

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή** **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



### **Αξιολόγηση Ακρίβειας Τεχνικής Εντοπισμού Θέσης με Χρήση Παραμέτρου του Δικτύου LTE**

**Στέλλα Πατσαλή**

**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Σταύρος Σταύρου**

**Σεπτέμβριος 2018**

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

## **Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

### **Αξιολόγηση Ακρίβειας Τεχνικής Εντοπισμού Θέσης με Χρήση Παραμέτρου του Δικτύου LTE**

**Στέλλα Πατσαλή**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Σταύρος Σταύρου**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε  
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών  
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών  
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

**Σεπτέμβριος 2018**

## Περίληψη

Η θέση μιας κινητής συσκευής και κατ' επέκταση του χρήστη της είναι χρήσιμη μέχρι και απαραίτητη σε αρκετές εφαρμογές. Οι κυριότερες αφορούν εντοπισμό ανθρώπων σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και εφαρμογές πλοήγησης. Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη ανάπτυξη έχουν οι εμπορικές εφαρμογές προσαρμογής υπηρεσίας με βάση τη θέση. Ως εκ τούτου είναι σημαντική η δυνατότητα εντοπισμού θέσης. Οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής όσο αφορά την ακρίβεια του εντοπισμού της θέσης όπως επίσης τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής, όπως για παράδειγμα εάν αφορά εσωτερικούς χώρους, καθορίζουν και τις τεχνικές οι οποίες είναι κατάλληλες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η τεχνολογία Global Positioning System (GPS) είναι από τις πρώτες τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό θέσης και είναι ευρέως διαδεδομένη. Με την ανάπτυξη των δικτύων κινητής τα τελευταία 20 χρόνια και ακόμη περισσότερο τη διάδοση των έξυπνων κινητών τα τελευταία 10-15 χρόνια, έχουν αναπτυχθεί παράλληλα μέθοδοι εντοπισμού θέσης με χρήση παραμέτρων του δικτύου κινητής.

Η μεταπτυχιακή διατριβή αυτή εστιάστηκε στην αξιολόγηση της ακρίβειας εντοπισμού θέσης με χρήση μίας παραμέτρου χρονισμού του δικτύου 4G, το οποίο αποτελεί την τελευταία εξέλιξη των δικτύων κινητής. Η παράμετρος άφιξης του σήματος (Time of Arrival) αποτελεί παράμετρο η οποία είναι διαθέσιμη στα δίκτυα διευκολύνοντας την υλοποίηση μηχανισμών εντοπισμού θέσης σε υφιστάμενα δίκτυα και συσκευές.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής αυτής υλοποιήθηκε προσομοίωση σε λογισμικό ενός δικτύου κινητής, τοποθετώντας την κυψέλη πάνω από κτήριο. Το κτήριο υλοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, στο πρώτο ήταν απομονωμένο ενώ στο δεύτερο βρίσκεται σε ένα αστικό περιβάλλον με άλλα κτήρια να το περιβάλλουν. Στην προσομοίωση μετρήθηκαν οι τιμές της παραμέτρου Time of Arrival. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε αλγόριθμος εντοπισμού θέσης της κινητής συσκευής και υπολογισμού του σφάλματος σε σχέση με την πραγματική θέση της κινητής συσκευής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κατέδειξε μια αρκετά καλή ακρίβεια εντοπισμού της θέσης, με μέσο σφάλμα γύρω στα 12-13 μέτρα. Τέτοια επίπεδα ακρίβειας είναι συχνά ικανοποιητικά για κάποιες σημαντικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα τον εντοπισμό ανθρώπων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Στα πλαίσια μελλοντικών κατευθύνσεων ερευνητικής εργασίας, θα μπορούσε να γίνει εξομοίωση και ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση αλγορίθμων μεγαλύτερης πολυπλοκότητας οι οποίοι θα έδιναν πιθανότητα μεγαλύτερη ακρίβεια εντοπισμού θέσης. Μια άλλη κατεύθυνση ερευνητικής εργασίας θα μπορούσε να είναι η σύγκριση σε μία κοινή εξομοίωση διαφόρων τεχνικών που κάνουν χρήση παραμέτρων των δικτύων κινητής, επιτρέποντας έτσι την άμεση σύγκριση των διαφόρων τεχνικών αφού θα έχουν όλες υλοποιηθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

## Summary

The position of a mobile device and consequently of the user of the device can be exploited by several applications and services, in some cases it is necessary for the proper functioning of the service. Some of the first services that required the knowledge of the user's position are the emergency services and navigation services. The past several years we have also seen an increasing use of the user's position by applications that customize the service based on the user's location. The attributes and requirements of each type of service/application, e.g. level of accuracy of the position, whether indoor coverage is needed, determine which type of localization technology and technique is the most appropriate for that application/service.

The Global Positioning System (GPS) technology was one of the first to be used for localizing a user and it is still one of the most widely used. The rapid development of mobile networks the past 20 years and the proliferation of smart phones the past 10-15 years has sparked the development of localization techniques that make use of the mobile network parameters.

This master's thesis focused on the evaluation of the accuracy of localization techniques using timing parameters of the 4G network, the latest evolution of mobile networks. Specifically, the Time of Arrival parameter was used, a parameter that is readily available in the network, which facilitates the deployment of localization solutions utilizing this parameter.

Within the scope of this master's thesis, a simulation software was used to simulate the operation of a 4G network. The setup included a building and a cellular antenna positioned at various spots on top of the building. In the first scenario, the building was isolated whereas in the second scenario the building was placed within an urban environment, surrounded by other buildings. During the simulation, for each transmitter location, the receiver was placed at various positions within the building and the Time of Arrival parameter was measured. A localization algorithm was then used to calculate the exact position of the receiver, using trilateration. Lastly, the localization error was

calculated, which is the distance between the calculated position and the actual position of the receiver.

The analysis has demonstrated a good level of accuracy, an average localization error of 12-13 meters. This level of accuracy is acceptable for several applications, including the localization of people contacting the emergency services.

Some of the future directions this work may take include the analysis of the simulation data using more complex localization algorithms, hence increasing the accuracy of the localization output. Another direction could be to conduct a single simulation to compare the accuracy of several, mobile networks' based techniques. Although there are comparisons in the literature, analysing several techniques in a single simulations ensures that the results are comparable since they were derived under the same conditions.

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ Σταύρο Σταύρου για την εποπτεία της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, για την επιστημονική καθοδήγηση και την άμεση βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της συγγραφής της διατριβής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ψυχολογική και οικονομική στήριξη για την εκπόνηση της διατριβής.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Τεχνικές Εντοπισμού Θέσης με Χρήση Δικτύου Κινητής</b>	<b>14</b>
2.1	Εισαγωγή	14
2.2	Παράμετρος Timing Advance.	15
2.3	Received Signal Strength	19
2.4	Cell ID και Enhanced Cell ID	20
2.5	Time of Arrival	21
2.6	Time Difference of Arrival	23
2.5	Angle of Arrival	26
<b>3</b>	<b>Πειραματική Αξιολόγηση Ακρίβειας Επιλεγμένης Τεχνικής Εντοπισμού Θέσης</b>	<b>29</b>
3.1	Εισαγωγή	29
3.2	Αλγόριθμος Υπολογισμού Θέσης	32
3.3	Εξομοίωση	36
3.3.1	Εξομοιωτής	36
3.3.2	Περιγραφή Εξομοίωσης	37
3.3.3	Αποτελέσματα Εξομοίωσης	41
3.3.4	Ανάλυση	45
<b>4</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>47</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>49</b>



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η γνώση της θέσης μιας κινητής συσκευής και κατ' επέκταση της θέσης του χρήστη της συσκευής μπορεί να αξιοποιηθεί για μια πληθώρα εφαρμογών. Σε κάποιες περιπτώσεις αποτελεί αναγκαιότητα. Οι πλείστες από αυτές τις εφαρμογές αξιοποιούν τη γνώση της θέσης για εμπορικούς σκοπούς ενώ σε άλλες περιπτώσεις η γνώση της θέσης της συσκευής εξυπηρετεί θέματα ασφάλειας του χρήστη της συσκευής. Ενδεικτικά, πιο κάτω περιγράφονται επιγραμματικά κάποιες εφαρμογές που αξιοποιούν τη γνώση της θέσης.

A. Πλοήγηση: η τοποθέτηση του χρήστη σε κάποιο χάρτη ή η καθοδήγηση του προς κάποιο προορισμό. Για τον εντοπισμό του χρήστη, οι εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούν συνήθως υλισμικό τεχνολογίας Global Positioning System (GPS) [1] στη συσκευή του χρήστη και φυσικά σήματα από τουλάχιστον 3 δορυφόρους για να μπορεί να επιτευχθεί υπολογισμός με χρήση τριγωνοποίησης. Οι εφαρμογές αυτές είναι ευρέως διαδεδομένες σε αυτοκίνητα ιδιωτικής χρήσης όπως επίσης σε εταιρικά αυτοκίνητα για διαχείριση στόλου. Τα τελευταία χρόνια, με την διάδοση της χρήσης ηλεκτρονικών χαρτών, όπως το

Google Maps [2], η εφαρμογή πλοήγησης τυγχάνει ευρείας χρήσης. Στις εφαρμογές πλοήγησης υπάρχει ανάγκη για υπολογισμό της θέσης του χρήστη με αρκετά μεγάλη ακρίβεια μερικών μέτρων αφού μεγαλύτερη απόκλιση μπορεί να τοποθετήσει τον χρήστη σε άλλο δρόμο σε σχέση με αυτόν που βρίσκεται [1].

B. Υπηρεσίες βασισμένες στη θέση (Location Based Services) [3]: αφορά την προσαρμογή/εξατομίκευση κάποιας υπηρεσίας με βάση τη θέση του χρήστη. Παραδείγματα αποτελούν εφαρμογές που προτείνουν στο χρήστη υπηρεσίες (πχ εστιατόρια) που βρίσκονται στην περιοχή του, εφαρμογές που προτείνουν στο χρήστη προσφορές από επιχειρήσεις που βρίσκονται κοντά του (πχ καταστήματα της περιοχής) και στοχευόμενη διαφήμιση με βάση την περιοχή του χρήστη. Τέτοιου είδους εφαρμογές δεν απαιτούν υπολογισμό της θέσης χρήστη με μεγάλη ακρίβεια αφού είναι αρκετό να τοποθετηθεί ο χρήστης σε κάποια περιοχή που εμπίπτει σε κύκλο με ακτίνα μερικές δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα. Σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου, όπως για παράδειγμα η προβολή σχετικού περιεχομένου σε μουσείο ή η προβολή προσφορών επιχειρήσεων εντός κλειστού εμπορικού κέντρου, απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια μερικών μέτρων αφού η προσαρμογή της προσφερόμενης υπηρεσίας παρουσιάζει ευαισθησία από μερικά μέτρα μέχρι 10-20 μέτρα.

Γ. Υπηρεσίες Έκτακτης Ανάγκης: ο εντοπισμός ατόμου ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Το πρώτο παράδειγμα είναι η υπηρεσία E911 [5] στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η οποία επιτρέπει σε υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να εντοπίζουν τον καλούντα του αριθμού έκτακτης ανάγκης 911. Άλλο παράδειγμα όπου προκύπτει τέτοια ανάγκη είναι ο εντοπισμός ατόμων που αγνοούνται λόγω απώλειας προσανατολισμού σε απομακρυσμένες περιοχές. Άλλο παράδειγμα είναι στα πλαίσια του καινούριου πανευρωπαϊκού κανονισμού eCall όπου σε περίπτωση ατυχήματος με το αυτοκίνητο πραγματοποιείται κλήση από το αυτοκίνητο προς τηλεφωνικό κέντρο υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Σε αυτή την περίπτωση, ο κανονισμός προνοεί τη δυνατότητα εντοπισμού της θέσης του αυτοκινήτου που πραγματοποιεί την κλήση.

Στις επόμενες δύο παραγράφους περιγράφονται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια δύο ενδεικτικές υπηρεσίες όπου είναι αναγκαίος ο εντοπισμός της θέσης του χρήστη μιας κινητής συσκευής.

Αρχικά, η κύρια κίνηση πίσω από την ανάπτυξη τεχνικών τοποθέτησης για την υποστήριξη υπηρεσιών εντοπισμού θέσης σε κυψελοειδή δίκτυα ήταν η ανάγκη εντοπισμού κλήσεων έκτακτης ανάγκης που προέρχονται από κινητό σταθμό. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ εξέδωσε τον πρώτο κανονισμό σχετικά με τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια του εντοπισμού παρόμοιων κλήσεων στις ΗΠΑ, ήδη από το 1996 [5], [6]. Η Επιτροπή επεδίωξε να επιταχύνει την υλοποίηση αυτής της σημαντικής υπηρεσίας προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα στους καλούντες ασύρματων κλήσεων να λάβουν βοήθεια έκτακτης ανάγκης πιο γρήγορα και αποτελεσματικά μέσω της μετάδοσης ορισμένων βελτιωμένων πληροφοριών που βοηθούν στον εντοπισμό του καλούντος. Η ασύρματη συνδρομή συνέχισε να αυξάνεται ραγδαία και τα ασύρματα τηλέφωνα χρησιμοποιούνταν όλο και περισσότερο για να πραγματοποιούν κλήσεις 911 σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Οι εταιρείες παροχής κυψελοειδών δικτύων δια νόμου επίσης παρέχουν τις θέσεις των καλούντων E911 ως υποχρεωτική απαίτηση από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ. Σήμερα, τα έξυπνα κινητά είναι εξοπλισμένα με σύστημα Global Positioning System [1] που λειτουργεί ανεξάρτητα από το κυψελοειδές δίκτυο. Ωστόσο, οι δέκτες GPS μπορούν να παρέχουν μια μοναδική τοποθεσία μόνο εάν είναι σε θέση να αποκτήσουν τουλάχιστον τέσσερα δορυφορικά σήματα. Σε πυκνά περιβάλλοντα χωρίς σαφή ορατότητα στον ουρανό (όπως εσωτερικές ή αστικές περιοχές), το GPS συχνά δεν παρέχει αξιόπιστη εκτίμηση [7]. Η Επιτροπή ενέκρινε ειδικούς κανόνες E911 με συμφωνία μεταξύ της βιομηχανίας ασύρματων δικτύων και τοπικών και τοπικών υπαλλήλων της υπηρεσίας 911 για την προώθηση ασύρματων τεχνολογιών και μεταδόσεων που παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για να μπορέσει το 911 Public Safety Answering Point να εντοπίσει άμεσα τον καλούντα 911. Η ασύρματη υπηρεσία E911 δημιουργήθηκε για να εξασφαλίσει ότι τα ασύρματα τηλέφωνα μεταδίδουν αυτόματα τα ίδια ζωτικά δεδομένα σχετικά με την τοποθεσία του 911 του καλούντος ως τηλέφωνα. Στην πρώτη επανεξέταση των κανόνων E911, οι μεταφορείς που καλύπτονταν από την υπηρεσία Commercial Mobile Radio Service επετύχχαναν τη διαβίβαση των βελτιωμένων πληροφοριών θέσης σε δύο φάσεις: η 1η φάση ξεκίνησε την 1η Απριλίου 1998.

Το 2002, η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε μια παρόμοια προσέγγιση, χωρίς ωστόσο να ορίζει ελάχιστες απαιτήσεις ακρίβειας για τις εκτιμώμενες θέσεις [8].

