

Ανάπτυξη και Υλοποίηση ενός μη επανδρωμένου εναέριου συστήματος σε ένα 5G περιβάλλον

Χρήστος Χαλής

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας Πληροφορίας

Πανεπιστήμιο Πατρών — up1020710@g.upatras.gr

Σύνοψη—Η εξέλιξη των ημι- και πλήρως αυτόνομων πλατφορμών έχουν δημιουργήσει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την χρήση τους σε ποικιλία εφαρμογών. Παρά το γεγονός αυτό, η συνδεσιμότητα δικτύου — ένα κρίσιμο μέρος για την επιτυχή εκμετάλλευση των οφελών τους — βρίσκεται ακόμη σε πρώιμα ερευνητικά στάδια. Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάζεται μια επισκόπηση των τρεχόντων τάσεων και τεχνολογιών σχετικά με τα δίκτυα τηλεπικοινωνίας. Έπειτα, περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος που στοχεύει να δείξει τη σκοπιμότητα ενός τηλεχειριζόμενου οχήματος μέσω του ίδιου δικτύου. Έμφαση δόθηκε στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος από άκρο σε άκρο που αποτελείται κυρίως από εξαρτήματα ανοιχτού κώδικα, ενώ είναι συμβατό πειραματικές ή εμπορικές εφαρμογές 5G.

I.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Σύμπραξη Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα 5G (5G-PPP) είναι μια κοινή πρωτοβουλία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της βιομηχανίας της Ευρωπαϊκής Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Αυτή η συνεργασία θα προσφέρει τεχνολογίες, αρχιτεκτονικές, πρότυπα και λύσεις για τις πανταχού παρούσες υποδομές επικοινωνίας επόμενης γενιάς της επόμενης δεκαετίας. Μια βασική πρόκληση είναι να διασφαλιστεί η ηγεσία της Ευρώπης σε πιθανές ευκαιρίες για δημιουργία νέων αγορών όπως έξυπνες πόλεις, ηλεκτρονική υγεία, έξυπνες μεταφορές, εκπαίδευση ή ψυχαγωγία και μέσα ενημέρωσης. Αυτό θα ενισχύσει την ευρωπαϊκή βιομηχανία συνολικά, προκειμένου να ανταγωνιστεί επιτυχώς στις παγκόσμιες αγορές και να ανοίξει νέες ευκαιρίες καινοτομίας.

Αυτή η προσπάθεια εμπίπτει στο πλαίσιο του πλαισίου έρευνας και καινοτομίας «Ορίζοντας 2020» της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπου έχουν δεσμευτεί 700 εκατομμύρια [10] για επενδύσεις κατά τη διάρκεια του προγράμματος. Το αντικείμενο αυτής της διατριβής θα αποτελέσει μέρος ενός από τα προαναφερθέντα ερευνητικά έργα, 5G Verticals Innovation Infrastructure (5G-VINNI) [13], ο στόχος του οποίου είναι η ανάπτυξη μιας μεγάλης κλίμακας, άκρο σε άκρο (E2E) 5G εγκατάστασης. Αυτή θα χρησιμοποιηθεί για να αποδείξει ότι οι δυνατότητες απόδοσης που συμμορφώνονται με τους βασικούς δείκτες απόδοσης 5G (KPI) μπορούν να ικανοποιηθούν σε ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης.

Για να διασφαλιστεί ότι οι προβλεπόμενες επιδείξεις είναι και οι δύο αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας και είναι εφαρμόσιμες στο ευρύτερο κοινό, το 5G-VINNI στοχεύει στην επίτευξη ευρείας ποικιλίας περιπτώσεων χρήσης. Αυτά, θα φέρουν μια πληθώρα καινοτόμων περιπτώσεων χρήσης που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την επικύρωση της εγκατάστασης 5G-VINNI και των εξαρτημάτων της έναντι 5G KPIs. Πρωταρχικό παράδειγμα ενός τέτοιου σεναρίου θα ήταν ο ιστότοπος εγκατάστασης του έργου στην Πάτρα, ο οποίος θα παρουσιάσει τέσσερις περιπτώσεις χρήσης ως απόδειξη της ιδέας, μία από τις οποίες είναι ο κύριος στόχος αυτού του έργου. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η διατριβή στοχεύει να περιγράψει την ανάπτυξη και την εφαρμογή μιας πλατφόρμας μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων, ικανών να ελέγχονται εξ αποστάσεως και να μεταδίδουν μια ροή βίντεο σε πραγματικό χρόνο μέσω της σύνδεσης του δικτύου. Επιπροσθέτως, ολόκληρη η στοίβα λογισμικού εί-

ναι σε θέση να αξιοποιήσει τις τελευταίες τεχνολογίες, ώστε να είναι προαιρετικά κατάλληλες για μελλοντικές εφαρμογές που θα απαιτούσαν τελικά σημεία με δυνατότητα μικροσυντήρησης.

II.

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

Τα δίκτυα 5G, σε συνδυασμό με τον τεμαχισμό του δικτύου, παρέχουν συνδεσιμότητα των επιχειρηματικών πελατών και επεξεργασία δεδομένων προσαρμοσμένων στις συγκεκριμένες επιχειρηματικές απαιτήσεις που συμμορφώνονται με μια συμφωνία επιπέδου υπηρεσίας (SLA) που έχει υπογραφεί με τον διαχειριστή του δικτύου. Οι δυνατότητες δικτύου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν διακίνηση δεδομένων, ποιότητα, χρόνος καθυστέρησης, αξιοπιστία και ασφάλεια. Από την άποψη ενός φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας, ένα τμήμα δικτύου είναι ένα ανεξάρτητο λογικό δίκτυο από άκρο σε άκρο που λειτουργεί σε μια κοινή φυσική υποδομή, ικανό να παρέχει ποιότητα υπηρεσιών μέσω διαπραγματεύσεων.

