του πεδίου σύνθετου αριθμού. Εκτός από τους αριθμούς 0 και 1, υπάρχουν επιπλέον μοναδικά στοιχεία στο πεδίο επέκτασης που θα αντιπροσωπεύονται με ένα νέο σύμβολο. Κάθε μη-ζωντανό στοιχείο στο $GF(2)$ μπορεί να αντιπροσωπεύεται από μια ισχύ του. Μια άπειρη ομάδα στοιχείων, F , σχηματίζεται ξεκινώντας με τα στοιχεία $\{0, 1, \}$ και δημιουργώντας πρόσθετα στοιχεία, πολλαπλασιάζοντας σταδιακά την τελευταία είσοδο με την οποία οι αποδόσεις

$$F = \{0, 1, a, a^2, \dots, a^j, \dots\} = \{0, a^0, a^1, a^2, \dots, a^j, \dots\} \quad (4.7)$$

πρέπει να ληφθούν από ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων $GF(2m)$ του F . Έτσι, πρέπει να επιβληθεί μία συνθήκη στον F έτσι ώστε να μπορεί να περιέχει μόνο στοιχεία $2m$ και να κλείνει με πολλαπλασιασμό. Η συνθήκη που κλείνει το σύνολο των στοιχείων πεδίου κάτω από τον πολλαπλασιασμό χαρακτηρίζεται από το μη αναγωγικό πολυώνυμο

$$a^{(2^m-1)} + 1 = 0 \quad (4.8)$$

ή ισοδύναμα,

$$a^{(2^m-1)} = 1 = a^0 \quad (4.9)$$

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον περιορισμό πολυώνυμου, οποιοδήποτε στοιχείο πεδίου που έχει ισχύ ίση ή μεγαλύτερη των $2^m - 1$ μπορεί να μειωθεί σε ένα στοιχείο με ισχύ μικρότερη από $2^m - 1$ ως εξής:

$$a^{(2^m+n)} = a^{(2^m-1)} a^{n+1} = a^{n+1} \quad (4.10)$$

Έτσι, η εξίσωση (5.9) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχηματίσει την πεπερασμένη ακολουθία F^* από την άπειρη αλληλουχία F , ως εξής:

$$F^* = \{0, 1, a, a^2, \dots, a^{2^m-2}, a^{2^m-1}, a^{2^m}, \dots\} = \{0, a^0, a^1, a^2, \dots, a^{2^m-2}, a^0, a^1, a^2, \dots\} \quad (4.11)$$

Επομένως, από την Εξίσωση (5.11) φαίνεται ότι τα στοιχεία του πεπερασμένου πεδίου $GF(2^m)$ δίδονται από την σχέση:

$$GF(2^m) = \{0, a^0, a^1, a^2, \dots, a^{2^m-2}\} \quad (4.12)$$

4.3. Προσθήκη στο πεδίο επέκτασης $GF(2^m)$

Κάθε ένα από τα 2^m στοιχεία του πεπερασμένου πεδίου $GF(2^m)$ μπορεί να αναπαρασταθεί ως διακριτό πολυώνυμο βαθμού $m-1$ ή μικρότερου. Ο βαθμός ενός πολυωνύμου είναι η τιμή του υψηλότερου εκθέτη του. Δηλώνουμε το καθένα από τα μη φυσικά στοιχεία του $GF(2^m)$ ως πολυώνυμο $a_i(X)$, όπου τουλάχιστον ένας από τους συντελεστές m του $a_i(X)$ είναι μηδενικός. Για το $i = 0, 1, 2, \dots, 2^m-2$,

$$a^i = a_i(X) = a_{i,0} + a_{i,1}X + a_{i,2}X^2 + \dots + a_{i,m-1}X^{m-1} \quad (4.13)$$

Εξετάζοντας την περίπτωση του $m=3$, όπου το πεπερασμένο πεδίο συμβολίζεται με $GF(2^3)$. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τη χαρτογράφηση των επτά στοιχείων $\{i\}$ και του μηδενικού στοιχείου, από την άποψη των στοιχείων βάσης $\{X^0, X^1, X^2\}$ που περιγράφονται από την Εξίσωση (4.13). Δεδομένου ότι η εξίσωση (5.9) υποδεικνύει ότι $a^0 = a^7$, υπάρχουν επτά μη φυσικά στοιχεία ή οκτώ στοιχεία σε αυτό το πεδίο. Κάθε σειρά στη χαρτογράφηση του Σχήματος 4.1 περιλαμβάνει μια ακολουθία δυαδικών τιμών που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές $a_{i,0}$, $a_{i,1}$ και $a_{i,2}$ στην Εξίσωση (4.13). Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης στοιχείων πεδίου επέκτασης $\{i\}$ αντί των δυαδικών στοιχείων είναι η συμπαγής σημείωση που διευκολύνει τη μαθηματική αναπαράσταση των μη συνδυασμένων διαδικασιών κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Η προσθήκη δύο στοιχείων του πεπερασμένου πεδίου ορίζεται στη συνέχεια ως το άθροισμα modulo-2 του καθενός από τους πολυωνυμικούς συντελεστές των ομοειδών δυνάμεων

$$a^i + a^j = (a_{i,0} + a_{j,0}) + (a_{i,1} + a_{j,1})X + \dots + (a_{i,m-1} + a_{j,m-1})X^{m-1} \quad (4.14)$$

Για τον ορισμό ενός πεπερασμένου πεδίου χρησιμοποιούμε ένα πρωτεύον πολυώνυμο.

Μια κατηγορία πολυωνύμων που ονομάζονται πρωτεύοντα πολυώνυμα, παρουσιάζει ενδιαφέρον, διότι τέτοιες συναρτήσεις καθορίζουν τα πεπερασμένα πεδία του $GF(2^m)$ τα οποία με τη σειρά τους χρειάζονται για τον ορισμό των κωδικών R-S. Η ακόλουθη προϋπόθεση είναι απαραίτητη και επαρκής για να διασφαλιστεί ότι:

		Basic elements		
		X^0	X^1	X^2
F i e l d e l e m e n t s	0	0	0	0
	α^0	1	0	0
	α^1	0	1	0
	α^2	0	0	1
	α^3	1	1	0
	α^4	0	1	1
	α^5	1	1	1
	α^6	1	0	1
	α^7	1	0	0

Σχήμα 4.1 Χαρτογράφηση στοιχείων πεδίου ως προς τα στοιχεία βάσης για GF (8) με $f(X)=1+X+X^3$.

το πολυώνυμο είναι πρωτεύον. Ένα μη αναστρέψιμο πολυώνυμο, $f(X)$, του βαθμού m λέγεται ότι είναι πρωτεύον, αν ο μικρότερος θετικός ακέραιος n για τον οποίο $f(X)$ διαιρεί το X^{n+1} είναι $n=2m-1$. Σημειώστε ότι ένα μη αναγωγικό πολυώνυμο δεν μπορεί να λαμβάνεται υπόψη την απόδοση πολυωνύμων κατώτερης τάξης και ότι η δήλωση A διαιρεί το B σημαίνει ότι το A διαιρούμενο σε B αποδίδει μη φυσικό πηλίκο και μηδενικό υπόλοιπο. Τα πολυώνυμα συνήθως εμφανίζονται σε χαμηλή τάξη προς υψηλή τάξη. Μερικές φορές, είναι βολικό να ακολουθήσετε την αντίστροφη μορφή (π.χ. όταν εκτελείτε διαίρεση πολυωνύμων).

Παράδειγμα 4.1 Η αναγνώριση ενός πρωτότυπου πολυωνύμου

Με βάση τον προηγούμενο ορισμό ενός πρωτότυπου πολυωνύμου, προσδιορίστε αν τα ακόλουθα μη αναγωγικά πολυώνυμα είναι πρωτότυπα:

- a) $1 + X + X^4$
- b) $1 + X + X^2 + X^3 + X^4$

Λύση:

- a) Μπορούμε να κοιτάξουμε εάν το πολυώνυμο αυτό που είναι βαθμού $m=4$ είναι πρωτότυπο, ελέγχοντας εάν διαιρεί το $X^n + 1 = X^{(2m-1)} + 1 = X^{15} + 1$, αλλά δεν διαιρεί το $X^n + 1$, για τιμές του n που είναι στο εύρος $1 \leq n < 15$. Είναι

εύκολο να επαληθεύσουμε ότι $1+X+X^4$ διαιρεί το $X^{15}+1$ και μετά από επανειλημμένους υπολογισμούς μπορεί να εξακριβωθεί ότι $1+X+X^4$ δεν θα διαιρέσει X^n+1 για κάθε n στην περιοχή $1 \leq n < 15$. Επομένως $1+X+X^4$ είναι ένα πρωτότυπο πολυώνυμο.

