

Η αναζήτηση της πραγματικά ανθεκτικής off-grid επικοινωνίας

Υπερβαίνοντας τον μύθο του Meshtastic

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για ανεξάρτητες και ανθεκτικές μορφές επικοινωνίας έχει επανέλθει δυναμικά στο προσκήνιο. Η αυξανόμενη εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας από το internet, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και τις ενεργειακές υποδομές έχει δημιουργήσει έναν εύθραυστο τεχνολογικό κόσμο, όπου μια μεγάλη διακοπή ρεύματος, μια φυσική καταστροφή, μια κυβερνοεπίθεση ή ακόμη και μια πολεμική σύγκρουση μπορούν να προκαλέσουν την άμεση κατάρρευση των συμβατικών μέσων επικοινωνίας.

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον εμφανίστηκαν νέες τεχνολογίες off-grid επικοινωνίας, με πιο γνωστή τα τελευταία χρόνια το Meshtastic και γενικότερα τα LoRa mesh δίκτυα. Η ευκολία χρήσης, το χαμηλό κόστος και η δυνατότητα λειτουργίας χωρίς internet οδήγησαν πολλούς στο συμπέρασμα ότι το Meshtastic αποτελεί την "απόλυτη λύση" για επικοινωνία σε συνθήκες κρίσης ή κατάρρευσης υποδομών.

Στην πραγματικότητα όμως, η εικόνα είναι πολύ πιο σύνθετη.

Καμία τεχνολογία επικοινωνίας δεν είναι ιδανική για όλα τα σενάρια. Κάθε σύστημα διαθέτει διαφορετικά πλεονεκτήματα, περιορισμούς, απαιτήσεις και επιχειρησιακές δυνατότητες. Το Meshtastic αποτελεί αναμφίβολα ένα εξαιρετικό εργαλείο για συγκεκριμένες χρήσεις, όμως γύρω από αυτό έχει δημιουργηθεί ένας έντονος τεχνολογικός ενθουσιασμός που συχνά αγνοεί τις πραγματικές αδυναμίες και τους φυσικούς περιορισμούς του.

Σκοπός αυτού του άρθρου δεν είναι να απορρίψει ή να υποτιμήσει το Meshtastic. Αντίθετα, στόχος είναι να παρουσιαστεί μια όσο το δυνατόν πιο αντικειμενική και τεχνικά τεκμηριωμένη σύγκριση όλων των βασικών μορφών off-grid επικοινωνίας, από τα LoRa mesh δίκτυα και το APRS μέχρι το HF radio, τα ψηφιακά πρωτόκολλα μεγάλης απόστασης, τα satellite systems και τις σύγχρονες αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές δικτύωσης.

Μέσα από αυτή τη σύγκριση επιχειρείται να καταρριφθεί η αντίληψη ότι υπάρχει μία και μοναδική "καλύτερη" λύση. Η πραγματική ανθεκτικότητα στις επικοινωνίες δεν προκύπτει από ένα μόνο πρωτόκολλο ή μία μόνο τεχνολογία, αλλά από τον σωστό συνδυασμό διαφορετικών συστημάτων, τα οποία μπορούν να λειτουργούν συμπληρωματικά όταν ένα ή περισσότερα επίπεδα υποδομής αποτύχουν.

Η μελέτη αυτή εξετάζει:

1. τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τεχνολογίας,
2. την πραγματική επιχειρησιακή τους αξία,
3. την αντοχή τους σε blackout και infrastructure collapse,
4. τις ενεργειακές απαιτήσεις,
5. τη δυνατότητα κλιμάκωσης,
6. τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων,
7. καθώς και τον βαθμό ανεξαρτησίας τους από τρίτες υποδομές.

Στόχος είναι η δημιουργία μιας συνολικής εικόνας για το τι σημαίνει πραγματικά resilient communication και γιατί η “απόλυτη off-grid λύση” δεν είναι ένα μόνο σύστημα αλλά μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική επικοινωνιών.

Meshtastic και LoRa

Τα πραγματικά πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί

Το Meshtastic βασίζεται στο LoRa, μια τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης σχεδιασμένη αρχικά για IoT εφαρμογές και αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα του LoRa είναι ότι μπορεί να μεταδώσει μικρές ποσότητες δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Αυτό το καθιστά ιδανικό για συσκευές που πρέπει να λειτουργούν για εβδομάδες ή ακόμη και μήνες με μικρές μπαταρίες ή ηλιακή τροφοδοσία.