Μπορούμε να ορίσουμε τμήματα δικτύου ως λογικά δίκτυα E2E που λειτουργούν σε ένα κοινό υποκείμενο (φυσικό ή εικονικό) δίκτυο, αμοιβαία απομονωμένο, με ανεξάρτητο έλεγχο και διαχείριση και τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν κατ' απαίτηση. Αυτά τα αυτόνομα δίκτυα πρέπει να είναι ευέλικτα ενώ ταυτοχρόνως να εξυπηρετούν διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης από πολλούς πελάτες σε μια κοινή υποδομή δικτύου, αρκετά ανθεκτική ώστε να ανταποκρίνεται στα KPI.

Η δυνατότητα δημιουργίας κατ' απαίτηση και με προγραμματιζόμενο τρόπο, αποδοτικών τμημάτων δικτύου E2E και αφιέρωσής τους για τη δυναμική παροχή διαφορετικών υπηρεσιών θεωρείται ως ζωτικό χαρακτηριστικό του δικτύου νέας γενιάς. Στο πλαίσιο αυτό, συνεχίζονται οι προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας 5G ικανών να αναπτύξουν τμήματα δικτύου διαφόρων μορφών και μεγεθών.

Η διαδικασία κοπής δικτύου κατανέμεται γενικά σε τρία βασικά επίπεδα, δηλαδή το επίπεδο παρουσίας υπηρεσίας, το στρώμα εμφάνισης δικτύου (NSI) και το επίπεδο πόρου. Κάθε παρουσία υπηρεσίας αντικατοπτρίζει μια υπηρεσία που παρέχεται από ένα κάθετο τμήμα, έναν πάροχο εφαρμογών ή έναν χειριστή δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το NSI αντιπροσωπεύει ένα σύνολο πόρων προσαρμοσμένων για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις απόδοσης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας και ενδέχεται να μην περιέχει καμία, μία ή μια σειρά διαφορετικών παρουσιών υποδικτύου. Μια παρουσία υποδικτύου μπορεί να είναι μια λειτουργία δικτύου ή ένα υποσύνολο λειτουργιών δικτύου ή πόρων αντιπροσωπεύοντας ένα μέρος ενός NSI.

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [26] και η Συνεργασία Δημοσίου-Ιδιωτικού Υποδομής 5G (5G-PPP) [5] έχουν εντοπίσει τρεις οικογένειες ευρείας χρήσης: ενισχυμένες ευρυζωνικές κινητές συσκευές, μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής και κρίσιμες επικοινωνίες. Οι διαφορές μεταξύ αυτών των περιπτώσεων χρήσης ισοδυναμούν με ένα σύνολο ετερογενών και συχνά αντιφατικών απαιτήσεων που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από την αρχιτεκτονική ενός μεγέθους. Οι διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης πρέπει να χαρτογραφηθούν για κατάλληλα προσαρμοσμένες δομές

δικτύου. Έχοντας αυτό κατά νου, οι αρχιτεκτονικές προτάσεις για το 5G στοχεύουν στην κάλυψη αυτών των περιπτώσεων χρήσης. Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν πώς ο τεμαχισμός δικτύου μπορεί να χρησιμοποιεί πόρους για την εξυπηρέτηση αυτών των κύριων περιπτώσεων χρήσης, τηρώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις τους.

A. Βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή (eMBB)

Το eMBB είναι ένα σύνολο υπηρεσιών που χαρακτηρίζονται από την ανάγκη τους για συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας στοχεύει στην υποστήριξη απαιτήσεων απόδοσης υψηλών ποσοστών δεδομένων και υψηλής πυκνότητας κίνησης. Αναμένεται ότι η χωρητικότητα κινητής τηλεφωνίας θα αυξηθεί 100 φορές σε σχέση με τη χωρητικότητα που προσφέρουν τα σύγχρονα συστήματα 4G έτσι ώστε να μπορέσει να αναποκριθεί στις απαιτήσεις αστικών περιοχών. Οι χρήστες θα πρέπει να μπορούν να επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες ακόμη και σε προκλητικά σενάρια όπως η ροή περιεχομένου εν κινήσει, ενώ βρίσκονται στην άκρη της κυψέλης και σε πολυσύχναστες περιοχές. Προκειμένου να παρασχεθεί NSaaS που παρέχει αυτήν την υπηρεσία, έμφαση δίνεται στην παροχή συγκεκριμένων εγγυήσεων απόδοσης για KPI στους ακόλουθους τομείς: εύρος ζώνης, απόδοση, κάλυψη και σταθερότητα της σύνδεσης.

Ορισμένες υπηρεσίες / εφαρμογές eMBB θα εφαρμόσουν μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο από την άποψη της χωρητικότητας κυκλοφορίας User Plane (UP) από άλλες και επομένως είναι πιο ενδιαφέρουσες από την άποψη της χωρητικότητας του Packet Core. Αυτό επιβάλλει τον καθορισμό χαρακτηριστικών με βάση την ανάγκη κάθε υπηρεσίας eMBB. Ανάλογα με την καθυστέρηση μετάδοσης, υπάρχει λόγος να διαικνείται το επίπεδο χρήσης στο επίπεδο πρόσβασης ενώ φιλοξενείται τις υπόλοιπες λειτουργίες κεντρικά.

B. Εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλού χρόνου καθυστέρησης (URLLC)

Το URLLC είναι ένα σύνολο υπηρεσιών με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας στοχεύει στην υποστήριξη απαιτήσεων απόδοσης χαμηλού χρόνου καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας, διατηρώντας παράλληλα τη διαθεσιμότητα. Η αύξηση της αξιοπιστίας μπορεί να επιτευχθεί αφιερώνοντας τους κατάλληλους πόρους στη σηματοδότηση, την υψηλότερη κωδικοποίηση πλεονασμού και τις αναμεταδόσεις. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένο χρόνο καθυστέρησης ανάλογο με το μέγεθος του πακέτου. Εάν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης είναι χαμηλές, μειώνοντας το μέγεθος του πακέτου, μπορεί να επιτευχθεί χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία, μειώνοντας παράλληλα τους χρόνους μετάδοσης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η υπηρεσία παρέχεται στον απαιτούμενο στόχο απόδοσης, το CSP πρέπει να δώσει προτεραιότητα στους πόρους στο URLLC τμήμα, ειδικά για κρίσιμες εφαρμογές. Επίσης, πρέπει να διαμορφώσει δυναμικά τμήματα σε περίπτωση πιθανής υποβάθμισης της υπηρεσίας και να μπορεί να επιτύχει υψηλή αξιοπιστία μέσω μετάδοσης στο User Plane. Τα τμήματα URLLC θα παρέχονται από το CSP για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο από τον πελάτη. Όσον αφορά τον τομέα της επικοινωνίας, δύο παράγοντες έχουν ύψιστη σημασία και επηρεάζουν τον ορισμό της αρχιτεκτονικής slice URLLC σε κάθε ιστότοπο διευκόλυνσης:

I. Απαιτείται καθυστέρηση E2E Sub-10ms για όλες τις περιπτώσεις χρήσης που μπορούν να αντιστοιχιστούν στο τμήμα δικτύου URLLC. Πολλές από τις εφαρμογές θα απαιτούσαν καθυστέρηση ακόμη και 5ms.

II. Η αξιοπιστία καθορίζεται από την πιθανότητα αστοχίας πακέτων (ποσοστό σφάλματος πακέτου) που δεν παραδίδονται επιτυχώς στον δέκτη εντός του ορίου καθυστέρησης, καθώς είτε είναι λανθασμένα, χαμένα είτε φτάνουν πολύ αργά.

C. Μαζικό Διαδίκτυο των πραγμάτων (mIoT)

Η ετερογενής πρόσβαση επιτρέπει σε συσκευές IoT να συνδεθούν χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε ραδιοφώνo ή σταθερή συνδεσιμότητα είναι διαθέσιμη τόσο από τη συσκευή όσο και από το δίκτυο. Το 5G-NR χρησιμοποιεί ζώνες φάσματος τόσο για χαμηλό όσο και για πολύ υψηλό εύρος ζώνης, καθώς και συνύπαρξη με κυψελοειδή και μη, δίκτυα πρόσβασης.

Ο τύπος υπηρεσίας mMTC στοχεύει στην υποστήριξη απαιτήσεων απόδοσης μεγάλου αριθμού και υψηλής πυκνότητας συσκευών IoT. Ορισμένες βασικές πτυχές αυτών των συσκευών είναι η πλήρως αυτοματοποιημένη φύση τους και η ελάχιστη αλληλεπίδραση με τους ανθρώπους, στέλνοντας μικρές ποσότητες πληροφοριών στο σύννεφο. Ορισμένες από αυτές τις συσκευές IoT αναμένεται να εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες, δυσπρόσιτες τοποθεσίες με κακή κάλυψη. Έτσι, βασική απαίτηση είναι η ικανότητα χρήσης πολύ ισχυρών σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Η μέση διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι περίπου μια δεκαετία και το συνολικό κόστος της συσκευής πρέπει να είναι χαμηλό. Με τον αριθμό τους αναμένεται να αυξηθεί δραματικά τα επόμενα χρόνια, οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να είναι σε θέση να χειριστούν το πρόσθετο φορτίο κατά τη μετάδοση. Προκειμένου να παρασχεθεί NSaaS που παρέχει αυτήν την υπηρεσία, το CSP θα δώσει έμφαση στην παροχή συγκεκριμένων εγγυήσεων απόδοσης για KPI, όπως η πυκνότητα σύνδεσης (1.000.000 συσκευές ανά km²) και η κάλυψη (95%), ενώ παράλληλα εγγυάται την ασφάλεια του τμήματος δικτύου. Το απόρρητο των καταναλωτών και η ασφάλεια των πληροφοριών αποτελούν εξαιρετικά σημαντική λεπτομέρεια για αυτόν τον τύπο υπηρεσίας.

IV. ΧΡΗΣΗ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Αυτό το τμήμα θα χρησιμεύσει ως μια εις βάθος ματιά στη γενική αρχιτεκτονική και στα βήματα εφαρμογής όπως περιγράφεται από τις αρχές 5G-VINNI. Κάτω από τη συνολική εγκατάσταση που θα περιλαμβάνει την πρώτη περίπτωση χρήσης της κύριας εγκατάστασης στην Ελλάδα, τεκμηριώνεται, με σκοπό να παρουσιάσει με πρακτικό τρόπο τις δυνατότητες, τις προόδους και ακόμη και τους περιορισμούς αυτής της μετατόπισης παραδείγματος που στοχεύει να προσφέρει η τμηματοποίηση δικτύου.