- b) Για να είναι πρωτότυπο θα πρέπει να επαληθεύσουμε ότι το πολυώνυμο $1+X+X^2+X^3+X^4$ διαιρεί το $X^{15}+1$. Η δοκιμή για να δούμε εάν θα διαιρέσει το X^n+1 για κάποια n που είναι μικρότερα από 15, αποδίδει το γεγονός ότι επίσης διαιρεί το X^5+1 . Έτσι, αν και το $1+X+X^2+X^3+X^4$ είναι μη αναστρέψιμο, δεν είναι πρωτότυπο.

4.4. Το πεδίο επέκτασης $GF(2^3)$

Εξετάστε ένα παράδειγμα που περιλαμβάνει ένα πρωτότυπο πολυώνυμο και το πεπερασμένο πεδίο που καθορίζει. Ο Πίνακας 4.1 περιέχει μια λίστα με ορισμένα πρωτότυπα πολυώνυμα. Επιλέγουμε το πρώτο που φαίνεται, $f(X) = 1+X+X^3$ που ορίζει ένα πεπερασμένο πεδίο $GF(2^m)$, όπου ο βαθμός του πολυωνύμου είναι $m=3$. Έτσι υπάρχουν $2^m = 2^3 = 8$ στοιχεία στο πεδίο που ορίζεται από το $f(X)$. Η επίλυση για τις ρίζες του $f(X)$ σημαίνει ότι πρέπει να βρεθούν οι τιμές του X που αντιστοιχούν στο $f(X) = 0$. Τα γνωστά δυαδικά στοιχεία 1 και 0 δεν ικανοποιούν (δεν είναι οι ρίζες) του πολυωνύμου $f(X) = 1+X+X^3$, αφού $f(1) = 1$ και $f(0) = 1$ (χρησιμοποιώντας αριθμητική modulo-2). Ωστόσο, ένα βασικό θεώρημα της άλγεβρας δηλώνει ότι ένα πολυώνυμο του βαθμού m πρέπει να έχει ακριβώς m ρίζες. Επομένως για αυτό το παράδειγμα, το $f(X) = 0$ πρέπει να έχει 3 ρίζες. Σαφώς προκύπτει ένα δίλημμα, καθώς οι 3 ρίζες δεν βρίσκονται στο ίδιο πεπερασμένο πεδίο με τους συντελεστές του $f(X)$. Επομένως, πρέπει να βρίσκονται αλλού. Οι ρίζες βρίσκονται στο πεδίο επέκτασης $GF(2^3)$. Έστω α , ένα στοιχείο του πεδίου επέκτασης, το οποίο ορίζεται ως ρίζα του πολυωνύμου $f(X)$. Συνεπώς έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= 0 \\ 1 + \alpha + \alpha^3 &= 0 \\ \alpha^3 &= -1 - \alpha \end{aligned} \tag{4.15}$$

m		m	
3	$1 + X + X^3$	14	$1 + X + X^6 + X^{10} + X^{14}$
4	$1 + X + X^4$	15	$1 + X + X^{15}$
5	$1 + X^2 + X^5$	16	$1 + X + X^3 + X^{12} + X^{16}$
6	$1 + X + X^6$	17	$1 + X^3 + X^{17}$
7	$1 + X^3 + X^7$	18	$1 + X^7 + X^{18}$
8	$1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8$	19	$1 + X^2 + X^2 + X^5 + X^{19}$
9	$1 + X^4 + X^9$	20	$1 + X^3 + X^{20}$
10	$1 + X^3 + X^{10}$	21	$1 + X^2 + X^{21}$
11	$1 + X^2 + X^{11}$	22	$1 + X^2 + X^{22}$
12	$1 + X + X^4 + X^6 + X^{12}$	23	$1 + X^5 + X^{23}$
13	$1 + X + X^3 + X^4 + X^{13}$	24	$1 + X + X^2 + X^7 + X^{24}$

Πίνακας 4.1 Μερικά πρωτότυπα πολυώνυμα

Δεδομένου ότι στο δυαδικό πεδίο $+1=-1$, τότε το α^3 εκφράζεται ως:

$$\alpha^3=1+\alpha \quad (4.16)$$

Έτσι, το α^3 εκφράζεται ως σταθμισμένο άθροισμα των όρων που έχουν χαμηλότερη δύναμη. Στην πραγματικότητα, όλες οι δυνάμεις του α μπορούν να εκφραστούν. Για παράδειγμα, έχουμε ότι

$$\alpha^4=\alpha \cdot \alpha^3=\alpha \cdot (1+\alpha)=\alpha+\alpha^2 \quad (4.17\alpha)$$

Επίσης έχουμε ότι

$$\alpha^5 = \alpha \cdot \alpha^4 = \alpha \cdot (\alpha + \alpha^2) = \alpha^2 + \alpha^3 \quad (4.17\beta)$$

Από τις σχέσεις (5.16) και (5.17β) προκύπτει ότι:

$$\alpha^5 = 1 + \alpha + \alpha^2 \quad (4.17\gamma)$$

Τώρα χρησιμοποιώντας την σχέση (4.17γ) έχουμε ότι:

$$\alpha^6 = \alpha \cdot \alpha^5 = \alpha \cdot (1 + \alpha + \alpha^2) = \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 = 1 + \alpha^2 \quad (4.17\delta)$$

Και χρησιμοποιώντας την σχέση (5.17δ) προκύπτει ότι:

$$\alpha^7 = \alpha \cdot \alpha^6 = \alpha \cdot (1 + \alpha^2) = \alpha + \alpha^3 = 1 = \alpha^0 \quad (4.17\epsilon)$$

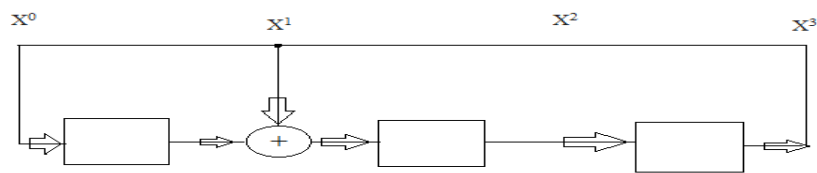
Σημειώστε ότι το $\alpha^7 = \alpha^0$ και συνεπώς τα οκτώ στοιχεία του πεπερασμένου πεδίου του $\text{GF}(2^3)$ είναι:

$$\{0, \alpha^0, \alpha^1, \alpha^2, \alpha^3, \alpha^4, \alpha^5, \alpha^6\} \quad (4.18)$$

Η χαρτογράφηση των στοιχείων του πεδίου ως προς τα βασικά στοιχεία, που περιγράφονται από την Εξίσωση (4.13), μπορεί να αποδειχθεί με το κύκλωμα LFSR που φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Το κύκλωμα παράγει (με $m = 3$) τα $2^m - 1$ μη φυσικά στοιχεία του πεδίου και έτσι συνοψίζει τα ευρήματα των Εξισώσεων (4.16) έως (4.18). Σημειώστε ότι στο Σχήμα 4.2, οι συνδέσεις ανατροφοδότησης κυκλώματος αντιστοιχούν στους συντελεστές του πολυωνύμου $f(X) = 1 + X + X^3$, ακριβώς όπως και για τους δυαδικούς κυκλικούς κώδικες. Έστω ότι το κύκλωμα ξεκινάει σε μη μηδενική κατάσταση, ας πούμε 1 0 0, και πραγματοποιώντας μια δεξιά μετατόπιση σε κάθε ώρα ρολογιού, είναι δυνατόν να επαληθεύσουμε ότι κάθε πεδίο Τα στοιχεία που φαίνονται στο σχήμα 4.1 (εκτός από το στοιχείο όλο μηδέν) θα εμφανιστούν κυκλικά στα στάδια του καταχωρητή ολίσθησης. Δύο αριθμητικές πράξεις, πρόσθεση και πολλαπλασιασμός, μπορούν να οριστούν για αυτό το πεπερασμένο πεδίο $\text{GF}(2^3)$. Η πρόσθεση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2 και ο πολλαπλασιασμός εμφανίζεται στον Πίνακα 4.3 μόνο για τα μη φυσικά στοιχεία. Οι κανόνες πρόσθεσης ακολουθούνται από τις Εξισώσεις (4.16) έως (4.17ε) και μπορούν να εξακριβωθούν παρατηρώντας στο Σχήμα 4.1 ότι το άθροισμα οποιωνδήποτε στοιχείων πεδίου μπορεί να ληφθεί προσθέτοντας (modulo-2) τους αντίστοιχους συντελεστές των στοιχείων βάσεων τους. Οι

κανόνες πολλαπλασιασμού στον Πίνακα 4.3 ακολουθούν τη συνήθη διαδικασία κατά την οποία το προϊόν των στοιχείων πεδίου λαμβάνεται προσθέτοντας τους

εκθέτες τους modulo- $(2^m - 1)$, ή για αυτή την περίπτωση, modulo-7.



