



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Μεταπτυχιακή Εργασία

Αρχιτεκτονικές και σχεδιασμός για το μελλοντικό Διαδίκτυο

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή : Τσιλιβίτης Διονύσης

ΑΜ : ΠΜΣ2009031

Επιβλέπων Βασιλάκης Κωνσταντίνος

Τρίπολη, Απρίλιος 2013

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας
Υπολογιστών της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα
εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετώνται μερικές περιοχές έρευνας πάνω στις αρχιτεκτονικές του μελλοντικού Διαδικτύου.

Πιο συγκεκριμένα προσδιορίζονται οι θεμελιώδεις περιορισμοί του Διαδικτύου καθώς και οι προκλήσεις και οι δυνατότητες που διαφαίνονται για το μέλλον αυτού. Παρέχετε επίσης μία επισκόπηση επεκτάσεων, βελτιώσεων και επανασχεδιασμού των τωρινών πρωτοκόλλων του Διαδικτύου που θα μπορούσαν να επιλύσουν αρκετά θέματα όπως είναι η επεκτασιμότητα και η ευελιξία του κινητού διαδικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο, αναδεικνύεται η καταλληλότητα και η εφαρμοσιμότητα των επίπεδων και υπερ-επίπεδων αρχιτεκτονικών καθώς επίσης και τα πλεονεκτήματα που επιτυγχάνονται με την υιοθέτηση μιας γνωσιακής αρχιτεκτονικής για το μέλλον του Διαδικτύου.

Abstract

This thesis studies some of the research areas upon the Future Internet architectures. More specifically identifies the fundamental limitations of the Internet and the challenges and opportunities emerging for its future. It also provides an overview of the extensions, improvements and redesign of current Internet protocols that could solve many issues such as scalability and flexibility of the mobile Internet. In this context, it is highlighted the suitability and applicability of the flat and ultra-flat architectures as well as the benefits achieved by adopting a cognitive architecture for the future of Internet.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Περιεχόμενα	5
Ευρετήριο σχημάτων	8
1. Εισαγωγή	9
1.1 Τρέχον Διαδίκτυο	9
2. Ζητήματα, Περιορισμοί, Προκλήσεις και Στόχοι για το μελλοντικό Διαδίκτυο.....	14
2.1 Προκλήσεις του Μελλοντικού Διαδικτύου	14
2.1.1 Εισαγωγή.....	14
2.1.2 Κοινωνικές και οικονομικές ερευνητικές προκλήσεις του μελλοντικού Διαδικτύου	16
2.1.3 Αξιοπιστία στο μελλοντικό Διαδίκτυο και ερευνητικές προκλήσεις ταυτοποίησης.....	16
2.1.4 Ερευνητικές και πειραματικές προκλήσεις στο μελλοντικό Διαδίκτυο.....	18
2.1.5 Προκλήσεις που αφορούν τη διαχείριση του μελλοντικού Διαδικτύου και τις μελλοντικές διαδικτυακές αρχιτεκτονικές με επίγνωση των υπηρεσιών.....	18
2.1.6 Ερευνητικές προκλήσεις μελλοντικών δικτύων διανομής περιεχομένου	20
2.1.7 Ερευνητικές προκλήσεις ενοποίησης φυσικού κόσμου και Διαδικτύου	21
2.2 Περιορισμοί του μελλοντικού διαδικτύου	22
2.2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2.2 Προσέγγιση Ανάλυσης.....	24
2.2.3 Περιορισμοί επεξεργασίας και χειρισμού	26
2.2.4 Περιορισμοί αποθήκευσης.....	27
2.2.5 Περιορισμοί Μεταφοράς.....	29

2.2.6 Περιορισμοί Ελέγχου	30
2.3 Σχεδιαστικοί στόχοι	33
2.4. Συμπέρασμα	37
3. Επίπεδες Αρχιτεκτονικές: Προς επεκτάσιμη κινητικότητα του μελλοντικού Διαδικτύου	38
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Χαρακτηριστικά εξέλιξης της κίνησης και προβλήματα επεκτασιμότητας του κινητού Διαδικτύου.....	40
3.2.1 Χαρακτηριστικά εξέλιξης της κίνησης του κινητού Διαδικτύου....	40
3.2.2 Προβλήματα επεκτασιμότητας του κινητού Διαδικτύου.....	44
3.3 Εξέλιξη των επιπέδων αρχιτεκτονικών.....	46
3.3.1 Εξέλιξη της Αρχιτεκτονικής των κινητών δικτύων 3GPP.....	46
3.3.2 Υπέρ-επίπεδη (Ultra Flat) Αρχιτεκτονική.....	50
3.4 Κατανεμημένη Διαχείριση Κινητικότητας στις επίπεδες Αρχιτεκτονικές	53
3.4.1 Κίνητρα για Λειτουργίες κατανεμημένης κινητικότητας.....	53
3.4.2 Σενάρια εφαρμογών για συστήματα κατανεμημένης διαχείρισης κινητικότητας (DMM Schemes).....	56
3.4.3 Μέθοδοι κατανομής των λειτουργιών κινητικότητας	59
3.5 Συμπέρασμα	61
4. Μια γνωσιακή Αρχιτεκτονική για το μελλοντικό Διαδίκτυο	66
4.1 Εισαγωγή.....	66
4.2 Η έννοια της Αρχιτεκτονικής.....	68
4.3 Γνωσιακό πλαίσιο αρχιτεκτονικής του μελλοντικού Διαδικτύου	75
4.3.1 Πλεονεκτήματα που αφορούν την αποδοτικότητα	80
4.3.2.....	81
Πλεονεκτήματα που αφορούν την ευελιξία	81
4.4 Πειραματικά Αποτελέσματα	83
5 Συμπεράσματα.....	87

Βιβλιογραφία..... 88

Ευρετήριο σχημάτων

Εικόνα 1. Τομείς έρευνας του μελλοντικού Διαδικτύου.....	15
Εικόνα 2. Η εξέλιξη του τομέα μεταγωγής πακέτων της 3GPP αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένου του επιπέδου χρήστη στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης και δίκτυα κορμού.....	47
Εικόνα 3. Η υπερ-επίπεδη (UFA) αρχιτεκτονική με έλεγχο κινητικότητας μέσω πρωτοκόλλων HIP και PMIP	51
Εικόνα 4. Προτεινόμενο γνωστικό πλαίσιο αρχιτεκτονικής για το μελλοντικό Διαδίκτυο....	73
Εικόνα 6. Δοκιμαστικό σενάριο.....	85

1. Εισαγωγή

1.1 Τρέχον Διαδίκτυο

Το σημερινό Διαδίκτυο που σχεδιάστηκε πριν από 40 χρόνια είναι σήμερα η πιο σημαντική υποδομή πληροφοριών, υπηρεσιών και δικτύωσης που παρέχει τους μηχανισμούς για την ψηφιακή κοινωνία για να λειτουργεί ως μία ενιαία οντότητα. Η υποδομή αυτή εξελίσσεται ραγδαία με τη μετάβαση από το «διαμοιρασμό» (sharing) στο Web 1.0 (Web) στη «συμμετοχή» (contributing) στο Web 2.0 (περιεχόμενο που δημιουργείται από τον χρήστη) στη "συν - δημιουργία" (co-creating) στο Web 3.0 (συνεργατική παραγωγή, σημασιολογικός ιστός) [1].

Το σημερινό Διαδίκτυο έχει βασιστεί σε μια απλή προϋπόθεση αρχιτεκτονικής, ότι μια απλή υπηρεσία δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα καθολικό μέσο για τη διασύνδεση ευφυών τελικών συστημάτων. Το τρέχον Διαδίκτυο είναι βασισμένο στο επίπεδο δικτύου και είναι ικανό να επιλέγει δυναμικά ένα μονοπάτι από την πηγή προορισμού του πακέτου προς τον τελικό του προορισμό, χωρίς εγγυήσεις ότι τα πακέτα παραδόθηκαν ή εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας, Η επιτυχία του μοντέλου των έξυπνων άκρων, έναντι της απλώς διεκπεραιωτικής υποδομής, έχει χρησιμεύσει στο να διατηρηθεί η επιθυμία για απλότητα. Η διατήρηση της απλότητας στο δίκτυο έχει ωθήσει την όποια πολυπλοκότητα στις συσκευές που συνδέονται στα άκρα του (endpoints), και αυτό το χαρακτηριστικό επέτρεψε στο Διαδίκτυο να φθάσει σε ιδιαίτερα υψηλούς αριθμούς όσον αφορά τις διασυνδεδεμένες συσκευές. Ωστόσο, ενώ η κλίμακα αυτή δεν έχει ακόμη φθάσει στα όριά της, τόσο η λειτουργικότητα όσο και το μέγεθος του διαδικτύου δεν αυξάνονται πλέον με τους ίδιους ρυθμούς. Είναι πλέον κοινή πεποίθηση ότι το τρέχον Διαδίκτυο θα φτάσει σύντομα τα όρια της αρχιτεκτονικής του ικανότητας και τα

όρια της δυναμικότητάς του (δηλαδή σε θέματα διευθυνσιοδότησης, προσβασιμότητας, ικανοποίηση απαιτήσεων σχετικά με την ποιότητα των υπηρεσιών, κ.λπ.).

Παρά το γεγονός ότι το σημερινό Διαδίκτυο, ως ένα ενιαίο και καθολικό μέσο για την επικοινωνία και τον υπολογισμό, υπήρξε εξαιρετικά επιτυχημένο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά άλυτα προβλήματα και προκλήσεις, αρκετές από τις οποίες έχουν ως αίτιο θεμελιώδεις αρχές της λειτουργίας του διαδικτύου. Πολλές από τις πτυχές αυτές δεν θα μπορούσαν να είχαν προβλεφθεί πριν από 40 χρόνια, όταν τα πρώτα τμήματα του Διαδικτύου δημιουργούνταν, αλλά αυτά πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα. Η ίδια η επιτυχία του Διαδικτύου δημιουργεί τώρα εμπόδια για μελλοντική καινοτομία της τεχνολογίας δικτύωσης, που βρίσκεται στον πυρήνα του Διαδικτύου, και των υπηρεσιών που την χρησιμοποιούν. Επιπλέον, η «δυσκαμψία» του Διαδικτύου κάνει την εισαγωγή και ανάπτυξη νέων δικτυακών τεχνολογιών και υπηρεσιών δύσκολη και δαπανηρή.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα ανωτέρω, απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές που θα μπορούν να καλύψουν τις ερευνητικές και κοινωνικές προκλήσεις και ευκαιρίες της Κοινωνίας της Πληροφορίας. Επιπρόσθετες αλλαγές σε ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές οι οποίες βελτιώνουν το τωρινό Διαδίκτυο είναι επίσης σημαντικές. Τέτοιες νέες αρχιτεκτονικές και οι βελτιώσεις τους θα πρέπει να βασίζονται σε:

- Αναδυόμενες ελπιδοφόρες έννοιες που θα εκτείνονται πέρα από τα βασικά πρωτόκολλα, τις συνιστώσες, τους μηχανισμούς και τις απαιτήσεις που αφορούν τη δικτύωση κορμού (core networking) και την παροχής υπηρεσιών (servicing) στο διαδίκτυο.
- Μοντέλα ολοκλήρωσης που θα επιτρέπουν καλύτερη ενσωμάτωση και χρήση των εκφάνσεων (facets) του

διαδικτύου που αφορούν στην επικοινωνία, στην πληροφορία, στους πόρους, στο περιεχόμενο, στις υπηρεσίες διαδικτύου και στο διαδίκτυο των πραγμάτων (internet of things).

- Δομές και υποδομές για τον έλεγχο, εγκατάσταση, διαμόρφωση, ενσωμάτωση, σύνθεση, οργάνωση και συνεργασία.
- Ενοποίηση και μεγαλύτερο βαθμό ολοκλήρωσης της επικοινωνίας, της αποθήκευσης, του περιεχομένου και του υπολογισμού ως μέσα, κάτι που θα επιτρέψει να δίνεται λιγότερη προσοχή σε θέματα χωρητικότητας, με αντίστοιχη αύξηση της εστίασης σε θέματα παροχής αυξημένων και πιο ευέλικτων δυνατοτήτων και ελέγχου λειτουργίας.
- Αυξημένο βαθμό εικονικοποίησης (virtualization) για όλα τα συστήματα: εφαρμογές, υπηρεσίες, δίκτυα, αποθήκευση, περιεχόμενο, πόρους και έξυπνα αντικείμενα.
- Συγχώνευση ποικίλων απαιτήσεων σχεδιασμού, οι οποίες περιλαμβάνουν διαφάνεια, οικονομική βιωσιμότητα, δικαιοσύνη, επεκτασιμότητα, διαχειρισιμότητα, εξελιξιμότητα, αυτονομία, κινητικότητα, πρόσβαση από παντού, χρήση και ασφάλεια συμπεριλαμβανομένων της αξιοπιστίας και της ιδιωτικότητας.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει 5 κεφάλαια που καλύπτουν μερικές περιοχές έρευνας πάνω στις αρχιτεκτονικές του μελλοντικού Διαδικτύου.

Το 2^ο κεφάλαιο προσδιορίζει τους θεμελιώδεις περιορισμούς του Διαδικτύου οι οποίοι δεν είναι μεμονωμένοι αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους. Η αύξηση του εύρους ζώνης θα συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση ή τον περιορισμό ορισμένων από αυτά τα προβλήματα, αλλά δεν θα αντιμετώπιζε την αιτία τους. Παράλληλα, αρκετά προβλήματα δεν θα επιλύονταν ούτε και θα αμβλύνονταν με την αύξηση του εύρους ζώνης.

Η μετάδοση μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση καλύτερων μεθόδων χειρισμού, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων, ενώ η συνολική απόδοση του Διαδικτύου θα βελτιωνόταν με λειτουργίες ελέγχου, αυτοδιαχείρισης, αυτοδιάγνωσης, κ.λπ. Ως συνολικό συμπέρασμα αυτό το κεφάλαιο παρέχει μία επισκόπηση επεκτάσεων, βελτιώσεων και επανασχεδιασμού των τωρινών πρωτοκόλλων του Διαδικτύου που θα μπορούσαν να επιλύσουν αρκετά θέματα. Ωστόσο η αντιμετώπιση θεμελιωδών περιορισμών του Διαδικτύου είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Απαιτούνται βελτιώσεις σε κάθε διάσταση σε συνδυασμό με μια ολιστική προσέγγιση στο πρόβλημα.

Το 3^ο κεφάλαιο περιέχει μια περιεκτική επισκόπηση και ανάλυση των προβλημάτων επεκτασιμότητας του κινητού Διαδικτύου επί των ημερών μας και να δείξει πώς η έννοια των επίπεδων και υπερ-επίπεδων αρχιτεκτονικών προκύπτει λόγω της καταλληλότητας και εφαρμοσιμότητας τους για το μελλοντικό Διαδίκτυο.

Το 4^ο κεφάλαιο προτείνει ένα νέο γνωσιακό πλαίσιο σαν μια αρχιτεκτονική αναφοράς το οποίο βασίζεται στους επονομαζόμενους γνωσιακούς διαχειριστές. Ο στόχος της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι διττός. Από τη μία πλευρά, στοχεύει στην επίτευξη πλήρους διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων που αποτελούν το περιβάλλον τεχνολογίας πληροφορίας και επικοινωνιών μέσω της εισαγωγής παραγόντων που καθιστούν δυνατή τη σημασιολογική εικονικοποίηση (semantic virtualization enablers). Από την άλλη πλευρά, στοχεύει στην επίτευξη συνδυαστικών βελτιστοποιήσεων, τόσο μεταξύ διακριτών δικτύων όσο και μεταξύ διαφορετικών επιπέδων μέσω ενός συνόλου γνωσιακών παραγόντων που καθιστούν δυνατή τη λήψη συντονισμένων και συνεκτικών αποφάσεων, σύμφωνα

με μια πλήρως γνωσιακή προσέγγιση κάνοντας χρήση των πληροφοριών που προέρχονται από τα επίπεδα μεταφοράς και υπηρεσιών/περιεχομένου όλων των δικτύων. Προκαταρκτικές δοκιμαστικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε οικιακό περιβάλλον, επιβεβαιώνουν τις δυνατότητες της προτεινόμενης λύσης.

Τέλος, το κεφάλαιο 5 συνοψίζει τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία.

2. Ζητήματα, Περιορισμοί, Προκλήσεις και Στόχοι για το μελλοντικό Διαδίκτυο

2.1 Προκλήσεις του Μελλοντικού Διαδικτύου

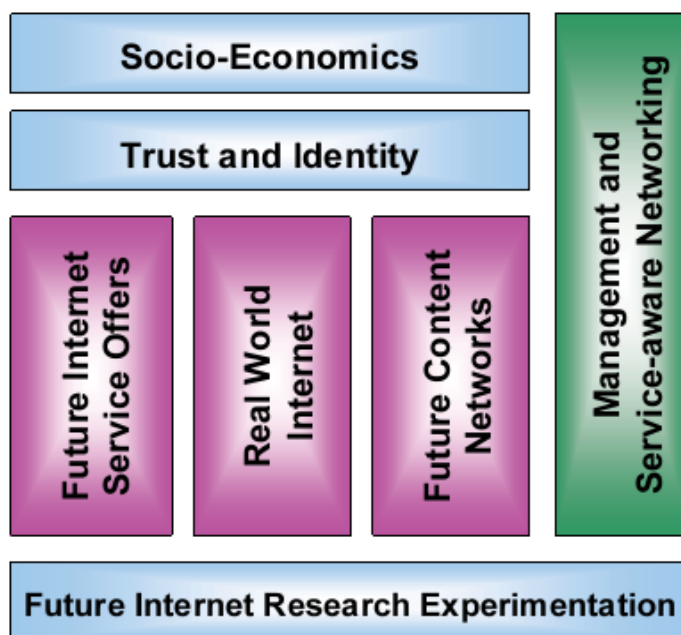
2.1.1 Εισαγωγή

Είμαστε αντιμέτωποι με ένα Διαδίκτυο που είναι καλό στην παράδοση πακέτων, αλλά εμφανίζει μια σχετική ακαμψία σε επίπεδο δικτύου και υπηρεσιών και μια έλλειψη εγγενών διευκολύνσεων για να υποστηρίξει οποιαδήποτε μη-βασική λειτουργία. Τα χαρακτηριστικά, τα οποία θεωρείται ότι απουσιάζουν, είναι τα εξής [2]:

- Εγγενής λειτουργικότητα διαχείρισης του δικτύου, ειδικά η λειτουργικότητα αυτοδιαχείρισης (self-management functionality).
- Διευκολύνσεις (facilities) για την προσθήκη νέων λειτουργιών, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας για την ενεργοποίηση (i) νέων υπηρεσιών κατ' απαίτηση (on-demand), (ii) λειτουργικότητας του δικτύου και (iii) νέων πρωτοκόλλων.
- Διευκολύνσεις για την παροχή, διαχείριση και ανάπτυξη των υπηρεσιών σε μεγάλη κλίμακα. Επίσης, υποστήριξη για μια υψηλού επιπέδου ενοποίηση μεταξύ των υπηρεσιών και των δικτύων.
- Διευκολύνσεις για τον συντονισμό της ασφάλειας, της αξιοπιστίας, της αντοχής, της κινητικότητας, του περιεχομένου, της υποστήριξης υπηρεσιών και της διαχείρισης, τόσο για τους πόρους επικοινωνίας όσο και τους πόρους των υπηρεσιών.
- Κινητικότητα των δικτύων, υπηρεσιών και συσκευών.
- Διευκολύνσεις για την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών (QoS) και Συμφωνίες Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreements - SLAs).