A. Ορισμός της Χρήσης

Στο ένα άκρο, μια μονάδα επίγειου σταθμού θα παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει σε πραγματικό χρόνο ένα όχημα, μέσω του κυψελοειδούς δικτύου. Σε σύγκριση με τα πιο παραδοσιακά σχήματα ελέγχου ραδιοσυχνότητων, ο χρήστης δεν απαιτείται να διατηρήσει την οπτική επαφή του εν λόγω οχήματος, καθώς ο ενσωματωμένος υπολογιστής που είναι συνδεδεμένος με κινητή συσκευή μπορεί να λαμβάνει εντολές μέσω του δικτύου. Αυτό μας οδηγεί στο άλλο μέρος του συστήματος που είναι φυσικά το ίδιο το όχημα, ικανό να μεταδίδει οπτικό υλικό σε πραγματικό χρόνο πίσω στο σταθμό του εδάφους για να παρέχει στον χρήστη κατάλληλη ανατροφοδότηση της πορείας του, στο οποίο μπορεί να αντιδρά ανάλογα. Τα παλαιά συστήματα χρησιμοποιούν εναλλακτικές ζώνες ραδιοσυχνότητων για τη μετάδοση των εν λόγω ροών βίντεο που είναι επιρρεπείς σε παρεμβολές, χαμηλής ποιότητας και μεσαίου έως υψηλού χρόνου καθυστέρησης. Αυτά αντικαθίστανται με σύγχρονες τεχνολογίες που αντιμετωπίζουν όλα τα ζητήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αξιοποιώντας τη συνδεσιμότητα V2X, ο χρήστης επωφελείται από το αναδυόμενο δίκτυο 5G NR, καθώς η αυξημένη κάλυψη, ο χαμηλός χρόνος καθυστέρησης και η ποιότητα των υπηρεσιών είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του. Τέτοια σενάρια μπορούν να αντιμετωπιστούν σε πολλές περιπτώσεις με τα πιο αξιοσημείωτα να είναι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, απομακρυσμένη ανάληψη αυτόνομων οχημάτων ή ακόμη και ανθρώπινη επίβλεψη περιοχών ενδιαφέροντος. Σχετικά με το σχεδιασμό, η περίπτωση χρήσης απαιτεί την εφαρμογή πτυχών από μεριάς

χρήστη και οχήματος, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις της πλατφόρμας δικτύου και ανοιχτού κώδικα. Ως πρόσθετο πλεονέκτημα, διάφορες μελλοντικές επεκτάσεις μπορούν να αυξήσουν τις δυνατότητες της πλατφόρμας, όπως γυαλιά πρώτης προβολής (FPV) και κάμερες 360° θα υποστηρίζονται σε μελλοντικές εκδόσεις.

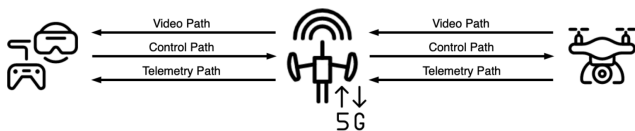
B. Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI) Ορισμός

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η περίπτωση χρήσης στοχεύει κυρίως στην προβολή των πλεονεκτημάτων που παρέχονται από τις τεχνολογίες τεμαχισμού δικτύου, καθώς η εφαρμογή της στις τρέχουσες τεχνολογίες δικτύου κινητής θα ήταν αδύνατη ή στο ελάχιστο, ανέφικτη. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να καθορίσουμε μερικούς από τους βασικούς δείκτες απόδοσης προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης λειτουργικότητα της πλατφόρμας. Παρατίθενται εν συντομία παρακάτω:

- **Throughput:** Ο ελάχιστος ρυθμός δεδομένων που απαιτείται για τον τελικό χρήστη να λαμβάνει ροή βίντεο επαρκούς ποιότητας και καθυστέρησης.
- **Καθυστέρηση:** Αυτό ισοδυναμεί με τη μέγιστη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο από τη στιγμή που ο χρήστης εκδίδει εντολή με το όχημα μπορεί να λάβει τις εν λόγω πληροφορίες και να ανταποκριθεί αναλόγως.
- **Αξιοπιστία:** Η ανθεκτικότητα του εν λόγω συστήματος επικοινωνιών σε όλα τα είδη σφαλμάτων που προκαλούνται από παρεμβολές και ατέλειες καναλιών
- **Time Instantiation Service:** Η καθυστέρηση που μετράται με το χρόνο που απαιτείται από την πλατφόρμα για την εκκίνηση, τη διαμόρφωση και την ανάπτυξη της εν λόγω απαιτούμενης υπηρεσίας κατόπιν εντολής.
- **Κάλυψη:** Η περιοχή για την οποία το όχημα θα μπορεί να λειτουργεί πλήρως, ενώ εξακολουθεί να συμμορφώνεται με τις πλήρεις προδιαγραφές που αναφέρονται παραπάνω.

C. Διαδρομές επικοινωνίας

Στην περίπτωση μας, πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις τμημάτων τύπου eMBB (για να επιτρέψουμε την απρόσκοπτη ροή βίντεο) και το uRLLC για να επιτραπεί ο τηλεχειρισμός του οχήματος.