Πάνω σε αυτή τη βάση, το Meshtastic δημιούργησε ένα mesh δίκτυο όπου κάθε node λειτουργεί ως αναμεταδότης. Θεωρητικά, όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν τόσο μεγαλώνει και η κάλυψη του δικτύου. Εδώ όμως βρίσκεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα της αρχιτεκτονικής του. Το σύστημα εξαρτάται σχεδόν ολοκληρωτικά από την ύπαρξη ενεργών κόμβων. Αν σε μια περιοχή δεν υπάρχουν nodes, δεν υπάρχει δίκτυο. Αν οι κόμβοι σταματήσουν να λειτουργούν λόγω έλλειψης ενέργειας ή φυσικής καταστροφής, το mesh αρχίζει να διασπάται.

Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική αξία του Meshtastic εξαρτάται άμεσα από:

1. την πυκνότητα της κοινότητας,
2. τη γεωγραφία της περιοχής,
3. την ενεργειακή αυτονομία των κόμβων,
4. και την ύπαρξη σωστά τοποθετημένων relay nodes.

Σε περιοχές με πολλούς χρήστες και καλή τοποθέτηση κόμβων, το Meshtastic μπορεί να λειτουργήσει εντυπωσιακά καλά. Σε αραιοκατοικημένες περιοχές όμως ή σε πραγματικές συνθήκες κρίσης όπου οι χρήστες χάνουν ρεύμα και υποδομές, το mesh αρχίζει να διασπάται σε μικρά απομονωμένα “νησιά” επικοινωνίας.

Επιπλέον, το ίδιο το LoRa έχει εγγενείς περιορισμούς. Το bandwidth είναι εξαιρετικά μικρό. Το Meshtastic είναι κατάλληλο για:

1. μικρά μηνύματα,
2. telemetry,
3. GPS coordinates,
4. και βασική ανταλλαγή δεδομένων.

Δεν είναι όμως σχεδιασμένο για:

1. φωνητική επικοινωνία,
2. πραγματικό networking υψηλού throughput,

3. ή realtime data exchange.

Vascos

Καθώς το δίκτυο μεγαλώνει, εμφανίζονται προβλήματα congestion και packet collisions. Η αρχιτεκτονική flooding retransmission που χρησιμοποιεί το Meshtastic λειτουργεί ικανοποιητικά σε μικρά meshes, όμως σε μεγάλης κλίμακας deployments το scalability μειώνεται σημαντικά.

Σε πραγματικές συνθήκες πόλης, τα θεωρητικά εντυπωσιακά ranges του LoRa συχνά καταρρέουν. Οι αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων που παρουσιάζονται συχνά στο διαδίκτυο επιτυγχάνονται κυρίως σε ιδανικά line-of-sight περιβάλλοντα ή με πολύ υψηλές κεραιές. Σε πυκνό αστικό περιβάλλον, το concrete attenuation, το RF noise και το multipath propagation μειώνουν δραματικά την απόδοση.

Αυτό δεν σημαίνει ότι το Meshtastic είναι κακή τεχνολογία. Αντιθέτως, είναι ίσως το καλύτερο low-power tactical messaging system που είναι σήμερα διαθέσιμο στο ευρύ κοινό. Για:

1. μικρές ομάδες,
2. οχήματα,
3. πεζοπορία,
4. bushcraft,
5. local coordination,
6. και χαμηλής κατανάλωσης επικοινωνία,

παραμένει εξαιρετικό εργαλείο.

Το πρόβλημα αρχίζει όταν παρουσιάζεται ως πλήρης αντικατάσταση όλων των άλλων μορφών resilient communication.

APRS και Packet Radio

Το APRS, αν και παλαιότερο τεχνολογικά, παραμένει επιχειρησιακά εξαιρετικά ώριμο. Βασίζεται σε packet radio μέσω VHF και διαθέτει δεκαετίες πραγματικής χρήσης σε emergency communications.

Σε αντίθεση με το Meshtastic:

1. δεν απαιτεί πυκνό mesh,
2. μπορεί να καλύψει τεράστιες περιοχές μέσω digipeaters,
3. και λειτουργεί με σημαντικά υψηλότερη ισχύ εκπομπής.