Με τις προόδους τόσο στα δίκτυα κυψελοειδούς ραδιοεπικοινωνίας όσο και στα δίκτυα πυρήνα - ιδιαίτερα με την εισαγωγή της μεταγωγής πακέτων - οι φορείς εκμετάλλευσης και οι πωλητές κινητής τηλεφωνίας σχεδίασαν μια πληθώρα νέων εμπορικών εφαρμογών εντοπισμού θέσης. Αυτά περιλαμβάνουν τη χρέωση βάσει τοποθεσίας, το μάρκετινγκ βάσει τοποθεσίας και τα κοινωνικά δίκτυα βάσει τοποθεσίας.

Ο σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής είναι να εξετάσει την ακρίβεια εντοπισμού που μπορεί να επιτευχθεί κατά την προσπάθεια εντοπισμού κυτταρικών χρηστών με βάση μεθόδους χρονισμού.

Αρκετές από τις εφαρμογές που αξιοποιούν τη θέση του χρήστη κάνουν χρήση τεχνολογιών GPS, γι' αυτό και υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία γύρω από τις τεχνολογίες αυτές. Όπως όμως επεξηγήθηκε πιο πάνω, κάποιες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο εντοπισμός του καλούντα προς αριθμούς έκτακτης ανάγκης, εξαρτώνται αποκλειστικά σε τεχνικές εντοπισμού θέσης με χρήση του δικτύου κινητής. Σημειώνονται επίσης οι αδυναμίες που παρουσιάζουν οι τεχνολογίες GPS, όπως για παράδειγμα ο εντοπισμός θέσης σε εσωτερικό χώρο [1], καθιστώντας την συνύπαρξη των δύο μεθόδων (GPS και μέσω δικτύου κινητής) αναγκαία. Όπως θα διαφανεί από την ανάλυση των τεχνικών εντοπισμού θέσης με χρήση δικτύου κινητής στο επόμενο κεφάλαιο, υπάρχουν αρκετές τεχνικές όπως και αρκετή βιβλιογραφία. Υπάρχει όμως και αρκετό περιθώριο για αξιολόγηση και περεταίρω ανάπτυξη των τεχνικών αυτών με στόχο πάντα τη βελτίωση της ακρίβειας, αξιοπιστίας, αποδοτικότητας των τεχνικών αυτών.

Αυτή η μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζει την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των αλγορίθμων κυψελοειδούς εντοπισμού που βασίζονται κυρίως στη χρήση των παραμέτρων χρονισμού των δικτύων 4G (Long Term Evolution, LTE), που αποτελούν την τελευταία εξέλιξη των δικτύων κινητής. Συγκεκριμένα, ο στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής είναι να εξετάσει την ακρίβεια εντοπισμού του χρήστη με τη χρήση ενός μοναδικού κινητού εικονικού κυψελοειδούς σταθμού βάσης, της παραμέτρου άφιξης σήματος (Time of Arrival) και χρήση τεχνικών τριπλευρισμού. Η μεταπτυχιακή διατριβή υλοποίησε σενάρια εντοπισμού χρηστών σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπως επίσης σε περιβάλλον υπαίθριο αστικό.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση τεχνικών εντοπισμού θέσης με χρήση δικτύου κινητής ακολουθούμενο από το κεφάλαιο περιγραφής της πειραματική αξιολόγησης της ακρίβειας της επιλεγμένης τεχνικής εντοπισμού θέσης. Τέλος γίνεται σύνοψη της εργασίας όπου καταγράφονται τα κυριότερα συμπεράσματα και καταγράφονται σκέψεις για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας.

# Κεφάλαιο 2

## Τεχνικές Εντοπισμού Θέσης με Χρήση Δικτύου Κινητής

### 1. Εισαγωγή

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές εντοπισμού θέσης. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται επισκόπηση των κυριοτέρων τεχνικών που κάνουν χρήση του δικτύου. Υπάρχουν και άλλες αρκετές τεχνικές βασισμένες σε δορυφόρου (Global Positioning System), οι οποίες είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής της διπλωματικής αυτής και ως εκ τούτου δεν έχουν περιληφθεί στο κεφάλαιο αυτό.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις οι οποίες συγκρίνουν τις διάφορες τεχνικές όσο αφορά την ακρίβεια τους κυρίως αλλά και τη διαθεσιμότητα τους και το κόστος [27] [9] [10].

Οι τεχνικές οι οποίες αναλύονται στις επόμενες παραγράφους είναι:

- Timing Advance
- Received Signal Strength
- Cell ID & Enhanced Cell ID
- Time of Arrival
- Time Difference Of Arrival, Observed Time Difference Of Arrival, Enhanced Observed Time Difference Of Arrival
- Angle Of Arrival

## 2. Παράμετρος Timing Advance

Οι συσκευές οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε ένα σταθμό βάσης απέχουν συνήθως διαφορετικές αποστάσεις από το σταθμό. Ως εκ τούτου, τα σήματα που εκπέμπουν οι συσκευές, ακόμη και εάν εκκινήσουν ταυτόχρονα από όλες τις συσκευές, θα καταφθάσουν στο σταθμό σε διαφορετικό χρόνο λόγω της καθυστέρησης στη διάδοση του σήματος. Το Global System for Mobile communications (GSM) [11] χρησιμοποιεί τεχνολογία Time Division Multiple Access (TDMA), σύμφωνα με την οποία ανατίθεται μια χρονοθήκη (timeslot) σε κάθε συσκευή η οποία είναι συνδεδεμένη στο σταθμό βάσης. Για να μπορέσει να λειτουργήσει η τεχνολογία TDMA, επιβάλλεται συγχρονισμός των εισερχόμενων σημάτων έτσι ώστε να λαμβάνονται στη σωστή χρονοθήκη. Εάν όμως η κάθε συσκευή εξέπεμπε το σήμα της χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η απόσταση από το σταθμό βάσης και κατ' επέκταση ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα για να φτάσει στο σταθμό από την κινητή συσκευή, η καθυστέρηση η οποία θα προέκυπτε λόγω της απόστασης δεν θα επέτρεπε τη λήψη από το σταθμό των σημάτων στη σωστή χρονοθήκη. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την επικάλυψη σημάτων από διαφορετικές συσκευές στην ίδια χρονοθήκη. Το πρόβλημα γίνεται ακόμη μεγαλύτερο εάν λάβουμε υπόψη ότι η κινητή συσκευή συχνά μετακινείται κατά τη διάρκεια της σύνδεσης της με το σταθμό βάσης. Για να επιλύσει αυτό το πρόβλημα, εισήχθη στο πρότυπο η παράμετρος Timing Advance (TA) [12]. Η παράμετρος TA υπολογίζεται από το σταθμό βάσης και ουσιαστικά πρόκειται για οδηγία από το σταθμό προς την κινητή συσκευή για να καθυστερήσει ή να επιταχύνει τη μετάδοση του σήματος της συσκευής προς το σταθμό. Η παράμετρος υπολογίζεται στην αρχική επικοινωνία της κινητής συσκευής με το σταθμό βάσης στο ξεχωριστό κανάλι Random Access Channel (RACH) και στη συνέχεια κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας αναθεωρείται σε τακτά χρονικά διαστήματα που ορίζονται από το σταθμό βάσης. Δεδομένου ότι ο χρόνος TA στέλλεται από το σταθμό βάσης προς τη συσκευή για να μπορέσει η συσκευή να στείλει το σήμα της στο σωστό χρόνο, στον υπολογισμό του TA λαμβάνεται υπόψη η απόσταση από το σταθμό στη συσκευή και πίσω, δηλαδή το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ της συσκευής και του σταθμού.

Ο σταθμός βάσης, ανάλογα με τον υπολογισμό που έχει κάνει της απόστασης της κινητής συσκευής, θα πρέπει να υπολογίσει και να αποστείλει την κατάλληλη τιμή της παραμέτρου TA. Το πρότυπο καθορίζει 6 διαθέσιμα bits για την παράμετρο TA, δηλαδή μπορεί να πάρει  $2^6 = 64$  διαφορετικές τιμές. Ως εκ τούτου, η παράμετρος παίρνει τις τιμές 0 – 63. Κάθε μονάδα του TA αντιστοιχεί στην ελάχιστη μονάδα χρόνου του GSM που υπολογίζεται στα 3,693  $\mu$ s.

$$T = 3,963 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του φωτός ως την ταχύτητα μετάδοσης σήματος, σε 3.693  $\mu$ s το σήμα καλύπτει απόσταση:

$$\Delta_1 = T \times c = 3,963 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 1107 \text{ m}$$

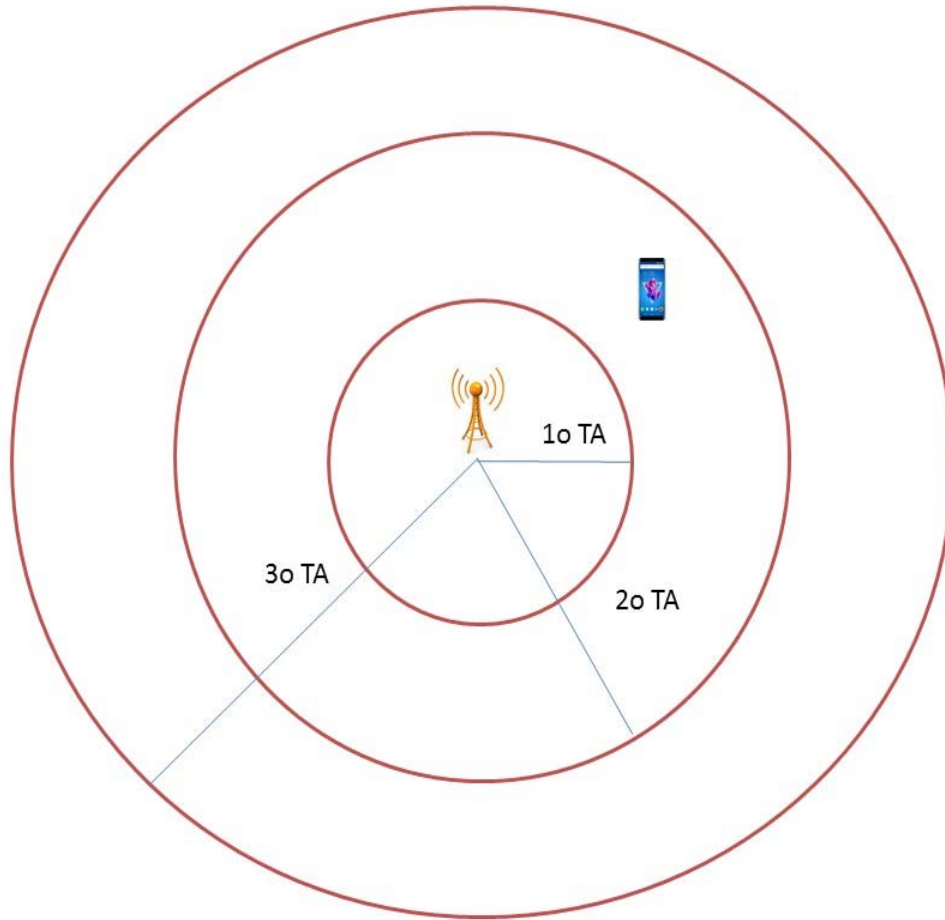
όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η απόσταση  $\Delta_1$  αφορά την απόσταση από το σταθμό στη συσκευή και πίσω. Ως εκ τούτου, η απόσταση της συσκευής από το σταθμό  $\Delta_S$  είναι:

$$\Delta_S = \Delta_1 / 2 \approx 554 \text{ m}$$

Αυτό σημαίνει ότι κάθε 1 μονάδα της παραμέτρου TA αντιστοιχεί σε 554 μέτρα περίπου από το σταθμό, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 1. Δηλαδή, εάν η συσκευή είναι στον πρώτο κύκλο, μέχρι 554 m από το σταθμό, η παράμετρος TA που θα σταλεί από το σταθμό θα έχει την τιμή 0. Εάν η συσκευή είναι μεταξύ του πρώτου και δεύτερου κύκλου, δηλαδή σε απόσταση 554-1108, τότε η παράμετρος θα πάρει την τιμή 1.





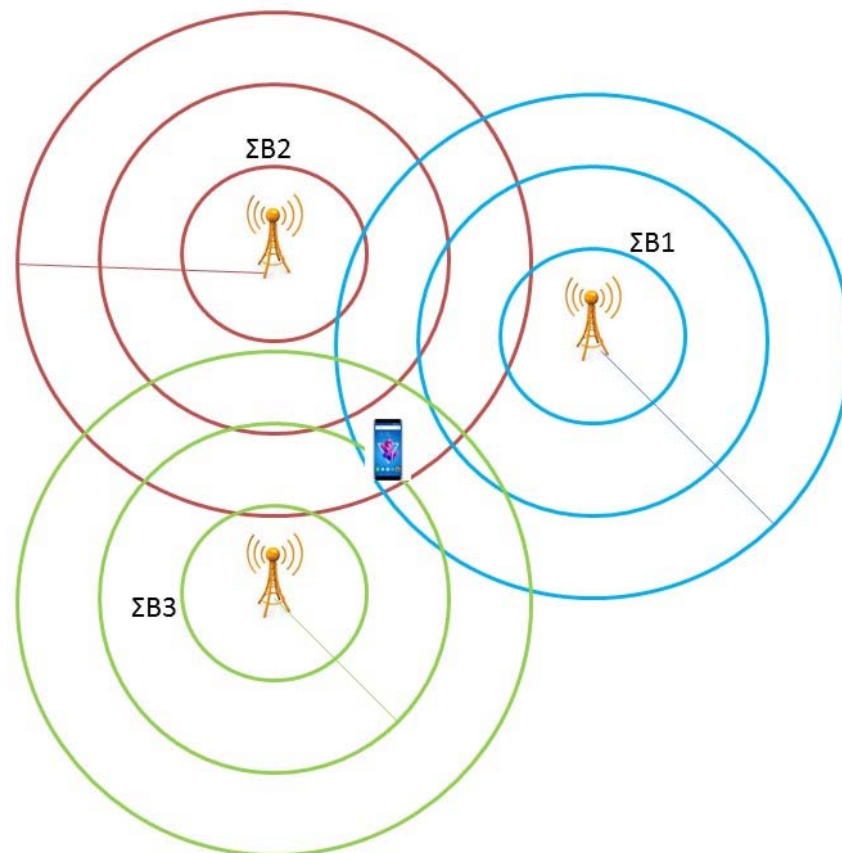
Σχεδιάγραμμα 1 : Αποστάσεις Κινητής Συσκευής από το Σταθμό Βάσης με βάση την παράμετρο Timing Advance (TA)

Η χρήση της παραμέτρου για εντοπισμό θέσης είναι ένας αρκετά απλός και ανέξοδος μηχανισμός, δεδομένου ότι η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από το σταθμό βάσης αφού αποτελεί μέρος του προτύπου. Γι' αυτό συζητήθηκε αρκετά νωρίς από ερευνητές, όμως αναγνωρίστηκε παράλληλα ότι η ακρίβεια ακτίνας κύκλου τουλάχιστον 500 m δεν είναι ικανοποιητική για τις πλείστες εφαρμογές εντοπισμού θέσης [13]. Αποτελέσματα πειραμάτων επιβεβαιώνουν τη χαμηλή ακρίβεια του υπολογισμού της θέσης με χρήση TA, ενώ η ακρίβεια γίνεται ακόμη χαμηλότερη σε περιοχές με μικρότερη πυκνότητα σταθμών βάσης, όπως είναι τα προάστια και οι αγροτικές περιοχές [14]. Τα πειράματα στο [14] παρουσιάζουν μια μικρή βελτίωση όταν χρησιμοποιείται συνδυασμός TA και cell-id, όμως η βελτίωση είναι αρκετά μικρή. Η πολύ χαμηλή ακρίβεια πιθανότατα να υπήρξε ο κυριότερος λόγος γιατί επί αρκετά χρόνια δεν υπήρξε σοβαρή προσπάθεια ανάπτυξης τεχνικών βασισμένων σε TA.