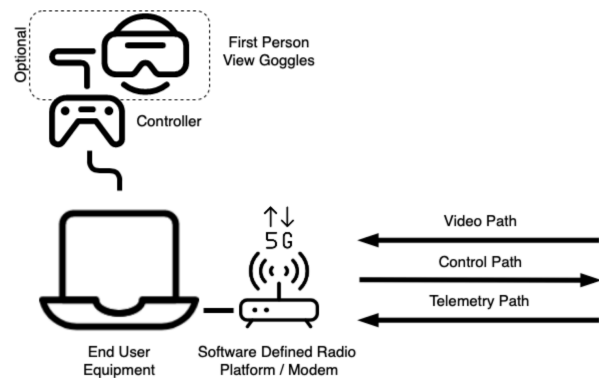
- **Διαδρομή Οπτικού Υλικού:** Παροχή επαρκούς εύρους ζώνης και καθυστέρησης για ζωντανή ροή βίντεο από το όχημα στον χρήστη. Το αναπτυγμένο δίκτυο 5G πρέπει να μπορεί να χειρίζεται με επιτυχία διάφορες ροές οπτικού υλικού από τις συσκευές, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις εύρους ζώνης. Ο χρήστης πρέπει να είναι σε θέση να κατεβάσει (Rx) ενώ η πλευρά του οχήματος πρέπει να είναι σε θέση να φορτώσει (Tx) σε παρόμοιες τιμές για να πραγματοποιήσει επιτυχώς την επίδειξη περίπτωσης χρήσης. Είναι αυτονόητο ότι το xNodeB πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον αυτές τις τιμές και στις δύο κατευθύνσεις. Συνεπώς, εάν η περίπτωση χρήσης απαιτεί πραγματικό FPV ή VR / AR, περισσότερο FPS ή / και υψηλότερη ποιότητα, θα απαιτούσε περισσότερο εύρος ζώνης.
- **Διαδρομή Τηλε-εντολής:** Ενεργοποίηση απομακρυσμένης λειτουργίας οχήματος από τον χρήστη. Ανάλογα με τον τύπο του οχήματος που χρησιμοποιείται, η λύση 5G θα πρέπει να εμφανίζει τον ίδιο ή λιγότερο χρόνο καθυστέρησης μετάδοσης και λήψης εντολών από τις παραδοσιακές λύσεις ελέγχου ραδιοφώνου.
- **Διαδρομή τηλεμετρίας:** Παροχή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του οχήματος. Η διαδρομή τηλεμετρίας στοχεύει να παρουσιάσει μια προ-

αιρετική υλοποίηση ενός τμήματος mIoT για μια λιγότερο απαιτητική διαδρομή όσον αφορά τους πόρους του δικτύου. Τα δεδομένα τηλεμετρίας, όπως η θέση του drone, το υψόμετρο και ο προσανατολισμός, θα αποδειχθούν εξαιρετικής ζωτικής σημασίας για την καταγραφή διαδρομής πτήσης, καθώς και για τυχόν αισθητήρες ειδικής υπόθεσης που θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στο όχημα αναλόγως.

IV. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

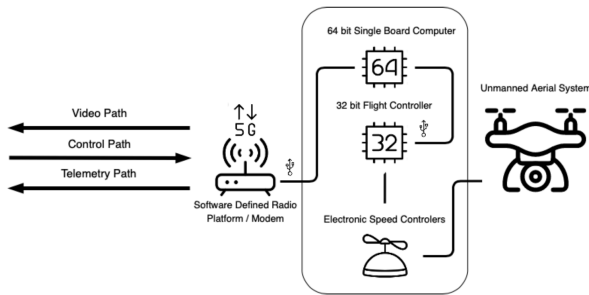
A. Από την Πλευρά του Χρήστη

Στο σενάριο περίπτωσης χρήσης, τα γυαλιά αντικαθίστανται με φορητό υπολογιστή για λόγους απλότητας. Σε μελλοντικές επαναλήψεις, τα γυαλιά πρώτης προβολής θα μπορούσαν να συνδεθούν σε μια θύρα εξόδου βίντεο στον εξοπλισμό τελικού χρήστη (σε αυτήν την περίπτωση έναν φορητό υπολογιστή) για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Λόγω της φύσης του αναλογικού ελέγχου των οχημάτων, το πληκτρολόγιο του φορητού υπολογιστή θα πρέπει να αποφεύγεται ως μέσο ελέγχου με κάθε κόστος, καθώς αποτελεί πολύ "τραχιά" συσκευή εισόδου. Για αυτόν τον λόγο, ένας ασύρματος προσαρμογέας θα χρησιμοποιηθεί για την αναμετάδοση των εντολών ενός παραδοσιακού τηλεχειριστηρίου στο λογισμικό επίγειου σταθμού που εκτελείται στον φορητό υπολογιστή.



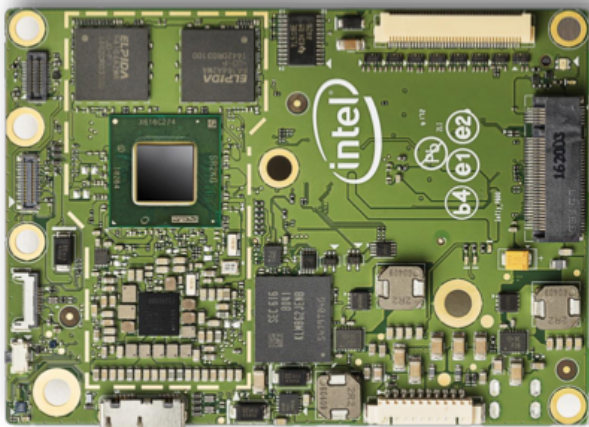
B. Από την Πλευρά του Οχήματος

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη της χρήσης είναι η εφαρμογή από πλευράς οχήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή όλες οι εργασίες που απαιτούν μεγάλο φόρτο εργασίας, όπως κωδικοποίηση βίντεο και ροή, διατηρώντας παράλληλα την έγκαιρη αντίδραση στις ληφθείσες εντολές, είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της. Γι' αυτό το λόγο, οι εμπορικές λύσεις που προσανατολίζονται για ψυχαγωγική χρήση αποδεικνύονται ανίκανες να ανταποκριθούν στις ανάγκες της πλατφόρμας μας. Μετά από εκτεταμένη έρευνα αγοράς, μόνο δύο λύσεις ικανοποίησαν όλες τις απαιτήσεις που θα απαιτούσε η περίπτωση χρήσης μας. Αυτές ήταν είτε μια εξατομικευμένη λύση από άμεσα διαθέσιμα ανταλλακτικά είτε ένα kit έρευνας drone που προσφέρει η Intel. Εν συντομία, η πλατφόρμα Intel Aero παρέχει έναν ισχυρό, αλλά αρκετά ελαφρύ, Single Board Computer (SBC) για κωδικοποίηση και ροή βίντεο, καθώς και συνδυασμένο βάρος απογείωσης 1,9 kgs. Αυτό θα επέτρεπε περισσότερο από αρκετό χώρο για μελλοντικές επεκτάσεις, καθώς πρόσθετες κάμερες ή αισθητήρες θα τοποθετηθούν εύκολα και δεν θα επηρεάζουν ιδιαίτερα τον ονομαστικό χρόνο πτήσης των 20 λεπτών. Τέλος, το kit συνοδεύεται από τον ελεγκτή πτήσης της Intel, που συνδέεται μέσω μιας σειριακής θύρας με τον συνοδευτικό υπολογιστή.