- Διαχείριση εμπιστοσύνης, ασφάλεια, απόρρητο και μηχανισμοί προστασίας καταναλωμένων δεδομένων.
- Ένα επαρκές σύστημα διευθυνσιοδότησης, όπου η ταυτότητα και η θέση δεν είναι ενσωματωμένα στην ίδια διεύθυνση.
- Διευκολύνσεις αλληλεπίδρασης με τον φυσικό κόσμο και απρόσκοπτη χρήση της περιβάλλουσας πληροφορίας για την ενίσχυση και βελτίωση των υφιστάμενων υπηρεσιών και για τη δημιουργία νέων.
- Κοινωνικο-οικονομικές πτυχές, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για την παροχή κατάλληλων κινήτρων, βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων, νομικών και κανονιστικών θεμάτων, καθώς και ανάγκη για ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής.
- Επίγνωση θεμάτων ενέργειας.

Αυτές οι προκλήσεις και οι δυνατότητες που διαφαίνονται για το μέλλον του Διαδικτύου αντιμετωπίζονται από αρκετούς τομείς έρευνας, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1. Στις επόμενες ενότητες θα αναπτύξουμε τα θέματα αυτά.



Εικόνα 1. Τομείς έρευνας του μελλοντικού Διαδικτύου

2.1.2 Κοινωνικές και οικονομικές ερευνητικές προκλήσεις του μελλοντικού Διαδικτύου

Ριζικές τεχνολογικές καινοτομίες, όπως αυτές που οραματίζεται το Σώμα του μελλοντικού Διαδικτύου (Future Internet Assembly) μπορούν μόνο να αναπτυχθούν με επιτυχία, αν λαμβάνονται υπόψη και τα μη τεχνικά ζητήματα αλλά και το επιχειρησιακό δυναμικό. Ως εκ τούτου, η εξέταση των κοινωνικο-οικονομικών πτυχών του Μελλοντικού Διαδικτύου είναι καθοριστικής σημασίας. Η μελέτη των Κοινωνικο-οικονομικών ζητημάτων είναι ένας διεπιστημονικός τομέας που διατρέχει όλους τους τομείς του Μελλοντικού Διαδικτύου, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων, υπηρεσιών και του περιεχομένου. Οι ερευνητικές προκλήσεις που αντιμετωπίζονται στο πλαίσιο αυτό είναι πολλαπλές. Θα πρέπει να σχεδιαστεί η κατάλληλη τιμολόγηση και επιχειρηματικά μοντέλα τα οποία θα παρέχουν τα κατάλληλα κίνητρα για τους διαχειριστές δικτύων, τους παρόχους υπηρεσιών, και τους τελικούς χρήστες.

Επιπλέον, νομικά και κανονιστικά θέματα, όπως η ουδετερότητα των δικτύων, η προστασία της ιδιωτικής ζωής, και τα ψηφιακά δικαιώματα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Τέλος, στις σημαντικές προκλήσεις περιλαμβάνονται η αύξηση του βαθμού της κινητικότητας στην κοινωνική ζωή και η ανάγκη για ασφάλεια.

2.1.3 Αξιοπιστία στο μελλοντικό Διαδίκτυο και ερευνητικές προκλήσεις ταυτοποίησης

Η απαίτηση για ασφάλεια, εδραίωση αξιοπιστίας και προστασία της ιδιωτικής ζωής στο Διαδίκτυο έχει αυξηθεί κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο έχουν αλλάξει τα σενάρια χρήσης. Αν και τα πρωτόκολλα του διαδικτύου είχαν σχεδιαστεί αρχικά για συγκεκριμένου σκοπού επικοινωνία μεταξύ «ειλικρινών» και ισότιμων εταίρων, το Διαδίκτυο αναπτύχθηκε και συνεχίζει να αναπτύσσεται προς μια πλατφόρμα που χρησιμοποιείται από όλους για μια πληθώρα ιδιωτικών και

επαγγελματικών σκοπών, με την «ανοικτότητα» (openness), την σημαντικότητα και την αξία των συναλλαγών που διενεργούνται σε αυτό να δημιουργούν ένα κίνητρο ώστε κακόβουλες οντότητες να ασχοληθούν με αυτό. Ενώ πολλές τεχνολογίες ασφαλείας για το Διαδίκτυο είναι διαθέσιμες, το μελλοντικό Διαδίκτυο επιβάλλει πρόσθετες προκλήσεις για την ασφάλεια και την αξιοπιστία, κυρίως λόγω της διεισδυτικότητας του, της επεκτασιμότητας του, και της διαβίου συμμετοχής των χρηστών του. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τον σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης ταυτοποίησης ικανών να αντιμετωπίσουν δισεκατομμύρια οντοτήτων και τους διαφορετικούς τους ρόλους στο μελλοντικό Διαδίκτυο, την αξιοπιστία και τον έλεγχο των κατανεμημένων εφαρμογών με βάση τις υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω ανοικτών πλατφορμών παροχής υπηρεσιών, καθώς και την ασφαλή και αξιόπιστη αλληλεπίδραση με αντικείμενα και οντότητες του πραγματικού κόσμου μέσω αισθητήρων και μηχανισμών ενεργοποίησης (actuators) δικτυακών υποδομών.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επιτρέπουν τη σύνδεση εφαρμογών λογισμικού και φυσικών αντικειμένων. Αν και αυτό δίνει μια πλήρη γκάμα από συναρπαστικά νέα σενάρια χρήσης στο μελλοντικό διαδίκτυο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, λόγω της ανοικτότητας (openness), της έκθεσης και των περιορισμένων τους πόρων, τα δίκτυα αισθητήρων είναι επιρρεπή σε επιθέσεις. Η ένταξη ενός συστήματος ανίχνευσης εισβολής μαζί με τις δυνατότητες αυτοδιαμόρφωσης θα πρέπει να αντιμετωπίσουν γεγονός ότι οι επιτιθέμενοι μπορεί να εξακολουθούν να είναι σε θέση να ξεπεράσουν την πρώτη γραμμή άμυνας.

Οι ευκαιρίες που το μελλοντικό Διαδίκτυο δημιουργεί για τα άτομα και τις επιχειρήσεις, θα πραγματοποιηθούν μόνο εάν οι χρήστες διατηρούν τον έλεγχο των προσωπικών τους δεδομένων. Η διαχείριση ταυτοποίησης και η προστασία της ιδιωτικής ζωής δεν

είναι μόνο τεχνικό θέμα, αλλά θα πρέπει να λάβει υπόψη νομικούς περιορισμούς.

2.1.4 Ερευνητικές και πειραματικές προκλήσεις στο μελλοντικό Διαδίκτυο

Το Διαδίκτυο καθ' εαυτό ήταν και είναι το μεγαλύτερο εργαστήριο για αναδυόμενες εφαρμογές και υπηρεσίες. Ωστόσο, είναι προφανές ότι δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μια πλατφόρμα δοκιμών για απλά πρωτόκολλα, αρχιτεκτονικές και υπηρεσίες. Η ανάπτυξη ενός ερευνητικού κέντρου (Future Internet Research and Experimentation facility - FIRE) που να σχετίζεται με την έρευνα και τον πειραματισμό στο μελλοντικό Διαδίκτυο θα παρέχει έναν χώρο για εκείνο το είδος της έρευνας που δεν μπορεί να διεξαχθεί σε μια κρίσιμη υποδομή, όπως το σημερινό Διαδίκτυο. Το ερευνητικό αυτό κέντρο δημιουργείται σταδιακά, βασισμένο στη συνεργασία υφιστάμενων δοκιμαστικών πλατφορμών, και θα αναπτύσσεται ανάλογα με τις ερευνητικές ανάγκες που καθορίζονται.

Ταυτόχρονα υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση από τον ακαδημαϊκό χώρο και τη βιομηχανία να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ της μακροπρόθεσμης έρευνας και του πειραματισμού σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω πειραματικής έρευνας, η οποία θα αποτελείται από επαναληπτικούς κύκλους έρευνας, σχεδίασης νέων δικτυακών αρχιτεκτονικών και προτύπων για το μελλοντικό διαδίκτυο, καθώς και πειραματισμού πάνω σε αυτές.

2.1.5 Προκλήσεις που αφορούν τη διαχείριση του μελλοντικού Διαδικτύου και τις μελλοντικές διαδικτυακές αρχιτεκτονικές με επίγνωση των υπηρεσιών

Η έρευνα περιλαμβάνει τη διαχείριση, τη δικτύωση και τη δικτύωση με επίγνωση των υπηρεσιών (service-aware networking), συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών πλατφόρμας υπηρεσιών και

συστημάτων, τα οποία αποτελούν την υποδομή για το μέλλον του διαδικτύου.

Η σημερινή τάση για τα δίκτυα είναι να έχουν γνώση των υπηρεσιών. Η ικανότητα αυτή έχει πολλές πτυχές, συμπεριλαμβανομένης της παράδοσης του περιεχομένου και του κώδικα των υπηρεσιών (service logic), την εκπλήρωση υπηρεσιών σε επίπεδο επιχειρήσεων, όπως η Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS) και οι Συμφωνίες σε επίπεδο Υπηρεσίας (Service Level Agreements - SLAs) και η βελτιστοποίηση των πόρων του δικτύου κατά τη διάρκεια της παροχής υπηρεσιών. Από την άλλη πλευρά, οι υπηρεσίες αποκτούν ολοένα και περισσότερη επίγνωση του δικτύου (network-awareness). Η ικανότητα αυτή σημαίνει ότι οι υπηρεσίες εκτελούνται και υπόκεινται σε διαχείριση μέσα σε περιβάλλοντα εκτέλεσης δικτύου και ότι τόσο οι υπηρεσίες όσο και οι πόροι του δικτύου μπορούν να τύχουν διαχείρισης ομοιόμορφα με έναν ολοκληρωμένο τρόπο. Ο σχεδιασμός των δικτύων και Υπηρεσιών κινείται προς την κατεύθυνση του να περιλαμβάνει υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού, αυτονομίας και αυτοδιαχείρισης.

Το μελλοντικό διαδίκτυο θα κατασκευαστεί έχοντας ως συνιστώσες συνεργατικά δίκτυα με επίγνωση των υπηρεσιών και των δικτύων, τα οποία θα παρέχουν ενσωματωμένες και οργανωμένες ιδιότητες όπως: περιβάλλουσα πληροφορία, αξιοπιστία, αντοχή, κινητικότητα, ασφάλεια, υποστήριξη υπηρεσιών και αυτοδιαχείριση των πόρων επικοινωνίας και των υπηρεσιών. Τέτοιες ιδιότητες υποδεικνύουν μια μετάβαση από ένα διαδίκτυο χωρίς επίγνωση των υπηρεσιών σε ένα νέο διαδίκτυο με επίγνωση των υπηρεσιών και αυτεπίγνωση (self-awareness), όπου η αυτεπίγνωση εξυπηρετεί το σκοπό της επικοινωνίας και του υπολογισμού μέσω ενισχυμένων ενδο-δικτυακών και ενδο-υπηρεσιακών αποφάσεων.

2.1.6 Ερευνητικές προκλήσεις μελλοντικών δικτύων διανομής περιεχομένου

Καθώς το Διαδίκτυο γίνεται όλο και πιο ικανό να μεταφέρει σήματα επικοινωνιών με μεγάλο εύρος ζώνης, με μικρή καθυστέρηση και ενισχυμένη λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσιών (PQoS), η ζήτηση για τρόπους επικοινωνίας με εμπλουτισμένα χαρακτηριστικά και υποστήριξη επικοινωνιών πραγματικού χρόνου θα αυξηθούν. Τα δισδιάστατα και τα πολλαπλών οπτικών βίντεο (multi-viewpoint video) όπως και ο στερεοφωνικός ήχος, θα δώσουν τη θέση τους στα 3D και στερεοσκοπικά βίντεο και στη σύνθεση κυματικού πεδίου (audio-wave field synthesis). Τα τωρινά δίκτυα διανομής περιεχομένου και οι υποδομές επικοινωνιών θα αντικατασταθούν σταδιακά από το μελλοντικό διαδίκτυο διανομής περιεχομένου, το οποίο θα διευκολύνει την απρόσκοπτη από άκρο-σε-άκρο (end-to-end) επικοινωνία πολυμέσων μέσα σε ένα πολύπλοκο συνδυασμό στοιχείων δικτύου, όπως τα προσωπικά δίκτυα μικρής εμβέλειας (personal area networks), δίκτυα περιοχής σώματος (body area networks), τα οικιακά δίκτυα, τα δίκτυα σταθερής πρόσβασης (fixed access networks), τα δίκτυα κινητής πρόσβασης, κ.λπ. Διάφορες προσεγγίσεις είναι ανοιχτές για εξέταση:

- Απρόσκοπτη από άκρο-σε-άκρο επικοινωνία πολυμέσων σε ένα πολύπλοκο συνδυασμό από δίκτυα [3] Ομότιμα (peer-to-peer, P2P), υβριδικά ή πλήρως καταναεμημένα υποδείγματα δικτύωσης για διαχείριση περιεχομένου (survey on P2P overlay streaming clients).
- Κωδικοποίηση και προσαρμογή περιεχομένου για να διευκολυνθούν οι δυνατότητες περιεχομένου (Content adaptation issues in the future internet).

2.1.7 Ερευνητικές προκλήσεις ενοποίησης φυσικού κόσμου και Διαδικτύου

Η ενοποίηση του φυσικού κόσμου και του μελλοντικού Διαδικτύου είναι ένα επίσης σημαντικό ζήτημα. Αισθητήρες, μηχανισμοί ενεργοποίησης (actuators), αντικείμενα με δυνατότητες ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID), και γενικά ετερογενή μηχανήματα δικτύωσης και αντικείμενα καθημερινής χρήσης θα ενσωματωθούν στο μελλοντικό Διαδίκτυο ενοποιώντας τον ψηφιακό και φυσικό κόσμο και καθιστώντας δυνατή μια γκάμα από καινούργιες και βελτιωμένες υπηρεσίες και εφαρμογές Διαδικτύου. Η ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων και μηχανισμών ενεργοποίησης είναι σχετικά διασκορπισμένη και είναι κατασκευασμένα σαν ανεξάρτητες και κλειστές λύσεις. Για την επίτευξη πραγματικής σύμπραξης μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου είναι απαραίτητη η διασύνδεση τέτοιων μεμονωμένων εγκαταστάσεων ώστε να επιτευχθεί η απρόσκοπτη αλληλεπίδραση με τους χρήστες του Διαδικτύου και να τους παρέχεται ενοποιημένη πρόσβαση στις πληροφορίες και υπηρεσίες που αυτά παρέχουν.

Ο σχεδιασμός επεκτάσιμων αρχιτεκτονικών που ενσωματώνουν μηχανισμούς για να επιτρέπουν την εύκολη σύγκλιση και διαλειτουργικότητα ετερογενών δικτύων αισθητήρων και μηχανισμών ενεργοποίησης με το Διαδίκτυο, η παροχή πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες ενεργοποίησης (actuation services) με ένα ενιαίο τρόπο, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα επάρκεια ασφαλιστικών μέτρων, αποτελεσματικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τα νέα πρότυπα κίνησης και κυκλοφορίας καθώς και μηχανισμοί και τα πρωτόκολλα που ασχολούνται με τις συνέπειες της κινητικότητας των δικτύων ακμής (edge networks) είναι μερικές από τις κύριες προκλήσεις του Διαδικτύου φυσικού κόσμου (Real World internet - RWI) (towards an architecture for a real world internet).

2.2 Περιορισμοί του μελλοντικού διαδικτύου

2.2.1 Εισαγωγή

Το Διαδίκτυο έχει εξελιχθεί από μια απλή δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης σε κεντρικούς υπολογιστές και από ένα αργό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ επιστημόνων στο πιο σημαντικό μέσο για ανταλλαγή πληροφοριών και το κυρίαρχο περιβάλλον επικοινωνίας για επιχειρηματικές σχέσεις και κοινωνικές αλληλεπιδράσεις. Δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο για την εύρεση, πρόσβαση και ανταλλαγή πληροφοριών, απολαμβάνοντας επικοινωνίες πολυμέσων, αξιοποιώντας προηγμένες υπηρεσίες λογισμικού, αγοράζοντας και πουλώντας, διατηρώντας επαφή με την οικογένεια και τους φίλους κ.ο.κ. Η επιτυχία του Διαδικτύου έχει δημιουργήσει ακόμα υψηλότερες ελπίδες και προσδοκίες για νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, τις οποίες το τρέχον Διαδίκτυο μπορεί να μην είναι σε θέση να υποστηρίξει σε ικανοποιητικό βαθμό. Αναμένεται ότι ο αριθμός των κόμβων (υπολογιστές, τερματικά φορητές συσκευές, αισθητήρες, κ.λπ.) του Διαδικτύου θα αυξηθούν σύντομα πάνω από 100 δισεκατομμύρια [4]. Οι νέες υπηρεσίες δικτύου θα απαιτείται να διαθέτουν αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, και διαλειτουργικότητα, και η τάση αυτή θα κλιμακωθεί στο μέλλον. Επομένως, οι απαιτήσεις για αυξημένη αντοχή (robustness), ικανότητα επιβίωσης, και συνεργατικές ιδιότητες (collaborative properties) επιβάλλεται να υπάρχουν στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Παράλληλα, οι εξελίξεις στην εγγραφή βίντεο και στα μέσα παραγωγής έχουν οδηγήσει σε πολύ μεγάλες ποσότητες πολυμεσικού περιεχομένου και εφαρμογών προσφέροντας έτσι συναρπαστικές εμπειρίες (π.χ., 3D βίντεο, διαδραστικά περιβάλλοντα, διαδικτυακά παιχνίδια, εικονικούς κόσμους, κ.λπ.) σε σύγκριση με τον όγκο και το είδος των δεδομένων που ανταλλάσσονται επί του παρόντος μέσω του Διαδικτύου. Από τα 42 Exabytes (10^{18}) της μηνιαίας κίνησης των

καταναλωτών στο Διαδίκτυο που ενδέχεται να δημιουργηθεί για το 2014, το 56% θα οφείλεται σε βίντεο στο Διαδίκτυο, ενώ η μέση μηνιαία κίνηση στο Διαδίκτυο θα ισοδυναμεί με 32 εκατομμύρια ανθρώπους να αναπαράγουν με βίντεο συνεχούς ροής (video streaming) την ταινία Avatar σε 3D, συνεχώς, για ένα μήνα.

Όλες αυτές οι εφαρμογές δημιουργούν νέες ανάγκες και απαιτήσεις, οι οποίες, σε κάποιο βαθμό μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη βοήθεια της παροχής πλεοναστικών πόρων σε συνδυασμό με την ενίσχυση ορισμένων δυνατοτήτων του Διαδικτύου σε βάθος χρόνου. Ενώ αυτό μπορεί να είναι μια ικανοποιητική (αν και μερικές φορές προσωρινή) λύση σε μερικές περιπτώσεις, οι αναλύσεις έχουν δείξει ότι η αύξηση του εύρους ζώνης στο δίκτυο κορμού δεν θα επαρκέσει, λόγω των νέων ποιοτικών απαιτήσεων που αφορούν, για παράδειγμα, πολύ κρίσιμες υπηρεσίες, όπως εφαρμογές της ηλεκτρονικής υγείας (e-health), τα νέφη υπηρεσιών (cloud of services) και τα νέφη αισθητήρων (cloud of sensors), νέες εφαρμογές κοινωνικών δικτύων, τρισδιάστατα συνεργατικά περιβάλλοντα, νέες εμπορικές εφαρμογές και εφαρμογές συναλλαγών, νέες υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία (location-based services) και ούτω καθεξής [5].