Με την εισαγωγή από το 3GPP του προτύπου τέταρτης γενεάς δικτύων κινητής 4G, γνωστό και ως Long Term Evolution (LTE), αναθερμάνθηκε το ενδιαφέρον για χρήση της παραμέτρου TA, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας που προσφέρεται στο LTE. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς [16], [17], η απόσταση μεταξύ δύο τιμών TA είναι 78,125 m.

Στην τεχνολογία WiMax υπάρχει αντίστοιχη παράμετρος, η οποία ονομάζεται Timing Adjust. Στην περίπτωση της τεχνολογίας WiMax, η ακρίβεια είναι ακόμη μεγαλύτερη αφού η απόσταση μεταξύ δύο τιμών TA υπολογίζεται στα 13,39m [18].

Με τη χρήση δύο ή περισσότερων τιμών TA για την ίδια συσκευή από διαφορετικούς σταθμούς βάσης θα μπορούσε να περιοριστεί η περιοχή εντοπισμού, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 2.



Σχεδιάγραμμα 2: Εντοπισμός θέσης κινητής συσκευής με χρήση TA από 3 σταθμούς

Στη διατριβή του [16] ο Leslie Jarvis παρουσιάζει προσομοιώσεις υπολογισμού θέσης με χρήση της παραμέτρου TA δικτύου LTE. Οι προσομοιώσεις χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, σε τεχνικές υπολογισμού σε 2 διαστάσεις (X,Y) και σε τεχνικές υπολογισμού στις 3 διαστάσεις (X,Y,Z). Τόσο στις 2 διαστάσεις όσο και στις 3, γίνονται προσομοιώσεις υπολογισμού χρησιμοποιώντας 1 σταθμό βάσης, 2 σταθμούς βάσης, 3 σταθμούς βάσεις και πέραν των 3 σταθμών. Η μεγαλύτερη ακρίβεια, 50cm, επιτεύχθηκε στην προσομοίωση με πολλαπλούς σταθμούς βάσεις (πέραν των 4) και χρήση τρισδιάστατου συστήματος συντεταγμένων για υπολογισμό της θέσης της κινητής συσκευής. Εν τη απουσία πραγματικών σταθμών βάσης, ο ερευνητής έτρεξε προσομοιώσεις με χρήση σταθερής απόστασης 78,125 m για κάθε αύξηση τιμής του TA όπως επίσης προσομοιώσεις με την εισαγωγή στατιστικής παραλλαγής στην τιμή του TA.

Αντίστοιχα πειράματα με υπολογισμούς σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων για την τεχνολογία WiMax με τη χρήση του Timing Adjust παρουσιάζονται στο [19].

Τα τελευταία χρόνια συναντάμε στη βιβλιογραφία αρκετές δημοσιεύσεις για τη χρήση της παραμέτρου TA για εντοπισμό θέσης. Οι εργασίες αυτές αφορούν είτε αξιολόγηση της χρήσης της παραμέτρου σε πραγματικό περιβάλλον, πέραν της προσομοίωσης, [20], είτε τον υπολογισμό της τοποθεσίας με χρήση της παραμέτρου TA σε συνδυασμό με άλλες πληροφορίες ή τεχνικές [17], [21].

### **3. Received Signal Strength (RSS)**

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί την απώλεια ισχύος του σήματος κατά τη διαδρομή του από τον πομπό στο δέκτη για να υπολογίσει την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Για αυτό το τον υπολογισμό απαιτείται η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από τον δέκτη, η ισχύς του σήματος κατά την εκπομπή του από τον πομπό και μια μαθηματική σχέση μεταξύ της απόστασης και της απώλειας ισχύος. Υπάρχουν αρκετά μοντέλα υπολογισμού της απώλειας σήματος σε σχέση με την απόσταση και ιδιαίτερα με τον τύπο περιβάλλοντος

(π.χ. πολύ διαφορετική είναι η απώλεια σήματος σε εσωτερικό χώρο σε σχέση με εξωτερικό χώρο) ([22] [23], [24]). Η ακρίβεια του μοντέλου στο να αντικατοπτρίζει την απώλεια σήματος σε σχέση με την απόσταση αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα για την ακρίβεια υπολογισμού θέσης με τη χρήση της παραμέτρου Received Signal Strength. Όπως και με τις πλείστες άλλες τεχνικές εντοπισμού θέσης, έτσι και τεχνικές βασισμένες στην παράμετρο RSS μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας τριπλευρισμό (trilateration) εάν φυσικά είναι διαθέσιμες πέραν από μία πηγές.

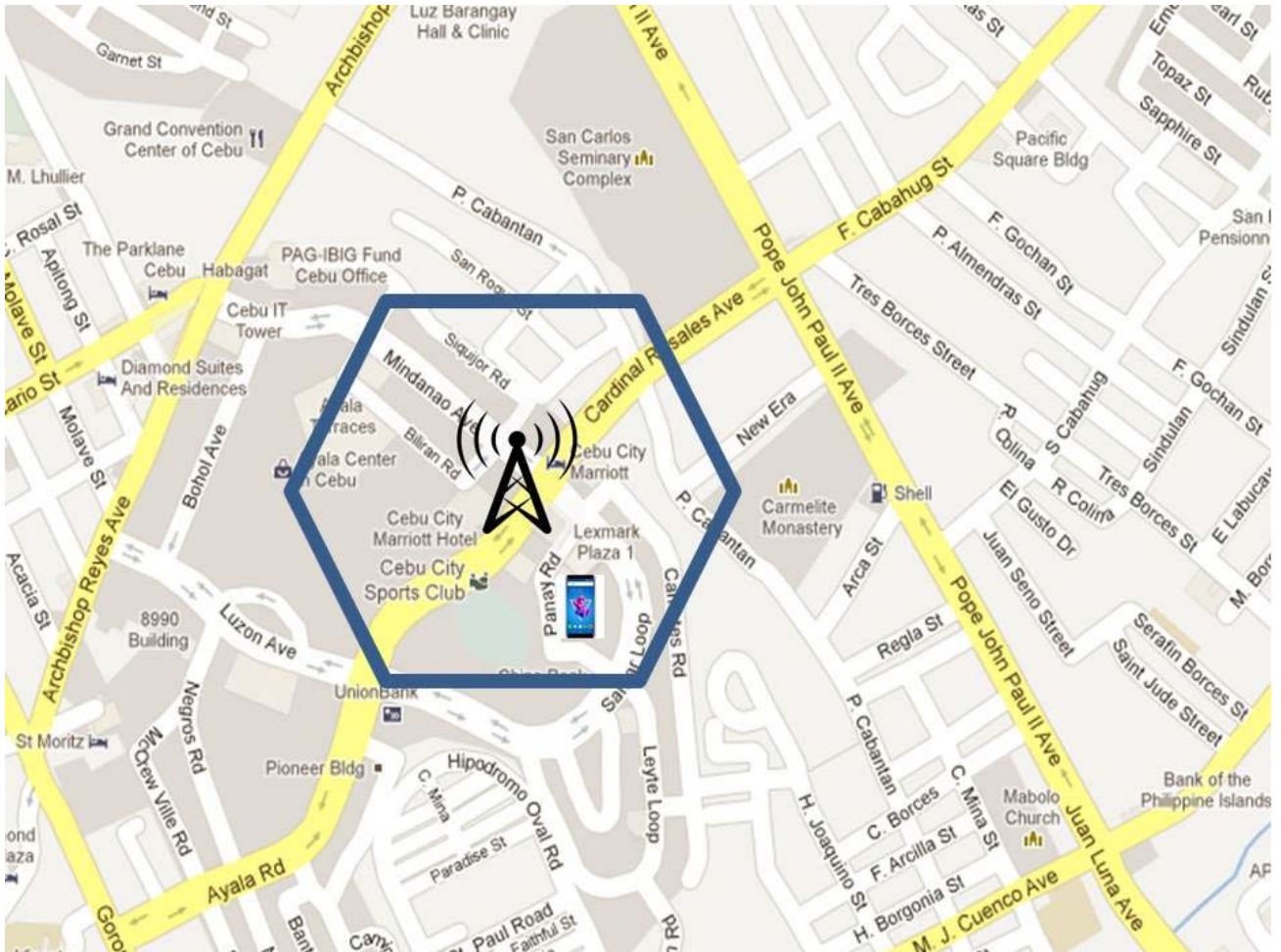
Ο υπολογισμός της ισχύς του σήματος στο δέκτη είναι ένα σημαντικό στοιχείο για τη λειτουργία μεταφοράς της σύνδεσης από ένα σταθμό σε άλλο (handover) και ως εκ τούτου εμφανίζεται στα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας. Στο πρότυπο του Long Term Evolution [25] εμφανίζεται κυρίως με την παράμετρο Reference Signal Received Power (RSRP). Την ίδια χρησιμότητα έχει η μέτρηση της ισχύος του σήματος στον δέκτη και για άλλου τύπου ασύρματα δίκτυα. Γι' αυτό συναντούμε την παράμετρο Received Signal Strength Indicator (RSSI) στα πρότυπα 802.11 για δίκτυα Wireless LAN (WLAN).

Η παράμετρος ισχύος του ληφθέντος σήματος μετριέται έτσι και αλλιώς στους δέκτες και ως εκ τούτου τεχνικές βασισμένες στην παράμετρο RSS είναι σχετικά ανέξοδες αφού δεν απαιτούν επιπρόσθετο εξειδικευμένο εξοπλισμό. Από την άλλη, απαιτείται καλή γνώση του περιβάλλοντος μεταξύ του πομπού και του δέκτη έτσι ώστε το μοντέλο συσχέτισης της απόστασης με την απώλεια ισχύος του σήματος να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβής.

## **4. Cell ID και Enhanced Cell ID**

Κάθε σταθμός βάσης σε δίκτυο κινητής αναγνωρίζεται από ένα μοναδικό αριθμό, το λεγόμενο ταυτότητα κυψέλης Cell ID. Δεδομένου ότι οι σταθμοί βάσεις είναι σταθεροί, όταν γνωρίζουμε από το Cell ID το σταθμό στον οποίο είναι συνδεδεμένη η κινητή συσκευή, τότε γνωρίζοντας την τοποθεσία του σταθμού βάσης μπορούμε να τοποθετήσουμε την κινητή συσκευή σε μια περιοχή που είναι το εύρος κάλυψης του συγκεκριμένου σταθμού, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 3. Η ακρίβεια υπολογισμού με βάση την ταυτότητα

της κυψέλης εξαρτάται από την πυκνότητα του δικτύου των σταθμών. Η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη σε αστικές περιοχές ενώ είναι αρκετά αραιή σε αγροτικές περιοχές και πολύ αραιή σε δασώδης περιοχές [26]. Η ακρίβεια μειώνεται ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι οι κινητές συσκευές δεν συνδέονται πάντοτε στον πλησιέστερο, σε ευθεία γραμμή, σταθμό βάσης.



Σχεδιάγραμμα 3: Εντοπισμός συσκευής με τη χρήση Cell ID

Από την έκδοση 9 του προτύπου LTE, εισήχθηκε το Enhanced Cell ID (E-Cell ID) ως ένας από τους υποστηριζόμενους τρόπους υπολογισμού της θέσης της κινητής συσκευής. Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση του Cell ID, της παραμέτρου Timing Advance και της παραμέτρου Angle Of Arrival (Παράγραφος 7). Ουσιαστικά το Cell ID αναγνωρίζει ένα κύκλο με ακτίνα  $r_1$  γύρω από το σταθμό ως την πιθανή περιοχή όπου βρίσκεται η συσκευή. Στη συνέχεια, ο κύκλος

περιορίζεται κάνοντας χρήση της παραμέτρου Timing Advance, όπως επεξηγήθηκε στην Παράγραφο 2. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται υπολογίζεται η γωνία άφιξης για να αναγνωριστεί η κατεύθυνση που βρίσκεται η κινητή συσκευή σε σχέση με το σταθμό βάσης (Παράγραφος 7).

## 5. Time of Arrival

Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση του χρόνου που χρειάστηκε το σήμα για να ταξιδέψει από το σταθμό βάσης στην κινητή συσκευή ή αντίστροφα. Ο χρόνος αυτός ονομάστηκε χρόνος άφιξης, Time of Arrival (TOA). Γνωρίζοντας το χρόνο άφιξης και την ταχύτητα του φωτός, προκύπτει η πιο κάτω σχέση μεταξύ της απόστασης μεταξύ της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης [27]:

$$d = ct_{\text{TOA}} = \left[ (x_{\text{BS}} - x_{\text{MS}})^2 + (y_{\text{BS}} - y_{\text{MS}})^2 \right]^{1/2}$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ του σταθμού και της συσκευής,  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός,  $t_{\text{TOA}}$  είναι ο χρόνος άφιξης του σήματος και  $x_{\text{BS}}$ ,  $y_{\text{BS}}$ ,  $x_{\text{MS}}$ ,  $y_{\text{MS}}$  είναι οι συντεταγμένες του σταθμού και της συσκευής αντίστοιχα, σε μια δισδιάστατη απεικόνιση με χρήση Καρτεσιανών συντεταγμένων. Δεδομένου ότι για τον υπολογισμό του  $t_{\text{TOA}}$  απαιτείται ο χρόνος αποστολής από τον πομπό και ο χρόνος λήψης του σήματος από το δέκτη, γίνεται αντιληπτό ότι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των μεθόδων με χρήση του χρόνου άφιξης TOA είναι ο συγχρονισμός μεταξύ της συσκευής και του σταθμού όσο αφορά την ακρίβεια υπολογισμού του χρόνου. Συχνά μπορεί ο συγχρονισμός αυτός να μην είναι στο επίπεδο ακρίβειας που να απαιτείται για την εξαγωγή αξιόπιστης εκτίμησης της θέσης. Όπως είναι προφανές από την εξίσωση, αποκλίσεις λάθους μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου μεταφράζονται σε λάθος αρκετών μέτρων λόγω της μεγάλης ταχύτητας του σήματος.

Όπως και με άλλες μεθόδους εντοπισμού θέσης, η ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με ` (trilateration). Στην περίπτωση του TOA, η συσκευή

μπορεί να υπολογίσει την απόσταση της από 3 διαφορετικούς σταθμούς βάσης και να περιορίσει την περιοχή τοποθεσίας της στο σημείο όπου τέμνονται οι 3 κύκλοι γύρω από τους 3 σταθμούς (Σχεδιάγραμμα 2).

## **6. Time Difference Of Arrival, Observed Time Difference Of Arrival, Enhanced Observed Time Difference Of Arrival**

Η μέθοδος που ονομάστηκε Time Difference of Arrival (TDOA) είναι μια παραλλαγή της μεθόδου Time of Arrival που περιγράφηκε πιο πάνω. Η μέθοδος TDOA προσπαθεί να αντιμετωπίσει την κυριότερη πρόκληση της μεθόδου TOA, δηλαδή το γεγονός ότι ο χρόνος εκπομπής και ο χρόνος λήψης του σήματος μετρούνται από δύο διαφορετικά μηχανήματα, η κινητή συσκευή και ο σταθμός βάσης, τα οποία δεν έχουν κοινή πηγή συγχρονισμού των μετρητών χρόνου τους.