C. Intel Aero Compute Board

Το Intel® Aero Compute Board είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο, μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) kit που τροφοδοτείται από έναν τετραπύρηνو επεξεργαστή Intel® Atom™ και απευθύνεται σε προγραμματιστές και ερευνητές μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Διαθέτει άφθονες δυνατότητες αποθήκευσης, 802.11ac Wi-Fi, υποστήριξη για πολλές κάμερες, συμπεριλαμβανομένης της κάμερας Intel RealSense R200, βιομηχανικών προδιαγραφών διεπαφών και επαναδιαμορφώσιμων εισόδων / εξόδων για τη διευκόλυνση της σύνδεσης σε μια ευρεία ποικιλία υποσυστημάτων υλικού drone. Η υπολογιστική κάρτα διατείνεται με το Yocto Project ανοιχτού κώδικα για ενσωματωμένα συστήματα Linux και προσφέρει δείγματα εφαρμογών και API για διασυνδέσεις πτήσης και όρασης, μειώνοντας τα εμπόδια για προγραμματιστές εξελιγμένων εφαρμογών drone. Για τον λόγο του ότι αυτή η πλατφόρμα ανάπτυξης προορίζεται να τροποποιηθεί από προγραμματιστές σύμφωνα με την επαγγελματική τους κρίση, η Intel δεν έχει καθορίσει περιορισμούς λειτουργίας για το kit όπως έχει διαμορφωθεί από το εργοστάσιο.



Για τη δική μας περίπτωση χρήσης, αφιερώθηκε μια τεράστια προσπάθεια για την κατάλληλη διαμόρφωση υλικού και λογισμικού ώστε να μην διακυβεύεται η αξιοπιστία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να εγκατασταθεί καμία άλλη έκδοση του Ubuntu Linux 16.04.3, για τον μοναδικό λόγο ότι το σύστημα θα σταματήσει να εκκινεί πλήρως. Τυχόν ενημερώσεις θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστάθειες, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών ενημερώσεων ασφαλείας. Για το λόγο αυτό, η στοιβή λογισμικού θεωρείται εξαιρετικά αναγκαία όσον αφορά την ενημέρωση με τις τρέχουσες διανομές Linux και δεν πρέπει να λειτουργεί σε υποδομές που εκτελούνται στον ιστότοπο και προορίζεται μόνο για σκοπούς επίδειξης.

Αντιμετωπίζοντας μια επιλογή μεταξύ των δύο διανομών Linux που είναι διαθέσιμες για την πλατφόρμα, δηλαδή ενός προεγκατεστημένου Yocto Project που παρέχεται από την Intel με τα απαραίτητα πακέτα για συμβατικές εφαρμογές ή την έκδοση του Ubuntu 16.04 για επιτραπέζιους υπολογιστές, η ευελιξία ήταν καθοριστικός παράγοντας. Αν και είναι πιο ελαφρύ και ειδικό για τη χρήση, η Yocto δεν συνοδεύεται από διαχειριστή προγραμμάτων, με τη μόνη επιλογή να είναι η εκ νέου συλλογή της εικόνας του συστήματος χρησιμο-

ποιώντας τις λεγόμενες "συνταγές", κάτι που θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο και με ποικίλα αποτελέσματα. Για αυτόν τον λόγο, επιλέξαμε την εμπορικά διαθέσιμη διανομή Ubuntu, δίνοντας επιπλέον προσοχή ώστε να μην αποκλίνουμε σε μεγάλο βαθμό από τη βασική διαμόρφωση, εκτός από τα απαραίτητα προγράμματα για τη χρήση μας.

D. Ελεγκτής Πτήσης

Αποτελούμενος από μια πλακέτα αυτόματου πιλότου STM32F427V είναι υπεύθυνη για τη φιλοξενία του λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου (RTOS), στο οποίο λειτουργεί το Autopilot Software Suite. Ο ελεγκτής πτήσης αποτελείται επίσης από μια ποικιλία αισθητήρων που είναι υπεύθυνοι για τις ζωτικές λειτουργίες του οχήματος, όπως ένα μαγνητόμετρο και μια πυξίδα, μαζί με μια πληθώρα συνδεσιμότητας για πρόσθετες μονάδες ειδικής χρήσης. Αυτό το συγκεκριμένο πρόγραμμα έρχεται προεγκατεστημένο στον προαναφερόμενο συνδυαστικό υπολογιστή, συνδεδεμένο μέσω ενός ειδικού συνδέσμου. Αυτό εγείρει ορισμένα ερωτήματα σχετικά με τη δυνατότητα συντήρησης της πλατφόρμας, καθώς τα ανταλλακτικά δεν είναι πλέον διαθέσιμα, αλλά ένας εξωτερικός ελεγκτής πτήσης μετά την αγορά μπορεί πάντα να συνδεθεί μέσω σύνδεσης USB.