Με άλλα λόγια, το ερώτημα είναι να προσδιοριστεί εάν η τρέχουσα αρχιτεκτονική του διαδικτύου και οι ιδιότητές της θα μπορούσαν να περιορίσουν την ανάπτυξη του Διαδικτύου και της υιοθέτησης νέων εφαρμογών. Για παράδειγμα, όπως αναφέρεται στο [6] " τα προτερήματα της από άκρης σε άκρη μετάδοσης (end-to-end) δεν είναι αρκετά για να υπερκαλύψουν άλλα κριτήρια για συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως η δρομολόγηση και ο έλεγχος της κυκλοφοριακής συμφόρησης". Από την άλλη πλευρά, η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου πραγματοποιείται με τη βοήθεια στοιχειωδών προσθηκών και όχι από μεγάλες και δυναμικές τροποποιήσεις [7]. Επιπλέον, μελέτες σχετικά με τον αντίκτυπο των ερευνητικών

αποτελεσμάτων έχουν δείξει ότι η καλύτερη απόδοση ή η πλουσιότερη λειτουργικότητα που επιφέρει μια αρχιτεκτονική αλλαγή καθορίζει αναγκαίες αλλά όχι επαρκείς συνθήκες για μια τέτοια αλλαγή στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου και / ή τα συστατικά του. Πράγματι, η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου έχει αποδείξει μέχρι στιγμής τη δυνατότητα να ξεπερνά τα εμπόδια αυτά, χωρίς να απαιτούνται ριζικές αλλαγές. Ως εκ τούτου, πριν προταθεί ή σχεδιαστεί μια νέα αρχιτεκτονική στο Διαδίκτυο (εάν απαιτείται), είναι απαραίτητο να καταδειχθούν τα θεμελιώδη όρια της τρέχουσας αρχιτεκτονικής [8]. Έτσι, επιστήμονες και ερευνητές τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό χώρο σε όλο τον κόσμο εργάζονται για την κατανόηση αυτών των ορίων της αρχιτεκτονικής, ώστε να καθορίσουν σταδιακά τις αρχές που θα οδηγήσουν στη μελλοντική αρχιτεκτονική του Διαδικτύου που θα ανταποκρίνεται επαρκώς τουλάχιστον στις προαναφερθείσες προκλήσεις.

2.2.2 Προσέγγιση Ανάλυσης

Από την ίδρυσή του, το Διαδίκτυο οδηγείται από ένα μικρό σύνολο θεμελιωδών σχεδιαστικών αρχών και όχι μια επίσημη αρχιτεκτονική που δημιουργείται από μία επιτροπή, από μια ερευνητική ομάδα ή ομάδα τυποποίησης. Επιπλέον, η αναγκαιότητα για την προς τα πίσω συμβατότητα και η αναγκαία επιλογή μεταξύ του επανασχεδιασμού του Διαδικτύου και προτεινόμενων επεκτάσεων, βελτιώσεων και ανασχεδιασμού των πρωτοκόλλων του Διαδικτύου συζητείται σήμερα σε μεγάλο βαθμό.

Η εμφάνιση νέων αναγκών, τόσο σε λειτουργικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο απόδοσης, το κόστος και η πολυπλοκότητα της ανάπτυξης του Διαδικτύου, οι υφιστάμενοι και προβλεπόμενοι περιορισμοί λειτουργίας και απόδοσης των αρχιτεκτονικών αρχών και του μοντέλου σχεδιασμού του Διαδικτύου θέτουν τις ακόλουθες θεμελιώδεις λειτουργίες υπό πίεση:

- **Επεξεργασία/χειρισμός «δεδομένων»:** αναφέρεται σε διατάξεις προώθησης (forwarders) (π.χ. δρομολογητές, switches, κ.λπ.), ηλεκτρονικούς υπολογιστές (π.χ., τερματικά, εξυπηρέτες, κ.ο.κ.), επεξεργαστές, κ.λπ. και χειριστές (προγράμματα λογισμικού/διαδικασίες) που παράγουν, χειρίζονται αλλά και ερωτούν(query) και αποκτούν πρόσβαση σε δεδομένα.
- **Αποθήκευση «δεδομένων»:** αναφέρεται στη μνήμη, στις ενδιάμεσες μνήμες (buffers), στις κρυφές μνήμες (caches), στους δίσκους κ.λπ., καθώς και συσχετιζόμενες λογικές δομές δεδομένων.
- **Μετάδοση «δεδομένων»:** αναφέρεται στη φυσική και λογική μετάδοση/ανταλλαγή δεδομένων.
- **Έλεγχος της επεξεργασίας, αποθήκευσης, μεταφοράς συστημάτων και λειτουργιών:** αναφέρεται στις διαδικασίες παρατήρησης (είσοδος), ανάλυσης και απόφασης (έξοδος), καθώς και τα παραγόμενά τους. Οι διαδικασίες αυτές επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων και λειτουργιών. Με τη χρήση αυτών των βασικών λειτουργιών, η επικοινωνία δεδομένων μπορεί να οριστεί ως ο συνδυασμός της επεξεργασίας, αποθήκευσης, μετάδοσης και ελέγχου που εφαρμόζονται στα "Δεδομένα". Ο όρος «έλεγχος» χρησιμοποιείται εδώ για να αναφερθούμε στον έλεγχο της λειτουργικότητας, αλλά επίσης και στη διαχείριση λειτουργικότητας, π.χ. των συστημάτων, δικτύων, υπηρεσιών, κ.λπ.

Για καθεμία από τις παραπάνω λειτουργίες, η ομάδα FIArch προσπάθησε να προσδιορίσει και να αναλύσει τα υποτιθέμενα προβλήματα και περιορισμούς του Διαδικτύου. Στις ακόλουθες

παραγράφους περιγράφονται οι περιορισμοί που εμφανίζονται στις ανωτέρω κατηγορίες.

2.2.3 Περιορισμοί επεξεργασίας και χειρισμού

Οι κύριοι περιορισμοί που έχουν εντοπιστεί σε αυτή την κατηγορία είναι:

- i) Το Διαδίκτυο δεν επιτρέπει στους υπολογιστές να κάνουν διάγνωση πιθανών προβλημάτων και το δίκτυο προσφέρει λίγη ανατροφοδότηση στους υπολογιστές ώστε να διαγνώσουν και να αναλύσουν την αιτία των προβλημάτων που εμφανίζονται. Στο σημερινό Διαδίκτυο, όταν παρουσιαστεί βλάβη, είναι συχνά αδύνατο για τους υπολογιστές να περιγράψουν την αποτυχία (τι συνέβη;), να καθορίσουν την αιτία της αποτυχίας (γιατί συνέβη;) και να καταλήξουν στις ενέργειες στις οποίες πρέπει να προβούν για να τη διορθώσουν. Η προβληματική συμπεριφορά, που μπορεί να οφείλεται σε κακόβουλες προθέσεις και συμφέροντα, είναι επιζήμια για τη συνεργασία μεταξύ χρηστών του Διαδικτύου και των παρόχων. Στην κατεύθυνση αυτή απαιτούνται μη-παρεμβατικά και χωρίς διακρίσεις (non-discriminatory) μέσα ανίχνευσης κακόβουλης συμπεριφοράς και αντιμετώπισης των συνεπειών της, τα οποία να διατηρούν παράλληλα ανοικτή και ευρεία δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Αυτά τα μέσα δεν υπάρχουν επί του παρόντος, και αυτός είναι ένας περιορισμός που είναι ζωτικής σημασίας να ξεπεραστεί [9].
- ii) *Η Έλλειψη ταυτότητας δεδομένων υποβαθμίζει την χρησιμότητα του συστήματος επικοινωνίας.* Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα, ως «οικονομικό αντικείμενο», «διατρέχουν» το δίκτυο πολλές φορές, περιορίζοντας την ικανότητα κλιμάκωσης, ενώ η έλλειψη ορισμού δικαιωμάτων σε ό,τι αφορά το περιεχόμενο (όχι μόνο τα δικαιώματα του

παραγωγού, αλλά και τα δικαιώματα χρήσης) οδηγεί στην απουσία ενός ορθολογιστικού μοντέλου χρέωσης.

- iii) Έλλειψη μεθόδων για αξιόπιστη επεξεργασία και χειρισμό του δικτύου, των συστημάτων υποδομής και των βασικών υπηρεσιών σε πολλά κρίσιμα περιβάλλοντα, όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές, η συμμόρφωση με τους νόμους και τις κανονιστικές διατάξεις, κ.λπ.
- iv) *Πραγματικός χρόνος επεξεργασίας.* Αν και αυτό δεν σχετίζεται άμεσα με την αρχιτεκτονική του διαδικτύου, η περιορισμένη ικανότητα για επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θέτει περιορισμούς ως προς τις εφαρμογές που μπορούν να τεθούν σε λειτουργία πάνω από το διαδίκτυο. Από την άλλη πλευρά, πολλές κατηγορίες εφαρμογών (π.χ. δίκτυα αισθητήρων) απαιτούν διαδικτυακή επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο στους απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου.

2.2.4 Περιορισμοί αποθήκευσης

Οι κύριοι περιορισμοί που έχουν εντοπιστεί σε αυτή την κατηγορία είναι:

- i) *Έλλειψη περιβάλλουσας πληροφορίας και μηχανισμών διαχείρισης αποθήκευσης που να λαμβάνουν υπ' όψιν την περιβάλλουσα πληροφορία:* Τα δεδομένα δεν συσχετίζονται εγγενώς με την περιβάλλουσα πληροφορία τους. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι διαθέσιμες στα τελικά σημεία επικοινωνίας (εφαρμογές), αλλά όχι όταν τα δεδομένα είναι σε διαδικασία μεταφοράς. Έτσι, δεν είναι εφικτό να λάβουμε αποτελεσματικές αποφάσεις αποθήκευσης που να εγγυώνται γρήγορη διαχείριση αποθήκευσης, γρήγορη εξόρυξη και ανάκτηση, καθώς και διαδικασίες ανανέωσης και

διαγραφής δεδομένων βελτιστοποιημένες για διαφορετικούς τύπους δεδομένων [10].

- ii) *Έλλειψη εγγενούς προστασίας απορρήτου χρηστών και δεδομένων*: Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μέθοδοι προστασίας/κρυπτογράφησης (ακόμα και με τη χρήση ασύμμετρης κρυπτογράφησης και μεθόδων δημόσιου κλειδιού), δεν είναι εφικτή η αποτελεσματική αποθήκευση/διαχείριση των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η έλλειψη της κρυπτογράφησης, εγκυμονεί κινδύνους για την ιδιωτική ζωή των χρηστών και το απόρρητο των δεδομένων. Απαιτείται περισσότερη έρευνα στην περιοχή της ευρύτερης προστασίας της ιδιωτικής ζωής και στην προστασία των δεδομένων του οικοσυστήματος, προκειμένου να ξεπεραστούν τα σημερινά όρια για το (i) πώς τα τρέχοντα πληροφοριακά συστήματα αντιμετωπίζουν την προστασία της ιδιωτικής ζωής και την προστασία των πληροφοριών των χρηστών, και (ii) να αναπτυχθούν τρόποι που θα σέβονται περισσότερο τις ανάγκες και τις προσδοκίες των χρηστών[11]
- iii) *Έλλειψη διασφαλίσεων σχετικά με την ακεραιότητα, αξιοπιστία και εμπιστοσύνη των δεδομένων*. Αυτό το θέμα καλύπτει τόσο την ακούσια αποκάλυψη και τη βλάβη στην ακεραιότητα από προβλήματα ή ελλείψεις, όσο και από κακόβουλες επιθέσεις που αξιοποιούν ευπάθειες.
- iv) *Έλλειψη αποτελεσματικής κρυφής αποθήκευσης (caching) και τήρησης αντιγράφων (mirroring)*: Δεν υπάρχει εγγενής μέθοδος για κρυφή αποθήκευση και τήρηση αντιγράφων (mirroring) του περιεχομένου κατά μήκος της διαδρομής της επικοινωνίας, ενώ σε αντιδιαστολή οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στα άκρα της διαδρομής (συμπεριλαμβανομένης της ανακατεύθυνσης σύνδεσης).

Τέτοιες μέθοδοι θα μπορούσαν να ασχοληθούν με θέματα όπως η συγκέντρωση κυκλοφοριακού φόρτου σε συγκεκριμένα σημεία (flash crowding) καθώς η εμφάνιση του φαινομένου μπορεί να οδηγήσει χιλιάδες εξυπηρέτες που διατηρούν κρυφή μνήμη να ζητήσουν όλοι τα ίδια έγγραφα από την αρχική θέση δημοσίευσης.

2.2.5 Περιορισμοί Μεταφοράς

Οι κύριοι περιορισμοί που έχουν εντοπιστεί σε αυτή την κατηγορία είναι:

- i) *Απουσία μηχανισμών για αποδοτική μετάδοση δικτυακής κίνησης με βάση το περιεχόμενο:* Η κίνηση πολυμεσικού περιεχομένου (Multimedia content-oriented traffic) περιλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο όγκο δεδομένων σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη ροή πληροφοριών, ενώ η αναποτελεσματική της διαχείριση έχει ως αποτέλεσμα την αναμετάδοση των ίδιων δεδομένων πολλαπλές φορές. Τα δίκτυα διανομής περιεχομένου (Content Delivery Networks - CDN) και γενικότερα οι αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούν κατακευματισμένη αποθήκευση σε κρυφή μνήμη (distributed caching) μετριάζουν το πρόβλημα υπό ορισμένες προϋποθέσεις, αλλά δεν μπορούν να κλιμακωθούν στο μέγεθος του Διαδικτύου [12]. Η μετάδοση από τις κεντρικές θέσεις δημιουργεί περιττά λειτουργικά έξοδα και μπορεί να είναι τελείως αναποτελεσματική όταν ανταλλάσσονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων.
- ii) *Η έλλειψη ενσωμάτωσης των συσκευών με περιορισμένους πόρους στο Διαδίκτυο ως αυτόνομες προσπελάσιμες οντότητες.* Συσκευές σε περιβάλλοντα όπως τα δίκτυα αισθητήρων ή και τα δίκτυα «έξυπνης σκόνης» (smart dust networks) ή ακόμα και σε περιβάλλοντα επικοινωνίας

μηχανής-προς-μηχανή (M2M) λειτουργούν με τόσο περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας, αποθήκευσης και μετάδοσης που μόνο εν μέρει μπορούν να εκτελούν τα πρωτόκολλα που απαιτούνται προκειμένου να ενσωματωθούν στο Διαδίκτυο ως αυτόνομες προσπελάσιμες οντότητες.

- iii) *Απαιτήσεις ασφάλειας των συνδέσεων μετάδοσης:* Το απόρρητο των επικοινωνιών δεν σημαίνει μόνο την προστασία/κρυπτογράφηση των δεδομένων που ανταλλάσσονται, αλλά μπορεί να εκτείνεται και στο να μην αποκαλύπτεται ότι πραγματοποιήθηκε η επικοινωνία. Δεν είναι επαρκές απλώς να προστατεύονται/κρυπτογραφούνται τα δεδομένα (συμπεριλαμβανομένων της κρυπτογράφησης των πρωτοκόλλων/πληροφοριών/περιεχομένου), αλλά πρέπει επίσης να προστατεύεται η ίδια η επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένης της σχέσης/αλληλεπίδρασης μεταξύ των συμβαλλομένων (επιχειρήσεις ή ιδιώτες).

2.2.6 Περιορισμοί Ελέγχου

Οι κύριοι περιορισμοί που έχουν εντοπιστεί σε αυτή την κατηγορία είναι:

- i) *Η έλλειψη ευελιξίας και προσαρμοστικού ελέγχου.* Στο σημερινό μοντέλο του Διαδικτύου, ο σχεδιασμός συσκευών και συνιστωσών ελέγχου IP (IP control components) μέχρι στιγμής καθοδηγείται αποκλειστικά από i) εκτιμήσεις ανάλυσης κόστους προς απόδοση και ii) προ-καθορισμένες, στατικές, και "ανοικτού βρόχου"¹ διαδικασίες ελέγχου (pre-defined, static, and open loop control processes). Η προσέγγιση αυτή τυπικά περιορίζει την ικανότητα του

¹ Μία διαδικασία ελέγχου «ανοικτού βρόχου» δεν λαμβάνει ανατροφοδότηση από το σύστημα που ελέγχει, κατά συνέπεια δεν παρακολουθεί τις συνέπειες των αποφάσεών της ώστε να τις βελτιστοποιήσει ή να τις διορθώσει.

συστήματος να προσαρμοστεί/αντιδράσει εγκαίρως και με αποδοτικό από οικονομικής άποψης τρόπο, όταν συμβούν εσωτερικά ή εξωτερικά συμβάντα που επηρεάζουν την αξία παράδοσης (value delivery). Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται ως ευελιξία [13]. Επιπλέον, η τρέχουσα τάση για αδόμητη προσθήκη κατά περίπτωση (ad-hoc) λειτουργικότητας για την άμβλυνση εν μέρει αυτής της έλλειψης ευελιξίας, έχει οδηγήσει σε αύξηση της πολυπλοκότητας (λειτουργική και συστήματος) και του κόστους του διαδικτύου. Περαιτέρω, για τη διατήρηση ή ακόμη και αύξηση της αξίας παράδοσης με την πάροδο του χρόνου, το διαδίκτυο θα πρέπει να παρέχει ευελιξία στη λειτουργική του οργάνωση, προσαρμογή και κατανομή του. Η ευελιξία στο χρόνο εκτέλεσης (run time) είναι απαραίτητη για να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη αβεβαιότητα (ανεπιτήρητα και απροσδόκητα γεγονότα), καθώς και το εύρος των αναμενόμενων γεγονότων/συνθηκών λειτουργίας για τις οποίες είχε αρχικά σχεδιαστεί. Το τελευταίο οδηγεί σε τέτοια πολυπλοκότητα που δεν αφήνει καμία δυνατότητα σε επιμέρους συστήματα να προσαρμόσουν τις αποφάσεις ελέγχου τους και να συντονίσουν την εκτέλεση τους στο χρόνο λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη την εσωτερική τους κατάσταση, τη δραστηριότητα/συμπεριφορά τους, καθώς και το περιβάλλον/τις εξωτερικές συνθήκες.

- ii) *Ακατάλληλος διαχωρισμός δεδομένων και ελέγχου.* Το τωρινό μοντέλο Διαδικτύου τέμνει (segments) με οριζόντιο τρόπο τα δεδομένα και τον έλεγχο. Έτσι, από τη μια πλευρά, η λειτουργικότητα IP δεν περιορίζεται πλέον στο επίπεδο δικτύου, και από την άλλη πλευρά, η IP δεν είναι πλήρως αποσυνδεδεμένη πια από τα υποκείμενα επίπεδα. Ως εκ τούτου, το «μοντέλο κλεψύδρας» του Διαδικτύου (hour-glass model) δεν προβλέπει τη συγκεκριμένη εξέλιξη της

λειτουργικότητας ελέγχου από πλευράς του μοντέλου σχεδιασμού.

- iii) *Έλλειψη αρχιτεκτονικής αναφοράς του επιπέδου ελέγχου του IP* (Lack of reference architecture of the IP control plane). Η επικοινωνία χρήστη (data plane) είναι σχετικά απλή αλλά τα συναφή εξαρτήματα ελέγχου της είναι πολυάριθμα και ενίοτε επικαλυπτόμενα. Αυτό είναι αποτέλεσμα των διαρκών προσθηκών κατά περίπτωση (ad-hoc) εξαρτημάτων ελέγχου, και έτσι οι αλληλεπιδράσεις γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Αυτό οδηγεί σε αρνητικές συνέπειες για τις ελεγχόμενες οντότητες, π.χ., αποτυχίες, αστάθεια, ασυνέπεια μεταξύ δρομολόγησης και προώθησης (π.χ. οδηγεί σε βρόχους)[14].
- iv) *Έλλειψη αποτελεσματικού ελέγχου συμφόρησης*. Ο έλεγχος συμφόρησης δεν μπορεί να υλοποιηθεί ως καθαρή από άκρο-σε-άκρο λειτουργία: η συμφόρηση είναι ένα εγγενές φαινόμενο του δικτύου, που μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά με συνεργασία των τελικών άκρων και του δικτύου, δεδομένου ότι πρόκειται για μια κοινή επικοινωνιακή υποδομή. Ως εκ τούτου, σημαντικό όφελος θα μπορούσε να αναμένεται με περαιτέρω βοήθεια από το δίκτυο, αλλά, από την άλλη πλευρά, η στήριξη αυτή του δικτύου θα μπορούσε να οδηγήσει σε επικάλυψη λειτουργιών, η οποία αντίκειται στην «από άκρο-σε-άκρο» φιλοσοφία των πρωτοκόλλων. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των αντισταθμισμάτων (trade-off) της παροχής υποστήριξης από το δίκτυο, χωρίς να μειωθούν οι ιδιότητες κλιμάκωσής του, απαιτώντας γνώση και διατήρηση της κατάστασης των μεμονωμένων ροών (maintenance of per-flow state), είναι μία από τις κύριες προκλήσεις του Διαδικτύου [15].