Σχήμα 4.2 Τα στοιχεία πεδίου επέκτασης μπορούν να αναπαρασταθούν από το περιεχόμενο ενός δυαδικού καταχωρητή μετατόπισης γραμμικής ανάδρασης (LFSR) που σχηματίζεται από ένα πρωτόγονο πολυώνυμο.

	α^0	α^1	α^2	α^3	α^4	α^5	α^6
α^0	0	α^3	α^6	α^1	α^5	α^4	α^2
α^1	α^3	0	α^4	α^0	α^2	α^6	α^5
α^2	α^6	α^4	0	α^5	α^1	α^3	α^0
α^3	α^1	α^0	α^5	0	α^6	α^2	α^4
α^4	α^5	α^2	α^1	α^6	0	α^0	α^3
α^5	α^4	α^6	α^3	α^2	α^0	0	α^1
α^6	α^2	α^5	α^0	α^4	α^3	α^1	0

Πίνακας 4.2 Πίνακας Πρόσθεσης για GF (8) με $f(X) = 1 + X + X^3$

	α^0	α^1	α^2	α^3	α^4	α^5	α^6
α^0	α^0	α^1	α^2	α^3	α^4	α^5	α^6
α^1	α^1	α^2	α^3	α^4	α^5	α^6	α^0
α^2	α^2	α^3	α^4	α^5	α^6	α^0	α^1
α^3	α^3	α^4	α^5	α^6	α^0	α^1	α^2
α^4	α^4	α^5	α^6	α^0	α^1	α^2	α^3
α^5	α^5	α^6	α^0	α^1	α^2	α^3	α^4
α^6	α^6	α^0	α^1	α^2	α^3	α^4	α^5

Πίνακας 4.3 Πίνακας πολλαπλασιασμού για GF (8) με $f(X) = 1 + X + X^3$

4.5. Μια απλή δοκιμή για να διαπιστώσετε εάν ένα πολυώνυμο είναι πρωτότυπο

Υπάρχει ένας άλλος τρόπος ορισμού ενός πρωτότυπου πολυωνύμου που κάνει την επαλήθευσή του σχετικά εύκολη. Για να είναι ένα μη αναγωγικό πολυώνυμο πρωτότυπο, θα πρέπει τουλάχιστον μία από τις ρίζες του να είναι ένα πρώτο στοιχείο. Πρώτο στοιχείο είναι αυτό που όταν ανυψώνεται σε υψηλότερου βαθμού εκθέτες θα αποδώσει όλα τα μη φυσικά στοιχεία στο πεδίο. Δεδομένου ότι το πεδίο είναι πεπερασμένο, ο αριθμός των στοιχείων αυτών είναι πεπερασμένος.

Παράδειγμα 4.2 Ένα πρωτότυπο πολυώνυμο πρέπει να έχει τουλάχιστον ένα πρωτότυπο στοιχείο

Βρείτε τις ρίζες $m = 3$ του $f(X) = 1 + X + X^3$ και βεβαιωθείτε ότι το πολυώνυμο είναι πρωτότυπο, ελέγχοντας ότι τουλάχιστον μία από τις ρίζες είναι ένα πρώτο στοιχείο. Ποιες είναι αυτές οι ρίζες; Ποιες είναι πρωτότυπες;

Λύση

Οι ρίζες θα βρεθούν με απαρίθμηση. Σαφώς, το $\alpha^0 = 1$ δεν είναι ρίζα γιατί $f(\alpha^0) = 1$. Τώρα θα χρησιμοποιήσουμε τον Πίνακα 5.2 για να ελέγξουμε αν το α^1 είναι ρίζα. Από το $f(\alpha) = 1 + \alpha + \alpha^3 = 1 + \alpha^0 = 0$, τότε το α είναι ρίζα. Τώρα θα ελέγξουμε αν το α^2 είναι ρίζα. $f(\alpha^2) = 1 + \alpha^2 + \alpha^6 = 1 + \alpha^0 = 0$. Επομένως, το α^2 είναι ρίζα. Τώρα θα κοιτάξουμε αν το α^3 είναι ρίζα. $f(\alpha^3) = 1 + \alpha^3 + \alpha^9 = 1 + \alpha^3 + \alpha^2 = 1 + \alpha^5 + \alpha^4 \neq 0$. Συνεπώς, το α^3 δεν είναι ρίζα. Είναι το α^4 μια ρίζα; $f(\alpha^4) = \alpha^{12} + \alpha^4 + 1 = \alpha^5 + \alpha^4 + 1 = 1 + \alpha^0 = 0$. Ναι, το α^4 είναι ρίζα. Επομένως, οι ρίζες της εξίσωσης $f(X) = 1 + X + X^3$ είναι, οι α , α^2 και α^4 . Δεν είναι δύσκολο να επαληθεύσουμε ότι ξεκινώντας με οποιαδήποτε από αυτές τις ρίζες και δημιουργώντας εκθέτες υψηλότερης τάξης αποδίδει όλα τα 7 μη μηδενικά στοιχεία του πεδίου. Ως εκ τούτου, κάθε μία από τις ρίζες είναι ένα πρωτότυπο στοιχείο. Δεδομένου ότι η επαλήθευσή μας απαιτεί τουλάχιστον μία ρίζα να είναι ένα πρωταρχικό στοιχείο, το πολυώνυμο είναι πρωτότυπο.

Μια σχετικά απλή μέθοδος για την επαλήθευση ότι ένα πολυώνυμο είναι πρωτότυπο μπορεί να περιγραφεί με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα. Έτσι για οποιοδήποτε υπό δοκιμή πολυώνυμο δίδεται, σχεδιάστε το

LFSR, με τις συνδέσεις ανάδρασης που αντιστοιχούν στους συντελεστές πολυωνύμων όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 4.2. Το φορτίο στο κύκλωμα-καταγράφει οποιαδήποτε μη-οριζόντια ρύθμιση και πραγματοποιεί μια δεξιά στροφή με κάθε παλμό ρολογιού. Εάν το κύκλωμα παράγει καθένα από τα μη μηδενικά στοιχεία του πεδίου μέσα σε μία περίοδο, τότε το πολυώνυμο που ορίζει αυτό το πεδίο $GF(2^m)$ είναι ένα πρωτότυπο πολυώνυμο.

4.6. Κωδικοποίηση Reed-Solomon

Η εξίσωση (4.2) εκφράζει την πιο συμβατική μορφή των κωδίκων Reed-Solomon (R-S) από την άποψη των παραμέτρων n , k , t και οποιουδήποτε θετικού ακέραιου $m > 2$. Επαναλαμβάνεται εδώ, η εξίσωση αυτή:

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t) \quad (4.19)$$

Όπου $n-k=2t$ είναι ο αριθμός των συμβόλων ισοτιμίας και t είναι η ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων συμβόλων του κώδικα. Το πολυώνυμο δημιουργίας για έναν κώδικα R-S έχει την ακόλουθη μορφή:

$$g(X) = g_0 + g_1X + g_2X^2 + \dots + g_{2t-1}X^{2t-1} + X^{2t} \quad (4.20)$$

Ο βαθμός του πολυωνύμου γεννήτριας είναι ίσος με τον αριθμό των συμβόλων ισοτιμίας. Οι κώδικες R-S είναι ένα υποσύνολο των κωδικών BCH. Επομένως, δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη ότι αυτή η σχέση μεταξύ του βαθμού του πολυωνύμου γεννήτριας και του αριθμού των συμβόλων ισοτιμίας ισχύει όπως και για τους κώδικες BCH. Δεδομένου ότι το πολυώνυμο γεννήτριας είναι βαθμού $2t$, πρέπει να υπάρχουν ακριβώς $2t$ διαδοχικές δυνάμεις που είναι οι ρίζες του πολυωνύμου.

