

# Cave Communications

Δίκτυα Νέας Γενιάς & Επικοινωνίες  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

## Μάρκος Δελαπόρτας \*

*Abstract* – Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών αισθητήρων έχουν γίνει πανταχού παρόντα, τόσο στην καθημερινή ζωή, όσο και σε πολλές βιομηχανίες. Ωστόσο η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να παρεμποδιστεί σε ορισμένα περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα στην εξερεύνηση σπηλαίων, στην διάσωση ανθρώπων από κατεστραμμένα κτήρια ή στον τομέα της γεωργίας ακριβείας όπου τα σπάρτα βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια υπάρχει ανάγκη για ασύρματη επικοινωνία σε υπόγειο περιβάλλον. Στο παρόν άρθρο εξετάζονται διάφορες τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας, οι περιορισμοί και οι στερήσεις που έχουν γίνει προκειμένου να μοντελοποιηθεί σε περιβάλλον σπηλαίων από διάφορες τεχνολογίες που έχουν προταθεί. Καθώς επίσης και πως με αλλαγές στην ισχύ και την συχνότητα μπορεί να μειωθεί η απώλεια μονοπατιού και η ισχύς του σήματος λήψης.

## I Εισαγωγή

Από την εμφάνιση των πρώτων κινητών επικοινωνιών, πολύ εξερευνητές, όπως και πολλοί διασώστες επιχειρούν να τις χρησιμοποιούν προς όφελός τους: πράγμα το οποίο αποδυνκνύεται δύσκολο λόγω της πρόκλησης που παρουσιάζεται κατά την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υπόγεια περιβάλλοντα και γενικότερα σε περιβάλλοντα με περίπλοκη μορφολογία. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι ενώ δεν υπάρχει πολύ βιβλιογραφία για συνήθειες σπήλαια και ερήπεια, έχει γίνει αρκετή έρευνα για ορυχεία ανθρακα, παρότι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η τρέχουσα γενιά ασύρματων δικτύων, όπως το 4G και το 5G, έχουν κατασκευαστεί βασισμένα σε αρχές υψηλού εύρους ζώνης, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής διαθεσιμότητας για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μεγάλου αριθμού πελατών. Αυτά τα δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας, επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, οι στόχοι των υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας είναι διαφορετικοί από εκείνους των υπαρχόντων ασύρματων δικτύων. Λόγω του μικρού αριθμού πελατών (κινητών τεματικών), του μικρού εύρους ζώνης και της υψηλής ανοχής καθυστέρησης, αυτά τα δίκτυα θα πρέπει να σχεδιάζονται με διαφορετικές αρχές κατά νου. Σε υπόγεια περιβάλλοντα, τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να είναι αξιόπιστα, αποτελεσματικά και ανεκτικά σε υψηλή εξασθένιση και απώλεια σήματος. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια μελέτη σκοπιμότητας για τη χρήση υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε περιβάλλοντα σπηλαίων. Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση των υπαρχόντων τεχνολογιών που έχουν προταθεί και υλοποιηθεί, τα χαρακτηριστικά διάδοσης του σήματος σε υπόγεια περιβάλλοντα καθώς και το σχεδιασμό πρωτοκόλλων επικοινωνίας για την επίτευξη αξιόπιστης και αποτελεσματικής επικοινωνίας.

## II Σχετικές Έρευνες

Στην βιβλιογραφία έχουν συνταχθεί αρκετές εργασίες σχετικά με την ασύρματη επικοινωνία σε σπήλαια και υπόγεια περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα ο Muhammed Enes Bayrakdar έδειξε έναν τρόπο για συσκευές του δικτύου των πραγμάτων να επικοινωνούν σε ένα δίκτυο πλέγματος [5]. Οι Mark Hedley και Ian Gipps ανέδειξαν έναν τρόπο για ακριβή προσδιορισμό θέσης σε υπόγεια ορυχεία [2]. Οι Manoja D. Weiss και Kevin Moore ανέδειξαν έναν τρόπο για αυτόνομη κινητή τηλεπικοινωνία και ασύρματη πρόσδεση σε τούνελ [1]. Οι William Walsh και Jay Gao ανέλυσαν την δυνατότητα χρήσης wifi σε περιβάλλον σπηλαίου [4]. Ο Philip Branch συνέταξε την διπλωματική του για κυψελωτά δίκτυα πέμπτης γενιάς σε υπόγεια ορυχεία βαρύτητας [6]. Οι M.I. Martínez-Garrido και R. Fort ανέπτυξαν υλισμικό για πειράματα σε ανθρώπογενή και φυσική κληρονομιά [3].