Ένας μόνο digipeater τοποθετημένος σε βουνό ή υψηλό σημείο μπορεί να παρέχει κάλυψη σε ολόκληρη πόλη ή περιφέρεια.

Το APRS χρησιμοποιείται κυρίως για:

1. tracking,
2. telemetry,

3. tactical coordination,
4. beaconing,
5. και emergency positioning.

Vascos

Το μεγάλο μειονέκτημά του είναι ότι:

1. απαιτεί ραδιοερασιτεχνική άδεια,
2. δεν επιτρέπει encryption,
3. και διαθέτει περιορισμένο bandwidth.

Παρόλα αυτά, η ωριμότητα της υποδομής του παραμένει σημαντικό στρατηγικό πλεονέκτημα.

HF Radio

Η πραγματική στρατηγική επικοινωνία

Σε αντίθεση με τα επίγεια mesh δίκτυα, το HF radio δεν εξαρτάται από τοπικές υποδομές. Η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω της ιονόσφαιρας, επιτρέποντας επικοινωνίες εκατοντάδων ή και χιλιάδων χιλιομέτρων χωρίς internet, repeaters ή mesh nodes.

Αυτό σημαίνει ότι ένας σταθμός με:

1. μπαταρία,
2. φορητή κεραία,
3. και βασικό εξοπλισμό HF,

μπορεί να επικοινωνήσει πανελλαδικά ή διεθνώς ακόμη και αν ολόκληρη η επίγεια υποδομή έχει καταρρεύσει.

Το HF απαιτεί:

1. περισσότερες τεχνικές γνώσεις,
2. σωστή κατανόηση propagation,
3. καλύτερες κεραίες,
4. και μεγαλύτερη εμπειρία χειρισμού.

Παρόλα αυτά, στρατηγικά παραμένει η πιο ανθεκτική μορφή off-grid επικοινωνίας που διαθέτει σήμερα το ευρύ κοινό.

HF Digital Communications

JS8Call, Winlink, VARA και VARAC

Πάνω στο HF έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα ψηφιακά πρωτόκολλα που μετατρέπουν το ραδιόφωνο σε resilient digital communication platform.

Το JS8Call επιτρέπει ανταλλαγή μηνυμάτων μεγάλων αποστάσεων με εξαιρετικά χαμηλή ισχύ, ακόμη και σε συνθήκες πολύ αδύναμου σήματος. Ουσιαστικά λειτουργεί σαν "HF text messaging".

Το Winlink προσφέρει δυνατότητα ανταλλαγής email μέσω HF και VHF και

χρησιμοποιείται ήδη από:

1. emergency οργανισμούς,

Vascos

2. maritime operators,
3. disaster response ομάδες,
4. και αποστολές σε απομονωμένες περιοχές.

Το VARA αποτελεί modem υψηλής απόδοσης για HF/VHF/UHF ψηφιακή επικοινωνία, ενώ το VARAC προσθέτει:

1. chat,
2. mailbox λειτουργίες,
3. relay,
4. asynchronous messaging,
5. και emergency communication δυνατότητες.

Σε αντίθεση με το Meshtastic:

1. δεν απαιτούν mesh,
2. δεν εξαρτώνται από πυκνή τοπική υποδομή,
3. και μπορούν να λειτουργήσουν σε στρατηγικές αποστάσεις.

Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και η ανάγκη για:

1. HF radio,
2. interfaces,
3. υπολογιστή,
4. και εμπειρία χειρισμού.

Reticulum και αποκεντρωμένα resilient δίκτυα

Το Reticulum αποτελεί μία από τις πιο ενδιαφέρουσες σύγχρονες προσεγγίσεις resilient networking.

Σε αντίθεση με το Meshtastic, το οποίο είναι εφαρμογή βασισμένη αποκλειστικά σε LoRa mesh, το Reticulum είναι πλήρες networking stack που μπορεί να λειτουργήσει πάνω από:

1. LoRa,
2. Wi-Fi,
3. Ethernet,
4. serial links,
5. packet radio,
6. ακόμη και HF.

Η φιλοσοφία του θυμίζει περισσότερο tactical communication architecture παρά hobbyist mesh system. Στόχος του είναι η δημιουργία αποκεντρωμένων και delay-tolerant δικτύων ανεξάρτητων από συγκεκριμένο transport layer.