Ορίζουμε τις ρίζες του $g(X)$ ως: $\alpha, \alpha_2, \dots, \alpha_{2t}$. Δεν είναι απαραίτητο να ξεκινήσουμε με τη ρίζα. Μπορούμε να ξεκινήσουμε με οποιαδήποτε δύναμη είναι δυνατή.

Εξετάζουμε ως παράδειγμα το (7, 3) διπλό σύμβολο με τον κώδικα R-S.

Περιγράφουμε το πολυώνυμο γεννήτριας με βάση τις $2t=n-k=4$ ρίζες του, ως εξής:

$$\begin{aligned} g(X) &= (X - \alpha)(X - \alpha^2)(X - \alpha^3)(X - \alpha^4) \\ &= (X^2 - (\alpha + \alpha^2)X + \alpha^3)(X^2 - (\alpha^3 + \alpha^4)X + \alpha^7) \\ &= (X^2 - \alpha^4X + \alpha^3)(X^2 - \alpha^6X + \alpha^0) \\ &= X^4 - (\alpha^4 + \alpha^6)X^3 + (\alpha^3 + \alpha^{10} + \alpha^0)X^2 - (\alpha^4 + \alpha^9)X + \alpha^3 \\ &= X^4 - \alpha^3X^3 + \alpha^0X^2 - \alpha^1X + \alpha^3 \end{aligned}$$

Ακολουθώντας τη μορφή χαμηλής τάξης προς την υψηλή τάξη και μεταβάλλοντας τα αρνητικά σημεία με θετικά, αφού στο δυαδικό πεδίο $+1=-1$, η γεννήτρια $g(X)$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$g(X) = a^3 + a^1X + a^0X^2 + a^3X^3 + X^4 \quad (4.21)$$

4.6.1. Κωδικοποίηση σε συστηματική μορφή

Δεδομένου ότι οι κώδικες R-S είναι κυκλικοί κώδικες, η κωδικοποίηση σε συστηματική μορφή είναι ανάλογη με τη διαδικασία δυαδικής κωδικοποίησης. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μετατοπίζοντας ενός πολυωνυμικό μήνυμα $m(X)$ προς τα δεξιά k θέσεις εντός ενός καταχωρητή κωδικών λέξεων και στη συνέχεια προσθέτοντας ένα ανάλογο πολυωνυμικό μήνυμα $p(X)$ προς τα αριστερά του καταχωρητή $n - k$ θέσεις. Επομένως, πολλαπλασιάζουμε το $m(X)$ με το X^{n-k} , μεταβάλλοντας έτσι το πολυώνυμο του μηνύματος αλγεβρικά έτσι ώστε να μετατοπισθεί προς τα δεξιά $n - k$ θέσεις. Στη συνέχεια, διαιρούμε το $X^{n-k} m(X)$ από ένα γενικό πολυώνυμο $g(X)$, το οποίο είναι γραμμένο ως

$$X^{n-k}m(X) = q(X)g(X) + p(X) \quad (4.22)$$

Όπου $q(X)$ και $p(X)$ είναι τα πολυώνυμα του πηλίκου και υπολοίπου, αντίστοιχα. Όπως και στην δυαδική περίπτωση, το υπόλοιπο είναι ίδιο. Η εξίσωση (5.22) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$p(X) = X^{n-k}m(X) \text{ modulo } g(X) \quad (4.23)$$

Το προκύπτον πολυώνυμο κωδικών λέξεων $U(X)$, μπορεί να γραφτεί:

$$U(X) = p(X) + X^{n-k}m(X) \quad (4.24)$$

Παρουσιάζουμε τα βήματα που συνεπάγονται οι εξισώσεις (4.23) και (4.24) με την κωδικοποίηση του μηνύματος τριών συμβόλων

$$\begin{array}{ccc} \underline{010} & \underline{110} & \underline{111} \\ \alpha^1 & \alpha^2 & \alpha^5 \end{array}$$

Με τον κώδικα (7, 3) R-S του οποίου το γενικό πολυώνυμο δίνεται στην Εξίσωση (5.21). Αρχικά πολλαπλασιάζουμε (ανοδικά) το πολυωνυμικό μήνυμα $\alpha^1 + \alpha^3X + \alpha^5X^2$

με το $X^{n-k} = X^4$, και προκύπτει $a^1X^4 + a^3X^5 + a^5X^6$. Στη συνέχεια διαιρούμε αυτό το προς τα πάνω μετατοπισμένο πολυώνυμο με το γενικό πολυώνυμο Εξίσωση (4.21), $a^3 + a^1X + a^0X^2 + a^3X^3 + X^4$. Άρα προκύπτει ότι:

$$p(X) = a^0 + a^2X + a^4X^2 + a^6X^3$$

Στη συνέχεια, από την εξίσωση (4.24), το πολυώνυμο κωδικών λέξεων μπορεί να γραφτεί ως:

$$U(X) = a^0 + a^2X + a^4X^2 + a^6X^3 + a^1X^4 + a^3X^5 + a^5X^6 \quad (4.25)$$

4.7. Αποκωδικοποίηση Reed-Solomon

Στην Ενότητα 8.1.5, σε ένα δοκιμαστικό μήνυμα κωδικοποιημένο σε συστηματική μορφή χρησιμοποιήθηκε ένας κώδικας (7, 3) R-S, και έτσι οδηγηθήκαμε σε ένα πολυώνυμο κωδικών λέξεων που περιγράφεται από την Εξίσωση (5.25). Τώρα, υποθέστε ότι κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, αυτή η κωδική λέξη καταστρέφεται έτσι ώστε 2 σύμβολα να λαμβάνονται κατά λάθος. (Αυτός ο αριθμός σφαλμάτων αντιστοιχεί στη μέγιστη ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων του κώδικα.) Για αυτό το παράδειγμα κωδικού λέξης 7 συμβόλων, το πρότυπο σφάλματος μπορεί να περιγραφεί σε πολυωνυμική μορφή ως

$$e(X) = \sum_{n=0}^6 e_n X^n \quad (4.26)$$

Για αυτό το παράδειγμα, θα αφήσουμε το σφάλμα διπλού συμβόλου να είναι τέτοιο ώστε :

$$\begin{aligned} e(X) &= 0 + 0X + 0X^2 + a^2X^3 + a^5X^4 + 0X^5 + 0X^6 \\ &= (000) + (000)X + (000)X^2 + (001)X^3 + (111)X^4 + (000)X^5 + (000)X^6 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Με άλλα λόγια, αυτό που φαίνεται με τις παραπάνω πράξεις είναι ότι ένα σύμβολο ισότητας έχει καταστραφεί με ένα σφάλμα 1 bit (θεωρείται ως a^2) και ένα σύμβολο δεδομένων έχει καταστραφεί με ένα σφάλμα 3-bit (θεωρείται ως a^5). Το λαμβανόμενο επεξεργασμένο πολυώνυμο $r(X)$ κωδικού λέξης αντιπροσωπεύεται στη συνέχεια από το άθροισμα του πολυωνύμου μεταδιδόμενου κωδικού λέξης και του πολυωνύμου σχήματος- σφάλματος ως εξής:

$$r(X) = U(X) + e(X) \quad (4.28)$$

Στην Εξίσωση (4.28), αντικαθιστούμε το $U(X)$ από την Εξίσωση (4.25) και το $e(X)$ από την Εξίσωση (4.27) και προκύπτει:

$$r(X) = a^0 + a^2X + a^4X^2 + a^6X^3 + a^1X^4 + a^3X^5 + a^5X^6 + (100) + (001)X + (011)X^2 + (100)X^3 + (101)X^4 + (110)X^5 + (111)X^6 \quad (4.29)$$

Σε αυτό το παράδειγμα διόρθωσης σφαλμάτων 2 συμβόλων, υπάρχουν τέσσερα άγνωστα στοιχεία: δύο θέσεις σφάλματος και δύο τιμές σφάλματος. Σημειώνουμε ότι υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ της μη συνδυασμένης αποκωδικοποίησης του $r(X)$ που αντιμετωπίζουμε με την Εξίσωση (4.29) και της δυαδικής αποκωδικοποίησης. Στη δυαδική αποκωδικοποίηση, ο αποκωδικοποιητής χρειάζεται μόνο να εντοπίσει τις θέσεις σφάλματος. Η γνώση ότι υπάρχει ένα σφάλμα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία υπαγορεύει ότι το κομμάτι πρέπει να "αναστραφεί" από το 1 στο 0 ή το αντίστροφο. Αλλά εδώ, τα μη συνδυαστικά σύμβολα απαιτούν όχι μόνο να μαθαίνουμε τις θέσεις σφάλματος, αλλά και να καθορίζουμε τις σωστές τιμές συμβόλων σε αυτές τις θέσεις. Δεδομένου ότι υπάρχουν τέσσερα άγνωστα σε αυτό το παράδειγμα, απαιτούνται τέσσερις εξισώσεις για τη λύση τους.