2.3 Σχεδιαστικοί στόχοι

Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να καταγράψει τους σχεδιαστικούς στόχους που πρέπει να πληρούνται από την αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Έχουμε κάνει διάκριση μεταξύ "υψηλού επιπέδου" και "χαμηλού επιπέδου" σχεδιαστικών στόχων. Οι υψηλού επιπέδου στόχοι αφορούν στις πολιτιστικές, ηθικές, κοινωνικές και οικονομικές, αλλά επίσης, και στις τεχνολογικές προσδοκίες που πρέπει να εκπληρωθούν από το Διαδίκτυο ως παγκόσμιο κοινό και πληροφοριακό σύστημα επικοινωνίας [16]. Με τον όρο *χαμηλού επιπέδου σχεδιαστικοί στόχοι*, εννοούμε τις λειτουργικές ιδιότητες, τις ιδιότητες επιδόσεων καθώς και τις δομικές και ποιοτικές ιδιότητες που η αρχιτεκτονική αυτού του παγκόσμιου και κοινού πληροφοριακού συστήματος αναμένεται να έχει. Από τις προηγούμενες ενότητες, μερικοί από τους χαμηλού επιπέδου στόχους πληρούνται και άλλοι όχι από την (παρούσα) αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Έχουμε, επίσης, τονίσει εδώ ότι οι στόχοι αυτοί συνήθως υιοθετούνται από την κοινότητα του Διαδικτύου σε μεγάλο βαθμό.

Το υπόλοιπο μέρος του παρόντος τμήματος παραθέτει μια πρώτη ανάλυση των ιδιοτήτων που θα πρέπει να εκπληρωθούν από την αρχιτεκτονική του Διαδικτύου, ξεκινώντας από τους αρχικούς στόχους, όπως απαριθμούνται σε διάφορες αναφορές [17]. Μία από τις βασικές προκλήσεις συνεπώς είναι να καθοριστεί η απαραίτητη προσθήκη/βελτίωση των υφιστάμενων αρχών αρχιτεκτονικής και η βελτίωση ή ακόμα και απομάκρυνση των αρχιτεκτονικών στοιχείων που απαιτούνται για την εξάλειψη ή τουλάχιστον τον σημαντικό περιορισμό των επιπτώσεων που απορρέουν από τους θεμελιώδεις περιορισμούς.

Η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου έχει δομηθεί γύρω από οκτώ θεμελιώδεις στόχους [18]: i) διασύνδεση υφιστάμενων δικτύων, ii)

ικανότητα επιβίωσης, iii) υποστήριξη πολλαπλών τύπων υπηρεσιών, iv) εξυπηρέτηση ποικιλίας φυσικών δικτύων, v) δυνατότητα κατανεμημένης διαχείρισης, vi) αποδοτικότητα από οικονομικής άποψης, vii) ευχέρεια σύνδεσης υπολογιστικών τερματικών διατάξεων με το λιγότερο δυνατό κόπο και, viii) λογοδοσία των πόρων (resource accountability). Επιπλέον, το RFC 1287, που δημοσιεύθηκε το 1991 από το IAB², τονίζει ότι η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου πρέπει να είναι σε θέση να επεκταθεί σε 10⁹ δίκτυα IP, αναγνωρίζοντας την ανάγκη να προστεθεί η επεκτασιμότητα ως σχεδιαστικός στόχος. Στο πλαίσιο αυτό, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε αρχίζει από τους υφιστάμενους στόχους σχεδιασμού στο Διαδίκτυο, έναντι μιας προσέγγισης που θα προσπαθούσε να επαναπροσδιορίσει εξ αρχής το σύνολο των σχεδιαστικών στόχων του διαδικτύου.

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τους σχεδιαστικούς στόχους του που πληρούνται επί του παρόντος, πληρούνται εν μέρει ή δεν πληρούνται καθόλου από τη σημερινή αρχιτεκτονική. Ειδικότερα, οι χαμηλού επίπεδου σχεδιαστικοί στόχοι της αρχιτεκτονικής θα πρέπει να παρέχουν:

- **Πρόσβαση** (ανοικτή και με τη βοήθεια ετερογενών ασύρματων και ενσύρματων διεπαφών) με το δίκτυο επικοινωνίας, αλλά επίσης και σε ετερογενή δεδομένα, εφαρμογές, υπηρεσίες, νομαδικότητα, και κινητικότητα (ενώ παρέχει τα μέσα για να διατηρηθεί η συνέχεια της εφαρμογής των ανταλλαγών επικοινωνίας όταν χρειάζεται). Η προσβασιμότητα και η νομαδικότητα καλύπτονται σήμερα από την τρέχουσα αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Από την άλλη πλευρά, η κινητικότητα εξακολουθεί να πραγματοποιείται στις

² http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee.html?commid=45072

περισσότερες περιπτώσεις μέσω αφιερωμένων/ξεχωριστών αρχιτεκτονικών συστατικών αντί του Mobile IP.

- **Καταλογισμό ευθύνης (accountability)** στη χρήση των πόρων και στην ασφάλεια, χωρίς να παραβιάζεται το απόρρητο των χρηστών, αυτο-διαιτησία (self-arbitration).
- **Διαχειρισιμότητα**, δηλαδή κατανεμημένες, οργανικές, αυτοματοποιημένες και αυτόνομες/αυτό-προσαρμοζόμενες λειτουργίες και **Διάγνωση** όπως είναι για παράδειγμα η ανίχνευση αιτίας προβλήματος/αποτυχίας.
- **Διαφάνεια**, δηλαδή η υπολογιστική τερματική διάταξη (host) ασχολείται μόνο με τη συνδεσιμότητα στα άκρα του δικτύου (end-to-end service).
- **Κατανομή επεξεργασίας και αποθήκευσης, έλεγχος λειτουργικότητας και αυτονομίας:** αντιμετωπίζεται από την τρέχουσα αρχιτεκτονική. Σχετικά με την αποθήκευση και την επεξεργασία, πολλές αρχιτεκτονικές βελτιώσεις μπορεί να απαιτηθούν, π.χ. για την ενσωμάτωση κατανεμημένων και ετερογενών δεδομένων και διαδικασιών.
- **Ικανότητα κλιμάκωσης**, συμπεριλαμβανομένης της δρομολόγησης και της διευθυνσιοδότησης του συστήματος από την άποψη του αριθμού των τερματικών διατάξεων, του αριθμού των διαμοιραζόμενων κόμβων υποδομής, κ.λπ., καθώς και σε ό,τι αφορά το σύστημα διαχείρισης.
- **Αξιοπιστία**, αναφέρεται εδώ στην ικανότητα του Διαδικτύου να λειτουργήσει σύμφωνα με ό,τι αναμένεται να αποδώσει στους τελικούς χρήστες, αντιμετωπίζοντας παράλληλα τον αυξανόμενο αριθμό χρηστών με αυξανόμενη ετερογένεια σε συχνά συναντώμενες ανάγκες επικοινωνίας.

- **Αντοχή/σταθερότητα, ανθεκτικότητα, και ικανότητα επιβίωσης.**
- **Ασφάλεια**
- **Γενικότητα (generality)** π.χ. στήριξη μιας πλειάδας εφαρμογών και συσχετιζόμενης κίνησης δεδομένων, όπως ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου και μη, μηνύματα, κ.λπ., ανεξάρτητα από τις κατατμήσεις/διαμερίσεις που εισάγονται από τη διαμοιραζόμενη υποδομή, και ανεξάρτητα από τις τελικές υπολογιστικές/τερματικές διατάξεις. Μερικά από τα θέματα αντιμετωπίζονται, ενώ σε άλλα η προσπάθεια πρέπει να ενταθεί (μετάβαση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας στο Διαδίκτυο IPv6, η IPTV μεταφέρεται στη διαδικτυακή TV, κ.λπ.), αλλιώς θα οδηγηθούμε κατακερματισμό και εξειδίκευση ανά εφαρμογή/υπηρεσία.
- **Ευελιξία**, δηλαδή η ικανότητα προσαρμογής/αντίδρασης εγκαίρως και με οικονομικά αποδοτικό τρόπο κατά την εμφάνιση εσωτερικών ή εξωτερικών γεγονότων που επηρεάζουν την αξία της παράδοσης, και **Εξελισσιμότητα**.
- **Απλότητα και οικονομική αποδοτικότητα:** μολονότι χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση, εκ πρώτης όψεως η απλότητα φαίνεται να μειώνεται σταδιακά. Σημειώνεται ότι η απλότητα έχει ρητά προστεθεί ως σχεδιαστικός στόχος για να αποφευχθεί τουλάχιστον η περαιτέρω επιδείνωση της πολυπλοκότητας της τωρινής αρχιτεκτονικής. Πράγματι, το να μειωθεί η πολυπλοκότητα και να διατηρηθεί ταυτόχρονα το ίδιο επίπεδο απόδοσης και λειτουργικότητας για ένα δεδομένο κόστος είναι ένας βασικός στόχος.
- **Δυνατότητα για μετάδοση και διανομή πληροφορίας με τρόπο που να λαμβάνει υπ' όψιν το περιεχόμενό της.**

2.4. Συμπέρασμα

Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέσαμε μία επισκόπηση των κύριων περιορισμών της αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου. Πολλοί από αυτούς τους περιορισμούς δεν είναι μεμονωμένοι αλλά εξαρτώνται άμεσα ο ένας από τον άλλον. Η αύξηση του εύρους ζώνης θα συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση ή άμβλυνση ορισμένων από αυτά τα προβλήματα, αλλά δεν θα αντιμετώπιζε την αιτία τους. Άλλα προβλήματα ωστόσο θα παρέμεναν άλυτα. Η μετάδοση μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας καλύτερη επεξεργασία δεδομένων (data processing) και χειρισμό (handling) (π.χ. κωδικοποίηση δικτύου, συμπίεση δεδομένων, ευφυή δρομολόγηση) και καλύτερη αποθήκευση δεδομένων (π.χ. network/terminal caches, data centers/mirrors) ενώ συνολικά η απόδοση του Διαδικτύου θα βελτιωνόταν σημαντικά με τον έλεγχο (control) και τη χρήση των λειτουργιών self-* (π.χ. self-management, self-arbitration, self-monitoring, self-healing κ.λπ.)

3. Επίπεδες Αρχιτεκτονικές: Προς επεκτάσιμη κινητικότητα του μελλοντικού Διαδικτύου

3.1 Εισαγωγή

Το κινητό Διαδίκτυο άρχισε πρόσφατα να γίνεται πραγματικότητα για τους χρήστες και τους διαχειριστές χάρη στην επιτυχία νέων και εξαιρετικά πρακτικών έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones), φορητών υπολογιστών με δυνατότητες χρήσης 3G USB modem και ελκυστικά επιχειρηματικά μοντέλα. Με βάση τις τρέχουσες τάσεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, οι πωλητές προβλέπουν ότι τα κινητά δίκτυα θα αντιμετωπίσουν μια τεράστια έκρηξη κίνησης στον τομέα μεταγωγής πακέτων (packet switched domain) έως το έτος 2020 [19-23]. Για να διευκολυνθεί το μελλοντικό Διαδίκτυο στις αναμενόμενες απαιτήσεις κίνησης, οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα ασύρματη δίκτυα πρόσβασης (Radio Access Networks - RANs) και στα δίκτυα κορμού (Core Networks) θα πρέπει να επεκταθούν και σε προηγμένα σενάρια μελλοντικής χρήσης.

Υπάρχουν πολλές λύσεις που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων χωρητικότητας (capacity) των τωρινών αρχιτεκτονικών του κινητού Διαδικτύου, τα οποία προκαλούνται από την εξέλιξη της κίνησης δεδομένων. Δεσμεύοντας πρόσθετους πόρους φάσματος (spectrum resources) είναι η πιο απλή προσέγγιση για την αύξηση του εύρους ζώνης της ασύρματης πρόσβασης, αλλά και η αποδοτικότητα του φάσματος μπορεί να ενισχυθεί χάρη σε νέες ασύρματες τεχνικές (π.χ., High Speed Packet Access - HSPA, και Long Term Evolution - LTE). Επίσης ετερογενή συστήματα που παρέχουν πυκνωση (densification) και απαλλαγή (offload) από το μακροκυψελωτό δίκτυο μέσω πικοκυψέλων (pico), φεμτοκυψέλων (femtocells), και αναμεταδόσεων ή διεπαφών WiFi/WiMAX επεκτείνουν την ασύρματη εμβέλεια. Ωστόσο, η ανάπτυξη νέων

τεχνολογιών που παρέχουν μεγαλύτερο ασύρματο εύρος ζώνης δημιουργούν εύκολα νέα σενάρια χρήσης και έτσι η αύξηση της κίνησης μπορεί να συνεχίσει να επιταχύνεται. Δεδομένου ότι οι σημερινές αρχιτεκτονικές του κινητού διαδικτύου σχεδιάστηκαν αρχικά για υπηρεσίες φωνής και αργότερα επεκτάθηκαν σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων με ένα πολύ συγκεντρωτικό τρόπο, η διαχείριση αυτής της συνεχούς αυξανόμενης ζήτησης κίνησης είναι αρκετά δύσκολο να αντιμετωπισθεί. Η πρόκληση είναι ακόμα πιο μεγάλη αν λάβουμε υπόψη τις συγκλίνουσες (convergent) σταθερές και κινητές αρχιτεκτονικές που διαχειρίζονται κινητούς πελάτες εξισορροπώντας την κίνηση του χρήστη ανάμεσα σε μια μεγάλη ποικιλία δικτύων πρόσβασης. Η επεκτασιμότητα της κίνησης και οι λειτουργίες διαχείρισης της κινητικότητας είναι από τα πιο σημαντικά ζητήματα του μελλοντικού Διαδικτύου.

Ο αυξανόμενος αριθμός των κινητών χρηστών, η αύξηση του όγκου της κίνησης, η πολυπλοκότητα σεναρίων κινητικότητας, καθώς και η ανάπτυξη νέων και καινοτόμων εφαρμογών πάνω από το πρωτόκολλο IP, απαιτούν αρχιτεκτονικές δικτύων που είναι σε θέση να ανταποκριθούν απρόσκοπτα σε όλα τα είδη απαιτήσεων της κίνησης δεδομένων, εξασφαλίζοντας υψηλή από-άκρο-σε-άκρο ποιότητα υπηρεσιών. Ωστόσο, η έντονα συγκεντρωτική φύση των τωρινών και προγραμματισμένων για το μέλλον προτύπων κινητού Διαδικτύου (π.χ., αυτές που διατηρούνται από το IETF ή με τη συνεργασία του 3GPP) αποτρέπει την οικονομικά αποδοτική επέκταση του συστήματος για τις νέες απαιτήσεις κίνησης που δημιουργούνται. Με στόχο να επιλυθούν τα πιεστικά προβλήματα της επεκτασιμότητας από μια αρχιτεκτονική άποψη, οι επίπεδες και πλήρως καταναμημένες κινητές αρχιτεκτονικές κερδίζουν όλο και περισσότερο την προσοχή σήμερα.

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παράσχει μια λεπτομερή εισαγωγή στα σημερινά αναδυόμενα προβλήματα επεκτασιμότητας

του κινητού Διαδικτύου και, επίσης, να παρουσιάσει μια περίληψη της εξέλιξης των επίπεδων και εξαιρετικά επίπεδων (Ultra-Flat) συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Για να επιτευχθεί αυτό, εισάγουμε στην ενότητα 3.2 πρώτα τα θέματα που σχετίζονται με τον συνεχώς αυξανόμενο φόρτο κίνησης μέσα στα δίκτυα των παρόχων κινητού Διαδικτύου. Στη συνέχεια, στην ενότητα 3.3, παρουσιάζουμε τα κύρια εξελικτικά βήματα των επίπεδων αρχιτεκτονικών, εστιάζοντας στα πιο σημαντικά συστήματα, μεθόδους, τεχνικές και εξελίξεις που είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία. Κατόπιν, στην ενότητα 3.4 παρατίθεται μια εισαγωγή στα καταναμημένα προγράμματα διαχείρισης της κινητικότητας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως το πιο σημαντικό κομμάτι των επίπεδων κινητών επικοινωνιών. Στην ενότητα 3.5 συνοψίζουμε τα οφέλη και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τις επίπεδες και καταναμημένες αρχιτεκτονικές.

3.2 Χαρακτηριστικά εξέλιξης της κίνησης και προβλήματα επεκτασιμότητας του κινητού Διαδικτύου

3.2.1 Χαρακτηριστικά εξέλιξης της κίνησης του κινητού Διαδικτύου

Ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους της αύξησης του όγκου της κίνησης στον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών είναι ο δημογραφικός παράγοντας. Σύμφωνα με τις τρέχουσες εξελίξεις, ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται με ρυθμό 1,2% ετησίως, και ο συνολικός πληθυσμός αναμένεται να είναι 7,6 δισ. το έτος 2020. Η τάση αυτή συνεπάγεται επίσης μια καθαρή προσθήκη 77 εκατομμυρίων νέων κατοίκων ανά έτος [24]. Σήμερα, πάνω από το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού, δηλαδή δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι, χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο. Πάνω από το 60% του παγκόσμιου πληθυσμού, δηλαδή 5 δισεκατομμύρια άνθρωποι, είναι συνδρομητές κάποιας υπηρεσίας κινητής επικοινωνίας [19][25]. Επιπλέον, ο αριθμός των ασύρματων ευρυζωνικών συνδρομών

αναμένεται να υπερβεί το συνολικό αριθμό των σταθερών ευρυζωνικών συνδρομών και αυτή η ανάπτυξη γίνεται ακόμα πιο σημαντική δεδομένου ότι ο όγκος των σταθερών ευρυζωνικών συνδρομών αυξάνεται με πολύ πιο αργούς ρυθμούς.

Η επέκταση των ασύρματων ευρυζωνικών συνδρομητών όχι μόνο αυξάνει τον όγκο της κινητής κίνησης, αλλά επίσης διευκολύνει την αύξηση των ευρυζωνικών ασύρματων τερματικών. Εντούτοις, αν και όλο και περισσότερες συσκευές επιτρέπουν κινητή πρόσβαση στο Διαδίκτυο, μόνον ένα μικρό μέρος των χρηστών έλκεται ή είναι δεκτικό να πληρώσει για τις ασύρματες υπηρεσίες του Διαδικτύου, πράγμα που σημαίνει ότι η φωνητική επικοινωνία θα παραμείνει η κυρίαρχη κινητή εφαρμογή και στο μέλλον. Παρά το γεγονός αυτό και την υπόθεση ότι η αύξηση του αριθμού των ατόμων που ενδεχομένως θα χρησιμοποιούν κινητές υπηρεσίες Διαδικτύου κατά πάσα πιθανότητα θα κορεστεί μετά το 2015 στις βιομηχανικές χώρες [24], η αύξηση των συνδρομών στο κινητό Διαδίκτυο θα διατηρείται μεγάλη σε παγκόσμιο επίπεδο λόγω δύο βασικών παραγόντων. Από τη μία πλευρά, η αύξηση των συνδρομητών συνεχίζεται αδιάκοπα στις αναπτυσσόμενες αγορές: για παράδειγμα, η κινητή ευρυζωνική πρόσβαση μέσω απλών μικρών συσκευών θα είναι η μόνη πρόσβαση στο Διαδίκτυο για πολλούς ανθρώπους της Ασίας. Από την άλλη πλευρά, η πρόσβαση μέσω συσκευών και η εξέλιξη στις εφαρμογές και στις υπηρεσίες αναμένεται επίσης να διατηρήσουν την αύξηση των συνδρομητών.

Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της εξέλιξης των υπηρεσιών και των εφαρμογών είναι η αύξηση της κίνησης βίντεο (video traffic): προβλέπεται ότι λόγω της ανάπτυξης ψυχαγωγικών υπηρεσιών που καταναλώνουν πολλά δεδομένα (data-hungry applications) όπως η μετάδοση τηλεόρασης/ραδιοφώνου και VoD (Video on Demand), το βίντεο θα αποτελεί το 66% της κίνησης στα κινητά δίκτυα μέχρι το 2014 [20]. Μια σημαντική ποσότητα αυτού του όγκου δεδομένων θα

παράγεται από κινητή περιήγηση ιστού (mobile Web browsing) η οποία αναμένεται να γίνει η μεγαλύτερη πηγή κινητής κίνησης βίντεο (π.χ. YouTube). Η Cisco προβλέπει επίσης ότι ο συνολικός όγκος των βίντεο (συμπεριλαμβανομένου IPTV, VoD, P2P streaming, διαδραστικά βίντεο, κ.λπ.) θα φτάσει περίπου το 90% του συνόλου της κίνησης των καταναλωτών (σταθερής και κινητής) μέχρι το έτος 2012, παράγοντας μια σημαντική αύξηση της συνολικής κίνησης σε κινητά δίκτυα άνω του 200% ετησίως [28]. Η κίνηση που αφορά δεδομένα βίντεο αναμένεται επίσης να αυξηθεί τόσο δραστικά τα επόμενα χρόνια που θα μπορούσε να υπερβεί την κίνηση επικοινωνίας μεταξύ ομότιμων κόμβων (Peer-to-Peer-P2P) [25]. Οι αναδυόμενες τεχνολογίες του διαδικτύου (όπως η HTML5), οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ποιότητα εικόνας (HDTV, 3D, SHV) και ειδικοί τομείς εφαρμογών (εμπειρία εικονικής πραγματικότητας διαμοιρασμού και παιχνιδιών) θα ενισχύσουν περαιτέρω αυτή τη διαδικασία και θα θέσουν νέες προκλήσεις για τα κινητά δίκτυα. Εφόσον το βίντεο και οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την ψυχαγωγία φαίνεται ότι αποκτούν δεσπόζουσα θέση όσον αφορά τη χρήση εύρους ζώνης, ειδικοί μηχανισμοί βελτιστοποίησης με επίκεντρο την διανομή περιεχομένου θα εμφανιστούν επίσης στο εγγύς μέλλον. Η αναμενόμενη εξέλιξη των δικτύων διανομής περιεχομένου (CDN) και οι έξυπνες τεχνολογίες κρυφής μνήμης (smart data caching) δεδομένων θα μπορούσαν να έχουν επιπλέον αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά της κίνησης και προφανώς στις κινητές αρχιτεκτονικές.

Ένα άλλο σημαντικό τμήμα της εφαρμογής των κινητών και της εξέλιξης υπηρεσιών είναι η κοινωνική δικτύωση. Όπως οι συσκευές, τα δίκτυα και οι τρόποι επικοινωνίας εξελίσσονται, οι χρήστες θα επιλέξουν από μια αυξανόμενη κλίμακα υπηρεσιών επικοινωνίας (π.χ., e-mail, τα άμεσα μηνύματα, blogging, micro-blogging, VoIP και μεταδόσεις βίντεο, κ.λπ.). Στο μέλλον, η κοινωνική δικτύωση θα

μπορούσε να εξελιχθεί ακόμη περισσότερο, όπως να καλύπτει ευρύτερους τομείς της προσωπικής επικοινωνίας με έναν πιο ολοκληρωμένο τρόπο, ή να θέσει το online gaming σε ένα νέο επίπεδο βαθιά εμποτισμένο με την κοινωνική δικτύωση και την εικονική πραγματικότητα.

Ακόμα κι αν το βίντεο φαίνεται να είναι μια σημαντική δύναμη πίσω από την τρέχουσα αύξηση της κίνησης του κινητού Διαδικτύου, υπάρχει μια άλλη αναδυόμενη μορφή επικοινωνίας που ονομάζεται M2M (Machine-to-Machine), η οποία έχει τη δυνατότητα να γίνει ο μεγαλύτερος παράγοντας αύξησης κίνησης στο μέλλον. Οι συνεδρίες M2M διευκολύνουν την από-άκρο-σε-άκρο επικοινωνία συσκευών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση για απομακρυσμένο έλεγχο, παρακολούθηση και μέτρηση, οδική ασφάλεια, έλεγχο ασφάλειας/ταυτοποίησης, παρακολούθηση βίντεο, κ.λπ. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι θα υπάρχουν 225 εκατομμύρια συσκευές M2M μέχρι το 2014 με μικρή κίνηση ανά κόμβο, αλλά θα έχουν ως αποτέλεσμα σημαντική συνολικά αύξηση, ως επί το πλείστον στην κατεύθυνση της ανερχόμενης κίνησης (uplink direction) [24]. Ο τεράστιος αριθμός των συνεδριών με μικροσκοπικά πακέτα δημιουργεί μια μεγάλη πρόκληση για τους διαχειριστές. Οι κεντρικές λειτουργίες του δικτύου μπορεί να μην είναι τόσο επεκτάσιμες, όπως απαιτείται να είναι από τον αυξανόμενο αριθμό των συνεδριών στον τομέα μεταγωγής πακέτων.

Ως περίληψη μπορούμε να δηλώσουμε ότι προβλέπεται αναπόφευκτη εξέλιξη της κινητής κίνησης χάρη στους ακόλουθους βασικούς παράγοντες: την αύξηση των κινητών συνδρομών, την εξέλιξη των κινητών δικτύων, των συσκευών, των εφαρμογών και των υπηρεσιών, καθώς και τη σημαντική αύξηση των δυνατοτήτων των συσκευών που επιφέρεται από τον τεράστιο αριθμό νέων εγγραφών για M2M Επικοινωνίες.

3.2.2 Προβλήματα επεκτασιμότητας του κινητού Διαδικτύου

Οι υπάρχουσες ασύρματες τηλεπικοινωνιακές υποδομές δεν είναι έτοιμες να χειριστούν αυτή την αύξηση κίνησης, διότι το τρέχον κινητό διαδίκτυο δεν είχε σχεδιαστεί με αυτές τις απαιτήσεις κατά του. Οι κινητές αρχιτεκτονικές υπό τυποποίηση (π.χ., 3GPP, 3GPP2, WiMAX Forum) ακολουθούν μια συγκεντρωτική προσέγγιση, η οποία δεν μπορεί να επεκταθεί ομαλά στις επερχόμενες συνθήκες κίνησης.

Από τη μία πλευρά, τα ζητήματα επεκτασιμότητας σε επίπεδο χρήστη (user plane) προβλέπονται για αρχιτεκτονικές βασιζόμενες σε άγκυρες (anchor-based architectures) του κινητού Διαδικτύου, όπου οι μηχανισμοί καταμερισμού IP διευθύνσεων και εγκατάστασης μηχανισμών σήραγγας (tunnel establishment) των τελικών συσκευών εντάσσονται στην αρμοδιότητα στοιχείων υψηλού επιπέδου του δικτύου, που ονομάζονται σημεία άγκυρας (anchor points) (GGSN σε 3GPP UMTS, PDN GW στο SAE, CSN και για δίκτυα WiMAX).

Κάθε σημείο άγκυρας διατηρεί ειδικές μονάδες πληροφοριών, που ονομάζονται *πλαίσια συμφραζομένων*, με την κάθε μία από τις οποίες να περιέχει ταυτότητα σύνδεσης (binding identity), αναγνωριστικό σήραγγας (tunnel identifier), απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών, κ.λ.π. ανά κινητό κόμβο. Αυτά τα πλαίσια *συμφραζομένων* ενημερώνονται συνεχώς και χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα και τη δρομολόγηση της κίνησης του χρήστη από το σημείο άγκυρας προς τα τερματικά άκρα και αντιστρόφως. Ωστόσο, τα στοιχεία του δικτύου (επομένως και τα σημεία άγκυρας) έχουν περιορισμούς σε ό,τι αφορά το πλήθος των πλαισίων που θα είναι ταυτόχρονα ενεργά. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση της αύξησης της κίνησης, νέοι εξοπλισμοί θα πρέπει να εγκατασταθούν ή οι υφιστάμενοι θα πρέπει να αναβαθμιστούν με μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Από την άλλη πλευρά, προβλέπονται επίσης ζητήματα επεκτασιμότητας και στο επίπεδο ελέγχου (control plane). Η καθιερωμένη προσέγγιση του διαχωρισμού του στρώματος υπηρεσιών και του στρώματος πρόσβασης παρέχει εύκολη σύγκλιση των υπηρεσιών στις τρέχουσες κινητές αρχιτεκτονικές διαδικτύου, εισάγει όμως επιπλέον πολυπλοκότητα όσον αφορά τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης συνεδρίας. Δεδομένου ότι τα στρώματα υπηρεσίας και δικτύου πρόσβασης αποσυντίθενται, ειδικά σχήματα (π.χ. Policy and Charging Control Architecture - PCC) έχουν εισαχθεί για την επίτευξη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο στρωμάτων κατά τη διάρκεια της εγκαθίδρυσης, τροποποίησης και τερματισμού των συνεδριών. Το PCC, και τα παρόμοια προς αυτό συστήματα, διασφαλίζουν ότι ο φορέας που είναι εγκατεστημένος στο δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί τους πόρους που αντιστοιχούν στο επίπεδο υπηρεσίας της συγκεκριμένης συνεδρίας, όπως αυτό καθορίστηκε από τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, και που επιτρέπονται από την πολιτική του χειριστή και τη συνδρομή του χρήστη. Λόγω του αριθμού των τυποποιημένων διεπαφών, η διαλειτουργικότητα μεταξύ των στρωμάτων υπηρεσίας και πρόσβασης μπορεί εύκολα να προκαλέσει προβλήματα επεκτασιμότητας και ποιότητας υπηρεσιών ακόμα και στο επίπεδο ελέγχου.

Κατά συνέπεια, απαιτούνται αρχιτεκτονικές αλλαγές για την αντιμετώπιση της συνεχιζόμενης εξέλιξης της κίνησης: τα μελλοντικά κινητά δίκτυα πρέπει να καθορίσουν μια αρχιτεκτονική που να διασφαλίζει μεγιστοποίηση της εμπειρίας του τελικού χρήστη, ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και λειτουργίας (CAPEX/OPEX), την ενεργειακή απόδοση, τις επιδόσεις του δικτύου, καθώς και τη βιωσιμότητα των κινητών δικτύων.

3.3 Εξέλιξη των επίπεδων αρχιτεκτονικών

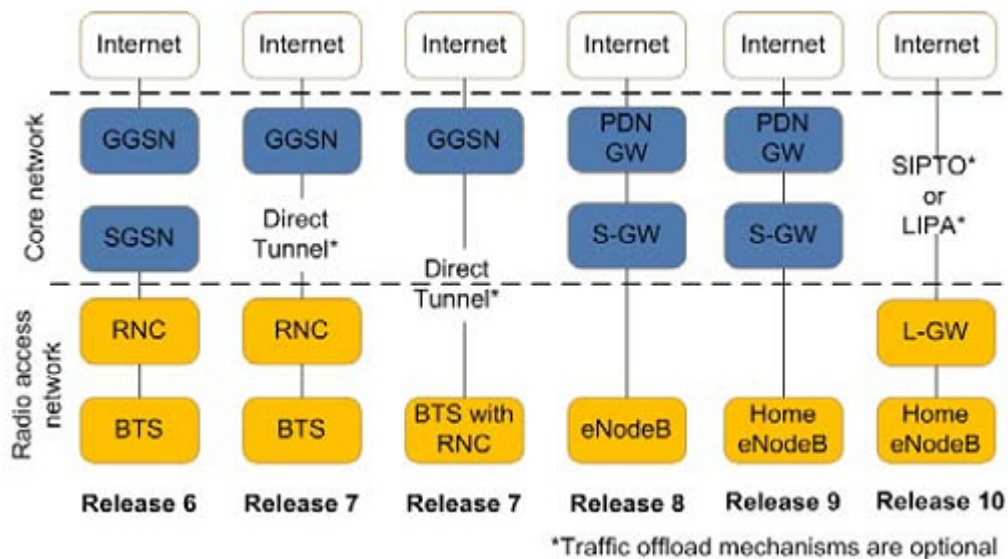
3.3.1 Εξέλιξη της Αρχιτεκτονικής των κινητών δικτύων 3GPP

Τα σταθερά δίκτυα αρχικά αντιμετώπιζαν και εκείνα παρόμοια προβλήματα επεκτασιμότητας. Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής πρόσβασης DSL έχει δείξει στο παρελθόν ότι μετακινώντας τη δρομολόγηση IP και άλλες λειτουργίες από τον πυρήνα προς το άκρο του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη βιώσιμης υποδομής δικτύου. Η ίδια εξέλιξη είχε αρχίσει να συμβαίνει σε ό,τι αφορά στο κινητό διαδίκτυο.

Οι προδιαγραφές αρχιτεκτονικής του δικτύου 3^{ης} γενιάς (προδιαγραφές 03.02 [29] και 23.002 [30]) παρουσιάζουν την εξέλιξη του δικτύου 3GPP από τη φάση 1 (phase 1 - 1995) του παγκόσμιου συστήματος κινητών επικοινωνιών GSM (Global System for Mobile Communications) μέχρι το Εξελιγμένο Σύστημα Πακέτων (Evolved Packet System - EPS) που ορίζεται στη Δημοσίευση 8 (Release 8 - 2010). Το κεντρικό κομμάτι του EPS που ονομάζεται Εξελιγμένος Πυρήνας Πακέτων (Evolved Packet Core - EPC) συνεχώς επεκτείνεται με νέα χαρακτηριστικά στη Δημοσίευση 10 και 11 (Release 10 and 11). Η Εικόνα 2 απεικονίζει τα στάδια εξέλιξης του τομέα μεταγωγής πακέτων, συμπεριλαμβανομένων των κύριων επιπέδων χρήστη στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού.

Στην φάση 1 (phase 1 - 1995) καθορίστηκαν τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής GSM. Οι λόγοι πίσω από την υιοθέτηση ιεραρχικού και συγκεντρωτικού μοντέλου στην αρχιτεκτονική GSM ήταν τόσο τεχνικοί όσο και οικονομικοί. Κατά κύριο λόγο, μείωσε τον φόρτο του εξοπλισμού μεταγωγής (Cross-bar switch ή Mobile Switching Center - MSC). Παράλληλα, οι υφιστάμενοι μεταγωγείς ISDN θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου ως κινητά κέντρα μεταγωγής (MSCs) μόνο αν οι ειδικές οντότητες κωδικοποίησης

φωνής εισαχθούν κάτω από το MSC, και αυτός ο περιορισμός ενίσχυσε περαιτέρω την ιεραρχική δομή του δικτύου. Ωστόσο, με τη εισαγωγή του τομέα μεταγωγής πακέτων (Packet-Switched Domain - PS) και την επέκταση της μεταγωγής πακέτων, τα μειονεκτήματα αυτού του σχεδιαστικού υποδείγματος άρχισαν να εμφανίζονται πολύ νωρίς.



Εικόνα 2. Η εξέλιξη του τομέα μεταγωγής πακέτων της 3GPP αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένου του επιπέδου χρήστη στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης και δίκτυα κορμού

Η βασικότερος λόγος για την εισαγωγή της μεταγωγής πακέτων ήταν ότι επέτρεψε την πολυπλεξία και ως εκ τούτου, οι πόροι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο αποτελεσματικά. Στη φάση 2+ (Phase 2+ 1997) περιγράφεται ο τομέας μεταγωγής πακέτων, ως εκ τούτου, προστίθενται στο δίκτυο οι κεντρικοί GPRS (General Packet Radio Service) κόμβοι στήριξης. Η Δημοσίευση 1999 (Release 1999 - 2002) περιγράφει την αρχιτεκτονική UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), διαχωρίζοντας σαφώς τους τομείς μεταγωγής πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος (CS). Βλέποντας ότι το UMTS έχει σχεδιαστεί για να είναι ο διάδοχος του GSM, δεν είναι περίεργο το γεγονός ότι οι κεντρικές άγκυρες παρέμειναν αμετάβλητες από τη στιγμή της εισαγωγής της τεχνολογίας 3G και μεταγενέστερα.

Η πρόοδος των κινητών και ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας εισήγαγε κάποιες θεμελιώδεις αλλαγές. Η πιο δραστική από αυτές είναι ότι το IP έχει γίνει το μοναδικό πρωτόκολλο πρόσβασης για δίκτυα δεδομένων και η συνεχώς αυξανόμενη μελλοντική ασύρματη κίνηση βασίζεται επίσης σε δεδομένα πακέτων (δηλαδή, επικοινωνία στο διαδίκτυο). Λόγω των παρενεργειών αυτής της αλλαγής, μια διαδικασία σύγκλισης άρχισε να εισάγει τεχνολογία μεταφοράς βασισμένη στο IP (IP-based transport technology) στα δίκτυα κορμού και στα ενδιάμεσα δίκτυα (backhaul networks): Η Δημοσίευση 4 (Release 4 - 2003 όρισε τη λειτουργία πύλης πολυμέσων (media gateway function), η δημοσίευση 5 (Release 5 - 2003) εισήγαγε τη λειτουργία επιπέδου πυρήνα IP Multimedia Subsystem (IMS) για την παροχή υπηρεσιών IP πάνω από τον τομέα PS, ενώ η δημοσίευση 6 τυποποίησε τη διαλειτουργικότητα WLAN και την υπηρεσία καθολικής εκπομπής και πολυεκπομπής πολυμέσων (Multimedia Broadcast Multicast Service- MBMS).

Με την αύξηση της κίνησης δεδομένων IP, επίπεδες, ιεραρχικές και συγκεντρωτικές λειτουργίες έγιναν η κύριες κινητήριες δυνάμεις στην εξέλιξη των αρχιτεκτονικών δικτύων 3^{ης} γενιάς. Η δημοσίευση 7 (Release 7 Internet HSPA - 2008) υποστηρίζει την ενσωμάτωση του ασύρματου ελεγκτή πρόσβασης (Radio Access Controller) με το σταθμό βάσης (NodeB) παρέχοντας ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται σε έναν μόνο κόμβο. Άλλη μια αρχιτεκτονική βελτίωση αυτής της έκδοσης είναι η ανάπτυξη της υπηρεσίας άμεσης σήραγγας (Direct Tunnel) [31] [32]. Η άμεση σήραγγα επιτρέπει την ελάφρυνση των κόμβων εξυπηρέτησης περιοχής (GPRS Support Node - SGSN) από την κίνηση που προκαλούν οι χρήστες, προδιαγράφοντας την παράκαμψή τους. Οι κόμβοι εξυπηρέτησης περιοχής με δυνατότητα άμεσης σήραγγας (Direct Tunnel enabled SGSNs) ξεκινούν την επανενεργοποίηση του πλαισίου συμφραζομένων PDP (Packet Data Protocol) ώστε να

οδηγήσουν την κίνηση χρήστη απευθείας από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης στον κόμβο εξυπηρέτησης υπηρεσιών (Gateway GPRS Support Node - GGSN) ή στην πύλη εξυπηρέτησης (serving GW), η οποία ορίζεται στη δημοσίευση 8 (Release 8). Ο μηχανισμός αυτός προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των αγκυρών κίνησης επιπέδου χρήστη. Ωστόσο, προσθέτει, επίσης, πολυπλοκότητα, διότι οι κόμβοι εξυπηρέτησης περιοχής δεν μπορούν να υπολογίσουν την κίνηση που διέρχεται από τις άμεσες σήραγγες. Όταν η άμεση σήραγγα είναι ενεργοποιημένη, οι κόμβοι εξυπηρέτησης περιοχής εξακολουθούν να χειρίζονται τη σηματοδότηση της κίνησης, δηλαδή, να παρακολουθούν τη θέση των κινητών συσκευών και να συμμετέχουν στη σηματοδότηση GTP (GPRS tunneling protocol) μεταξύ του κόμβου εξυπηρέτησης υπηρεσιών και του ασύρματου ελεγκτή πρόσβασης.