Vascos

Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι:

1. η αυξημένη πολυπλοκότητα,
2. η μικρή ακόμη κοινότητα,
3. και η ανάγκη σημαντικής τεχνικής γνώσης.

Η σημασία της ενεργειακής αυτονομίας

Σε πραγματικές συνθήκες blackout, η ενέργεια γίνεται εξίσου σημαντική με το ίδιο το communication protocol.

Ένα communication system χωρίς:

1. μπαταρίες,
2. solar backup,
3. generator,
4. ή δυνατότητα χαμηλής κατανάλωσης, παύει πολύ γρήγορα να είναι λειτουργικό.

Τα LoRa systems υπερτερούν σημαντικά λόγω της εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης. Αντίθετα:

1. Wi-Fi mesh,
2. μεγάλα repeater infrastructures,
3. microwave links,
4. και IP networking systems,

έχουν πολύ υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

Το HF βρίσκεται σε ενδιάμεση θέση. Αν και απαιτεί περισσότερη ισχύ κατά την εκπομπή, έχει το τεράστιο πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται πυκνή υποδομή ή συνεχώς ενεργούς ενδιάμεσους κόμβους.

Ο ανθρώπινος παράγοντας

Η μεγαλύτερη αδυναμία οποιουδήποτε communication system δεν είναι πάντα η τεχνολογία αλλά ο άνθρωπος.

Ακόμη και το πιο προηγμένο δίκτυο καθίσταται άχρηστο όταν:

1. δεν υπάρχουν εκπαιδευμένοι operators,
2. δεν υπάρχει πειθαρχία επικοινωνιών,
3. δεν υπάρχουν SOPs,
4. δεν υπάρχει ενεργειακή προετοιμασία,
5. και δεν υπάρχουν fallback σχέδια.

Η πραγματική resilient επικοινωνία απαιτεί:

1. εκπαίδευση,
2. οργάνωση,
3. redundancy,
4. και κατανόηση των περιορισμών κάθε τεχνολογίας.

EMP, ηλεκτρονικός πόλεμος και jamming

Σε ακραία σενάρια μεγάλης κλίμακας, οι επικοινωνίες αντιμετωπίζουν επιπλέον απειλές:

1. EMP,
2. jamming,
3. spoofing,
4. και electronic warfare.

Τα περισσότερα civilian mesh δίκτυα δεν διαθέτουν:

1. anti-jamming δυνατότητες,
2. hardened infrastructure,
3. frequency hopping,
4. ή adaptive spectrum management.

Αντίθετα, στρατιωτικά MANET systems χρησιμοποιούν:

1. self-healing networking,
2. dynamic routing,
3. spread spectrum,
4. anti-jamming τεχνολογίες,
5. και tactical RF management.

Αυτό αποδεικνύει ότι η πραγματική resilient επικοινωνία απαιτεί πολύ περισσότερα από ένα απλό mesh δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης.

Συνολικό συμπέρασμα

Καμία τεχνολογία δεν αποτελεί από μόνη της την “απόλυτη λύση”.

Το Meshtastic είναι εξαιρετικό:

1. για local tactical messaging,
2. low-power επικοινωνία,

3. GPS coordination,
4. και μικρές ομάδες.

Vascos

Όμως δεν μπορεί να αντικαταστήσει:

1. το HF,
2. τα VHF/UHF voice systems,
3. τα digital HF modes,
4. ή τα μεγάλης κλίμακας resilient δίκτυα.

Η πραγματική off-grid επικοινωνία βασίζεται σε πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική:

1. LoRa για χαμηλής κατανάλωσης local mesh,
2. VHF/UHF για άμεση φωνή,
3. APRS για tactical coordination,
4. HF για στρατηγικές αποστάσεις,
5. JS8Call, VARAC και Winlink για resilient digital messaging,
6. και αποκεντρωμένα networking stacks όπως το Reticulum για multi-layer communications.

Η ανθεκτικότητα δεν προκύπτει από ένα μόνο σύστημα αλλά από:

1. redundancy,
2. διαφορετικά propagation methods,
3. ενεργειακή αυτονομία,
4. και δυνατότητα fallback όταν ένα επίπεδο αποτύχει.

Η πραγματική resilient επικοινωνία δεν είναι "ένα app", ούτε "ένα mesh".