4.7.1. Υπολογισμός Συνδρόμου

Με την έννοια σύνδρομο εννοούμε το αποτέλεσμα ενός ελέγχου ισότητας που εκτελείται στο r για να προσδιορίσουμε αν το r είναι έγκυρο μέλος της ομάδας κωδικών λέξεων. Αν στην πραγματικότητα το r είναι μέλος, τότε το σύνδρομο S έχει τιμή 0. Οποιαδήποτε μη μηδενική τιμή του S υποδηλώνει την ύπαρξη σφαλμάτων. Παρόμοια με τη δυαδική περίπτωση, το σύνδρομο S αποτελείται από σύμβολα $n-k$, $\{S_i\}$ ($i=1, \dots, n-k$). Έτσι, για αυτόν τον κώδικα (7, 3) R-S, υπάρχουν τέσσερα σύμβολα σε κάθε φορέα του συνδρόμου. Οι τιμές τους μπορούν να υπολογιστούν από το λαμβανόμενο πολυώνυμο $r(X)$. Να σημειώσουμε πως ο υπολογισμός διευκολύνεται από τη δομή του κώδικα, που δίνεται από την εξίσωση:

$$U(X) = m(X) g(X) \quad (4.30)$$

Από αυτή τη δομή μπορεί να φανεί ότι κάθε έγκυρο πολυώνυμο κωδικών λέξεων $U(X)$ είναι ένα πολλαπλάσιο του γενικού πολυωνύμου $g(X)$. Επομένως, οι ρίζες του $g(X)$ πρέπει επίσης να είναι οι ρίζες του $U(X)$. Δεδομένου ότι το $r(X) = U(x) + e(X)$, τότε το $r(X)$ που αξιολογείται σε κάθε ρίζα του $g(X)$ θα πρέπει να αποδίδει μηδέν

μόνο όταν είναι έγκυρη κωδική λέξη. Οποιαδήποτε σφάλματα θα προκύψουν από έναν ή περισσότερους υπολογισμούς θα αποφέρουν ένα μη μηδενικό αποτέλεσμα. Ο υπολογισμός ενός συμβόλου συνδρόμου μπορεί να περιγραφεί ως:

$$S_i = r(X)|_{x = a^i} = r(a^i) \quad i = 1, \dots, n - k \quad (4.31)$$

Όπου το $r(X)$ περιέχει τα υποτιθέμενα σφάλματα 2 συμβόλων όπως φαίνεται στην Εξίσωση (5.25). Εάν το $r(X)$ ήταν έγκυρη κωδική λέξη, θα προέκυπτε ότι το κάθε σύμβολο του συνδρόμου $S_i = 0$. Για αυτό στο παράδειγμα, τα τέσσερα σύμβολα του συνδρόμου βρίσκονται ως εξής:

$$\begin{aligned} S_1 &= r(a) = a^0 + a^3 + a^6 + a^3 + a^{10} + a^8 + a^{11} \\ &= a^0 + a^3 + a^6 + a^3 + a^2 + a^1 + a^4 \\ &= a^3 \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} S_2 &= r(a^2) = a^0 + a^4 + a^8 + a^6 + a^{14} + a^{13} + a^{17} \\ &= a^0 + a^4 + a^1 + a^6 + a^0 + a^6 + a^3 \\ &= a^5 \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} S_3 &= r(a^3) = a^0 + a^5 + a^{10} + a^9 + a^{18} + a^{18} + a^{23} \\ &= a^0 + a^5 + a^3 + a^2 + a^4 + a^4 + a^2 \\ &= a^6 \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} S_4 &= r(a^4) = a^0 + a^6 + a^{12} + a^{12} + a^{22} + a^{23} + a^{29} \\ &= a^0 + a^6 + a^5 + a^5 + a^1 + a^2 + a^1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η ληφθείσα λέξη κώδικα περιέχει ένα σφάλμα (το οποίο εισήγαμε) από το $S \neq 0$.

4.7.2 Θέση Σφάλματος

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν σφάλματα v στη λέξη κώδικα στη θέση $X^{j_1}, X^{j_2}, \dots, X^{j_v}$. Στη συνέχεια, το πολυώνυμο σφάλματος που εμφανίζεται στις Εξισώσεις (4.26) και (5.27) μπορεί να γραφτεί ως :

$$e(X) = e_{j_1} X^{j_1} + e_{j_2} X^{j_2} + \dots + e_{j_v} X^{j_v} \quad (4.36)$$

Οι δείκτες $1, 2, \dots, v$ αναφέρονται στο $1^{\text{st}}, 2^{\text{nd}}, \dots, v^{\text{th}}$ σφάλματα και το ευρετήριο j αναφέρεται στη θέση σφάλματος. Για να διορθωθεί η αλλοιωμένη λέξη κώδικα, κάθε τιμή σφάλματος e_{j_l} και η θέση της X^{j_l} , όπου $l=1, 2, \dots, v$ πρέπει να προσδιοριστεί. Ορίζουμε έναν αριθμό εντοπισμού σφαλμάτων ως $b_l = e^{j_l}$. Στη συνέχεια, παίρνουμε τα σύμβολα του συνδρόμου $n-k=2t$ αντικαθιστώντας το a^i μέσα στο λαμβανόμενο πολυώνυμο για τα $i=1, 2, \dots, 2t$:

$$\begin{aligned} S_1 &= r(a) = e_{j_1} b^1 + e_{j_2} b^2 + \dots + e_{j_v} b^v \\ S_2 &= r(a^2) = e_{j_1} b^{2j_1} + e_{j_2} b^{2j_2} + \dots + e_{j_v} b^{2j_v} \end{aligned} \quad (4.36)$$

□

$$S_{2t} = r(a^{2t}) = e_{j_1} b^{2tj_1} + e_{j_2} b^{2tj_2} + \dots + e_{j_v} b^{2tj_v}$$

Υπάρχουν $2t$ άγνωστα (τιμές σφάλματος t και θέσεις t) και $2t$ ταυτόχρονες εξισώσεις. Ωστόσο, αυτές οι $2t$ ταυτόχρονες εξισώσεις δεν μπορούν να λυθούν με τον συνηθισμένο τρόπο επειδή είναι μη γραμμικές (καθώς μερικές άγνωστες έχουν εκθέτες). Κάθε τεχνική που λύνει αυτό το σύστημα εξισώσεων είναι γνωστή ως αλγόριθμος αποκωδικοποίησης Reed-Solomon.

ΠΕΜΠΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Επίλογος

Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών και της πληροφορικής τα τελευταία χρόνια έχει σηματοδοτήσει την αρχή μιας νέας εποχής με τεράστιες απαιτήσεις για την Πολεμική Αεροπορία. Το κλειδί που θα βοηθήσει την Πολεμική Αεροπορία να αντεπεξέλθει στις νέες προκλήσεις βρίσκεται στην έννοια του “ενοποιημένου περιβάλλοντος μάχης” μέσα από το οποίο μπορεί να επιτευχθεί ο συντονισμός και η επιχειρησιακή αξιοποίηση όλων των δυνάμεων και των μέσων που υποστηρίζουν το θέατρο επιχειρήσεων. Για να μπορέσουμε λοιπόν να δημιουργήσουμε ένα ενοποιημένο περιβάλλον μάχης θα πρέπει να βρούμε ένα τρόπο έτσι ώστε όλα τα συστήματα επικοινωνίας να συνεργάζονται μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν τις πληροφορίες που χρειάζεται να μεταδοθούν άμεσα, γρήγορα και χωρίς κίνδυνο αλλοίωσης από παρεμβολές. Ο τρόπος αυτός είναι η εφαρμογή των αρχών και των επιταγών του Δικτυοκεντρικού πολέμου. Τι είναι όμως ο δικτυοκεντρικός πόλεμος ; Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο ο Δικτυοκεντρικός Πόλεμος (ΔΚΠ-NCW) είναι μέρος της πληροφορικής επανάστασης, είναι νέος τρόπος στρατηγικής σκέψης, νέο εργαλείο τακτικού σχεδιασμού. Ο ΔΚΠ λοιπόν είναι μια νέα αντίληψη για διεξαγωγή επιχειρήσεων, βασισμένη στις δυνατότητες που προσφέρει η υπεροχή στον τομέα των πληροφοριών. Ο ορισμός που δίνεται από τους εμπνευστές αυτού του δόγματος είναι σύμφωνα με το *Τμήμα Σχεδίασης Ναυτικών Επιχειρήσεων του Αμερικάνικου Ναυτικού*: « **Ο NCW , είναι μια σύλληψη για διεξαγωγή επιχειρήσεων, βασισμένη στις δυνατότητες που προσφέρει η υπεροχή στον τομέα των πληροφοριών. Ο NCW δημιουργεί μια αυξημένη μαχητική ισχύ μέσω δικτυωμένων αισθητήρων, διοικήσεων και οπλικών συστημάτων, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα αυξημένη και διανεμημένη επαγρύπνηση, μεγαλύτερη ταχύτητα αντίδρασης, μεγαλύτερη καταστρεπτικότητα και αυτοπροστασία, και τέλος συγχρονισμό μεταξύ των μονάδων. Γενικά μπορεί να χαρακτηριστεί σαν την μετάλλαξη της πληροφορίας σε στρατιωτική ισχύ, μέσω μιας σύζευξης των μονάδων σε ένα πεδίο μάχης. »**

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτει ότι από τις υπάρχουσες ζεύξεις που χρησιμοποιούνται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις χώρες μέλη του NATO, αυτή με τις περισσότερες λειτουργίες και τα περισσότερα πλεονεκτήματα όπως γρήγορη μεταφορά δεδομένων, μετάδοση εκτεταμένων τύπων πληροφοριών και μεγάλη εμβέλεια είναι το Link 16, το οποίο έχει επιλεγεί από το NATO για την διασύνδεση των εξωτερικών μονάδων του ACCS (AIR COMMAND AND CONTROL SYSTEM). Όμως τα θετικά αυτά στοιχεία του συστήματος δεν επαρκούν για την εκτέλεση επιχειρήσεων στα πλαίσια των απαιτήσεων ενός πλήρως εξελιγμένου δόγματος Δικτυοκεντρικού πολέμου. Το επίπεδο για το οποίο επαρκούν είναι μέχρι το επίπεδο Ελέγχου Δυνάμεων (Force Control). Ο χρόνος αντίδρασης των μονάδων που συμμετέχουν στο δίκτυο καθώς και τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά τον συσχετισμό ιχνών αποτελούν τροχοπέδη για την επίτευξη του επόμενου επιπέδου που είναι ο Έλεγχος Όπλων (Weapons Control) από τις μονάδες C2.

Ο χρόνος αντίδρασης των συμμετεχόντων μονάδων στο δίκτυο αποτελεί τον πρώτο ανασταλτικό στοιχείο που εμποδίζει την επίτευξη του δόγματος του Δικτυοκεντρικού πολέμου. Σύμφωνα με μία μελέτη που παρουσιάζεται στο βιβλίο *Network-Centric Warfare: Its origin and future*, Articles 98, January 1998 του Vice Admiral Arthur K. Cebrowski, US Navy & John J. Garstka ο χρόνος που απαιτείται για μεταφορά στόχων μεταξύ κόμβων – πλατφορμών του δικτύου για επίτευξη του ανώτερου επιπέδου είναι μικρότερος από 1 δευτερόλεπτο ενώ το Link-16 πραγματοποιεί χρόνους μεγαλύτερους από 1 δευτερόλεπτο και αυτό οφείλεται σε ένα βαθμό στον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το Link-16 τον Reed-Solomon, όπως εξετάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Επομένως, απαιτείται εύρεση λύσεων για την μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης πληροφορίας στο δίκτυο/πλέγμα C4I.

Οι ζεύξεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα διοίκησης και ελέγχου είναι ψηφιακές. Αυτό συμβαίνει γιατί η ψηφιακή τεχνολογία που εφαρμόζεται στους αισθητήρες και στα ηλεκτρονικά συστήματα διοίκησης και ελέγχου καθιστά υποχρεωτική τη δυνατότητα μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων κόμβων ενός δικτύου (αεροσκάφη, πλοία, μονάδες στρατού ξηράς). Στα τελευταία 20 χρόνια η ανάπτυξη των ψηφιακών ζεύξεων δεδομένων (Digital Data Links, DDL), έχει επικεντρωθεί στη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ των μονάδων διοίκησης και ελέγχου. Η πολυσύνθετη μορφή

των σημερινών, αλλά πολύ περισσότερο των μελλοντικών πεδίων μαχών, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για λήψη πληροφορίας σε "πραγματικό χρόνο" και την ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων ηλεκτρονικού πολέμου (Electronic Warfare, EW), έχουν όπως είναι προφανώς ξεπεράσει τις ικανότητες των σημερινών συστημάτων DDL που βρίσκονται σε υπηρεσία στις χώρες μέλη του NATO αλλά και εκτός αυτού. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών, ικανού να αντιστέκεται στα ηλεκτρονικά αντίμετρα (**Electronic Coimtermeasures Resistant Communication System, ERCS**), και να παρέχει ασφαλή μετάδοση πληροφοριών μεταξύ όλων των μονάδων που εμπλέκονται σε αεροπορικές επιχειρήσεις. Οι ένοπλες δυνάμεις έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για ένα **Πολυλειτουργικό Σύστημα Διανομής Πληροφοριών (Multi-functional Information Distribution System, MIDS)**. Το σύστημα που ανταποκρίνεται στις παραπάνω απαιτήσεις είναι το **Διακλαδικό Σύστημα Τακτικών Πληροφοριών (Joint Tactical Information System, JTIDS)**, το οποίο βασίζεται στις διαλειτουργικές ικανότητες του Link-16. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του Link-16 στηρίζεται στην αρχιτεκτονική Time Division Multiple Access (TDMA).

Κάθε "κυλινδρική" περιστροφή, που ονομάζεται "εποχή", έχει διάρκεια 12,8 λεπτά. Κάθε εποχή χωρίζεται σε 98304 χρονικές θυρίδες ή 64 καρέ εκάστη αποτελούμενη από 1536 σχισμές ($64 \times 1536 = 98304$). Έτσι, μια χρονική θυρίδα έχει διάρκεια 7.8125 msec και καταλαμβάνεται από μια μονάδα JTIDS (JU), δηλαδή κάθε JU εκπέμπει ή δέχεται σε κάθε χρονική θυρίδα ένα σχήμα γνωστό ως TDMA (Time Division Multiple Access). Επομένως, υπάρχουν 128 χρονικές θυρίδες ανά δευτερόλεπτο. Μια ομάδα συμμετεχόντων που ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους καλείται Net. Υπάρχουν μέχρι 127 δίκτυα στοιβάζονται και ευθυγραμμισμένα ταυτόχρονα. Σε κάθε Net έχει εκχωρηθεί ένα μοναδικό μοτίβο εναλλαγής συχνότητας για τις μεταδόσεις του. Το JDITS λειτουργεί στη ζώνη Lx μεταξύ 960-1215 MHz που εκπέμπει 51 πιθανές συχνότητες φορέα, με ρυθμό αναπήδησης συχνότητας > 33.000 λυκίσκους / δευτερόλεπτο. Έξοδος ισχύος = 200 Watt. 128 Η κυματομορφή είναι ένας συνδυασμός τσιπ (1 τσιπ ανά hop) και bit (1 bit ανά σύμβολο διαμόρφωσης). Το chipping γίνεται με το CCSK (Cyclic Code Shift Keying) και η διαμόρφωση είναι CPSM (Συνεχής Μετατόπιση Φάσης) ή Phase-Coherent Binary Shift Keying Keying. Τα μηνύματα Link-16 ανήκουν σε τέσσερις τύπους: σταθερή μορφή, μεταβλητή μορφή, ελεύθερο κείμενο και χρονισμό γύρου ταξιδιού. Για τη διόρθωση σφαλμάτων

εφαρμόζεται η κωδικοποίηση Reed-Solomon (R-S), έτσι ώστε τα 15 bits των πραγματικών δεδομένων να επεκταθούν σε ένα πακέτο 31 bits στο μήνυμα. Η κωδικοποίηση R-S μπορεί να ανιχνεύσει και να διορθώσει έως 8 bit κατά λάθος.