Η δημοσίευση 8 (Release 8 - 2010) εισάγει ένα νέο τομέα μεταγωγής πακέτου, δηλαδή, τον Εξελιγμένο πυρήνα πακέτων. Σε αντιδιαστολή με την έκδοση 6 που προδιαγράφει τέσσερις κύριες οντότητες του τομέα μεταγωγής πακέτου GPRS [δηλαδή τον σταθμό βάσης (NodeB), τον ασύρματο ελεγκτή πρόσβασης (RNC), τον κόμβο εξυπηρέτησης περιοχής (SGSN) και τον κόμβο εξυπηρέτησης υπηρεσιών (GGSN)] η αρχιτεκτονική αυτή έχει έναν ενσωματωμένο, ασύρματο κόμβο που περιέχει τον σταθμό βάσης και τις λειτουργίες ελέγχου του ασύρματου δικτύου, καθώς και τρεις κύριες λειτουργικές οντότητες στον πυρήνα, δηλαδή την Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME), την πύλη εξυπηρέτησης (S-GW) και την πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων (PDN GW).

Η δημοσίευση 9 (Release 9 - 2010) εισάγει τον ορισμό του υποσυστήματος οικείου σταθμού βάσης (Home (e)NodeB Subsystem). Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την χωρίς διχειριστική παρέμβαση ανάπτυξη των femτοκυψελών σε εσωτερικούς χώρους,

παρέχοντας σχεδόν τέλεια ευρυζωνική ασύρματη κάλυψη σε κατοικημένες περιοχές και περιοχές εργασίας, καθώς και μείωση του φόρτου του μακρο-κυψελωτού δικτύου [35].

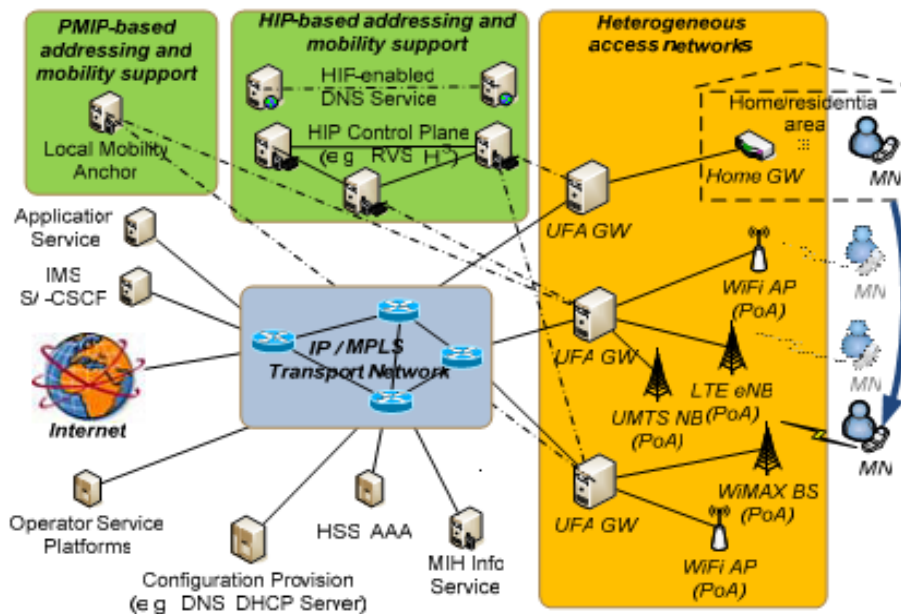
Στη δημοσίευση 10 (Release 10 - 2010) έχουν δημοσιευθεί οι υπηρεσίες SIPTO (Selective IP Traffic Offload) και LIPA (Local IP Access) [36]. Αυτές επιτρέπουν την περαιτέρω ελάφρυνση ορισμένης κίνησης IP από το μακρο-κυψελωτό δίκτυο ή το υποσύστημα οικείου σταθμού βάσης, προκειμένου να ελαφρυνθεί ο φόρτος των στοιχείων του δικτύου στους τομείς PS EPC PS.

Τα παραπάνω εξελικτικά βήματα είχαν ως αποτέλεσμα ότι τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης 3^{ης} γενιάς έγιναν επίπεδα στην κλίμακα ενός μόνο κόμβου εξυπηρέτησης (δηλαδή του σταθμού βάσης) και παράλληλα προήχθη η καλύτερη κατανομή των μέχρι πρότινος κεντροποιημένων λειτουργιών των ασυρμάτων ελεγκτών πρόσβασης. Ωστόσο, η επίπεδη φύση των αρχιτεκτονικών LTE και LTE-A αφορά μόνο το επίπεδο ελέγχου, αλλά όχι το επίπεδο χρήστη: το LTE συνδέεται με το EPC στην εξέλιξη συστημάτων 3^{ης} γενιάς, και στο EPC οι οντότητες μεταγωγής πακέτου δικτύων κορμού εξακολουθούν να παραμένουν συγκεντρωτικές, διατηρώντας την κίνηση IP που αφορά τον χρήστη αγκυρωμένη (anchored). Υπάρχουν πολλά σχήματα για την εξάλειψη της υπόλοιπης συγκέντρωσης και την περαιτέρω επέκταση των δικτύων 3^{ης} γενιάς.

3.3.2 Υπέρ-επίπεδη (Ultra Flat) Αρχιτεκτονική

Ένα από τα πιο σημαντικά σχήματα που αποσκοπεί στην περαιτέρω επέκταση των προτύπων 3GPP είναι η υπερ-επίπεδη Αρχιτεκτονική (UFA) [37-41]. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν και αξιολογούν μια σχεδόν πράσινη προσέγγιση, που είναι μία επίπεδη και κατανεμημένη συγκλίνουσα (convergent) αρχιτεκτονική με την εξαίρεση ορισμένων λειτουργιών ελέγχου που εξακολουθούν να παρέχονται από τον πυρήνα. Οι UFA αντιπροσωπεύουν το επόμενο βήμα προς την

επιπεδοποίηση (flattening) των IP δικτύων κορμού. Ο στόχος του σχεδιασμού των UFA είναι να καταλείψει τις λειτουργίες πυρήνα σε μεμονωμένους κόμβους στα άκρα του δικτύου, π.χ., τους σταθμούς βάσης. Οι ευφυείς κόμβοι στο άκρο του δικτύου καλούνται πύλες UFA. Η Εικόνα 3 απεικονίζει τη UFA που ενσωματώνει έλεγχο κινητικότητας βάσει των πρωτοκόλλων HIP (Host Identity Protocol) και PMIP (Proxy Mobile IPv6).



Εικόνα 3. Η υπερ-επίπεδη (UFA) αρχιτεκτονική με έλεγχο κινητικότητας μέσω πρωτοκόλλων HIP και PMIP

Δεδομένου ότι η κινητικότητα εισάγει συχνές μεταβιβάσεις IP (handovers), έχει περιγραφεί στο [37] μία διαδικασία μεταβίβασης που βασίζεται στο πρωτόκολλο αρχικοποίησης συνόδου (Session Initiation Protocol - SIP). Έχει αποδειχθεί από μία αριθμητική ανάλυση, και σε μια μεταγενέστερη δημοσίευση με μετρήσεις σε μια πλατφόρμα δοκιμών [38] ότι η διαδικασία αυτή μπορεί να εγγυηθεί απρόσκοπτες μεταβιβάσεις για εφαρμογές που βασίζονται στο πρωτόκολλο SIP.

Στον τομέα PS, οι υπηρεσίες πολυμέσων IP απαιτούν εγκατάσταση συνεδρίας δύο επιπέδων. Πρώτα, ο κινητός κόμβος (Mobile Node -

MN) και ο ανταποκρινόμενος κόμβος (Corresponded Node - CN) διαπραγματεύονται τις παραμέτρους συνεδρίας με τη χρήση του πρωτοκόλλου SIP στο στρώμα υπηρεσιών, και στη συνέχεια η Έλεγχος πολιτικής και χρέωσης (Policy and Charging Control - PCRF), διασφαλίζει ότι ο φορέας που είναι εγκατεστημένος στο στρώμα πρόσβασης χρησιμοποιεί τους πόρους που αναλογούν στη συνεδρία. Το πρόβλημα είναι ότι το στρώμα υπηρεσιών δεν ενημερώνεται άμεσα για τα προβλήματα πόρων του στρώματος πρόσβασης και, για παράδειγμα, είναι δύσκολο να προσαρμοστούν διάφορα στοιχεία της συνεδρίας της εφαρμογής που αφορούν την ίδια υπηρεσία στους διαθέσιμους πόρους στο στρώμα πρόσβασης. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, εισάγεται στο [37] μία νέα διαδικασία εγκατάστασης συνεδρίας SIP και μια διαδικασία ενημέρωσης συνεδρίας για τις UFA.

Η διαλειτουργικότητα με εφαρμογές του Διαδικτύου που βασίζονται σε μη-SIP πρωτόκολλα ελέγχου είναι μία τεχνική πρόκληση για τους διαχειριστές κινητών δικτύων. Ένας από τους στόχους τους είναι να παρέχουν απρόσκοπτες μεταβιβάσεις για κάθε εφαρμογή. Ο έλεγχος κινητικότητας IP μπορεί να προσφερθεί από πρωτόκολλα που βρίσκονται κάτω από το στρώμα εφαρμογής. Ένα εναλλακτικό σύστημα σηματοδότησης που βασίζεται σε ένα κινητό πρωτόκολλο IPv6 και ένα πρωτόκολλο HIP [39] περιγράφει μια νέα υπηρεσία επέκτασης του HIP που επιτρέπει την ανάθεση σηματοδότησης (signaling delegation) [40]. Η υπηρεσία αυτή εφαρμόζεται σε μεταβιβάσεις βασισμένες στο HIP και στις διαδικασίες εγκαθίδρυσης συνεδριών των UFA, για να μειωθεί ο αριθμός των ανταλλαγών σταθμών βάσει του HIP στα δίκτυο κορμού και πρόσβασης, καθώς και να καταστεί δυνατή η ανάθεση της σηματοδότησης HIP του κινητού κόμβου από τις UFA πύλες. Επιπλέον, έχει εισαχθεί ένας νέος δια-στρωματικός μηχανισμός εξουσιοδότησης για τα L2 και HIP, προκειμένου να αντικαταστήσει την εξουσιοδότηση πρόσβασης με

βάση τα πιστοποιητικά από έναν πιο αποδοτικό μηχανισμό εξουσιοδότησης. Στο [41] ορίζεται με σαφήνεια ότι η σύνδεση του τερματικού σταθμού (terminal attachment), η εγκαθίδρυση συνεδρίας (session establishment) και οι διαδικασίες παράδοσης, ενισχύουν περαιτέρω την αρχική ιδέα παρέχοντας δύο ολοκληρωμένα σχήματα UFA (δηλαδή τα SIP-IEEE 802.21-HIP και SIP- IEEE 802.21-PMIP) και αναλύουν την καταλληλότητα των δύο λύσεων χρησιμοποιώντας τη Διαδικασία Πολλαπλασιαστικής Αναλυτικής Ιεράρχησης.

3.4 Κατανεμημένη Διαχείριση Κινητικότητας στις επίπεδες Αρχιτεκτονικές

3.4.1 Κίνητρα για Λειτουργίες κατανεμημένης κινητικότητας

Τα επίπεδα κινητά δίκτυα, όχι μόνο απαιτούν νέα υποδείγματα αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, ειδικούς κόμβους δικτύου και στοιχεία με ιδιαίτερες λειτουργίες, αλλά επίσης απαιτούν σχήματα διαχείρισης κινητικότητας επαρκώς προσαρμοσμένα στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική. Στην πραγματικότητα, οι κατανεμημένοι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας και οι συσχετιζόμενες με αυτούς μέθοδοι απόφασης, οι υπηρεσίες πληροφοριών, εντολών και συμβάντων αποτελούν το κλειδί του μελλοντικού σχεδιασμού του κινητού Διαδικτύου. Η σημασία αυτού του τομέα έρευνας τονίζεται επίσης με τη δημιουργία μιας νέας ομάδας εργασίας (IETF) που ονομάζεται Κατανεμημένη Διαχείριση Κινητικότητας (Distributed Mobility Management - DMM), με στόχο να επεκτείνει τις τρέχουσες λύσεις της κινητικότητας IP για επίπεδες αρχιτεκτονικές δικτύων.

Οι τρέχουσες λύσεις διαχείρισης κινητικότητας βασίζονται σε ιεραρχικές και συγκεντρωτικές αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούν κόμβους άγκυρας για τη σηματοδότηση κινητικότητας και την προώθηση της κίνησης χρηστών. Στις αρχιτεκτονικές 3G UMTS, οι συγκεντρωτικές και ιεραρχικές άγκυρες κινητικότητας υλοποιούνται

από τους κόμβους RNC, SGSN και GGSN που χειρίζονται τις εργασίες προώθησης της κίνησης χρησιμοποιώντας τη συσκευή (apparatus) του GPRS Tunneling Protocol (GTP). Παρόμοια συγκεντρωτική δομή είναι εμφανής στο κινητό IP (MIP) [42], όπου ο οικείος πράκτορας, ένας κόμβος άγκυρας τόσο για τη σηματοδότηση όσο και για την κίνηση σε επίπεδο χρήστη, διαχειρίζεται πληροφορίες θέσης κινητών τερματικών, και κατευθύνει μέσω σήραγγας (tunnels) την κίνηση χρηστών προς τις τρέχουσες θέσεις του κινητού και το αντίστροφο. Αρκετές βελτιώσεις και επεκτάσεις, όπως οι γρήγορες μεταβιβάσεις κινητού IPv6 (Fast MIP - FMIP) [43], ιεραρχικό κινητό IPv6 (Hierarchical MIP - HMIP) [44], πολλαπλές καταχωρήσεις διευθύνσεων Care-of [45], κινητικότητα δικτύου (Network Mobility - NEMO) βασική υποστήριξη (Basic Support) [46], διπλή στοίβα κινητού IPv6 [47], proxy mobile IPv6 (PMIP) [48], είχαν προταθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη διεύρυνση των δυνατοτήτων του κινητού IP, αλλά όλα διατήρησαν τα χαρακτηριστικά του συγκεντρωτικού σχεδιασμού και της αγκύρωσης, τα οποία υπήρχαν και στο αρχικό σχέδιο.

Υπάρχουν επίσης εναλλακτικά σχήματα στη βιβλιογραφία, που έχουν ως στόχο την ενσωμάτωση πρωτόκολλων κινητικότητας IP σε κυψελωτές αρχιτεκτονικές και την αποτελεσματική διαχείριση ετερογενών δικτύων με ειδικά σενάρια κινητικότητας. Το κυψελωτό IP [49] εισάγει ένα δρομολογητή πύλης (Gateway Router) που ασχολείται με την τοπική διαχείριση της κινητικότητας, ενώ υποστηρίζει επίσης μια σειρά από τεχνικές μεταβίβασης και σελιδοποίησης (paging). Μια παρόμοια προσέγγιση είναι η handoff-aware wireless access Internet infrastructure (HAWAII) [50], η οποία είναι ένα ξεχωριστό πρωτόκολλο δρομολόγησης για να χειριστεί τη μικροκινητικότητα. Η Ανεξάρτητη Κινητικότητα Τερματικού για IP (Terminal Independent Mobility) [51] συνδυάζει ορισμένα πλεονεκτήματα από το κυψελωτό IP και το HAWAII, όπου

τα τερματικά με «παραδοσιακές» στοίβες IP έχουν τον ίδιο βαθμό κινητικότητας με τα τερματικά με στοίβες IP που είναι προσαρμοσμένες στην κινητικότητα. Οι συγγραφείς του [52] παρουσιάζουν ένα πλαίσιο που ενσωματώνει το πρωτόκολλο 802.21 Media independent Handover [53] και το κινητό IP προκειμένου για τη δημιουργία δικτύου με γνώμονα την κινητικότητα. Ωστόσο, οι προτάσεις αυτές βασίζονται επίσης σε συγκεντρωτικές λειτουργίες και γενικά βασίζονται σε συστήματα MIP ή παρόμοια συστήματα προσάρτησης.

Μερικές από τις παραπάνω λύσεις αποτελούν ήδη πρότυπα [33] [34] [54] για 3G αλλά και μεταγενέστερες του 3G αρχιτεκτονικές, όπου η αρχιτεκτονική βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη: Σταθμοί βάσης της EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) ή της LTE (Long Term Evolution) έγιναν κατανομημένοι σε ένα πιο επίπεδο σύστημα που επιτρέπει τη σχεδόν ολοκληρωτική κατανομή μηχανισμών ελέγχου παράδοσης και της ασύρματης σύνδεσης, μαζί με άμεσες λογικές διεπαφές για επικοινωνία μεταξύ των σταθμών βάσης. Εδώ, η προώθηση της κίνησης μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης επιτρέπεται προσωρινά κατά τη διάρκεια των συμβάντων παράδοσης που παρέχουν κινητικότητα εντός του τομέα (intra-domain mobility). Ωστόσο, η προώθηση της κίνησης και οι λειτουργίες κινητικότητας που περιλαμβάνουν περισσότερες της μίας πύλες παραμένουν κεντρικές χάρη στους κόμβους άγκυρας τοπικής κινητικότητας (Local Mobility Anchor) S-GW, PDN-GW. Επίσης, η μείωση του φόρτου κίνησης με χρήση των επεκτάσεων LIPTO και SIPA δεν μπορεί να λύσει πλήρως το θέμα αυτό: οι μηχανισμοί διαχείρισης κινητικότητας σε τρέχοντα ασύρματα και κινητά δίκτυα, αγκυρώνουν (anchor) την κίνηση των χρηστών σχετικά μακριά από την τοποθεσία των χρηστών. Αυτό οδηγεί σε κεντρικό, μη επεκτάσιμο επίπεδο δεδομένων (data plane) και επίπεδο ελέγχου (control plane) με μη-βέλτιστες διαδρομές, επιπρόσθετο φορτίο

(overhead) και υψηλή από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση πακέτων, ακόμη και στη περίπτωση ακίνητων χρηστών, κεντροκοποιημένη διαχείριση πλαισίων συμφραζομένων (centralized context maintenance) και σημεία αποτυχιών. Η βασισμένη στην αγκύρωση προώθηση κίνησης και οι λύσεις διαχείρισης της κινητικότητας προκαλούν επίσης την ανάπτυξη θεμάτων για την προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου (caching content) κοντά στον χρήστη.

Για να λυθούν όλα αυτά τα προβλήματα και ερωτήματα, πρέπει να προβλεφθούν νέες καταναμημένες προσεγγίσεις διαχείρισης κινητικότητας, που να εφαρμόζονται στις περιπτώσεις ενδο-και δια-τεχνολογικής κινητικότητας (intra- and inter- technology mobility cases).

3.4.2 Σενάρια εφαρμογών για συστήματα καταναμημένης διαχείρισης κινητικότητας (DMM Schemes)

Η βασική ιδέα είναι ότι οι κόμβοι αναφοράς και οι λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας των ασύρματων και των κινητών συστημάτων θα μπορούσαν να καταναμηθούν σε πολλαπλές θέσεις σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου, συνεπώς οι κινητοί κόμβοι που βρίσκονται σε οποιαδήποτε από αυτές τις περιοχές θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν από μια κοντινή οντότητα.