Η προτεινόμενη λύση με κινητούς αναμεταδότες που παρατείνεται είναι πολύ χρήσιμη για επιχειρήσεις διάσωσης σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ή/και επικοινωνίας σε υπόγειο βάθος.

## III Βασικοί Τρόποι Προσέγγισης

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι προσέγγισης του προβλήματος. Με άλλα λόγια τι τοπολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες σε σπήλαια και άλλα περιβάλλοντα που παρουσιάζεται υψηλή εξασθένιση. Για αυτό δύο τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν:

- peer to peer
- mesh

Παρακάτω παρατίθενται διάφορες τοπολογίες και τεχνικές με συνδιασμό ενός εκ των παραπάνω τρόπων προσέγγισης και αστερισμού προκειμένου να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ κινητών συσκευών μέσα σε περιβάλλον σπηλαίου αλλά και μεταξύ ενός σταθμού βάσης σε εξωτερικό χώρο.

## IV Βασική Τοπολογία

Ο βασικός σκοπός του In-Cave Wireless Sensor Networks (ICWCS) είναι να παρέχει ένα αξιόπιστο κανάλι φωνητικής επικοινωνίας μέσω ενός δικτύου πολυμέσων μεταξύ των μελών μιας ομάδας σε μια σπηλιά. Αποτελείται από δύο διαφορετικούς τύπους κόμβων.

- «κόμβους κορμού» που είναι τοποθετημένο στα τοιχώματα του σπηλαίου.

- «Κινητοί κόμβοι», οι οποίοι έχουν παρόμοια λειτουργικότητα όπως τα κινητά τηλέφωνα, φέρονται από τα μέλη της ομάδας.

## IV.I Κόμβοι ραχοκοκαλιάς

Οι κόμβοι κορμού είναι ακίνητοι κόμβοι και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στον προηγούμενο ασύρματο αισθητήρα γενικής χρήσης κόμβος «VF1A» [4]. Έχουν μια μονάδα επεξεργαστή, ένα RF μονάδα πομποδέκτη, μονάδα μνήμης και τροφοδοσία ενόττητα διαχείρισης. Αυτοί οι κόμβοι είναι υπεύθυνοι για διατήρηση της συνδεσιμότητας κορμού μέσα στο σπήλαιο, το δραστηριότητες εγγραφής και περιαγωγής κινητών κόμβων, δρομολόγηση πληροφοριών κλήσεων μεταξύ κινητών κόμβων και μεταφορά των δεδομένων ελέγχου και φωνής μέσω του ασύρματου δικτύου.

## IV.II Κινητοί κόμβοι

Οι κινητοί κόμβοι μεταφέρονται από σπηλαιολόγους και περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά πέρα από τα τυπικά ενός ασύρματου αισθητήρα κόμβος για την αλληλεπίδραση με τους σπηλαιολόγους. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνει μια γραφική οθόνη, ένα μικρόφωνο, ένα ακουστικό και ένα πληκτρολόγιο ελέγχου.

## V Τεχνολογίες

Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης προκειμένου να μπορεί να διαδοθεί σήμα μέσα σε σκληρά υλικά ή το ενδεχόμενο εκμετάλευσης των ρογμών (π.χ. μεταξύ βράχων) αυτών.

## V.I

Σε θεωρητικό επίπεδο έχουν προταθεί τεχνολογίες extrimely low frequency (elf) οι οποίες είναι ήδη σε χρήση σε υποβρύχια επειδή τα ραδιοκύματα ELF μπορούν να διεισδύσουν στο θαλασσινό νερό σε πολύ μεγαλύτερο βάθος από τα ραδιοκύματα υψηλότερης συχνότητας, τα οποία απορροφώνται από το νερό. Τα κύματα ELF (3 - 30Hz) έχουν πολύ μεγάλη κύματος, που κυμαίνονται από εκατοντάδες έως χιλιάδες χιλιόμετρα, και παράγονται από μια μεγάλη κεραία που ονομάζεται «δίπολο εδάφους» ή «δίπολο γης». Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία ELF έχουν συνήθως μήκος πολλών χιλιομέτρων και συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές με χαμηλά επίπεδα ανθρωπογενών παρεμβολών.