Όσον αφορά το αυτόματο πιλότο, οι δύο πιο δημοφιλείς στοιβές εξετάστηκαν για αυτήν την υλοποίηση, δηλαδή το PX4 και το Ardupilot, με το πρώτο να είναι η ύστατη επιλογή. Το PX4 αποτελείται από δύο βασικά στρώματα: τη στοιβή πτήσης που είναι ένα σύστημα εκτίμησης και ελέγχου πτήσης, υπεύθυνο για τις βασικές λειτουργίες οποιουδήποτε αυτόνομου οχήματος, όπως η επίγνωση ισορροπίας και θέσης και το μεσαίο λογισμικό, το οποίο είναι ένα γενικό στρώμα ρομποτικής που μπορεί να υποστηρίξει κάθε τύπο αυτόνομο ρομπότ που αποτελείται κυρίως από προγράμματα οδήγησης συσκευών για ενσωματωμένους αισθητήρες και επικοινωνία με τον εξωτερικό κόσμο (συνδυαστικός υπολογιστής, σταθμοί ελέγχου εδάφους κλπ.).

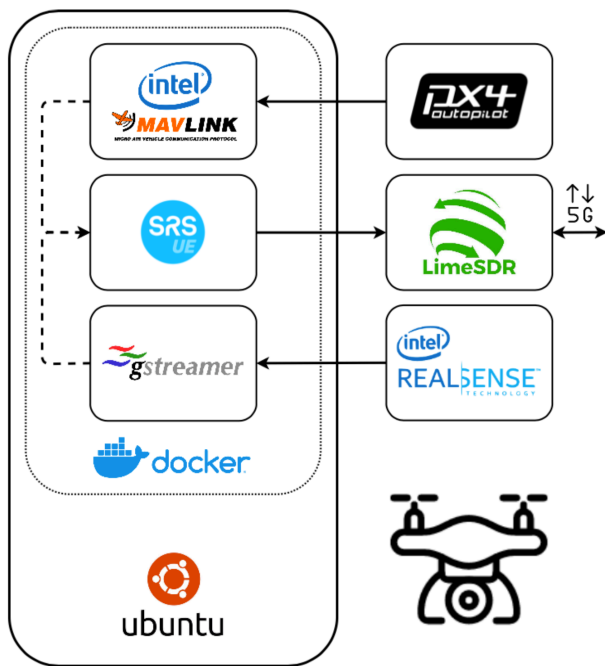
E. Κάμερες

Τοποθετημένο στην μπροστινή πλευρά του αεροσκάφους, η μονάδα Intel RealSense R200 είναι ένα ενσωματωμένο σύστημα απεικόνισης 3D stereovision μεγάλης εμβέλειας που εφαρμόζει μια ποικιλία δυνατοτήτων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανάλογα. Πιο αναλυτικά, μπορεί να παρέχει ροές βίντεο χρώματος, βάθους και υπέρυθρων. Οι ροές βίντεο βάθους είναι σαν έγχρωμες ροές βίντεο, εκτός από το ότι κάθε εικονοστοιχείο έχει τιμή που αντιπροσωπεύει την απόσταση μακριά από την κάμερα αντί για πληροφορίες χρώματος. Αποτελείται από ένα σύστημα προβολής υπέρυθρων λέιζερ, δύο υπέρυθρους και πλήρεις αισθητήρες έγχρωμης απεικόνισης HD. Η ροή βίντεο βάθους δημιουργείται με τεχνολογία στερεοφωνικής όρασης που υποστηρίζεται από τον προβολέα υπέρυθρων λέιζερ και τους δύο αισθητήρες απεικόνισης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τα χρωματικά δεδομένα παρέχονται από τον αισθητήρα έγχρωμης απεικόνισης πλήρους HD.



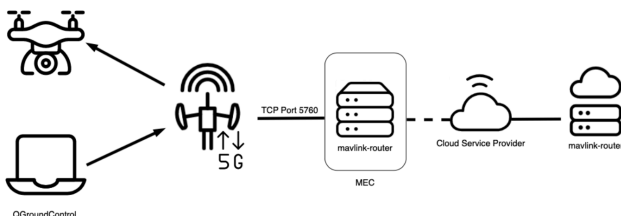
Λόγω της πολυπλοκότητας μιας τέτοιας συσκευής, πρέπει να καταβληθεί πρόσθετη προσπάθεια για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία κατά τη διάρκεια του σεναρίου περίπτωσης χρήσης. Αρχικά, πρέπει να εκκινηθεί ένας προσαρμοσμένος πυρήνας για να αναγνωριστούν κατάλληλα τα διάφορα modules της κάμερας. Στη συνέχεια, ο παλιός κλάδος του δημόσιου χώρου αποθήκευσης RealSense R200 πρέπει να διαμορφωθεί στο λειτουργικό σύστημα Ubuntu 16.04.3, όπου μετά την επιτυχή προετοιμασία, θα πρέπει να αναγρά-

φονται τρεις ξεχωριστές συσκευές βίντεο..