Μια πρώτη εναλλακτική λύση για την επίτευξη DMM είναι η κατανομή σε επίπεδο πυρήνα. Σε αυτή την περίπτωση οι άγκυρες κινητικότητας είναι τοπολογικά καταναμημένες και καλύπτουν συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, αλλά εξακολουθούν να παραμένουν στο δίκτυο κορμού. Ένα καλό παράδειγμα είναι το Παγκόσμιο πρωτόκολλο HA to HA [55], το οποίο επεκτείνει το κινητό IP και τη κινητικότητα δικτύου για να απομακρύνει τις εξαρτήσεις τους από το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (link layer dependencies) στο Home Link και να καταναμεί τους Home agents στο επίπεδο 3 (Layer 3), στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου. Το DIMA (Distributed IP Mobility Approach - καταναμημένη Προσέγγιση κινητικότητας IP)

[56] μπορεί να θεωρηθεί επίσης ως ένα σύστημα επιπέδου πυρήνα, επιτρέποντας τη κατανομή του MIP Home Agent (τον συνήθως απομονωμένο κεντρικό εξυπηρέτη) σε πολλούς και λιγότερο ισχυρούς συνεργαζόμενους εξυπηρέτες που ονομάζονται *πράκτορες κινητικότητας* (Mobility Agents - MA). Αυτοί οι νέοι κόμβοι έχουν τη συνδυασμένη λειτουργικότητα ενός MIP Home Agent και κινητά σημεία προσάρτησης (mobility anchor points) HMIP PMIP. Η διαχείριση του συστήματος κατανεμημένων κινητών πρακτόρων γίνεται μέσω μιας κατανεμημένης δομής πίνακα επικάλυψης (overlay table structure), που βασίζεται σε έναν κατανεμημένο πίνακα κερματισμού (Distributed Hash Table - DHT) [57]. Δημιουργεί μία εικονική συστοιχία Home Agent με κατανεμημένη κρυφή μνήμη σύνδεσης (binding cache) που απεικονίζει το προσωρινό αναγνωριστικό ενός κινητού κόμβου με τον μόνιμο του αναγνωριστικό.

Μια εναλλακτική προσέγγιση για DMM είναι όταν κατανέμονται λειτουργίες κινητικότητας και άγκυρες στο τμήμα πρόσβασης του δικτύου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των pico-και femto κυψελωτών συστημάτων πρόσβασης, θα μπορούσε να είναι πολύ αποτελεσματική η εισαγωγή δυνατοτήτων του επιπέδου 3 (Layer 3) σε κόμβους πρόσβασης για να διαχειριστούν την κινητικότητα IP και να παρέχουν υψηλότερου επιπέδου παρέμβαση ακόμη και διαστρωματικούς μηχανισμούς βελτιστοποίησης. Η έννοια του δρομολογητή σταθμού βάσης (Base Station Router - BSR) UMTS [58] υλοποιεί ένα κατανεμημένο σύστημα διαχείρισης κινητικότητας, όπου ένα ειδικό στοιχείο του δικτύου που ονομάζεται BSR χρησιμοποιείται για την κατασκευή επίπεδων κυψελωτών συστημάτων. Το BSR συγχωνεύει τις οντότητες GGSN, SGSN, RNC και NodeB σε ένα μόνο στοιχείο: ενώ ένα κοινό δίκτυο UMTS είναι χτισμένο από μια πληθώρα δικτυακών κόμβων και διατηρείται σε μια ιεραρχική και συγκεντρωτική μορφή, το BSR ενσωματώνει όλη τη

ασύρματη πρόσβαση και τις βασικές λειτουργίες. Επιπλέον, το BSR μπορεί να θεωρηθεί ως ειδικός ασύρματος δρομολογητής που αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ κινητής/ασύρματης επικοινωνίας και της επικοινωνίας IP. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, η υποστήριξη της κινητικότητας στο BSR αντιμετωπίζεται σε τρία στρώματα: κανάλι κινητικότητας RF, κινητικότητα άγκυρας επιπέδου 2 (Layer 2), και κινητικότητα IP επιπέδου 3 (Layer 3). Η ιδέα που παρουσιάζεται στο [59] είναι αρκετά παρόμοια με την έννοια του BSR. Εδώ ένας κόμβος που ονομάζεται πύλη πρόσβασης (Access Gateway - AGW) εισάγεται για την υλοποίηση κατανεμημένων λειτουργιών διαχείρισης κινητικότητας στο επίπεδο πρόσβασης. Ολόκληρη η επίπεδη αρχιτεκτονική αποτελείται από δύο είδη στοιχείων, το AGW από την πλευρά του δικτύου πρόσβασης και τα τερματικά από την πλευρά του χρήστη. Οι κόμβοι του δικτύου κορμού είναι κυρίως απλοί δρομολογητές IP. Το σχήμα εφαρμόζει τους διαχωρισμούς DHT και Loc/ID: κάθε κινητός κόμβος έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID), που διατηρείται σταθερό, και μια διεύθυνση τοποθεσίας IP (Loc) που αλλάζει με κάθε συμβάν κινητικότητας. Το (Loc, ID) ζεύγος κάθε κινητού κόμβου αποθηκεύεται στους κόμβους AGW και η διαχείρισή του γίνεται με τη χρήση πινάκων κατακερματισμού (DHTs).

Ένας τρίτος τύπος DMM είναι η λεγόμενη επιπέδου-host ή ομότιμη κατανεμημένη διαχείριση κινητικότητας, όπου όταν βρεθεί ο ανταποκρινόμενος (correspondent) κόμβος, ομότιμοι χρήστες μπορούν να ανταλλάσσουν απευθείας πακέτα IP. Για να βρεθεί ο ανταποκρινόμενος κόμβος, απαιτείται ένας ειδικός εξυπηρέτης πληροφοριών στο δίκτυο, ο οποίος μπορεί επίσης να είναι συγκεντρωτικός ή κατανεμημένος. Ένα καλό παράδειγμα για σύστημα επιπέδου-host στο επίπεδο IP είναι το MIPv6 το οποίο είναι σε θέση να παρακάμψει την άγκυρα επιπέδου χρήστη (δηλαδή, τον Home agent), λόγω μηχανισμού βελτιστοποίησης διαδρομής,

παρέχοντας ως εκ τούτου μια μέθοδο επικοινωνίας υπολογιστή-προς-υπολογιστή. Τα πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας από-άκρο-σε-άκρο τα οποία λειτουργούν σε υψηλότερα στρώματα της στήβας TCP/IP όπως το Host Identity Protocol (HIP) [60], το TCP-Migrate [61], MSOCKS [62], Stream Control Transmission Protocol (SCTP) [63], ή Session Initiation Protocol (SIP) [64] μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης αποτελεσματικά σε τέτοια συστήματα.

3.4.3 Μέθοδοι κατανομής των λειτουργιών κινητικότητας

Οι λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας μπορούν να κατανεμηθούν με δύο τρόπους: μερικώς και πλήρως.

Τα μερικώς κατανεμημένα συστήματα μπορούν να υλοποιηθούν είτε:

- με διακριτή σηματοδότηση και επίπεδα χρηστών με βάση τις διαφορές τους στον όγκο της κίνησης ή με end-host συμπεριφορά (δηλαδή, κατανέμεται μόνο το επίπεδο χρήστη)
- καθιστώντας δυνατή την κινητικότητα μόνο στους κόμβους που τη χρειάζονται πραγματικά, ως εκ τούτου, επιτυγχάνοντας πιο προηγμένη διαχείριση των πόρων.

Σημειώστε ότι αυτές οι δύο προσεγγίσεις μπορούν επίσης να συνδυαστούν.

Τα σημερινά πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας (π.χ., Mobile IP, NEMO BS και Proxy Mobile IP χωρίς βελτιστοποίηση διαδρομής) δεν ξεχωρίζουν τη σηματοδότηση και το επίπεδο χρήστη, πράγμα που σημαίνει ότι όλα τα πακέτα ελέγχου και δεδομένων διασχίζουν την κεντρική ή ιεραρχική άγκυρα κινητικότητας. Δεδομένου ότι ο όγκος της κίνησης στο επίπεδο χρήστη είναι πολύ μεγαλύτερος σε σύγκριση με την κίνηση σηματοδότησης, ο διαχωρισμός της σηματοδότησης και των επιπέδων χρηστών μαζί με την κατανομή αυτών, αλλά χωρίς την εξάλειψη των αγκυρών σηματοδότησης μπορεί ακόμα να έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματική και κλιμακούμενη

διαχείριση της κινητικότητας. Αυτή η διαδικασία αξιοποιείται από το σύστημα των υπερεπίπεδων αρχιτεκτονικών με βάση το πρωτόκολλο HIP [39-41], όπου ένα σχετικά απλό inter-UFA GW πρωτόκολλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί χάρη στο κεντρικό HIP επίπεδο σηματοδότησης, αλλά το επίπεδο χρήστη είναι ακόμη πλήρως κατακευματισμένο. Οι λύσεις Κινητού IP DMM βασίζονται επίσης στα πλεονεκτήματα αυτής της μερικώς κατακευματισμένης ιδέας, όταν εφαρμόζουν βελτιστοποίηση δρομολόγησης, ως εκ τούτου, ξεχωρίζουν τα πακέτα ελέγχου από τα μηνύματα δεδομένων μετά από μια σύντομη περίοδο διαδικασίας βελτιστοποίησης διαδρομής.

Ο δεύτερος τύπος μερικώς κατακευματισμένης διαχείρισης κινητικότητας βασίζεται στην ικανότητα απενεργοποίησης της σηματοδότησης κινητικότητας όταν δεν χρειάζονται τέτοιοι μηχανισμοί. Αυτή η αποκαλούμενη *δυναμική διαχείριση της κινητικότητας* εκτελεί δυναμικά λειτουργίες κινητικότητας μόνο για κινητούς κόμβους που υπόκεινται πραγματικά σε συμβάντα παράδοσης (handover events). Σε αυτή τη περίπτωση, χάρη στην αφαίρεση της ανεπιθύμητης σηματοδότησης κινητικότητας, η αδράνεια παράδοσης και ο έλεγχος επιπρόσθετου φορτίου κίνησης (control overhead) μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Ενσωματώνοντας την ιδέα αυτή με κατακευματισμένες άγκυρες, οι αλγόριθμοι που υποστηρίζουν δυναμική κινητικότητα θα μπορούσαν, επίσης, να γίνουν κατακευματισμένοι. Η ενσωμάτωση αυτή πραγματοποιείται στα [65] [66], όπου οι συγγραφείς εισάγουν και αξιολογούν ένα σύστημα δυναμικής προσάρτησης της κίνησης κόμβων σε κατακευματισμένους κόμβους πρόσβασης (Access Nodes - AN), ανάλογα με την πραγματική θέση των κινητών όταν εγκαθιδρύονται οι συνεδρίες. Η δυναμική φύση της λύσης έγκειται στο γεγονός ότι οι συνεδρίες των κινητών κόμβων είναι δυναμικά αγκυροβολημένες σε διαφορετικούς κόμβους πρόσβασης ανάλογα με τη διεύθυνση IP που χρησιμοποιείται. Με βάση αυτή την συμπεριφορά, το σύστημα είναι σε θέση να αποφύγει

την εκτέλεση των λειτουργιών διαχείρισης κινητικότητας (π.χ., ενθουλάκωση κυκλοφορίας) εφόσον δεν κινείται ένας συγκεκριμένος κινητός κόμβος. Η μέθοδος είναι ταυτόχρονα δυναμική και καταναεμημένη και επειδή όλη η διαχείριση των λειτουργιών κινητικότητας γίνεται στο επίπεδο πρόσβασης (από τους κόμβους πρόσβασης - ANs), είναι κατάλληλη για επίπεδες αρχιτεκτονικές.

Τα πλήρως καταναεμημένα συστήματα επιφέρουν τη πλήρη κατανομή των λειτουργιών κινητικότητας, δηλαδή, τόσο το επίπεδο χρήστη όσο και το επίπεδο ελέγχου καταναεμονται. Αυτό συνεπάγεται την καθιέρωση ειδικών μηχανισμών, προκειμένου να προσδιορίσουν την άγκυρα που διαχειρίζεται τη σηματοδοσία κινητικότητας και την προώθηση δεδομένων ενός συγκεκριμένου κινητού κόμβου. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό απαιτεί επίσης την απόλυτη κατανομή της βάσης δεδομένων πλαισίων κινητικότητας (mobility context database). Πίνακες κερματισμού ή επικοινωνίες τύπου anycast/broadcast/multicast μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους παραπάνω σκοπούς. Σε τέτοια συστήματα, συνήθως, όλη η δρομολόγηση και οι λειτουργίες σηματοδοσίας των κόμβων αναφοράς κινητικότητας είναι ενσωματωμένα στο επίπεδο πρόσβασης.

3.5 Συμπέρασμα

Οι επίπεδες αρχιτεκτονικές προσφέρουν υψηλή επεκτασιμότητα επειδή οι κεντρικές άγκυρες – ο κυριότερος λόγος συμφόρησης - αφαιρούνται, και η κίνηση προωθείται με ένα καταναεμημένο τρόπο. Η επίπεδη προσέγγιση παρέχει επίσης ευελιξία όσον αφορά την εξέλιξη της ευρυζωνικής πρόσβασης, π.χ. η επέκταση του εύρους των ασύρματων δικτύων πρόσβασης με micro-, pico-και femto-κυψελοειδή δίκτυα που δεν απαιτούν διαχειριστική παρέμβαση, χωρίς να υπάρχουν λόγοι ανησυχίας για το αν οι κεντρικές οντότητες καλύπτουν όλη την έκταση με μια ιεραρχική δομή.

Στις επίπεδες αρχιτεκτονικές, οντότητες ενσωματωμένων ασύρματων σταθμών βάσης IP συνδέονται άμεσα με την υποδομή IP του δικτύου κορμού. Επομένως, παρέχουν κατάλληλη και απεριόριστη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών ασύρματων τεχνολογιών, και προσφέρουν έναν πρακτικό τρόπο κατανομής της υποδομής για τους διαχειριστές. Η επίπεδη φύση επίσης επιφέρει την εξάλειψη των κεντρικών συστατικών που εξαρτώνται από συγκεκριμένες τεχνολογίες πρόσβασης. Χάρη στην ενσωματωμένη φύση αυτών των προηγμένων σταθμών βάσης, η επιπλέον καθυστέρηση που το επίπεδο χρήστη και σηματοδοσίας αντιλαμβάνονται πάνω από ένα ιεραρχικό και πολλαπλών στοιχείων (multi-element) δίκτυο πρόσβασης και δίκτυο κορμού (δηλαδή, τη μετάδοση και τις καθυστερήσεις σε μια ουρά σε ένα κεντρικό κόμβο ελέγχου) μειώνεται ή και εξαλείφεται. Αυτός ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός των κόμβων σταθμών βάσης ελαχιστοποιεί επίσης το χρόνο ανατροφοδότησης της επικοινωνίας μεταξύ στοιχείων της αρχιτεκτονικής (intermodule communication), δηλαδή ο χειρισμός της σηματοδοσίας γίνεται άμεσα μόλις αυτή ληφθεί σε τοπικό επίπεδο, στο άκρο του δικτύου του χειριστή, κάτι που δίνει τη δυνατότητα να ενσωματώθούν εξελιγμένες διαστρωματικές τεχνικές βελτιστοποίησης της απόδοσης του εξοπλισμού IP.

Η χρήση εξοπλισμού IP γενικής χρήσης που παράγεται σε μεγάλες ποσότητες έχει επίσης οικονομικά πλεονεκτήματα. Σε επίπεδες αρχιτεκτονικές, τα συστατικά του ασύρματου δικτύου πρόσβασης θα μπορούσαν να είναι πολύ φθηνότερα σε σύγκριση με τις συσκευές HSPA και LTE, λόγω της οικονομίας κλίμακας (economy of scale). Επίσης, τα λειτουργικά κόστη μπορεί να μειωθούν διότι ένα επίπεδο δίκτυο έχει λιγότερα ολοκληρωμένα στοιχεία, και δεν περιλαμβάνει τις ιεραρχικές λειτουργίες που επηρεάζονται ταυτόχρονα από τις διαδικασίες διαχείρισης. Η αύξηση του ανταγωνισμού των εργαλείων διαχείρισης του δικτύου λόγω της εμφάνισης εργαλείων που

αναπτύχθηκαν αρχικά για την εποχή του Διαδικτύου μπορεί να μειώσει επίσης τις λειτουργικές δαπάνες.

Η ανοχή σε σφάλματα, η αξιοπιστία και ο πλεονασμός των δικτύων μπορεί επίσης να βελτιωθεί και να ενισχυθεί με επίπεδα συστήματα σχεδιασμού. Κόμβοι αναφοράς και ελέγχου σε ιεραρχικές και κεντρικές αρχιτεκτονικές είναι συχνά σημεία αποτυχιών και η ανεπάρκειά τους μπορεί εύκολα να προκαλέσει σοβαρές βλάβες που θα επηρεάσουν μεγάλες περιοχές. Μέσα στις επίπεδες αρχιτεκτονικές τέτοια σημεία αποτυχίας δεν υπάρχουν και οι επιπτώσεις των πιθανών αποτυχιών των κατανεμημένων στοιχείων του δικτύου (δηλαδή των σταθμών βάσης) μπορούν να περιοριστούν σε τοπικό επίπεδο, χωρίς να είναι μάλιστα απαραίτητες πολύπλοκες λειτουργίες αποκατάστασης.

Ένα άλλο σημαντικό όφελος των επίπεδων αρχιτεκτονικών είναι η δυνατότητα για την πρόληψη καταστάσεων μη βέλτιστης δρομολόγησης και η υλοποίηση προηγμένης διαχείρισης πόρων. Σε μια κοινή ιεραρχική αρχιτεκτονική, όλη η κυκλοφορία περνά μέσω των κεντρικών κόμβων αναφοράς, κάτι που πιθανόν αυξάνει το μονοπάτι δρομολόγησης και οδηγεί σε μη βέλτιστη δρομολόγηση της κίνησης σε σύγκριση με τις επίπεδες αρχιτεκτονικές.

Ωστόσο, προκειμένου να αξιοποιηθούν όλα τα παραπάνω οφέλη και πλεονεκτήματα, πρέπει να αντιμετωπιστούν μερικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι επίπεδες αρχιτεκτονικές.

Στις επίπεδες αρχιτεκτονικές, η διαχείριση και ο συντονισμός του δικτύου μαζί με τον έλεγχο των πόρων πρέπει να γίνει με ένα πλήρως κατανεμημένο και αποκεντρωμένο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η αυτό-διαμόρφωση και οι ικανότητες αυτο-βελτιστοποίησης πρόκειται να εισαχθούν στο σύστημα. Στενά συνδεδεμένα με την αυτό-βελτιστοποίηση και την αυτο-ρύθμιση, η αυτο-διάγνωση και η αυτό-ίαση είναι απαραίτητα για τη συνεχή και αξιόπιστη παροχή υπηρεσιών στις επίπεδες αρχιτεκτονικές. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι συσκευές IP είναι πιο ευαίσθητες σε αποτυχίες: λόγω

της έλλειψης οντοτήτων-ελεγκτών, ο έλεγχος των σταθμών βάσης δεν είναι πλέον κεντρικός. Ως εκ τούτου, οι αποτυχίες διάγνωσης και αποκατάστασης πρέπει να γίνονται με ένα πλήρως καταναμημένο και αυτοματοποιημένο τρόπο. Αυτό είναι μια μεγάλη πρόκληση, αλλά έρχεται με τα οφέλη της επεκτασιμότητας, ανοχής σφαλμάτων και ευελιξίας.