Είναι ο συνδυασμός τεχνολογιών, γνώσης, υποδομών και ανθρώπων που συνεχίζουν να λειτουργούν ακόμη και όταν όλα τα υπόλοιπα έχουν σταματήσει.

ΟΛΟΙ ΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΠΙΝΑΚΑ

Τεχνολογία	Υποδομή απαραίτητη	Εμβέλεια	Κατανάλωση	Φωνή	Data/Text	Ανθεκτικότητα σε blackout	Πολυπλοκότητα	Ασφάλεια / Encryption	Scalability	Ιδανική χρήση
Meshtastic / LoRa	Mesh nodes	Μικρή-μεσαία	Πολύ χαμηλή	Όχι	Ναι	Μέτρια	Χαμηλή	Καλή	Μέτρια	Tactical messaging, GPS
MeshCore	Mesh nodes	Μικρή-μεσαία	Πολύ χαμηλή	Όχι	Ναι	Καλή	Μέτρια	Καλή	Καλύτερη από Meshtastic	Urban mesh
Reticulum	Όχι απαραίτητα	Εξαρτάται transport	Χαμηλή-μέτρια	Όχι άμεσα	Ναι	Πολύ καλή	Πολύ υψηλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Resilient decentralized networking
APRS	Digipeaters προαιρετικά	Μεσαία-μεγάλη	Μέτρια	Όχι	Ναι	Καλή	Μέτρια	Όχι	Καλή	Tracking / coordination
Packet Radio (AX.25)	Όχι απαραίτητα	Μεσαία	Μέτρια	Όχι	Ναι	Πολύ καλή	Υψηλή	Όχι	Καλή	Tactical digital radio
VHF/UHF Analog FM	Repeaters προαιρετικά	Τοπική-περιφερειακή	Μέτρια	Ναι	Περιορισμένα	Πολύ καλή	Χαμηλή	Όχι	Πολύ καλή	Άμεση φωνητική επικοινωνία
PMR446	Όχι	Μικρή	Χαμηλή	Ναι	Όχι	Μέτρια	Πολύ χαμηλή	Όχι	Περιορισμένη	Οικογένεια / μικρές ομάδες
CB Radio (27 MHz)	Όχι	Μεσαία	Μέτρια	Ναι	Πολύ περιορισμένα	Πολύ καλή	Χαμηλή	Όχι	Καλή	Convoys, local emergency use
SSB CB	Όχι	Μεγάλη	Μέτρια	Ναι	Περιορισμένα	Πολύ καλή	Μέτρια	Όχι	Καλή	Long-range CB communication
DMR	Συνήθως repeaters	Μεσαία	Μέτρια	Ναι	Ναι	Μέτρια	Μέτρια	Περιορισμένη	Καλή	Ψηφιακή ομαδική επικοινωνία
C4FM / System Fusion	Repeaters προαιρετικά	Μεσαία	Μέτρια	Ναι	Ναι	Καλή	Μέτρια	Όχι	Καλή	Ψηφιακή φωνή + data