## V.II

Σε πειραματικό επίπεδο έχουν υλοποιηθεί και δοκιμαστεί ορισμένα πρότυπα επικοινωνίας τα οποία βασίζονται σε κάποιες από τις αρχές που έχουν προταθεί παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα το HeyPhone είναι ένα φορητό ραδιόφωνο που χρησιμοποιεί μια κεραία βρόχου με διάμετρο ένα μέτρο και έχει την ικανότητα να διαπεράσει το έδαφος σε βάθος μέχρι και 500 περίπου μέτρα, χρησιμοποιεί διαμόρφωση 87KHz Single Side Band (SSB).

## V.III

Ακόμη μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευραίως στην βιομηχανία είναι το τηλέφωνο ενός καλωδίου (Single Wire Telephone). Οι συσκευές είναι πολύ απλές, χρησιμοποιώντας ένα μόνο op-amp τόσο για να στείλουν όσο και να λάβουν ένα ηχητικό σήμα (φωνή) κατά μήκος ενός μόνο μονωμένου καλωδίου, χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα σύζευξης χειριστών στη γείωση για την επιστροφή. Ο δέκτης έχει πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου. Η ζήτηση ισχύος είναι πολύ χαμηλή, με πολλές ώρες (ή ημέρες) λειτουργίας από μπαταρία 9 volt. Απαιτείται πολύ μικρή σύζευξη στο έδαφος στο τέλος της λήψης. Το άκρο μετάδοσης οδηγεί κυρίως στην κατανεμημένη χωρητικότητα του καλωδίου στη γείωση. Τα πολύ μεγάλα καλώδια (χιλιόμετρα) θα απαιτήσουν αρκετά καλή σύζευξη στη γείωση στο άκρο μετάδοσης. Προφανώς, οι αμφίδρομες επικοινωνίες πάνω από ένα πολύ μακρύ σύρμα θα απαιτήσουν αρκετά καλούς λόγους και στα δύο άκρα, όπως ένα μικρό πείρο σε βρωμιά ή ένα γυμνό σύρμα στο νερό.

**Συμπέρασμα:** Συμπερασματικά, η εργασία καταδεικνύει τη σκοπιμότητα των υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε υπόγεια περιβάλλοντα. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν μικρό αριθμό πελατών, με μικρά εύρη ζώνης και υψηλή ανοχή καθυστέρησης, και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι αξιόπιστα και αποτελεσματικά σε τέτοια απαιτητικά περιβάλλοντα. Η μελέτη παρέχει ένα σημείο εκκίνησης για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

## References

- [1] M. D. Weiss and K. L. Moore, “Autonomous Mobile Radios for Enhancing Wireless Communications through Wireless Tethering in Tunnel-Like Environments,” *IFAC Proceedings Volumes*, **jourvol** 42, **number** 22, **pages** 31–36, 2009, ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20091006-3-US-4006.00006>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015340143>.
- [2] M. Hedley and I. Gipps, “Accurate wireless tracking for underground mining,” in *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)* ISSN: 2164-7038, **june** 2013, **pages** 42–46. DOI: [10.1109/ICCW.2013.6649198](https://doi.org/10.1109/ICCW.2013.6649198). url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6649198> (urlseen 13/11/2023).
- [3] M. I. Martínez-Garrido and R. Fort, “Experimental assessment of a wireless communications platform for the built and natural heritage,” *Measurement*, **jourvol** 82, **pages** 188–201, **1 march** 2016, ISSN: 0263-2241. DOI: [10.1016/j.measurement.2015.12.036](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.036). url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322411500696X> (urlseen 13/11/2023).
- [4] W. Walsh and J. Gao, “Communications in a cave environment,” in *2018 IEEE Aerospace Conference* **march** 2018, **pages** 1–8. DOI: [10.1109/AERO.2018.8396606](https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396606). url: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8396606> (urlseen 13/11/2023).
- [5] M. E. Bayrakdar, “Rule based collector station selection scheme for lossless data transmission in underground sensor networks,” *China Communications*, **jourvol** 16, **number** 12, **pages** 72–83, **december** 2019, Conference Name: China Communications, ISSN: 1673-5447. DOI: [10.23919/JCC.2019.12.005](https://doi.org/10.23919/JCC.2019.12.005). url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8968724> (urlseen 13/11/2023).
- [6] P. Branch, “Fifth Generation Cellular Networks for Underground Block Cave Mining: A Position Paper,” in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* ISSN: 2162-1233, **october** 2021, **pages** 25–30. DOI: [10.1109/ICTC52510.2021.9620942](https://doi.org/10.1109/ICTC52510.2021.9620942). url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9620942> (urlseen 13/11/2023).