F. MAVLink-Router

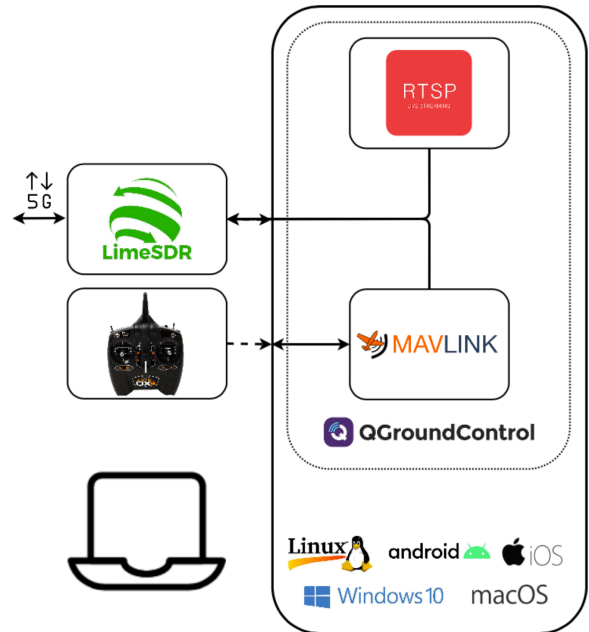
Το MAVLink είναι μια δημοφιλής εφαρμογή για την επικοινωνία μηνυμάτων drone, λειτουργώντας ως διαπαφή για ελεγκτές πτήσεων. Χρησιμοποιείται κυρίως για σταθμούς ελέγχου εδάφους (GCS) όπως το QGroundControl και το Mission Planner, κυρίως για τη σύνδεση εντολών και ελέγχου. Είναι ένα πρωτόκολλο δυαδικής τηλεμετρίας σχεδιασμένο για συστήματα περιορισμένων πόρων και συνδέσμους περιορισμένου εύρους ζώνης. Η εφαρμογή χαμηλού επιπέδου αυτού του πρωτοκόλλου επιτρέπει την αποστολή πακέτων μέσω UDP, TCP και σειριακών διεπαφών με την ίδια ακριβώς μορφή μηνύματος. Τα μηνύματα μπορούν αντιστοίχως να προωθηθούν σε μία ή πολλές συνδέσεις ταυτόχρονα. Οι περισσότερες υπηρεσίες χρησιμοποιούν το μοτίβο πελάτη-διακομιστή, έτσι ώστε το GCS (πελάτης) να ξεκινά ένα αίτημα και το όχημα (διακομιστής) να ανταποκρίνεται με τα δεδομένα. Υπάρχουν πολλές υπάρχουσες λύσεις που παρέχουν δυνατότητα δρομολόγησης δικτύου πακέτων MAVLINK, αλλά το προαναφερθέν MAVProxy, γραμμένο σε Python είναι σχετικά αργής απόδοσης, επομένως ακατάλληλο για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Προς το παρόν, παράλληλα με την εμπορική κυκλοφορία του Intel Aero, η εταιρεία κυκλοφόρησε μια πληθώρα υποστηρικτικών εφαρμογών, μία από τις οποίες είναι mavlink-router, με την εφαρμογή της να φαίνεται πιο κατάλληλη για σενάρια χαμηλού χρόνου καθυστέρησης.



Το Mavlink-router είναι ένα έργο ανοιχτού κώδικα της Intel που δρομολογεί τις ροές MAVLink σε συγκεκριμένα τελικά σημεία, που υλοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο Intel Aero για να χειριστούν τις επικοινωνίες με τον συνοδευτικό υπολογιστή. Εκτός τοπικών συνδέσεων, ο δρομολογητής mavlink έχει τη δυνατότητα να δρομολογεί ροές MAVLink μέσω δικτύου. Αυτό μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα είτε μέσω ενός αρχείου διαμόρφωσης.

G. Intel Camera Streaming Daemon

Το πρόγραμμα ροής της κάμερας εγκαθίσταται με σύστημα αερο από προεπιλογή. Είναι υπεύθυνη για τον εντοπισμό εγκατεστημένων συσκευών κάμερας και την πρόταση τροφοδοσιών RTSP. Δεν απαιτείται περαιτέρω χειροκίνητη διαμόρφωση. Η κάμερα θα μεταδίδει ροές βίντεο μέσω του δικτύου με RTSP, ένα τυπικό πρωτόκολλο. Το RTSP βίντεο μπορεί να ληφθεί από το QGroundControl και από τυπικά προγράμματα αναπαραγωγής βίντεο στις περισσότερες πλατφόρμες.



H. QGroundControl

Το QGroundControl παρέχει πλήρη έλεγχο πτήσης και ρύθμιση οχήματος για οχήματα με κινητήρα PX4 ή ArduPilot. Οι «μικροσυσκευές» του MAVLink ορίζουν πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου που μπορούν να υιοθετήσουν τα συστήματα MAVLink προκειμένου να λειτουργούν καλύτερα και χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή πολλών τύπων δεδομένων, όπως: παράμετροι, αποστολές, τροχιές, εικόνες και άλλα αρχεία.

Από προεπιλογή, το QGC επικοινωνεί απευθείας με το Aero όταν είναι συνδεδεμένο στο ίδιο υποδίκτυο. Ωστόσο, όταν το drone είναι σε κυψελοειδή σύνδεση, μια άμεση σύνδεση δεν είναι ασήμαντη, καθώς τόσο το drone όσο και ο υπολογιστής μπορούν να βρίσκονται πίσω από πολλαπλά επίπεδα NAT/τειχών προστασίας. Στις επιλογές που περιγράφονται παρακάτω, ένας διακομιστής cloud χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ του drone και του υπολογιστή. Εναλλακτικά, το μελλοντικό MEC του gNodeB θα ήταν ο πρωταρχικός υποψήφιος για τη φιλοξενία των εν λόγω παρουσιών για πολύ μειωμένη καθυστέρηση.

Στο Intel Aero Ready to Fly Drone (γνωστός και ως Aero RTF), ο δρομολογητής mavlink εκτελείται τοπικά για τον χειρισμό πακέτων δρομολόγησης μεταξύ του ελεγκτή πτήσης και διαφορετικών τελικών σημείων IP. Αλλά μπορούμε επίσης να αναπτύξουμε μια άλλη παρουσία του mavlink-router στο cloud για να χειριστούμε τη δρομολόγηση μόνο της κίνησης IP. Τόσο το drone όσο και το QGC συνδέονται στη συνέχεια σε αυτό και δημιουργείται επικοινωνία. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης αυτής της μεθόδου είναι ότι τα αρχεία καταγραφής πτήσεων αποθηκεύονται αυτόματα στο cloud, επομένως ένα αντίγραφο των αρχείων καταγραφής μπορεί πάντα να ανακτηθεί. Αυτή η μέθοδος κλιμακώνεται επίσης καλά με μία προς πολλές περιπτώσεις χρήσης.