TETRA	Συνήθως infrastructure	Μεσαία	Μέτρια	Ναι	Ναι	Πολύ καλή	Υψηλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Professional emergency systems
Τεχνολογία	Υποδομή απαραίτητη	Εμβέλεια	Κατανάλωση	Φωνή	Data/Text	Ανθεκτικότητα σε blackout	Πολυπλοκότητα	Ασφάλεια / Encryption	Scalability	Ιδανική χρήση
P25	Infrastructure προαιρετικό	Μεσαία-μεγάλη	Μέτρια	Ναι	Ναι	Πολύ καλή	Υψηλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Δημόσια ασφάλεια
HF Voice	Όχι	Πολύ μεγάλη	Μέτρια	Ναι	Περιορισμένα	Άριστη	Υψηλή	Όχι	Άριστη	Στρατηγική επικοινωνία
HF Digital Modes	Όχι	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή-μέτρια	Όχι	Ναι	Άριστη	Υψηλή	Περιορισμένη	Άριστη	Long-range digital communication
JS8Call	Όχι	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή	Όχι	Ναι	Άριστη	Υψηλή	Περιορισμένη	Πολύ καλή	HF messaging
FT8 / FT4	Όχι	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή	Όχι	Ελάχιστα	Πολύ καλή	Μέτρια	Όχι	Άριστη	Weak signal communication
Winlink	Όχι	Πολύ μεγάλη	Μέτρια	Όχι	Ναι (email/forms)	Άριστη	Υψηλή	Περιορισμένη	Άριστη	Emergency email & forms
VARA HF	Όχι	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή-μέτρια	Όχι	Ναι	Άριστη	Υψηλή	Περιορισμένη	Άριστη	HF υψηλής απόδοσης data
VARAC	Όχι	Πολύ μεγάλη	Χαμηλή-μέτρια	Όχι	Ναι	Άριστη	Υψηλή	Περιορισμένη	Άριστη	HF chat / resilient messaging
Vara FM	Όχι απαραίτητα	Μεσαία	Μέτρια	Όχι	Ναι	Πολύ καλή	Υψηλή	Περιορισμένη	Πολύ καλή	High-speed local RF networking
SSTV	Όχι	Μεγάλη	Μέτρια	Όχι	Εικόνες	Πολύ καλή	Μέτρια	Όχι	Περιορισμένη	Image transfer
NVIS HF	Όχι	Περιφερειακή	Μέτρια	Ναι	Ναι	Άριστη	Υψηλή	Όχι	Πολύ καλή	Περιφερειακή emergency comms
Microwave Links	Κατευθυντικές κεραίες	Μεγάλη LOS	Μέτρια-υψηλή	Ναι	Ναι	Καλή	Πολύ υψηλή	Καλή	Καλή	RF backbone links

Wi-Fi Mesh	Nodes / ρεύμα	Μικρή-μεσαία	Υψηλή	Ναι	Ναι	Μέτρια	Μέτρια	Καλή	Καλή	Urban IP mesh
AREDN / BATMAN	Mesh nodes	Μεσαία	Υψηλή	Ναι	Ναι	Καλή	Υψηλή	Καλή	Πολύ καλή	Amateur emergency IP networking
Τεχνολογία	Υποδομή απαραίτητη	Εμβέλεια	Κατανάλωση	Φωνή	Data/Text	Ανθεκτικότητα σε blackout	Πολυπλοκότητα	Ασφάλεια / Encryption	Scalability	Ιδανική χρήση
Satellite Phones	Δορυφορική υποδομή	Παγκόσμια	Μέτρια	Ναι	Ναι	Πολύ καλή	Χαμηλή	Πολύ καλή	Άριστη	Global emergency communication
Garmin inReach / SAT Messengers	Δορυφόροι	Παγκόσμια	Χαμηλή	Όχι	Ναι	Πολύ καλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ καλή	Άριστη	SOS / expeditions
DECT / Cordless Systems	Τοπική βάση	Πολύ μικρή	Χαμηλή	Ναι	Όχι	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Περιορισμένη	Πολύ μικρή	Τοπική χρήση
Military MANET Systems	Tactical infrastructure	Μεσαία-μεγάλη	Μέτρια	Ναι	Ναι	Άριστη	Πολύ υψηλή	Άριστη	Άριστη	Στρατιωτικά resilient δίκτυα

Παρατηρήσεις για ορισμένα σημαντικά συστήματα

CB Radio (27 MHz)

Το Citizens Band radio παραμένει εξαιρετικά υποτιμημένο. Παρότι θεωρείται “παλιά τεχνολογία”, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. δεν απαιτεί άδεια στις περισσότερες χώρες,
2. διαθέτει πολύ μεγαλύτερη διάδοση από PMR ή UHF,
3. λειτουργεί χωρίς infrastructure,
4. και σε κατάλληλες συνθήκες μπορεί να επιτύχει surprisingly μεγάλες αποστάσεις.

Η χρήση SSB στο CB αυξάνει δραματικά την εμβέλεια. Σε blackout scenarios, το CB παραμένει από τα πιο ανθεκτικά civilian communication systems.

PMR446

Το PMR446 είναι εξαιρετικό για:

1. οικογένειες,
2. μικρές ομάδες,
3. πεζοπορία,
4. local coordination.

Όμως:

1. έχει πολύ μικρή ισχύ,
2. fixed antennas απαγορεύονται,
3. και η εμβέλεια στην πόλη είναι περιορισμένη.

AREDN / BATMAN Mesh

Το AREDN είναι ίσως το πιο σοβαρό amateur radio IP mesh system σήμερα.