Στην μέθοδο TDOA μετράται ο χρόνος λήψης από δύο διαφορετικούς σταθμούς βάσης του σήματος από την ίδια κινητή συσκευή. Σε ένα δίκτυο κινητής συνήθως υπάρχει εξοπλισμός συγχρονισμού, από τον οποίο λαμβάνει τον ακριβή χρόνο όλος ο εξοπλισμός του δικτύου. Ως εκ τούτου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι δύο σταθμοί βάσης θα έχουν συγχρονισμένα ρολόγια και κατά συνέπεια η διαφορά στο χρόνο λήψης των σημάτων της κινητής συσκευής στους δύο σταθμούς δεν θα οφείλεται σε έλλειψη συγχρονισμού των ρολογιών αλλά αντικατοπτρίζει τη διαφορά στην απόσταση που απέχει η συσκευή από τους δύο σταθμούς. Δηλαδή, εάν στον σταθμό 1 ληφθεί το σήμα σε χρόνο  $t_1$  και στο σταθμό 2 ληφθεί σε χρόνο  $t_2 = t_1 + \Delta t$ , τότε

$$\Delta d = c * (\Delta t)$$

όπου  $\Delta d$  είναι διαφορά μεταξύ των αποστάσεων της συσκευής από τους 2 σταθμούς και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός. Εάν αποτυπώσουμε την περιοχή σε

δύο διαστάσεις και με χρήση Καρτεσιανών συντεταγμένων, τότε οδηγούμαστε στην εξίσωση [28]:

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x)^2 - (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 - (y_1 - y)^2}$$

όπου  $x_1, y_1$  και  $x_2, y_2$  είναι οι τοποθεσίες των 2 σταθμών βάσεις και  $x, y$  η τοποθεσία της κινητής συσκευής.

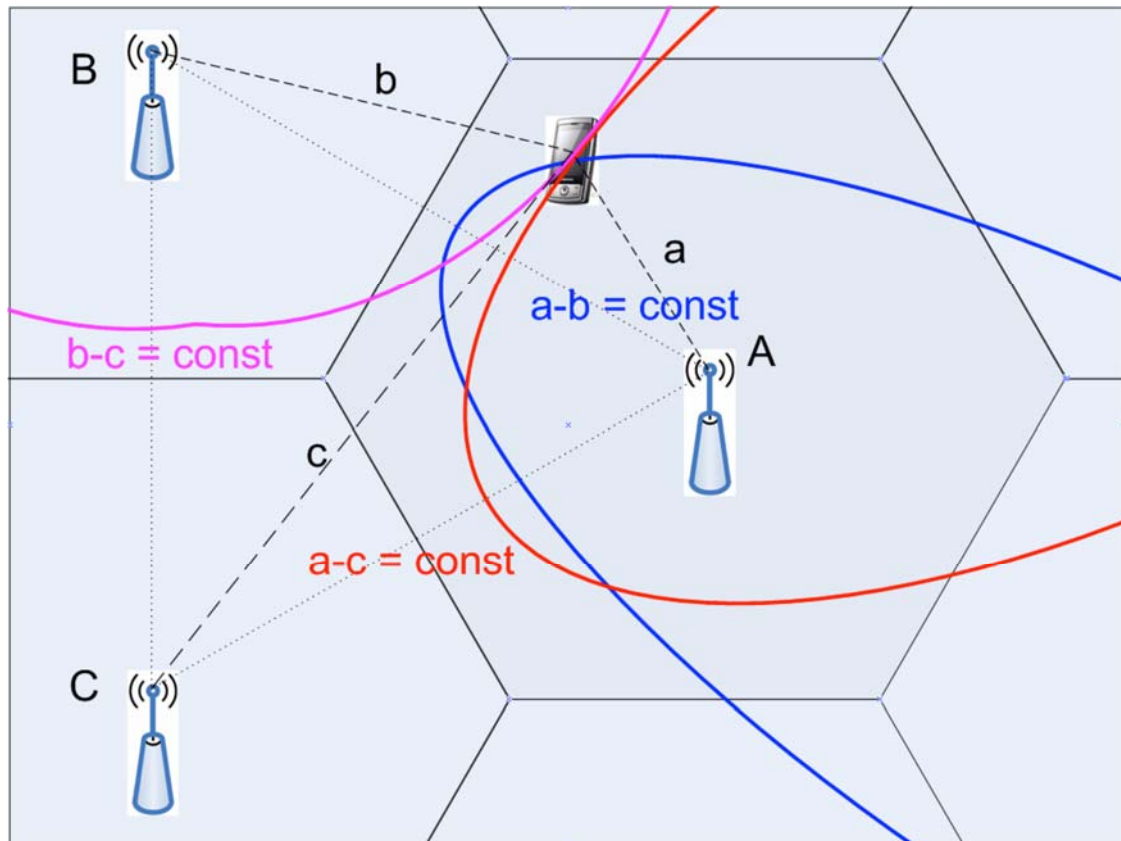
Η λύση αυτή της εξίσωσης οδηγεί σε υπερβολή, πάνω στην οποία βρίσκεται η συσκευή. Για περεταίρω ακρίβεια εντοπισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τρίτος σταθμός βάσης. Από τη διαφορά στο χρόνο άφιξης TDOA άλλων 2 σταθμών, μπορεί να παραχθεί και δεύτερη υπερβολή. Από την τομή των δύο υπερβολών μπορεί να υπολογιστεί η τοποθεσία της συσκευής.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι το σήμα ταξιδεύει με τον ίδιο τρόπο από τη συσκευή προς τους 2 σταθμούς βάσης. Αυτό όμως δεν ισχύει πάντοτε. Εάν κάποιο εμπόδιο εμποδίζει την ευθεία μετάδοση του σήματος προς τον ένα σταθμό βάσης ενώ δεν υπάρχει αντίστοιχο εμπόδιο προς τον δεύτερο σταθμό βάσης, τότε η διαφορά στο χρόνο λήψης στους δύο σταθμούς δεν θα αντικατοπτρίζει σωστά τη διαφορά απόστασης  $\Delta d$ .

Η μέθοδος Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) λειτουργεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως η μέθοδος TDOA, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση της OTDOA το σημείο μέτρησης του χρόνου λήψης είναι η κινητή συσκευή αντί του σταθμού βάσης. Όπως και στην περίπτωση της TDOA, η μέτρηση του χρόνου από μία μόνο συσκευή αντιμετωπίζει το πρόβλημα του συγχρονισμού που συναντήσαμε στη μέθοδο TOA. Απαιτείται και στη μέθοδο OTDOA η μέτρηση χρόνου λήψης από τουλάχιστον 2 σταθμούς και με βάση το χρόνο λήψης σχηματίζονται οι 2 υπερβολές, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 4 [29], όπου



σχηματίζονται 3 υπερβολές, η κάθε μία εκ των οποίων έχει ως κέντρο την τοποθεσία του αντίστοιχου σταθμού βάσης.



Σχεδιάγραμμα 4: Υπερβολές των Σταθμών Βάσης A,B,C με βάση το χρόνο λήψης του σήματος από τη συσκευή

Η μέθοδος Enhanced Observed Time Difference Of Arrival (E-OTDOA) αποτελεί μία παραλλαγή της OTDOA στην περίπτωση που το θεωρούμε ότι το δίκτυο δεν είναι συγχρονισμένο, δηλαδή η εκπομπή των σημάτων από τους 2 σταθμούς προς την κινητή συσκευή δεν γίνεται τον ίδιο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, το πρότυπο προνοεί για μία ανεξάρτητη μονάδα μέσα στο δίκτυο, η οποία ονομάζεται Location Measurement Unit (LMU), και η οποία γνωρίζει τη διαφορά χρόνου συγχρονισμού μεταξύ δύο σταθμών βάσης. Αυτή η διαφορά ονομάζεται Real Time Difference.

Εάν υποθέσουμε ότι η κινητή συσκευή έλαβε το σήμα από το σταθμό A σε χρόνο  $t_1$  και από το σταθμό B σε χρόνο  $t_2$ , τότε [30]

$$\text{OTDOA} = t_2 - t_1$$

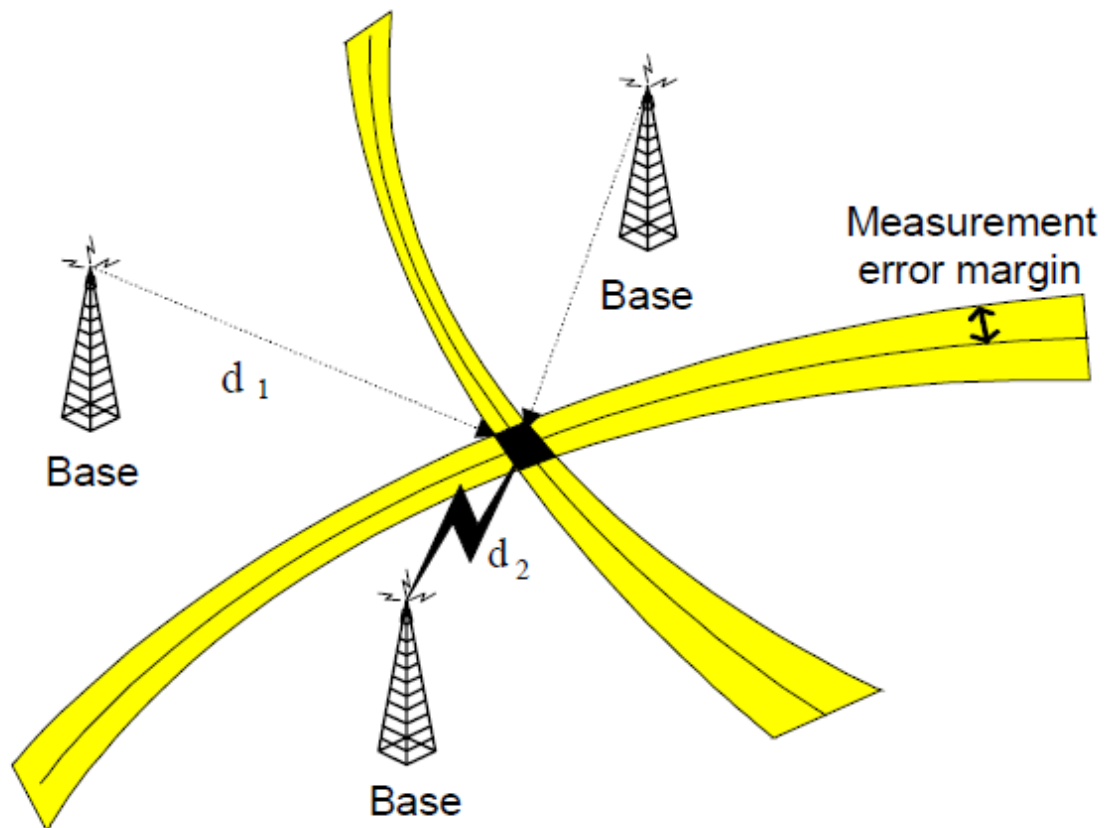
Εάν ο σταθμός A εκπέμπει το σήμα σε χρόνο  $t_3$  και ο σταθμός B σε χρόνο  $t_4$ , τότε [30]

$$\text{RTD} = t_4 - t_3$$

Τέλος, ορίζεται ως Geometric Time Difference η πραγματική διαφορά στο χρόνο λήψης του σήματος των 2 σταθμών από την κινητή συσκευή, αφού διορθωθούν οι χρόνοι OTDOA με το RTD. Δηλαδή [30],

$$\text{GTD} = \text{OTDOA} - \text{RTD}$$

Με βάση το GTD, ακολουθείται η ίδια διαδικασία εντοπισμού της θέσης της κινητής συσκευής όπως και στην περίπτωση της μεθόδου OTDOA, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 5 [30].



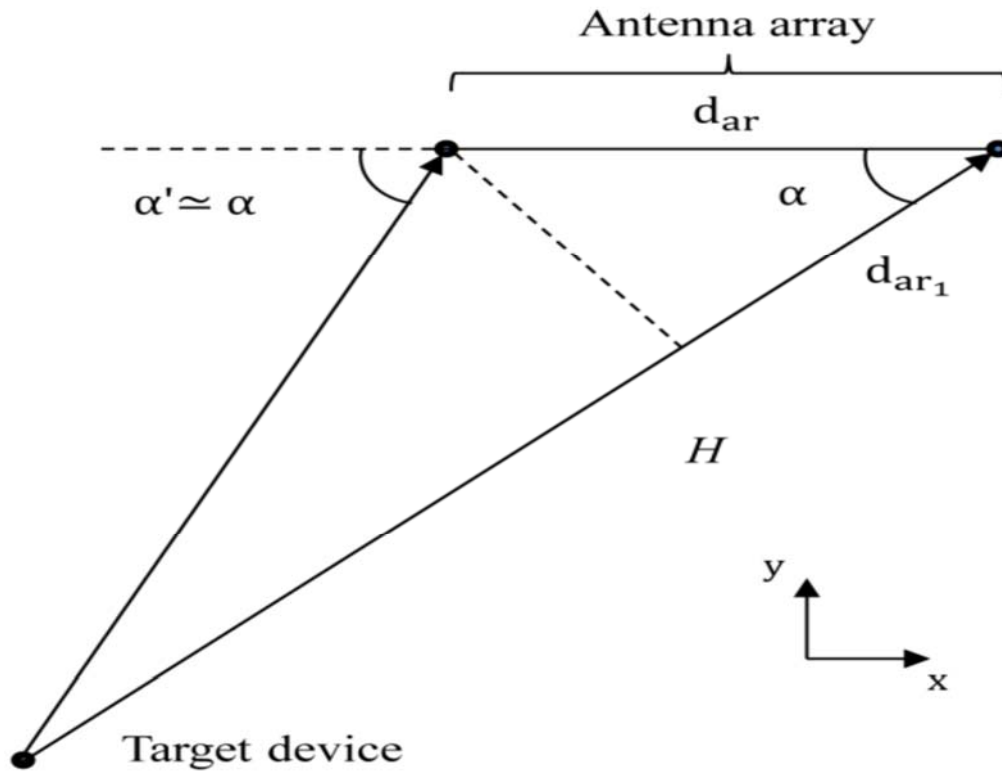
Σχεδιάγραμμα 5: Υπολογισμός τοποθεσίας κινητής συσκευής με OTDOA

## 7. Angle Of Arrival

Η μέθοδος Angle Of Arrival (AOA) χρησιμοποιεί τη γωνία λήψης του σήματος στο σταθμό βάσης από την κινητή συσκευή για να υπολογίσει την τοποθεσία της κινητής συσκευής. Για να είναι εφικτή η μέτρηση της γωνίας απαιτείται συστοιχία κεραιών στο σταθμό βάσης, ενώ συχνά δεν είναι εφικτή ο ακριβής υπολογισμός της γωνίας. Εάν υποθέσουμε ίσες αποστάσεις μεταξύ των κεραιών  $d_{ar}$ , τότε η γωνία λήψης  $\alpha$  που φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 6 ([22]) μπορεί να υπολογιστεί με την πιο κάτω εξίσωση [22]:

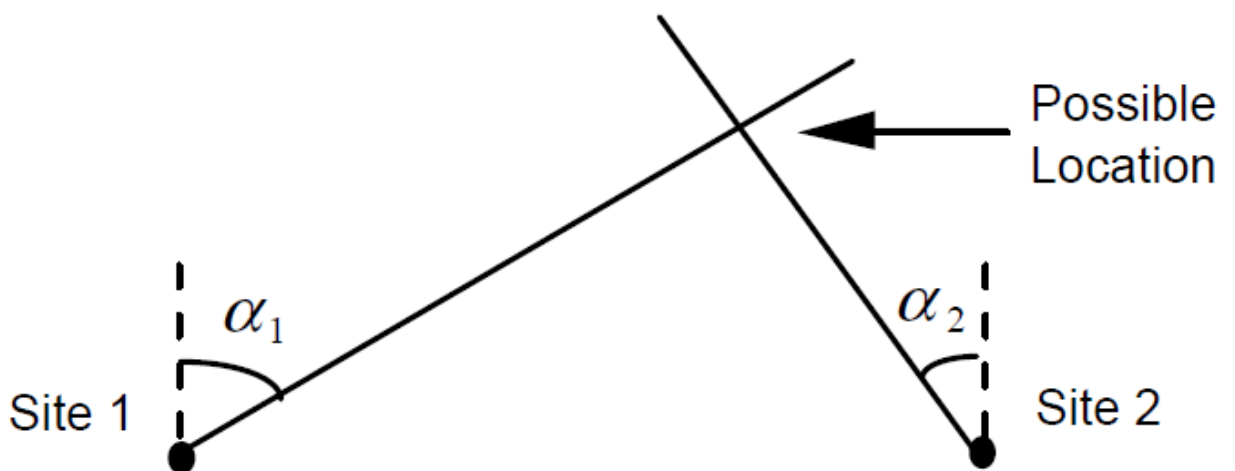
$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{d_{ar_1}}{d_{ar}} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\varphi c}{2\pi f_c d_{ar}} \right)$$

όπου  $H$  είναι η απόσταση της συσκευής από το σταθμό,  $d_{ar_1}$  είναι η προβολή του  $d_{ar}$  στο  $H$ ,  $\varphi$  η διαφορά φάσης,  $f_c$  η φέρουσα συχνότητα και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.