Οι κώδικες Reed-Solomon (R-S) είναι μη συνδυαστικοί κυκλικοί κώδικες με σύμβολα που αποτελούνται από ακολουθίες m-bit, όπου m είναι οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος που έχει τιμή μεγαλύτερη από 2. Αποτελούν την κεντρικό μηχανισμό απευθείας διόρθωσης σφαλμάτων που οφείλονται στον θόρυβο των ασυρμάτων ζεύξεων.

Το σύστημα NPG (Net Participation Groups) επιτρέπει στις πληροφορίες που συνδέονται με ένα συγκεκριμένο χρήστη του δικτύου να είναι προσβάσιμες από αυτόν όταν απαιτηθεί. Δηλαδή το NPG είναι μια λειτουργική ομαδοποίηση των μηνυμάτων του Link 16 που υποστηρίζει ένα συγκεκριμένο τύπο αποστολής, όπως (α) Επιτήρηση, (β) Ηλεκτρονικός πόλεμος (EW), (γ) Διαχείριση αποστολών, (δ) Εναέριος έλεγχος, (ε) Μαχητικό σε Μαχητικό (Fighter to Fighter), (ς) Ασφαλής μετάδοση φωνής, (ζ) Ακριβής θέση και ταυτότητα συμμετέχοντος (Precise Participant Location and Identification-PPLI).

Η χρήση του συστήματος NPG, επιτρέπει να διαχειρίζονται επιλεκτικά οι διαφορετικοί τύποι δεδομένων, επιτρέποντας στους χρήστες που συμμετέχουν στο δίκτυο να επικοινωνούν με τις πλατφόρμες για να πάρουν την επικρατούσα αεροπορική εικόνα και στην συνέχεια να επιστρέψουν σε άλλο δίκτυο και να ανταλλάσσουν διάφορες πληροφορίες μεταξύ τους.

Η παρούσα διατριβή ανέλυσε λεπτομερώς την λειτουργία του Link-16 ως εναερίου δικτυακού συστήματος υψηλής ταχύτητας και αξιοπιστίας για την ικανοποίηση των επιχειρησιακών αναγκών ενός μοντέρνου συστήματος αποτελεσματικής άμυνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α) ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[8] Adams, T. K. (1998). Radical destabilizing effects of new technologies. *Parameters*, 1998(Autumn), 99-111.

Aderson, M.S., 1998. *War and Society in Europe of the Old Regime 1618-1789*. Montreal, Quebec: McGill-Queen's University Press.

[9] Alberts, D.S., and D.S. Papp (eds.), 1997. *The Information Age: An Anthology on Its Impact and Consequences*. Washington, DC: National Defense University.

Alberts, David S., 2003. *Power to the Edge: Command and Control in the Information Age*. Washington, DC: Command and Control Research Program, National Defense University.

Alberts, David S., et al., 1999. *Network Centric Warfare: Development and Leveraging Information Superiority*. Washington, DC: National Defense University Press.

Anderson, Matt, Joel Hamby and Frank O'Donnell, 2000. "Battalion/Task Force Targeting and the Military Decision-Making Process (MDMP) in the Information Operations (IO) Environment." *Combat Training Center (CTC) Quarterly Bulletin*, 1st Quarter FY 2000.

[11] Armistead, Leigh. (ed.), 2007. *Information Warfare: Separating Hype from Reality*. Washington, DC: Potomac Books, Inc.

Babbie, E. R., 2007. *The basics of social research*. Australia: Thomson/Wadsworth.

Beckno, Brian T., 2006. *Preparing the American Soldier in a Brigade Combat Team to Conduct Information Operations in the Contemporary Operational Environment*. Fort Leavenworth, KS: Army Command and Staff College.

Bérenger, Jean (ed.), 1998. *La révolution militaire en Europe (XVe–XVIIIe siècles)*. Paris: Economica.

Berg, B. L., 2003. *Qualitative research methods for the social sciences*. Boston: Allyn & Bacon.

Berkowitz, B. D. (2003). *The new face of war: How war will be fought in the 21st century*. New York: Free Press.

[3] Bond, Brian, 2003. *War and Society In Europe: 1870-1970*. Montreal & Kingston: McGill-Queens University Press.

Boot, Max. 2006. *War Made New: Weapons, Warriors, and the Making of the Modern World*. New York: Gotham Books, .

Bouchard, Ronald M., 1999. *Information Operations in Iraq*. Carlisle Barracks, PA: Army War College.

Brown, J.S., and P. Duguid. (2000). *The Social Life of Information*. Boston: Harvard Business School Press.

Cares, Jeffrey R., 2005. *Distributed Networked Operations: The Foundations of Network Centric Warfare*. Newport, RI: Alidade Press.

Carr, Timothy D., 2004. *Network-Centric Warfare: Are We Past the Age of De-centralized Execution?* Newport, RI: Naval War College.

Clausewitz C., 1982. *On War*. London: Penguin Group.

Cox, Joseph L., 2006. *Information Operations in Operations Enduring Freedom and Iraqi Freedom -- What Went Wrong?* Fort Leavenworth, KS: Army Command and Staff College,

Creswell, John W., 2003. *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Thousand Oaks, CA: Sage.

DeLange, Eric P. and Mike Morris, 2006. *Decision-Centric Warfare: Reading Between the Lines of Network-Centric Warfare*. Newport, RI: Naval War College.

Dennis E. Showalter, 1993. "Caste, Skill, and Training: The Evolution of Cohesion in European Armies from the Middle Ages to the Sixteenth Century," *The Journal of Military History* 57(3): 407-430.

Denzin, N. & Lincoln, Y. (eds.), 2005. *The Sage book of qualitative research*. Thousand Oaks, CA: Sage.

[4] DeVries, Kelly, (1998). "Gunpowder Weaponry and the Rise of the Early Modern State." *War in History* 5(2): 127-45.

Duyvesteyn, Isabelle and Angstrom, Jan, 2005. *Rethinking the Nature of War*. London: Routledge.

Eltis, David, 1996. *The Military Revolution in Sixteenth-Century Europe*. London and New York: I. B. Tauris.

Emery, Norman, 2004. "Information Operations in Iraq." *Military Review* 84(3): 11-14.

Fast, William R. 1997. "Knowledge Strategies: Balancing Ends, Ways, and Means in the Information Age", ετς Neilson, Robert E. (ed.). *Sun Tzu and Information Warfare: A Collection of Winning Papers*

from the Sun Tzu Art of War in Information Warfare Competition. Washington, DC: National Defense University Press, σ.σ. 3-32.

Feld, M. D., 1975. "Middle Class Society and the Rise of Military Professionalism: The Dutch Army, 1589–1609." *Armed Forces and Society* 1(4): 419–422.

Ferris, Joh, 2003. "A New American Way of War? C4ISR, Intelligence and Information Operations in Operation 'Iraqi Freedom': A Provisional Assessment." *Intelligence & National Security* 18(4): 155-174.

Forno, Richard and Ronald Baklarz, 1999. *Art of Information Warfare: Insight Into the Knowledge Warrior Philosophy*. Boca Raton, FL: Universal Publishers.

Garth, Dennis, 2003. *Network Centric Warfare and Its Impact on Operational Functions*. Newport, RI: Naval War College.

Gilbert John Millar (1971). "The Landsknecht: His Recruitment and Organization, With Some Reference to the Reign of Henry VIII," *Military Affairs* 35(3):95-99.

[1],[12] Gongora, T., Riekhoff, H. (ed) (2000). *Toward a Revolution in Military Affairs? Defence and Security at the dawn of the 21st century*. Westport, Connecticut: Greenwood Press.

Gongora, T., Riekhoff, H., 2000. *Toward a Revolution in Military Affairs?* Santa Barbara, CA: Praeger, σ.σ. 37-38.

Gray, David E., 2004. *Doing research in the real world*. London, UK: Sage Publications.

Greenwood, Michael D., 1999. *E Pluribus Unum: Enhancing Intelligence Support in the Network Centric Environment*. Newport, RI: Naval War College.

Hardesty, David C., 2003. "Fix Net Centric for the Operators." *United States Naval Institute Proceedings* 129(9): 68-71.

Heickero, Roland, 2006. *Some Thoughts on the Application of Military Theory to Information Operations and Network Centric Warfare*. Stockholm, Sweden: Swedish Defence Research Agency.