Χρησιμοποιεί:

1. τροποποιημένο Wi-Fi hardware,
2. directional antennas,
3. και πραγματικό IP routing.

Σε αντίθεση με Meshtastic:

1. μπορεί να μεταφέρει VoIP,
2. video,
3. web services,
4. file transfer,
5. και πλήρες IP networking.

Το μειονέκτημα είναι:

1. μεγαλύτερη κατανάλωση,
2. ανάγκη για υψηλά σημεία,
3. και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.

Military MANET Systems

Τα πραγματικά στρατιωτικά mesh δίκτυα είναι τελείως διαφορετικό επίπεδο από τα hobby LoRa meshes.

Χρησιμοποιούν:

1. adaptive routing,
2. frequency hopping,
3. self-healing networking,
4. QoS,
5. encryption,
6. anti-jamming τεχνολογίες,

7. και tactical RF management.

Αυτό δείχνει και κάτι σημαντικό:

τα επαγγελματικά resilient δίκτυα ποτέ δεν βασίζονται μόνο σε flooding mesh όπως το Meshtastic.

Vascom

Τι είναι το VARA και το VARAC

Το VARA είναι software modem υψηλής απόδοσης για:

1. HF,
2. VHF,
3. UHF digital communications.

Το VARAC είναι application layer πάνω στο VARA που προσφέρει:

1. chat,
2. messaging,
3. store-and-forward λειτουργίες,
4. mailbox,
5. relay,
6. beaconing,
7. file transfer,
8. emergency messaging.

Στην πράξη:

το VARAC θεωρείται από πολλούς η πιο σύγχρονη μορφή HF tactical messaging σήμερα.

Γιατί το VARAC θεωρείται τόσο σημαντικό

Σε αντίθεση με:

1. Meshtastic,
2. APRS,
3. ή απλό packet radio,

το VARAC λειτουργεί πάνω σε HF.

Αυτό σημαίνει:

1. δεν χρειάζεται mesh,
2. δεν χρειάζεται repeaters,
3. δεν χρειάζεται internet,
4. ούτε πυκνή υποδομή nodes.

Ένα μόνο HF station μπορεί:

- να επικοινωνήσει πανελλαδικά,
- πανευρωπαϊκά,
- ή διαηπειρωτικά.

Πλεονεκτήματα VARAC

Το μεγάλο πλεονέκτημα του VARAC είναι ότι συνδυάζει:

1. τη στρατηγική εμβέλεια του HF,
2. με σύγχρονη εμπειρία messaging.

Παρέχει:

1. real-time chat,
2. asynchronous messaging,
3. relay stations,
4. emergency mailbox λειτουργία,
5. propagation-aware communication,
6. πολύ καλή απόδοση σε αδύναμα σήματα.

Σε χαμηλό SNR:

- συνεχίζει να λειτουργεί εκεί όπου η φωνή καταρρέει.

Γιατί θεωρείται ανώτερο από Meshtastic σε πραγματικό blackout

Το VARAC:

1. δεν εξαρτάται από local nodes,
2. δεν απαιτεί πυκνό mesh,
3. δεν χρειάζεται community infrastructure,
4. ούτε line-of-sight.

Vascolos

Άρα σε μεγάλη καταστροφή:

1. όπου τα τοπικά mesh διαλύονται,
2. το HF συνεχίζει να λειτουργεί.

Αυτό είναι τεράστιο στρατηγικό πλεονέκτημα.

Πού υπερτερεί το Meshtastic

Παρόλα αυτά το Meshtastic έχει πλεονεκτήματα:

1. πολύ μικρότερη κατανάλωση,
2. portable χρήση,
3. απλότητα,
4. εύκολη χρήση από μη ραδιοερασιτέχνες,
5. instant smartphone integration.

Το VARAC απαιτεί:

1. HF radio,
2. υπολογιστή,
3. interface,
4. κεραιές,
5. και γνώσεις propagation.

Το VARAC ως "HF internet replacement"

Πολλοί operators το περιγράφουν σαν:

"το email/chat σύστημα που επιβιώνει όταν πεθάνει το internet".

Και αυτό δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Με:

1. battery power,
2. solar,
3. portable HF setup,

μπορεί να συνεχίσει να παρέχει:

1. messaging,
2. κατάσταση ομάδων,
3. emergency coordination,
4. exchange δεδομένων,

σε αποστάσεις που κανένα LoRa mesh δεν μπορεί να πλησιάσει.