Σχεδιάγραμμα 6: Γεωμετρικά στοιχεία της μεθόδου ΑΟΑ

Εάν υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της γωνίας λήψης σε πέραν του ενός σταθμού, τότε μπορεί να αυξηθεί η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 7 [30].



Σχεδιάγραμμα 7: Υπολογισμός θέσης με χρήση ΑΟΑ από 2 σταθμούς βάσης

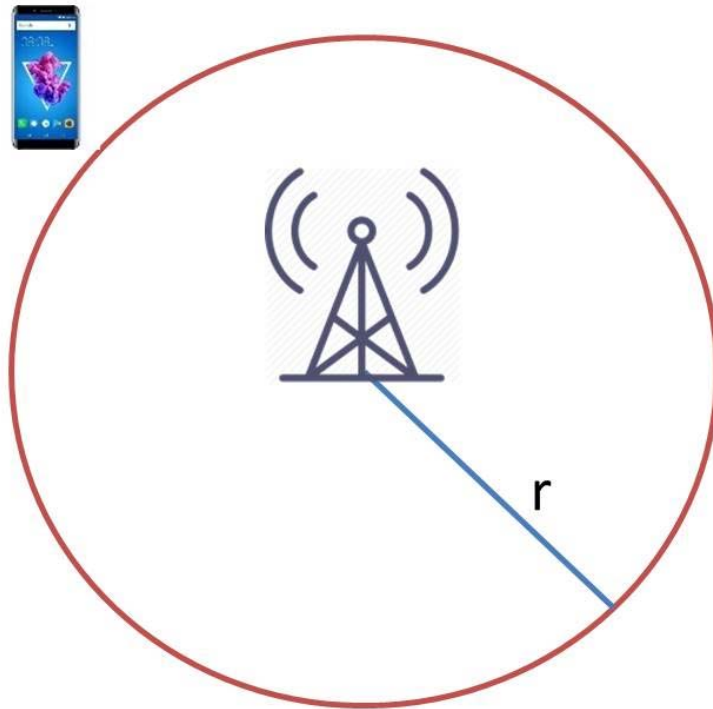
# Κεφάλαιο 3

## Πειραματική Αξιολόγηση Ακρίβειας Επιλεγμένης Τεχνικής Εντοπισμού Θέσης

### 1. Εισαγωγή

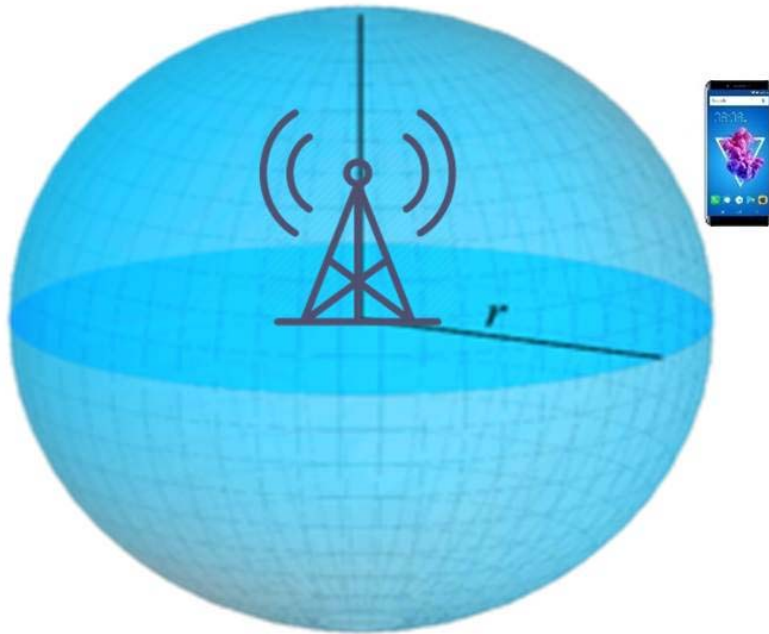
Ο στόχος αυτής της διατριβής είναι η αξιολόγηση της ακρίβειας μιας από τις τεχνικές υπολογισμού θέσης κινητού που κάνουν χρήση παραμέτρους δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η παράμετρος η οποία επιλέγηκε είναι ο χρόνος άφιξης, Time of Arrival. Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η παράμετρος αυτή καταγράφει το χρόνο άφιξης του σήματος στο δέκτη, που είναι η κινητή συσκευή. Έχοντας στη διάθεση το χρόνο εκκίνησης του σήματος, μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάστηκε για το σήμα να ταξιδέψει από τον πομπό, την αντένα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, στο δέκτη. Διαθέτοντας το χρόνο αυτό, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση του δέκτη από τον πομπό, με βάση την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος που είναι η ταχύτητα μετάδοσης του φωτός.

Εάν γνωρίζουμε την απόσταση του δέκτη από τον πομπό,  $r$ , τότε μπορούμε να τοποθετήσουμε τον δέκτη σε ένα κύκλο με κέντρο τον πομπό και ακτίνα την απόσταση  $r$ , όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 8.



Σχεδιάγραμμα 8: Κύκλος με κέντρο τον πομπό και ακτίνα  $r$

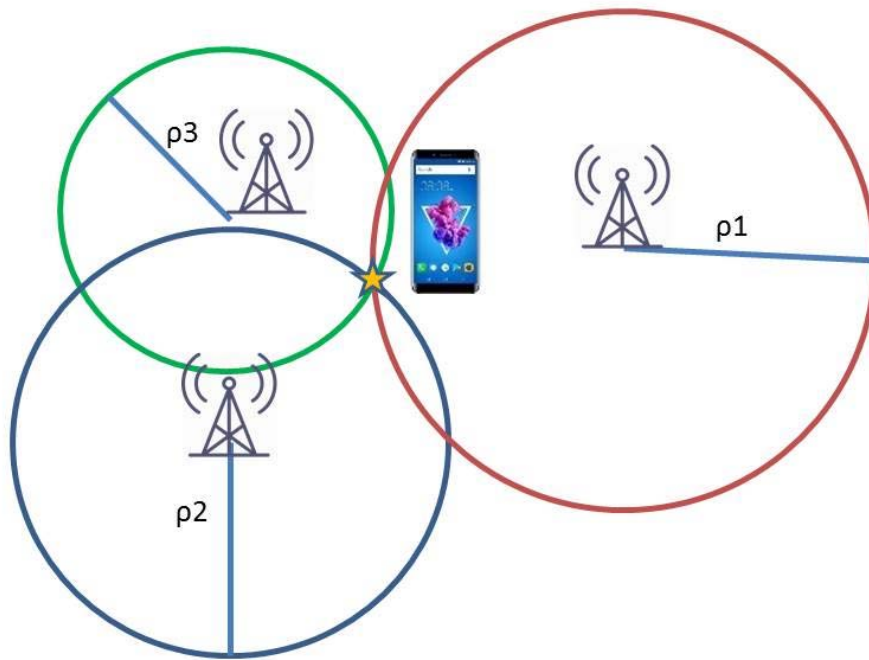
Στην περίπτωση τρισδιάστατης απεικόνισης, που αντιπροσωπεύει ένα πραγματικό σενάριο εντοπισμού θέσης, τότε ο δέκτης τοποθετείται στην επιφάνεια μιας σφαίρας με κέντρο τον πομπό και ακτίνα  $r$ , όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 9.



*Σχεδιάγραμμα 9: Σφαίρα με κέντρο τον πομπό και ακτίνα  $r$*

Με βάση το πιο πάνω, είναι κατανοητό ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του δέκτη με τη χρήση μόνο ενός πομπού, αφού ο δέκτης μπορεί να είναι οπουδήποτε στην περιφέρεια του κύκλου ή στην επιφάνεια της σφαίρας.

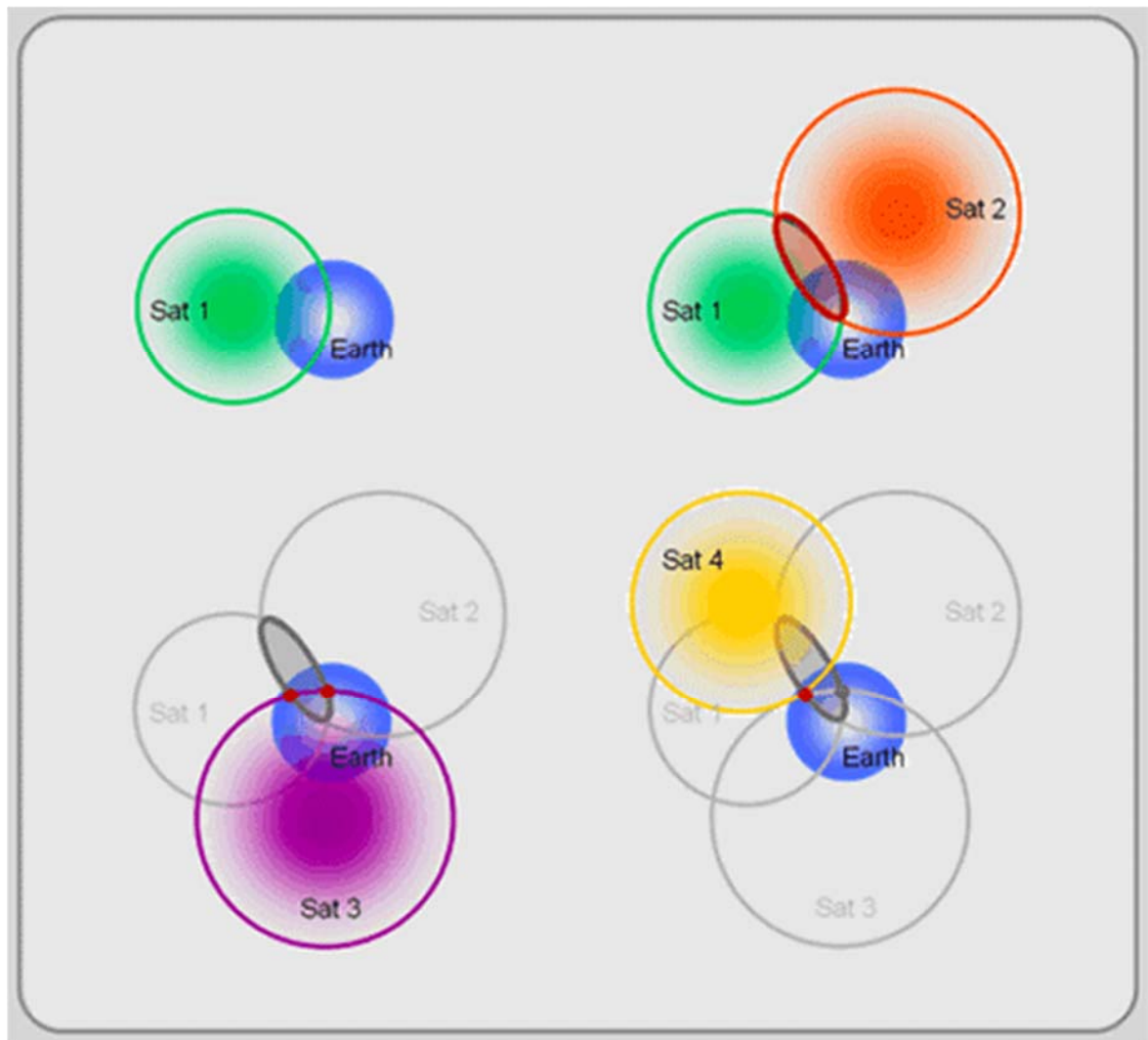
Στην περίπτωση της δισδιάστατης απεικόνισης, η χρήση δεύτερου πομπού περιορίζει τα πιθανά σημεία όπου μπορεί να βρίσκεται ο δέκτης στα δύο σημεία τομής των δύο κύκλων. Εάν γίνει και χρήση τρίτου πομπού, τότε βελτιώνεται περαιτέρω η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης αφού ο δέκτης βρίσκεται στο σημείο τομής των τριών κύκλων, όπως φαίνεται στο Σχεδιάγραμμα 10 πιο κάτω.



Σχεδιάγραμμα 10: Υπολογισμός θέσης δέκτη με χρήση τριών πομπών

Αντίστοιχα στην περίπτωση της τρισδιάστατης απεικόνισης, τέσσερις πομποί επιτρέπουν τον ακριβέστερο υπολογισμό θέσης, όπως φαίνεται στο πιο κάτω Σχεδιάγραμμα 11 από άρθρο σχετικό με τη λειτουργία συστημάτων GPS, τα οποία εντοπίζουν τη θέση της συσκευής με χρήση δορυφόρων, αντί με τη χρήση πομπών κινητής. Όπως φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στο σχεδιάγραμμα, η περιοχή όπου πιθανώς να βρίσκεται ο δέκτης περιορίζεται αισθητά όσο αυξάνονται οι πομποί, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι δορυφόροι. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, οι πομποί είναι πομποί του δικτύου κινητής.





Σχεδιάγραμμα 11: Χρήση 1-4 πομπών για εντοπισμό θέσης δέκτη [31]

## 2. Αλγόριθμος Υπολογισμού Θέσης

Βήμα 1: Υπολογισμός απόστασης δέκτη από κάθε πομπό

Εάν υποθέσουμε ότι  $t_{TOA}$  είναι η μέτρηση για το χρόνο άφιξης του σήματος στον δέκτη και  $d$  είναι η απόσταση του δέκτη από τον πομπό, τότε η απόσταση  $d$  υπολογίζεται από την εξίσωση

$$d = ct_{TOA} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός 299.792.458 m/s.