Henderson, Breck W., 1990. "USAF, NATO Invest Heavily in AWACS Electronics Upgrades," *Aviation Week & Space Technology* 132(1): 45–50.

Hill, Brian A., 2006. *Can't We All Just Get Along? The Interagency Process at Work in Information Operations*. Newport, RI: Naval War College.

Howard, Michael, 2001. *War in European History*. Oxford: Oxford University Press.

Hubbard, Zachary P., 1999. "Information Warfare in Kosovo." *Journal of Electronic Defense* 22(11): 57-60.

Hubbard, Zachary P., 2000. "Information Operations and Information Warfare in Kosovo: A Report Card We Didn't Want to Bring Home." *Cyber Sword* 4(1): 27-29.

[6] Hundley, Richard O., 1999. *Past Revolutions, Future Transformations. What Can the History of Revolutions in Military Affairs Tell Us about Transforming the U.S. Military?* Washington D.C.: RAND.

Knox, MacGregor, Williamson Murray (eds.), 2001. *The dynamics of military revolution, 1300-2050* / Cambridge (UK), New York: Cambridge University Press.

Knud J. V. Jespersen, 1983. "Social Change and Military Revolution in Early Modern Europe: Some Danish Evidence", *The Historical Journal* 26(1): 1-13.

[2] Krepinevich, Andrew F. "Cavalry to computer; the pattern of military revolutions." *The National Interest* 37 (Fall 1994): 30 (13).

Liaropoulos, Andrew N., 2009. *The Transformation of Warfare in the Information Age*. Athens: Defence Analyses Institute.

Lynn, John A. (ed.), 1993. *Feeding Mars: Logistics in Western Warfare from the Middle Ages to the Present*. Boulder, Colorado: Westview Press.

[7] M. Knox, W. Murray (eds) (2001). *The Dynamics of Military Revolution 1300–2050*. Cambridge: Cambridge University Press.

Morgan, Patrick M., 2000. "The impact of the revolution in military affairs". *Journal of Strategic Studies* 23(1): 132-162.

Moskos, Charles S./Williams, John Allen, Segal, David R., 2000. *The Postmodern Military*. Oxford: Oxford University Press.

NATO's Sixteen Nations (1998), Special Edition 1998, "AWACS Takes Off into the 21st Century". Uithoorn, the Netherlands: Jules Perel's Publishing Co.

Neill, J., 2007. *Qualitative versus Quantitative Research: Key Points in the Classic Debate*. Διαθέσιμο εις:

<http://wilderdom.com/research/QualitativeVersusQuantitativeResearch.html#Features>

(ανακτήθηκε στις 14 Μαΐου 2013)

Newman, W. L., 2003. *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches* (5th ed.). Boston: A&B.

Oman, Charles, 1885. *The art of war in the Middle Ages, A.D. 378-1515*. Oxford: Blackwell.

Oppenheim, A. N., 1992. *Questionnaire Design, Interviewing and Attitude Measurement*. London & NY: Continuum.

Oppenheim, A. N., 1992. *Questionnaire Design, Interviewing and Attitude Measurement*. London & NY: Continuum.

Parker, Geoffrey (1995). "The Military Revolution, 1560-1660 - a Myth?" εις *The Military Revolution Debate*, edited by Clifford J. Rogers, Boulder: Westview Press.

Parker, Geoffrey, 1996. *The Military Revolution: Military Innovation and the Rise of the West, 1500–1800*. 2nd ed. Cambridge (U.K.), and New York: Cambridge University Press.

Parrott, David, 1985. "Strategy and Tactics in the Thirty Years' War: The 'Military Revolution.'" *Militärgeschichtliche Mitteilungen* 18 (2): 7–25.

Paul D. Solon, 1972. "Popular Response to Standing Military Forces in Fifteenth-Century France," *Studies in the Renaissance* 19: 78-111.

Paul Stewart, 1969. "The Soldier, the Bureaucrat, and Fiscal Records in the Army of Ferdinand and Isabella." *Hispanic American Historical Review* 49 (2):281-292.

Proctor, Paul, 1999. "Aging NATO AWACS Prove Reliable in Balkans Campaign," *Aviation Week & Space Technology* 151(9): 43.

Reynolds, Linda K., 2006. *A Framework for the Management of Evolving Requirements in Software Systems Supporting Network-Centric Warfare*. Monterey, CA: Naval Postgraduate School.

Roberts, Michael, 1953. *Gustavus Adolphus: A History of Sweden, 1611–1632* (2 vols). London and New York: Longmans, Green.

Roberts, Michael, 1956. *The Military Revolution 1560-1660*. Belfast: M. Boyd.

Roberts, Michael, 1995. "The Military Revolution, 1560-1660" εις *The Military Revolution Debate: Readings on the Military Transformation of Early Modern Europe*, edited by Clifford J. Rogers. Boulder: Westview Press.

Rogers, Clifford J. (ed.), 1995. *The Military Revolution Debate: Readings on the Military Transformation of Early Modern Europe*. Boulder, Colorado: Westview Press.

Romanych, Marc J. and Kenneth Krumm, 2004. "Tactical Information Operations in Kosovo." *Military Review* 84(5): 56-61.

Rothenberg, Panther E., 1986. "Maurice of Nassau, Gustavus Adolphus, Raimondo Montecuccoli, and the 'Military Revolution' of the Seventeenth Century", εις *Makers of Modern Strategy: From Machiavelli to the Nuclear Age* (ed. Peter Paret, Gordon A. Craig and Felix Gilbert), Princeton, NJ: Princeton University Press.

Seidman, I., 1998. *Interviewing as qualitative research: A guide for researchers in education and the social sciences*. New York: Teachers College.

Storrs, Christopher and H. M. Scott, 1996. "The Military Revolution and the European Nobility, c. 1600–1800." *War in History* 3(1): 1–41.

Tessmer, Arnold Lee, 1988. *Politics of Compromise: NATO and AWACS*, Washington, D.C.: National Defense University Press.

[13] US Department of Defence, 2005. *Net-Centric Environment Joint Functional Concept 1.0*. Washington, DC: Department of Defense Publications.

Van Evera, S., 2009. *Εισαγωγή στη Μεθοδολογία της Πολιτικής Επιστήμης*. Αθήνα: Ποιότητα.

Wawro, Geoffrey, 2000. *Warfare and Society In Europe 1792-1914*, London: Routledge.

Wilfred Brenton Kerr (1940). "The English Soldier in the Campaign of Agincourt," *The Journal of the American Military Institute* 4(4): 209-224.

NCTSI. *UNDERSTANDING LINK-16, A Guidebook for New Users*, Δεκέμβριος 1998.

Tri T. Ha. *DIGITAL SATELLITE COMMUNICATIONS*, MACMILLAN PUBLISHING COMPANY, New York NY, 1986.

Sklar-Kumar - *Digital Communications - Fundamentals & Applications* (2nd edition)

B) ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[10] ΖΗΡΝΟΒΑΛΗΣ, Α./ΚΑΡΑΜΠΙΑΤΗΣ-ΓΚΟΥΓΚΟΥΛΙΑΣ, Β., 2008. *Δικτυοκεντρικός Πόλεμος- Network Centric Warfare*. Δεκέλεια: ΥΑΕ.

Κοτζιάς, Ν., 2003. *Παγκοσμιοποίηση. Η ιστορική θέση, το μέλλον και η πολιτική σημασία*. Αθήνα: Καστανιώτης.

Μύνκλερ, Χείφριντ, 2005. *Οι Νέοι Πόλεμοι, Νέοι Εχθροί και Νέες Μορφές Πολέμου* (μτφρ Αναστασία Δασκαρόλη). Αθήνα: Καστανιώτης.

[5] Ντόκος, Θάνος Π. 1999. Η «Επανάσταση στα Στρατιωτικά Θέματα». Συνέπειες για την Ελληνική Ασφάλεια και ευκαιρία για τις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις. Αθήνα: Ινστιτούτο Αμυντικών Αναλύσεων.

Παπαρούπας Αλέξιος-Γεώργιος, Νάτσιος Κωνσταντίνος, 2008. *Το ΑΣΕΠΕ ως πλατφόρμα Δικτυοκεντρικού Πολέμου (C4ISR)*. Δεκέλεια: ΥΑΕ.

Τσιριγώτης, Άνθιμος-Αλέξανδρος, 2008. Η Στρατιωτική Επανάσταση του 21^{ου} Αιώνα. Ο Πόλεμος στην Εποχή της «Εικονοποίησης». Πειραιάς: Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