Το πραγματικό πρόβλημα του VARAC

Το VARAC δεν έγινε mainstream επειδή:

1. είναι πιο δύσκολο,
2. απαιτεί ραδιοερασιτεχνική άδεια,
3. χρειάζεται σοβαρό RF setup,
4. και εξαρτάται από propagation conditions.

Επιπλέον:

1. δεν είναι "βάζω app και δουλεύει",
2. όπως το Meshtastic.

Στρατηγική αξιολόγηση

Αν εξετάσουμε μόνο:

"ποιο σύστημα επιβιώνει καλύτερα σε total infrastructure collapse"

τότε:

1. HF + VARAC/JS8Call/Winlink
υπερέχουν στρατηγικά.

Αν εξετάσουμε:

“ποιο σύστημα είναι πιο εύκολο, φθηνό και low-power”

τότε:

Vascos

- Meshtastic παραμένει κορυφαίο.

Τελική τεχνική εικόνα

Το VARAC είναι ίσως:

η πιο κοντινή μορφή “off-grid digital internet” που διαθέτει σήμερα ο ραδιοερασιτεχνισμός.

Συνδυάζει:

1. resilience,
2. μεγάλη εμβέλεια,
3. asynchronous communication,
4. χαμηλή απαίτηση bandwidth,
5. και λειτουργία χωρίς infrastructure.

Για σοβαρό preparedness ή emergency communications:

1. HF + VARAC,
2. μαζί με local VHF/UHF και LoRa layers,

θεωρείται από πολλούς πολύ πιο ολοκληρωμένη λύση από ένα αποκλειστικά Meshtastic-based δίκτυο.

Βιβλιογραφία και πηγές

Επίσημες τεχνικές πηγές

Meshtastic Documentation

Επίσημη τεκμηρίωση Meshtastic, LoRa configuration, mesh routing και limits.

Reticulum Network Stack Manual

Επίσημη τεκμηρίωση του Reticulum networking stack.

ARRL – APRS Overview

Εισαγωγή στο APRS και packet radio από την American Radio Relay League.

Winlink Global Radio Email System

Επίσημη σελίδα Winlink.

JS8Call Official Site

Επίσημη τεκμηρίωση JS8Call.

Τεχνικά άρθρα και αναλύσεις

Meshtastic vs APRS Analysis

Σύγκριση Meshtastic και APRS.

Meshtastic Alternatives and Limitations

Αναλυτική παρουσίαση περιορισμών Meshtastic και εναλλακτικών.

LoRa Mesh Scaling Discussion

Τεχνική συζήτηση για collisions και scalability σε LoRa mesh.

HF Digital Communications Overview

Ψηφιακά HF modes και emergency communications.

MeshCore Project

Τεχνικές πληροφορίες για MeshCore routing και αρχιτεκτονική.

Βιβλία και τεχνικά εγχειρίδια

ARRL Handbook for Radio Communications

American Radio Relay League.

Θεωρείται το βασικότερο τεχνικό εγχειρίδιο:

1. RF propagation,
2. antennas,
3. digital modes,
4. emergency communications,
5. packet radio.

Near Vertical Incidence Skywave Communication

by LTC David Fiedler & MAJ Edward Farmer.

Αναφορά για HF NVIS επικοινωνία σε emergency και tactical χρήση.

Low Band DXing

by John Devoldere, ON4UN.

Προχωρημένη θεωρία HF propagation και long-distance communication.

Wireless Communications by Andrea Goldsmith.

Ακαδημαϊκή ανάλυση:

1. wireless protocols,
2. bandwidth,
3. spread spectrum,
4. network scaling.

Computer Networks by Andrew S. Tanenbaum.

Βασικές αρχές:

1. routing,
2. packet switching,
3. resilient networking,
4. decentralized architectures.

Επιπλέον πηγές έρευνας

IEEE papers για LoRaWAN scalability

ETSI ISM band regulations

FCC / CE RF specifications

ARES/RACES emergency communication manuals

Amateur Radio Emergency Service documentation

Reddit technical communities (Meshtastic, amateurradio, RTLSDR)

GitHub repositories και issue discussions Meshtastic/Reticulum