## Βήμα 2: Υπολογισμός θέσης δέκτη με χρήση τριπλευρισμού(trilateration)

Περίπτωση δισδιάστατης απεικόνισης

Εάν υποθέσουμε ότι  $x,y$  είναι οι συντεταγμένες του δέκτη και  $x_i, y_i$  είναι οι συντεταγμένες του  $i$ -ουστού πομπού και  $d_i$  είναι η αντίστοιχη απόσταση του δέκτη από τον  $i$ -οστό πομπό, τότε θα πρέπει να ισχύει η πιο κάτω σχέση

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 = d_i^2 \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Από αυτή την εξίσωση, το ζητούμενο είναι η εξεύρεση των  $(x,y)$ , δηλαδή είναι εξίσωση με 2 αγνώστους. Επειδή όμως είναι δευτέρου βαθμού εξίσωση και ως εκ τούτου μη γραμμική, απαιτείται η χρήση 3 εξισώσεων για να μπορέσει να λυθεί. Εάν έχουμε δεδομένα από 3 πομπούς, τότε το σημείο  $(x,y)$  ικανοποιεί και τις 3 πιο κάτω σχέσεις:

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = d_1^2 \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

$$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = d_2^2 \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

$$(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = d_3^2 \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Εάν αναπτύξουμε περεταίρω τις πιο πάνω εξισώσεις και αφαιρέσουμε την Εξίσωση 1 από τις άλλες δύο εξισώσεις, τότε καταλήγουμε στις πιο κάτω γραμμικές εξισώσεις [32]:

$$2(x_2-x_1)x + 2(y_2-y_1)y = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

$$2(x_3-x_1)x + 2(y_3-y_1)y = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Αυτές είναι γραμμικές εξισώσεις οι οποίες μπορούν να επιλυθούν πολύ πιο εύκολα με αντικατάσταση της μιας άγνωστης μεταβλητής στην άλλη εξίσωση. Για ευκολία στην παρουσίαση, ας αντικαταστήσουμε με γράμματα τις σταθερές, ως εξής:

$$\alpha = 2(x_2 - x_1), \beta = 2(y_2 - y_1), \gamma = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2)$$

$$\delta = 2(x_3 - x_1), \varepsilon = 2(y_3 - y_1), \zeta = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)$$

Εάν κάνουμε την άσκηση επίλυσης των 2 εξισώσεων, καταλήγουμε με:

$$x = \frac{\gamma(\varepsilon\alpha - \delta\beta) - \beta(\zeta\alpha - \delta\gamma)}{\alpha(\varepsilon\alpha - \delta\beta)} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

$$y = \frac{(\zeta\alpha - \delta\gamma)}{(\varepsilon\alpha - \delta\beta)} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Αντίστοιχα στην περίπτωση της τρισδιάστατης απεικόνισης, εάν υποθέσουμε ότι  $x, y, z$  είναι οι συντεταγμένες του δέκτη και  $x_i, y_i, z_i$  είναι οι συντεταγμένες του  $i$ -οστού πομπού και  $d_i$  είναι η απόσταση που μετρήθηκε, τότε θα πρέπει να ισχύει η πιο κάτω σχέση

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Από αυτή την εξίσωση, το ζητούμενο είναι η εξεύρεση των  $(x, y, z)$ , δηλαδή είναι εξίσωση με 3 αγνώστους. Επειδή όμως είναι δευτέρου βαθμού εξίσωση και ως εκ τούτου μη γραμμική, απαιτείται η χρήση 3 εξισώσεων για να μπορέσει να λυθεί. Εάν έχουμε δεδομένα από 3 πομπούς, τότε το σημείο  $(x, y)$  ικανοποιεί και τις 3 πιο κάτω σχέσεις:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_4)^2 = d_3^2 \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

Με την ίδια μεθοδολογία όπως και στη δισδιάστατη απεικόνιση, καταλήγουμε στις πιο κάτω γραμμικές εξισώσεις [32]:

$$2(x_2-x_1)x + 2(y_2-y_1)y + 2(z_2-z_1)z = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2)$$

(Εξίσωση 15)

$$2(x_3-x_1)x + 2(y_3-y_1)y + 2(z_3-z_1)z = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2)$$

(Εξίσωση 16)

$$2(x_4-x_1)x + 2(y_4-y_1)y + 2(z_4-z_1)z = (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2)$$

(Εξίσωση 17)

Η επίλυση τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους, είναι λίγο πιο πολύπλοκη από την επίλυση δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους που εξετάσαμε πιο πάνω, ως εκ τούτου εδώ θα κάνουμε χρήση πινάκων για ευκολότερο χειρισμό των πολλαπλών παραμέτρων.

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}$$

όπου

$$\alpha = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2)$$

$$\beta = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2)$$

$$\gamma = (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2)$$

Δηλαδή οι τρεις εξισώσεις μπορούν να εκφραστούν με χρήση των πινάκων ως εξής:

$$AF = B$$

Δεδομένου ότι το ζητούμενο είναι το F, τότε η λύση δίνεται από το:

$$F = A^{-1} B \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

όπου  $A^{-1}$  είναι ο αντίστροφος πίνακας του  $A$ , εφόσον φυσικά υπάρχει.

### Βήμα 3: Υπολογισμός Σφάλματος

Όταν υπολογιστούν οι συντεταγμένες της θέσης του δέκτη  $(x_e, y_e, z_e)$ , τότε πρέπει να υπολογιστεί το σφάλμα. Γνωρίζοντας τις πραγματικές συντεταγμένες του δέκτη  $(x_r, y_r, z_r)$ , τότε το σφάλμα είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου υπολογισμένης θέσης και του σημείου της πραγματικής θέσης.

$$\delta^2 = (x_e - x_r)^2 + (y_e - y_r)^2 + (z_e - z_r)^2$$

Δηλαδή το σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 19 πιο κάτω:

$$\Sigma_\varphi = \sqrt{(x_e - x_r)^2 + (y_e - y_r)^2 + (z_e - z_r)^2} \quad (\text{Εξίσωση 19})$$

### **3. Εξομοίωση**

Με βάση το υπόβαθρο που αναλύθηκε στο προηγούμενο μέρος, το επόμενο βήμα ήταν η λήψη μετρήσεων για διακρίβωση της ακρίβειας υπολογισμού θέσης με χρήση της παραμέτρου Time of Arrival.

Ελλείψει πρόσβασης σε πραγματικό δίκτυο κινητής, επιλέγηκε η επόμενη εφικτή και ικανοποιητικά αποδεκτή λύση, η χρήση εξομοιωτή δικτύου. Στις επόμενες 2 παραγράφους δίνεται σύντομη περιγραφή του εξομοιωτή που έχει χρησιμοποιηθεί όπως επίσης των ρυθμίσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

#### **3.1. Εξομοιωτής**

Έχει επιλεγεί ο εξομοιωτής TruNet Wireless της εταιρείας Fractal Networx, ο οποίος είναι διαθέσιμος στο πανεπιστήμιο.

Ο TruNet είναι κυρίως εργαλείο σχεδιασμού ασύρματων δικτύων όπως δικτύων κινητής, WiFi, δίκτυα ασύρματων αισθητήρων κλπ. Επιτρέπει την εισαγωγή στην εξομοίωση μεγάλου εύρους σεναρίων όπως τη συμπεριφορά του δικτύου σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, επιτρέποντας για παράδειγμα το σχεδιασμό κτηρίων με διαφορετικά είδη υλικών. Επίσης για εξωτερικούς χώρους το TruNet επιτρέπει το σχεδιασμό περιβάλλοντα χώρου που μπορεί να είναι για παράδειγμα κτήρια διαφόρων υψομέτρων σε ένα αστικό περιβάλλον όπως επίσης στοιχεία φυσικού περιβάλλοντος όπως λόφοι, κοιλάδες, δάση κλπ.

Το TruNet επιτρέπει τον καθορισμό πομπών και δεκτών στις τοποθεσίες που θα επιλέξει ο χρήστης και τον καθορισμό παραμέτρων λειτουργίας των πομπών και δεκτών όπως επίσης και του δικτύου.

Όταν καθοριστεί το περιβάλλον εξομοίωσης τότε το λογισμικό εκτελεί την εξομοίωση του δικτύου, καταγράφοντας τις παραμέτρους που θα έχει

προεπιλέξει ο χρήστης. Όταν ολοκληρωθεί η εξομοίωση, τότε ο χρήστης μπορεί να εξαγει τα δεδομένα που παρήγαγε η εξομοίωση, σε μορφή η οποία επιτρέπει περαιτέρω επεξεργασία.

### 3.2. Περιγραφή Εξομοίωσης

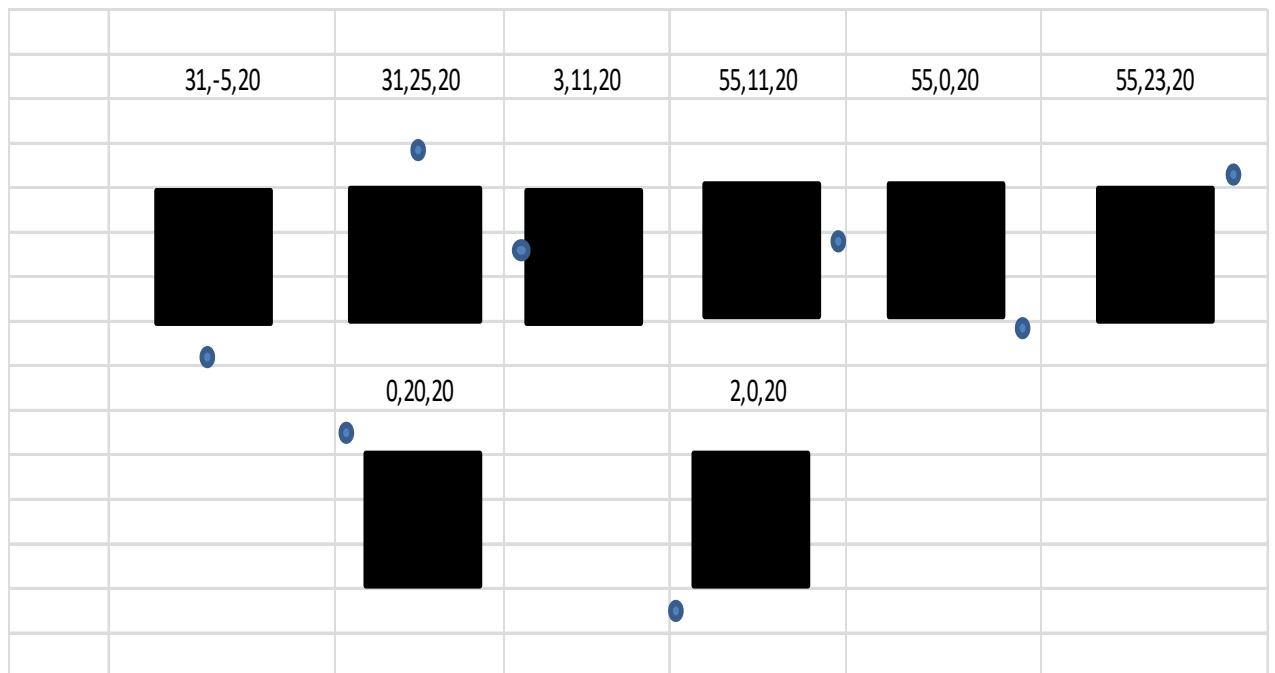
Έγινε χρήση προϋπάρχοντος περιβάλλοντος που είχε δημιουργηθεί στο λογισμικό TruNet για να προσομοιάσει το κτήριο του Ανοικτού Πανεπιστημίου. Το κτήριο είχε τρεις ορόφους με δομικό υλικό τσιμέντο.

Έγινε χρήση ενός UAV πομπού (Unmanned Aerial Vehicle) κοινώς γνωστό ως Drone. Το UAV είναι ένα αεροσκάφος χωρίς ανθρώπινο πιλότο, έχοντας επίγειο ελεγκτή. Για τους σκοπούς της εξομοίωσης, ο πομπός UAV πετούσε περιφερειακά πάνω από την οροφή του κτηρίου, σε ύψος 20μέτρων. Για 8 διαφορετικές θέσεις του πομπού έτρεξαν εξομοιώσεις και έγιναν μετρήσεις. Οι 8 θέσεις του πομπού φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα. Οι συντεταγμένες (x,y,z) υποδηλώνουν την απόσταση, σε μέτρα, από το σημείο αναφοράς που είναι το (0,0,0).

Πομπός	X	Y	Z
1	31	-5	20
2	31	25	20
3	3	11	20
4	55	11	20
5	55	0	20
6	55	23	20
7	0	20	20
8	2	0	20

Πίνακας 1: Τοποθεσίες Πομπών

Στο πιο κάτω γράφημα φαίνονται οι τοποθεσίες όπου τοποθετήθηκε ο πομπός και έτρεξαν οι εξομοιώσεις.



Καταγράφονται επίσης τα πιο κάτω χαρακτηριστικά της εξομοίωσης:

Είδος Αντένας: ισοτροπική, δηλαδή εκπέμπει με ίση ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις. Το εκπεμπόμενο σήμα είναι 4G στη συχνότητα 800 MHz.

Μεταδόσεις (transmissions): παράμετρος του εξομοιωτή η οποία καθορίζει μέχρι πόσες φορές να επιτρέπεται να περάσει το σήμα μέσα από κάποιο υλικό (πχ τοίχο) πριν τερματιστεί. Διεξήχθησαν πειράματα με τον αριθμό αυτό ορισμένο από 8 μέχρι 20 (8, 12, 16, 20).

Αντανakλάσεις (reflections): παράμετρος του εξομοιωτή η οποία καθορίζει μέχρι πόσες φορές να επιτρέπεται να αντανakλασθεί το σήμα σε κάποιο υλικό (πχ τοίχο) πριν τερματιστεί. Διεξήχθησαν πειράματα με τον αριθμό αυτό ορισμένο από 4 μέχρι 16 (4, 8, 12, 16).

Για κάθε πομπό και συνδυασμό των πιο πάνω παραμέτρων, έτρεξε διαφορετικό υπο-σενάριο προσομοίωσης όπου ο δέκτης τοποθετούνταν σε αρκετές χιλιάδες



διαφορετικά σημεία. Για κάθε ένα από τα σημεία, το λογισμικό διενεργούσε μετρήσεις.

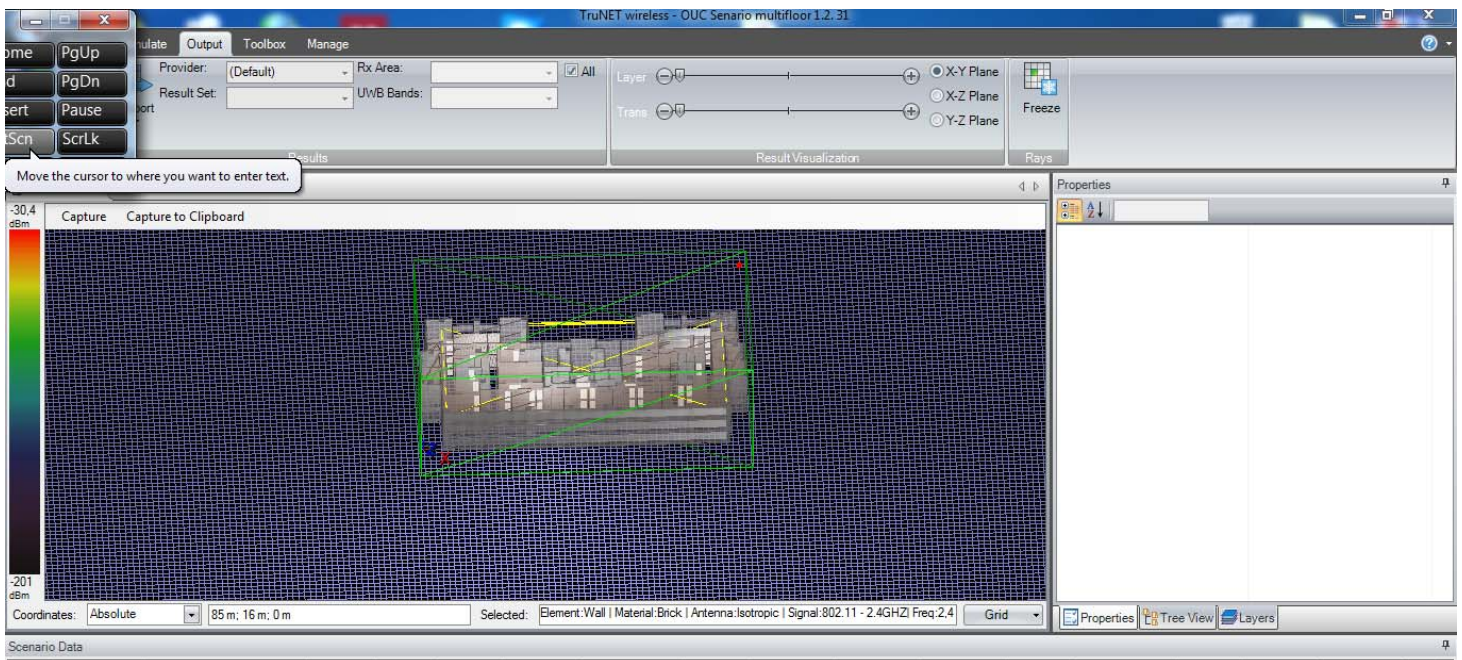
Για κάθε υπο-σενάριο εξομοίωσης, στα αποτελέσματα καταγραφόταν:

- Η ακριβής τοποθεσία του δέκτη σε μορφή τρισδιάστατων συντεταγμένων (x,y,z) σε μέτρα από το σημείο αναφοράς (0,0,0)
- Ο χρόνος άφιξης του σήματος (Time of Arrival) σε δευτερόλεπτα

Καθορίστηκαν 2 σενάρια

### Σενάριο1: Σενάριο απομονωμένου κτηρίου

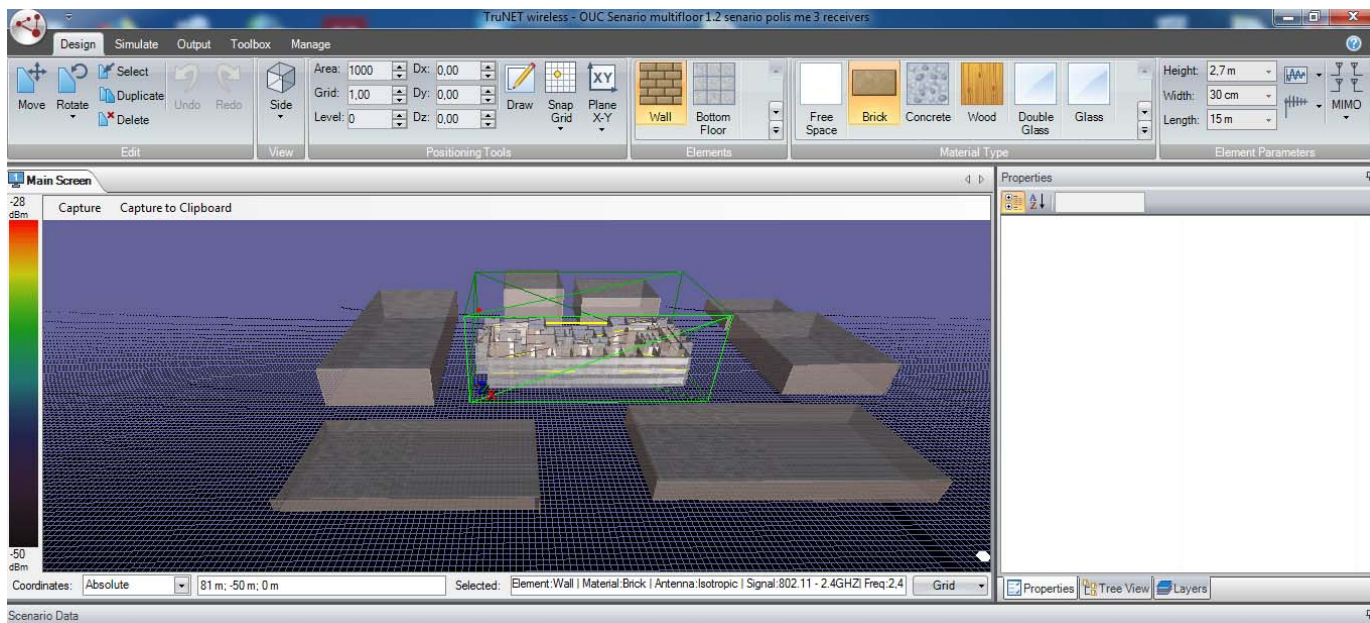
Σε αυτό το σενάριο, το κτήριο του Ανοικτού Πανεπιστημίου είναι απομονωμένο, δηλαδή δεν υπάρχουν γύρω του άλλα κτήρια ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο περιβάλλοντος το οποίο θα μπορούσε να επηρεάσει το σήμα. Το σενάριο αυτό φαίνεται στο πιο κάτω Σχεδιάγραμμα 12 όπως αποτυπώθηκε στο λογισμικό TruNet.



Σχεδιάγραμμα 12: Σενάριο απομονωμένου κτηρίου

## Σενάριο 2: Σενάριο κτηρίου σε πόλη

Σε αυτό το σενάριο, το κτήριο του Ανοικτού Πανεπιστημίου είναι σε πόλη, δηλαδή περιβάλλεται από άλλα κτήρια. Το σενάριο αυτό φαίνεται στο πιο κάτω Σχεδιάγραμμα 13 όπως αποτυπώθηκε στο λογισμικό TruNet.



Σχεδιάγραμμα 13: Σενάριο κτηρίου σε πόλη

Για κάθε ένα από τα 2 σενάρια, έτρεξαν 4 υπο-σενάρια μεταβάλλοντας κάθε φορά τις παραμέτρους Μεταδόσεις και Αντανακλάσεις. Καθορίστηκαν 4 υπο-σενάρια, δηλαδή σύνολο 8 υπο-σενάρια όπως φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα:

Σενάριο	Υπο-σενάριο	Μεταδόσεις	Ανακλάσεις
1. Απομονωμένο Κτήριο	1.1	8	4
	1.2	12	8
	1.3	16	12
	1.4	20	16
2. Κτήριο σε Πόλη	1.1	8	4
	1.2	12	8
	1.3	16	12
	1.4	20	16

Πίνακας 2: Υπο-σενάριο Εξομοίωσης

Σημειώνεται ότι για κάθε ένα από τα 8 υπο-σενάρια, εκτελούνταν ξεχωριστή εξομοίωση για κάθε μια από τις 8 θέσεις του πομπού που φαίνονται στον Πίνακα 1. Δηλαδή στο σύνολο εκτελέστηκαν  $8 \times 8 = 64$  εξομοιώσεις.

### 3.3. Αποτελέσματα Εξομοίωσης

Σε κάθε μια από τις 64 εξομοιώσεις συλλέχτηκαν μετρήσεις για χιλιάδες δέκτες. Τα αποτελέσματα εξάγονταν σε txt αρχείο. Στο αρχείο περιλαμβάνονταν τα στοιχεία του πομπού

- συντεταγμένες,
- τύπος αντένας (ισοτροπική),
- τύπος σήματος (4G)
- συχνότητα σήματος (800MHz).

και τα στοιχεία του κάθε σημείου που τοποθετήθηκε ο δέκτης

- μέτρηση ισχύος σήματος
- συντεταγμένες σημείου
- μέτρηση της παραμέτρου Time of Arrival.

Σε πρώτη φάση έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ υπο-σεναρίων όπου η τοποθεσία του πομπού είναι η ίδια αλλά είναι διαφορετικός ο αριθμός των Μεταδόσεων και Ανακλάσεων. Οι τιμές της παραμέτρου Time of Arrival μεταξύ των υπο-σεναρίων αυτών για τις ίδιες τοποθεσίες δεκτών ήταν ακριβώς οι ίδιες. Ως εκ τούτου δεν αναλύθηκε περαιτέρω η επίδραση των παραμέτρων Μετάδοση, Ανάκλαση αφού τα αποτελέσματα δεν έχουν καταδείξει επίδραση των παραμέτρων αυτών στα αποτελέσματα.

Σε δεύτερη φάση έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων σε κάθε ένα από τα δύο σενάρια. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι ως εξής:

- Για συγκεκριμένες, τυχαία επιλεγμένες τιμές των παραμέτρων Μεταδόσεων (16) και Ανακλάσεων (12), μεταφέρθηκαν σε αρχείο της Excel τα αποτελέσματα από τις εξομοιώσεις και των 8 πομπών.

- Ακολούθως έγινε αναζήτηση τοποθεσιών δεκτών που ήταν κοινά στα αποτελέσματα εξομοιώσεων σε 4 από τους 8 πομπούς. Ο λόγος που αναζητήθηκαν αποτελέσματα από 4 πομπούς είναι για να μπορέσει να τρέξει ο αλγόριθμος τριπλευρισμού ο οποίος απαιτεί 4 πομπούς στην περίπτωση τρισδιάστατου υπολογισμού θέσης.
- Για κάθε ένα από τα σημεία που βρέθηκαν κατά την αναζήτηση που αναφέρθηκε πιο πάνω, έτρεξε ο αλγόριθμος υπολογισμού της θέσης του δέκτη όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2. Στο σημείο αυτό είχαμε για 1 δέκτη, την παράμετρο Time of Arrival από 4 διαφορετικούς πομπούς. Με χρήση της παραμέτρου Time of Arrival υπολογίστηκε η απόσταση από τον αντίστοιχο πομπό. Ακολούθως χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 18 για υπολογισμό των συντεταγμένων του δέκτη.
- Τέλος, για κάθε ένα από τα σημεία που υπολογίστηκε η θέση του έγινε υπολογισμός του σφάλματος με χρήση της Εξίσωσης 19. Η ακριβής θέση του σημείου ήταν γνωστή από τα αποτελέσματα της εξομοίωσης.

#### Σενάριο1: Σενάριο απομονωμένου κτηρίου

- Η αναζήτηση σημείων δεκτών που ήταν κοινά στα αποτελέσματα εξομοιώσεων 4 πομπών έβγαλε ως αποτέλεσμα 66 σημεία δεκτών. Οι πομποί για τους οποίους βρέθηκαν κοινά σημεία δεκτών ήταν (η αρίθμηση των πομπών που έχει χρησιμοποιηθεί εδώ είναι με βάση την αρίθμηση που φαίνεται στον Πίνακα 1):
  - 1,2,3,7
  - 1,2,3,8
  - 1,2,4,5

- 1,2,5,6
  - 1,2,7,8
  - 1,3,7,8
  - 1,4,5,6
- Για κάθε ένα από τα 66 σημεία, έγινε υπολογισμός της θέσης του δέκτη με χρήση του αλγόριθμου που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.
  - Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα 66 σημεία έγινε υπολογισμός του σφάλματος με χρήση της Εξίσωσης 19 που περιγράφηκε επίσης στην Παράγραφο 2.

Η ανάλυση αυτή έδωσε τα πιο κάτω αποτελέσματα:

Μέσος Όρος Σφάλματος	15,08406 m
Διάμεση Τιμή Σφάλματος	16,0734 m
Ελάχιστη Τιμή Σφάλματος	2,946316 m
Μέγιστη Τιμή Σφάλματος	110,3239 m
Τυπική Απόκλιση ( $\sigma$ )	16,0734 m

Αφαιρέθηκαν 2 τιμές οι οποίες ήταν πολύ μεγαλύτερες από το μέσο όρο και πιθανώς να ήταν αποτέλεσμα λανθασμένων υπολογισμών και στη συνέχεια έγινε ξανά υπολογισμός των πιο πάνω τιμών:

Μέσος Όρος Σφάλματος	12,52809 m
Διάμεση Τιμή Σφάλματος	12,94928 m
Ελάχιστη Τιμή Σφάλματος	2,946316 m
Μέγιστη Τιμή Σφάλματος	30,60869 m
Τυπική Απόκλιση ( $\sigma$ )	6,465572 m

## Σενάριο 2: Σενάριο κτηρίου σε πόλη

- Η αναζήτηση σημείων δεκτών που ήταν κοινά στα αποτελέσματα εξομοιώσεων 4 πομπών έβγαλε ως αποτέλεσμα 80 σημεία. Οι πομποί για τους οποίους βρέθηκαν κοινά σημεία δεκτών ήταν (η αρίθμηση των πομπών που έχει χρησιμοποιηθεί εδώ είναι με βάση την αρίθμηση που φαίνεται στον Πίνακα 1)::
  - 1,2,3,7
  - 1,2,3,8
  - 1,2,4,5
  - 1,2,5,6
  - 1,2,7,8
  - 1,3,7,8
  - 1,4,5,6
- Για κάθε ένα από τα 80 σημεία, έγινε υπολογισμός της θέσης του δέκτη με χρήση του αλγόριθμου που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.
- Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα 80 σημεία έγινε υπολογισμός του σφάλματος με χρήση της Εξίσωσης 19 που περιγράφηκε επίσης στην Παράγραφο 2.

Η ανάλυση αυτή έδωσε τα πιο κάτω αποτελέσματα:

Μέσος Όρος Σφάλματος	16,24644 m
Διάμεση Τιμή Σφάλματος	12,82749 m
Ελάχιστη Τιμή Σφάλματος	3,82246 m
Μέγιστη Τιμή Σφάλματος	110,3239 m
Τυπική Απόκλιση ( $\sigma$ )	17,16912 m

Αφαιρέθηκαν 2 τιμές οι οποίες ήταν πολύ μεγαλύτερες από το μέσο όρο και πιθανώς να ήταν αποτέλεσμα λανθασμένων υπολογισμών και στη συνέχεια έγινε ξανά υπολογισμός των πιο πάνω τιμών:

Μέσος Όρος Σφάλματος	12,95353 m
Διάμεση Τιμή Σφάλματος	12,77415 m
Ελάχιστη Τιμή Σφάλματος	3,82246 m
Μέγιστη Τιμή Σφάλματος	66,90486 m
Τυπική Απόκλιση ( $\sigma$ )	11,10538 m

## 3.4. Ανάλυση

### 3.4.1. Ανάλυση Εξομοίωσης

Τοποθετώντας τον πομπό σε διαφορετικές θέσεις και τρέχοντας εξομοιώσεις κάθε φορά για χιλιάδες τοποθεσίες δεκτών, καταφέραμε να έχουμε στη διάθεση μας στοιχεία λήψης του ίδιου σημείου δέκτη από 4 διαφορετικούς πομπούς. Από τα στοιχεία λήψης, η παράμετρος την οποία αξιοποιήσαμε είναι η παράμετρος Time of Arrival η οποία δίνει το χρόνο άφιξης του σήματος στο δέκτη, υποθέτοντας ως χρόνο μηδέν το χρόνο αποστολής από τον πομπό. Με χρήση της παραμέτρου αυτού μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την απόσταση του δέκτη από τον πομπό. Δηλαδή για ένα δέκτη έχουμε την υπολογισμένη απόσταση του από 4 διαφορετικούς πομπούς. Με χρήση της τεχνικής τριπλευρισμού που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2 και συγκεκριμένα της Εξίσωσης 18, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του δέκτη με χρήση των 4 αποστάσεων από τους 4 πομπούς. Η υπολογισμένη αυτή θέση θα πρέπει φυσικά να συγκριθεί με την πραγματική θέση του δέκτη. Η πραγματική θέση του δέκτη είναι γνωστή σε εμάς μέσα από τα αποτελέσματα της εξομοίωσης. Με χρήση της Εξίσωσης 19 που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2 βρέθηκε το σφάλμα της υπολογισμένης θέσης σε σχέση με την ακριβή θέση του δέκτη. Το σφάλμα αυτό είναι εκφρασμένο σε μέτρα.

Ο σκοπός της εργασίας ήταν η αξιολόγηση της ακρίβειας τρισδιάστατου υπολογισμού θέσης αλγόριθμου που κάνει χρήση της παραμέτρου του LTE Time of Arrival. Η εξομοίωση που έτρεξε με τον UAV πομπό τοποθετημένο σε διάφορα σημεία πάνω από το χώρο εξομοίωσης, προσφέρει ένα αρκετά απλό τρόπο για εξασφάλιση δεδομένων από 4 τουλάχιστον πομπούς. Όταν για ένα δέκτη εξασφαλιστούν τιμές της παραμέτρου Time of Arrival από 4 διαφορετικούς πομπούς, τότε μπορεί να υπολογιστεί η θέση του δέκτη.

Ο αριθμός των σημείων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν (66 στο Σενάριο 1 και 88 στο Σενάριο 2) κρίνεται αρκετά μεγάλος για να δίνει αξιοπιστία στα αποτελέσματα. Δεδομένου ότι υπήρχε σημαντική απόκλιση μικρού αριθμού



αποτελεσμάτων από τον μέσο, έγινε και υπολογισμός μετά την αφαίρεση 2 ακραίων αποτελεσμάτων.

### 3.4.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα αποτελέσματα είναι:

1. Η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης με χρήση της παραμέτρου Time of Arrival είναι αρκετά καλή. Ο μέσος όρος των 12,5 μέτρων σφάλματος μπορεί να είναι αρκετά ψηλός για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή εντοπισμό θέσης όμως πιθανότατα είναι αποδεκτός για τις πλείστες εφαρμογές εντοπισμού θέσης. Η απόκλιση επίσης κρίνεται αρκετά χαμηλή. Σημειώνεται ότι σε κάποιες περιπτώσεις η ακρίβεια ήταν πολύ ψηλή με σφάλμα κάτω από τα 3 μέτρα.
2. Αν και παρατηρήθηκε κάποια διαφορά της ακρίβειας υπολογισμού θέσης μεταξύ των δύο σεναρίων (Απομονωμένο Κτήριο vs Κτήριο σε πόλη), η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή, λιγότερη από μισό μέτρο. Σημειώνεται όμως ότι στο σενάριο του Κτηρίου σε πόλη (Σενάριο 2) παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερη απόκλιση, σχεδόν διπλάσια σε σχέση με το Σενάριο 1. Αυτό είναι απόρροια της παρουσίας περισσότερων ακραίων αποτελεσμάτων στο Σενάριο 2, όπου είχαμε αποτελέσματα με αρκετά μεγάλα σφάλματα (πχ 60 μέτρα).
3. Η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου υπολογισμού θέσης με χρήση της παραμέτρου Time of Arrival είναι αρκετά χαμηλή. Αυτό το δεδομένο, συνδυασμένο με το γεγονός ότι η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι αρκετά καλή, την καθιστά μια πολύ ελκυστική μέθοδο υπολογισμού θέσης με χρήση δικτύου κινητής.

# Κεφάλαιο 4

## Συμπεράσματα

Αρκετές από τις εφαρμογές που αξιοποιούν τη θέση του χρήστη κάνουν χρήση τεχνολογιών GPS, γι' αυτό και υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία γύρω από τις τεχνολογίες αυτές. Ο εντοπισμός όμως θέσης με χρήση δικτύων κινητής αποτελεί αναγκαιότητα σε αριθμό άλλων επιπτώσεων, ενώ παρουσιάζει περιθώρια περαιτέρω ανάλυσης και βελτίωσης.

Ο στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής αυτής ήταν να εξετάσει την ακρίβεια εντοπισμού του χρήστη με τη χρήση ενός μοναδικού κινητού εικονικού κυψελοειδούς σταθμού βάσης, της παραμέτρου άφιξης σήματος (Time of Arrival) και χρήση τεχνικών τριπλευρισμού. Η μεταπτυχιακή διατριβή υλοποίησε σενάρια εντοπισμού χρηστών σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπως επίσης σε περιβάλλον αστικό.

Για τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό εξομοίωσης ασύρματων δικτύων TruNet. Στο λογισμικό αυτό το βασικό περιβάλλον είναι το κτήριο του πανεπιστημίου ενώ ορίστηκαν δύο σενάρια, στο ένα το κτήριο είναι απομονωμένο ενώ στο δεύτερο βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον με κτήρια γύρω του. Στο κτήριο αυτό ορίστηκε ως πομπός μία κυψέλη LTE η οποία τοποθετήθηκε σε Drone το οποίο τοποθετήθηκε σε διάφορα σημεία πάνω από το κτήριο. Για κάθε τοποθεσία της κυψέλης η εξομοίωση μετρούσε την παράμετρο χρόνου άφιξης σήματος (Time of Arrival) σε χιλιάδες σημεία εντός του κτηρίου.

Για υπολογισμό της ακρίβειας εντοπισμού θέσης έγινε ανάλυση των δεδομένων. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν μετρήσεις της παραμέτρου Time of Arrival για το

ίδιο σημείο που προήλθαν από τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες της κυψέλης. Με τη χρήση τεχνικής τριπλευρισμού υπολογίστηκε η θέση του κάθε σημείου. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το σφάλμα του υπολογισμού της θέσης σε σχέση με την ακριβή θέση του σημείου.

Η ανάλυση αυτή κατέδειξε ότι και για τα δύο σενάρια, απομονωμένο και αστικό κτήριο, η ακρίβεια εντοπισμού θέσης παρουσιάζει ένα σφάλμα γύρω στα 12-13 μέτρα. Στο σενάριο απομονωμένου κτηρίου παρουσιάζεται ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια αφού το σφάλμα είναι 12,5 μέτρα περίπου με τυπική απόκλιση 6,5 μέτρα. Στο σενάριο αστικού περιβάλλοντος το σφάλμα είναι 13 σχεδόν μέτρα, η τυπική απόκλιση όμως είναι σημαντικά μεγαλύτερη, στα 11 μέτρα.

Έχει ήδη γίνει κάποια εργασία σε πιο εξεζητημένα μοντέλα υπολογισμού θέσης με χρήση χρονισμού και συγκεκριμένα μοντέλων με χρήση της παραμέτρου άφιξης σήματος (Time of Arrival). Αυτά τα μοντέλα βελτιώνουν την ακρίβεια, υπάρχει όμως ακόμη περιθώριο βελτίωσης, κάτι που αποτελεί μια κατεύθυνση μελλοντικής εργασίας. Άλλη περιοχή που θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω είναι η σύγκριση διαφόρων μεθόδων εντοπισμού θέσης με χρήση δικτύων κινητής. Υπάρχει βιβλιογραφία η οποία κάνει ανασκόπηση τεχνικών εντοπισμού θέσης, όμως η ανασκόπηση βασίζεται σε αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία. Αν και μια τέτοια ανασκόπηση δίνει ενδεικτική σύγκριση μεταξύ των τεχνικών, δεν διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα είναι άμεσα συγκρίσιμα αφού πιθανώς να έγιναν υπό διαφορετικές συνθήκες. Στα πλαίσια μελλοντικής εργασίας, θα μπορούσε να γίνει υλοποίηση εξομοίωσης στην οποία θα μετριόνταν πολλαπλές παράμετροι και έτσι κατ' επέκταση θα μπορούσε να γίνει υπολογισμός της θέσης με χρήση πολλαπλών τεχνικών. Σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε να γίνει αξιόπιστη σύγκριση των διαφόρων τεχνικών αφού οι μετρήσεις θα γίνονταν κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

## Βιβλιογραφία

- [1]: Bajaj, R., Ranaweera, S.L. and Agrawal, D.P., 2002. GPS: location-tracking technology. *Computer*, (4), pp.92-94.
- [2]: Google Maps. (2018). Google Maps. [online] Available at: <http://maps.google.com> [Accessed 29 Sep. 2018].
- [3]: Küpper, A., 2005. Location-based services: fundamentals and operation. John Wiley & Sons.
- [4]: Mobility and Transport. (2018). The interoperable EU-wide eCall - Mobility and Transport - European Commission. [online] Available at: [https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action\\_plan/ecall\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan/ecall_en) [Accessed 29 Sep. 2018].
- [5]: Federal Communications Commission, 1996. Revision of the commission's rules to ensure compatibility with enhanced 911 emergency calling systems. Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking, Tech. Rep. CC Docket, (94-102).
- [6]: Reed, J.H., Krizman, K.J., Woerner, B.D. and Rappaport, T.S., 1998. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service. *IEEE Communications Magazine*, 36(4), pp.30-37.
- [7]: Parikh, J. and Basu, A., 2011. LTE Advanced: The 4G mobile broadband technology. *spectrum*, 5(2.5), p.30.
- [8]: European Commission, «Commission recommendation 2003/558/EC,» *Official Journal of the European Union*, 2003.
- [9]: Schmidt-Dannert, A. and SNET, S.M.M., 2010. Positioning technologies and mechanisms for mobile devices. In Seminar Master Module SNET2 TU-Berlin.
- [10]: Gustafsson, F. and Gunnarsson, F., 2005. Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements. *IEEE Signal processing magazine*, 22(4), pp.41-53.
- [11]: ETSI, "European digital cellular telecommunications system (phase 1); Radio Sub-system Synchronization," in (ETSI) Recommendation GSM 05.10, ed, 1992
- [12]: ETSI, "European digital cellular telecommunications system (phase 2); Radio Sub-system Synchronization (GSM 05.10). Version 4.4.0," in ETSI-European Telecommunications Standards Institute, ed, 1994.
- [13]: C. Drane, M. Macnaughtan, and C. Scott, "Positioning GSM telephones," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 46–54, 1998.
- [14]: Pettersen, M., Eckhoff, R., Lehne, P.H., Worren, T.A. and Melby, E., 2002, September. An experimental evaluation of network-based methods for mobile station positioning. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on (Vol. 5, pp. 2287-2291). IEEE.
- [15]: 36.213 3GPP E-UTRA Physical layer procedures, Release 9 (2010-06).

- [16]: Jarvis Jr, L.A., 2010. *Geolocation of LTE subscriber stations based on the timing advance ranging parameter*. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA.
- [17]: Roth, J.D., 2016. *Analysis and augmentation of timing advance-based geolocation in LTE Cellular Networks* (Doctoral dissertation, Monterey, California: Naval Postgraduate School).
- [18]: Whitty, R.D., Tummala, M. and McEachen, J.C., 2012, January. *Precision geolocation of mobile wimax subscribers using timing adjust measurements*. In *System Science (HICSS), 2012 45th Hawaii International Conference on* (pp. 5639-5648). IEEE.
- [19]: R. Whitty, M. Tummala, and J. McEachen, "Precision geolocation of mobile WiMAX subscribers using timing adjust measurements," in *Proc. 45th Hawaii Int. Conf. Sys. Sci.*, 2012, pp. 5639–5648.
- [20]: Hiltunen, T., Turkka, J., Mondal, R. and Ristaniemi, T., 2015, December. *Performance evaluation of LTE radio fingerprint positioning with timing advancing*. In *Information, Communications and Signal Processing (ICICSP), 2015 10th International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- [21]: T. Wigren, "Fingerprinting localisation using round trip time and timing advance," *IET Commun.*, vol. 6, pp. 419–427, 2012.
- [22]: Soderini, A.P., 2016. "Outdoor Positioning Algorithms Based on LTE and WiFi Measurements." MSc Thesis, Tempere University of Technology.
- [23]: Tzanos, I.H., 2008. "Εντοπισμός Χρηστών σε Περιβάλλον Ασύρματων Τοπικών Δικτύων. Χρήση του Cisco Unified Wireless Network" BSc Thesis, National Technical University of Athens.
- [24]: Zhu, X. and Feng, Y., 2013. *RSSI-based algorithm for indoor localization*. *Communications and Network*, 5(02), p.37.
- [25]: ETSI TS. "136 214 V13.0.0 (2016-01) LTE; Technical Specification." *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*.
- [26]: E. Trevisani and A. Vitaletti, "Cell-id location technique, limits and benefits: an experimental study," in *Mobile Computing Systems and Applications, 2004. WMCSA 2004. Sixth IEEE Workshop on, 2004*, pp. 51 – 60.
- [27]: Zakaria, Y and Ivánek, L. , 2017, "Performance Evaluation of UE Location Techniques in LTE Networks." *American Journal of Applied Sciences*, 14, pp. 81-89.
- [28]: O'Keefe B., 2017, "Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques", *Tech Notes, Senior Project Handbook, Tufts*, Available at: [https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick\\_OKeefe\\_F1.pdf](https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf) (Accessed 23 May 2018)
- [29]: Thorpe, M., Kottkamp, M., Rössler, A. and Schütz, J., 2013. *LTE location based services technology introduction*. Rohde & Schwarz.
- [30]: Motorola, I., 2001, January. *Overview of 2G LCS Technologies and Standards*. In *3GPP TSG SA2 LCS Workshop, London*. Available at: <ftp://ftp.3gpp.org/workshop/Archive/0101LCS/Docs/PDF/LCS-010019.pdf> (Accessed 23 May 2018).

- [31]: Gisccommons.org. (2018). Ch. 2: Input | Michael Schmandt. [online] Available at: <http://gisccommons.org/chapter-2-input/> [Accessed 8 Sep. 2018].
- [32]: Seo, H., & Kim, H. (2012). Four Anchor Sensor Nodes Based Localization Algorithm over Three-Dimensional Space. *Journal of information and communication convergence engineering*, 10(4), 349-358.
- [33] Progi, I. (2011), *RF Signals*, Springer New York, New York, NY, pp. 97--147.
- [34] Marx M.; Kokozinski R.; Muller H.-C.; Time synchronization for Real Time Localization Systems with multi path mitigation IMWS200
- [35] Yamasaki R.; Ogino A.; Tamaki T.; Uta T.: TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN WCNC 2005.
- [36] H. C. So Y. T. Chan and F. K. W. Chan "Closed -Form Formulae for Time-Difference-of-Arrival Estimation " *IEEE Trans. Signal Process.* vol. 65 no. 6 pp. 2614-2620 June 2008.
- [37] B. Yang and J. Scheuing "Cramer-Rao bound and optimum sensor array for source localization from time differences of arrival " in *Proc. IEEE ICASSP 2005* vol.4 pp. 961-964.
- [38] F. Vanhaverbeke, M. Moeneclaey and Y. L. Guan, "Time-of-Arrival Estimation by Means of SAGE for IR-UWB in the Presence of Pulse Overlap," 2010 Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Athens, 2010, pp. 1-4.
- [39] S. Wang, R. Inkol and B. R. Jackson, "Relationship between the maximum likelihood emitter location estimators based on received signal strength (RSS) and received signal strength difference (RSSD)," 2012 26th Biennial Symposium on Communications (QBSC), Kingston, ON, 2012, pp. 64-69.
- [40] S. Wang B. R. Jackson and R. Inkol "Impact of emittersensor geometry on accuracy of received signal strength based geolocation " *Proc. VTC2011-Fall* pp. 1-5 Sept. 2011
- [41] SeungJune Yi; SungDuck Chun; YoungDae Lee; SungJun Park; SungHoon Jung, "Overview of LTE and LTE-Advanced New Features," in *Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced* , , Wiley, 2013, pp.
- [42] S. Chen, J. Hu, Y. Shi and L. Zhao, "LTE-V: A TD-LTE-Based V2X Solution for Future Vehicular Network," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 997-1005, Dec. 2016.
- [43] G. Remy S.-M. Senouci F. Jan Y. Gourhant "LTE4V2X—Impact of high mobility in highway scenarios" *Proc. Glob. Inf. Infrastruct. Symp. (GIIS)* pp. 1-7 Aug. 2011.
- [44] . Liu N. Kato J. Ma N. Kadowaki "Device-to-device communication in LTE-advanced networks: A survey" *IEEE Commun. Surveys Tuts.* vol. 17 no. 4 pp. 1923-1940 4th Quart. 2015.

[45] L. Gallo J. Harri "Short paper: A LTE-direct broadcast mechanism for periodic vehicular safety communications" Proc. IEEE Veh. Netw. Conf. (VNC) pp. 166-169 Dec. 2013.

[46] Christopher Cox, "Performance of LTE and LTE-Advanced," in An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications , Wiley, 2014, pp.