Η βελτιστοποίηση της απόδοσης μεταβίβασης είναι μια άλλη βασική πρόκληση για τα επίπεδα δίκτυα. Σε αντίθεση με τις ιεραρχικές και συγκεντρωτικές αρχιτεκτονικές, οι οποίες συνήθως παρέχουν αποτελεσματικούς και γρήγορους μηχανισμούς παράδοσης χρησιμοποιώντας μεθόδους του επιπέδου 2 (Layer 2), στις επίπεδες αρχιτεκτονικές πρέπει να χρησιμοποιηθεί πρωτόκολλο διαχείρισης κινητικότητας IP με προηγμένη επέκταση μικροκινητικότητας. Δεδομένου ότι όλοι οι σταθμοί βάσης συνδέονται άμεσα με το δίκτυο κορμού IP, είναι πολύ πιο δύσκολο να αποκρυβούν συμβάντα κινητικότητας από το επίπεδο IP.

Τελευταίο, αλλά εξ ίσου σημαντικό, είναι το θέμα της ποιότητας της παροχής υπηρεσιών, το οποίο είναι επίσης μια σημαντική πρόκληση για τις επίπεδες αρχιτεκτονικές. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει επειδή οι τρέχοντες μηχανισμοί διασφάλισης ποιότητας υπηρεσιών στον κόσμο του IP απαιτούν βελτιώσεις για την αντικατάσταση των συστημάτων QoS του επιπέδου 2 των παραδοσιακών συστημάτων ιεραρχικών και συγκεντρωτικών αρχιτεκτονικών κινητών τηλεπικοινωνιών. Το δίκτυο IP που ασχολείται με τη διασύνδεση των σταθμών βάσης σε επίπεδα δίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να διασφαλίσει διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (π.χ., εύρους ζώνης και καθυστέρησης) και να διαχειριστεί τους πόρους για επαρκή απόδοση των εφαρμογών.

Με βάση τα οφέλη που συλλέγονται και τις πραγματικές προκλήσεις των επίπεδων αρχιτεκτονικών, μπορούμε να πούμε ότι η εφαρμογή συστημάτων επίπεδης δικτύωσης μαζί με καταναμημένα και δυναμικά διαχείριση της κινητικότητας είναι μια από τις πιο υποσχόμενες

εναλλακτικές λύσεις για την αλλαγή της τρέχουσας κινητής αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου για την καλύτερη προσαρμογή του στις μελλοντικές ανάγκες.

4. Μια γνωσιακή Αρχιτεκτονική για το μελλοντικό Διαδίκτυο

4.1 Εισαγωγή

Ήδη από το 2005, υπήρχε η αίσθηση ότι η αρχιτεκτονική και τα πρωτόκολλα του Διαδικτύου έπρεπε να επανεξεταστούν για να αποφευχθεί η κατάρρευση του Διαδικτύου [69]. Ωστόσο, η έρευνα για το μελλοντικό Διαδίκτυο έγινε προτεραιότητα μόνο κατά τα τελευταία πέντε χρόνια, όταν η εκθετική ανάπτυξη μικρών και/ή κινητών συσκευών, αισθητήρων, υπηρεσιών και των απαιτήσεων ασφαλείας άρχισαν να δείχνουν ότι το τρέχον Διαδίκτυο γίνεται το ίδιο αποτρεπτικός παράγοντας ανάπτυξής του. Δύο κύριες προσεγγίσεις έχουν προταθεί και διερευνηθεί: η ριζοσπαστική προσέγγιση [70], με στόχο τον εντελώς εκ νέου σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου, και η εξελικτική προσέγγιση [71], που προσπαθεί ομαλά να προσθέσει νέες λειτουργίες στο σημερινό Διαδίκτυο εφεξής.

Μέχρι αυτή τη στιγμή, η εξέλιξη της τεχνολογίας κατάφερε να καλύψει τις ελλείψεις της αρχιτεκτονικής του σημερινού Διαδικτύου, αλλά, κατά πάσα πιθανότητα, η ανάπτυξη των Internet-aware συσκευών και οι όλο και πιο απαιτητικές ανάγκες των νέων υπηρεσιών και εφαρμογών θα απαιτήσουν σύντομα ριζικές βελτιώσεις στην αρχιτεκτονική. Η θέση αυτή υποστηρίζεται από τον αριθμό των χρηματοδοτούμενων έργων, τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ευρώπη.

Στις ΗΠΑ, υπάρχουν σημαντικές πρωτοβουλίες. Το NeTS (Networking Technology and Systems) [72] ήταν ένα πρόγραμμα του Εθνικού Ιδρύματος Επιστημών (National Science Foundation) για την έρευνα στο διαδίκτυο, που στόχο είχε την προώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων που απαιτούνται για τη δημιουργία δικτύων

επόμενης γενιάς και τη βελτίωση της κατανόησης των μεγάλων, πολύπλοκων και ετερογενών δικτύων. Η συνέχεια του NeTS, το NetSE [73] προτείνει μια καθαρή προσέγγιση για τη σωστή εκπλήρωση των απαιτήσεων όσον αφορά την ασφάλεια, την προστασία της ιδιωτικής ζωής και την οικονομική βιωσιμότητα. Το GENI (Global Environment for networks innovations) [74] είναι ένα εικονικό εργαστήριο πειραματισμού σε μεγάλη κλίμακα της επιστήμης των δικτύων, το οποίο βασίζεται σε μια πραγματική υποδομή της τάξης των 40 Gbps. Το Stanford Clean Slate [75] προτείνει μια «αποδιοργανωτική» (disruptive) προσέγγιση με τη δημιουργία πλατφόρμων υπηρεσιών που τίθενται στη διάθεση των ερευνητικών κοινοτήτων και των χρηστών.

Στην Ευρώπη, η έρευνα για το μελλοντικό Διαδίκτυο έχει συμπεριληφθεί ως ένα από τα θέματα του FP6 (Framework Programme 6) και του FP7 (Framework Programme 7). Οι ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες εμφανίζονται λιγότερο επιρρεπείς σε ριζικές αλλαγές, σε σχέση με αυτές των ΗΠΑ, και προσπαθούν να αναπτύξουν πλατφόρμες που υποστηρίζουν υπηρεσίες και εφαρμογές με τη χρήση των υφιστάμενων υποδομών του Διαδικτύου. Για παράδειγμα, το G-Lab (Design and experiment the network of the future, Γερμανία) [76], είναι η γερμανική εθνική πλατφόρμα για μελέτες για το μέλλον του Διαδικτύου και περιλαμβάνει τις ερευνητικές μελέτες των τεχνολογιών του μελλοντικού Διαδικτύου και τον σχεδιασμό και εγκατάσταση των πειραματικών κέντρων. Το GRIF (Research Group for the Future Internet, Γαλλία) [77] και το Internet del Futuro (Ισπανία) [78] εξετάζουν τη ζητήματα συνεργασίας σε διάφορους τομείς εφαρμογών (π.χ. υγεία) και τεχνολογικές πλατφόρμες. Το FIRE [79] είναι μια πρωτοβουλία της ΕΕ με στόχο τη δημιουργία ενός ευρωπαϊκού πειραματικού κέντρου, το οποίο κατασκευάζεται με τη

σταδιακή σύνδεση των υφιστάμενων και μελλοντικών πλατφορμών πειραματισμού για τις μελλοντικές τεχνολογίες του Διαδικτύου.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η πρόταση που παρουσιάζεται στην εργασία [80] για μια μελλοντική αρχιτεκτονική Διαδικτύου η οποία υιοθετεί την εξελικτική προσέγγιση, αλλά είναι επίσης ανοικτή σε καινοτόμες τεχνολογίες και υπηρεσίες. Η βασική ιδέα είναι να συλλέγονται και να υποβάλλονται σε λεπτομερή επεξεργασία όλες οι πληροφορίες που προέρχονται από το σύνολο του περιβάλλοντος (δηλαδή, τους χρήστες, το περιεχόμενο, τις υπηρεσίες, τους πόρους του δικτύου, τους υπολογιστικούς πόρους, τα χαρακτηριστικά των συσκευών) μέσω λειτουργιών εικονικοποίησης και εξόρυξης δεδομένων. Τα μεταδεδομένα που παράγονται με τον τρόπο αυτό εισάγονται κατόπιν σε ευφυείς γνωστικές μονάδες (cognitive modules), οι οποίες παρέχουν τις εφαρμογές/υπηρεσίες με τις απαιτούμενες λειτουργίες προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα εμπειρίας του χρήστη με τους διαθέσιμους πόρους.

Το κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: Η ενότητα 2 είναι αφιερωμένη στην περιγραφή των εννοιών στις οποίες βασίζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Η ενότητα 3 περιγράφει λεπτομερώς την πλατφόρμα για το μέλλον του Διαδικτύου. Τα πειραματικά αποτελέσματα που καταδεικνύουν τις δυνατότητες της πλατφόρμας περιγράφονται στην ενότητα 4. Τέλος, στην ενότητα 5 εξάγονται τα συμπεράσματα.

4.2 Η έννοια της Αρχιτεκτονικής

Οι οντοτήτες που συμμετέχουν στο μελλοντικό Διαδίκτυο, καθώς και στους στόχους του μελλοντικού Διαδικτύου, μπορούν να οριστούν ως εξής:

- *Actors*: Αντιπροσωπεύουν τις οντότητες των οποίων τις απαιτήσεις το μελλοντικό διαδίκτυο στοχεύει οι να ικανοποιήσει. Για παράδειγμα, οι actors περιλαμβάνουν τους

χρήστες, τους προγραμματιστές, τους παρόχους δικτύου, τους παρόχους υπηρεσίας, τους παρόχους περιεχομένου, κ.λπ.

- *Πόροι (Resources)*: Αντιπροσωπεύουν τις οντότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκπλήρωση των απαιτήσεων των actors. Περιλαμβάνουν τις υπηρεσίες, το περιεχόμενο, τα τερματικά, τις συσκευές, τις λειτουργίες ενδιάμεσου λογισμικού (middleware), τις ικανότητες αποθήκευσης, υπολογισμού, συνδεσιμότητας και δικτύωσης.
- *Εφαρμογές (Applications)*: χρησιμοποιούνται από τους actors για να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις και ανάγκες τους εκμεταλλευόμενοι τους διαθέσιμους πόρους.

Στόχος για το μέλλον του Διαδικτύου, σύμφωνα με την εργασία [80], είναι να επιτρέψει στις εφαρμογές να αξιοποιήσουν τους διαθέσιμους πόρους με διαφάνεια, αποτελεσματικότητα και ευελιξία, επιτρέποντας συνεπώς στους actors, με τη χρήση τέτοιων εφαρμογών, να καλύψουν τις απαιτήσεις και τις ανάγκες τους. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, το μελλοντικό Διαδίκτυο θα πρέπει να υπερκεράσει τους ακόλουθους κύριους περιορισμούς.

- Ένας πρώτος περιορισμός είναι σύμφυτος με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική διαστρωμάτωσης, η οποία εξαναγκάζει σε διατήρηση αλγορίθμων και διαδικασιών που τοποθετούνται σε διαφορετικά στρώματα, σε πλήρη ανεξαρτησία μεταξύ τους. Επιπλέον, ακόμη και στο πλαίσιο ενός δεδομένου στρώματος, οι αλγόριθμοι και οι διαδικασίες που αφορούν διαφορετικές εργασίες συχνά σχεδιάζονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον. Αυτά τα ζητήματα απλοποιούν σε μεγάλο βαθμό τον συνολικό σχεδιασμό των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και επίσης μειώνουν σημαντικά τις ανάγκες σε επεξεργαστική ισχύ, μια και το συνολικό πρόβλημα του ελέγχου του τηλεπικοινωνιακού δικτύου επιμερίζεται σε έναν αριθμό πολύ

απλούστερων υπο-προβλημάτων. Παρ' όλα αυτά, ένας σημαντικός περιορισμός αυτής της προσέγγισης προκύπτει από το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι και οι διαδικασίες δεν συντονίζονται επαρκώς μεταξύ τους, μειώνοντας την απόδοση του συνολικού ελέγχου του δικτύου τηλεπικοινωνιών. Τα ανωτέρω θέματα οδηγούν στην απαίτηση για ισχυρότερο συντονισμό μεταξύ των αλγορίθμων και διαδικασιών που ασχολούνται με διάφορες διεργασίες.

- Ένας δεύτερος περιορισμός προέρχεται από το γεγονός ότι, επί του παρόντος, οι περισσότεροι αλγόριθμοι και διαδικασίες που είναι ενσωματωμένες στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι «ανοικτού βρόχου» (open-loop), δηλ. βασίζονται σε off-line "λογική" εκτίμηση των μεταβλητών δικτύου (π.χ. φόρτος εισόδου), αντί για μετρήσεις πραγματικού χρόνου των εν λόγω μεταβλητών. Αυτός ο περιορισμός γίνεται όλο και πιο σημαντικός, δεδομένου ότι οι συμπεριφορές του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και της ταχείας εξέλιξης των χαρακτηριστικών των υπηρεσιών, γίνονται όλο και πιο απρόβλεπτες. Αυτό οδηγεί στην απαίτηση για εξέλιξη προς αλγορίθμους και διαδικασίες «κλειστού βρόχου», οι οποίες είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν σωστά τις κατάλληλες μετρήσεις του δικτύου που γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Από την άποψη αυτή, οι τρέχουσες εξελίξεις της τεχνολογίας, που εξασφαλίζουν φτηνές και ισχυρές δυνατότητες αίσθησης (sensing capabilities), ευνοούν αυτό το είδος της εξέλιξης.
- Ο τρίτος περιορισμός προέρχεται από τη μεγάλη ποικιλία των υπάρχοντων ετερογενών πόρων που έχουν αναπτυχθεί σύμφωνα με διαφορετικές ετερογενείς τεχνολογίες και ως εκ τούτου, ενσωματώνουν τους εξαρτώμενους από την τεχνολογία (technology-dependent) αλγορίθμους και διαδικασίες, καθώς και από τη μεγάλη ποικιλία των ετερογενών

actors σχετίζονται με τις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνίας. Από την άποψη αυτή, η απαίτηση της ενσωμάτωσης και εικονικοποίησης των πόρων και actors έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπιστούν με έναν ομοιογενή και εικονικό τρόπο από τις εφαρμογές, αξιώνει το σχεδιασμό ενός τεχνολογικά ανεξάρτητου, εικονικοποιημένου πλαισίου. Αυτό το πλαίσιο, από τη μία πλευρά, αναμένεται να ενσωματώσει αλγορίθμους και διαδικασίες οι οποίες μπορούν να βασιστούν σε αφηρημένες προηγμένες μεθοδολογίες και, από την άλλη πλευρά, αναμένεται να παρέχονται με τις κατάλληλες διασυνδέσεις εικονικοποίησης που επιτρέπουν σε όλες τις εφαρμογές να επωφεληθούν από τις λειτουργίες που προσφέρονται από το ίδιο το πλαίσιο.

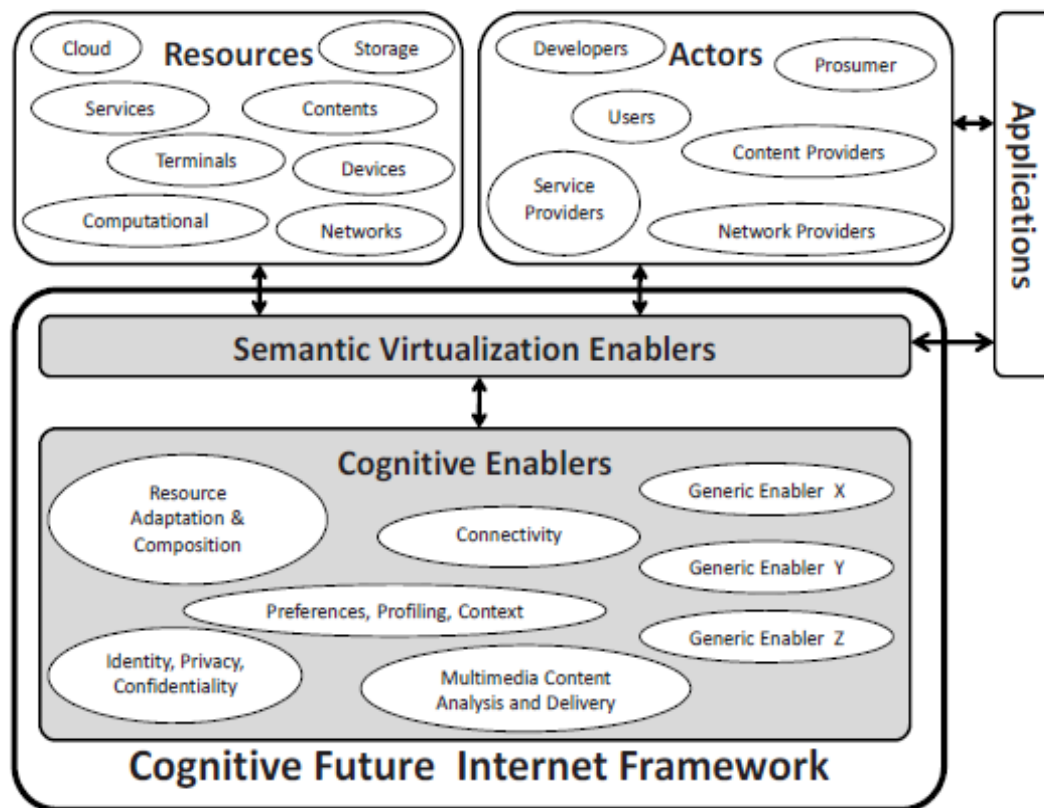
Η ιδέα πίσω από την προτεινόμενη μελλοντική αρχιτεκτονική του Διαδικτύου, η οποία στοχεύει στην αντιμετώπιση των τριών προαναφερθέντων περιορισμών, σκιαγραφείται στην Εικόνα 3. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται στο αποκαλούμενο «γνωσιακό πλαίσιο μελλοντικού Διαδικτύου» υιοθετώντας έναν σπονδυλωτό (modular) σχεδιασμό έχοντας ως βάση τους ενδιάμεσους ενεργοποιητές (middleware enablers). Οι ενεργοποιητές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης (Semantic Virtualization Enablers) και γνωσιακούς ενεργοποιητές (Semantic enablers). Οι γνωσιακοί ενεργοποιητές αποτελούν τον πυρήνα του γνωσιακού Πλαισίου και είναι υπεύθυνοι για την παροχή ελέγχου του μελλοντικού Διαδικτύου και τις λειτουργίες διαχείρισης. Αλληλεπιδρούν με actors, πόρους και εφαρμογές μέσω ενεργοποιητών σημασιολογικής εικονικοποίησης.

Οι ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης είναι υπεύθυνοι για την εικονικοποίηση ετερογενών πρακτόρων, πόρων και εφαρμογών περιγράφοντάς τους μέσω των σωστά επιλεγμένων,

δυναμικών, ομοιογενών, context-aware και σημασιολογικά συγκεντρωτικών μεταδεδομένων.

Οι γνωσιακοί ενεργοποιητές αποτελούνται από ένα σύνολο αρθρωτών, τεχνολογικά ανεξάρτητων, διαλειτουργικών ενεργοποιητών οι οποίοι, βάσει των συγκεντρωτικών μεταδεδομένων που παρέχονται από τους ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης, κάνουν συνεπή έλεγχο και λαμβάνουν τις αποφάσεις διαχείρισης με τον καλύτερο τρόπο για να αξιοποιηθούν και να ρυθμιστούν οι διαθέσιμοι πόροι για την αποτελεσματική και ευέλικτη ικανοποίηση των απαιτήσεων των εφαρμογών και, κατά συνέπεια, των αναγκών των πρακτόρων. Για παράδειγμα, οι γνωσιακοί ενεργοποιητές μπορούν να διατηρήσουν τους πόρους του δικτύου, να συνθέσουν ατομικές υπηρεσίες (compose atomic services) για να παρέχεται μια συγκεκριμένη εφαρμογή, να μεγιστοποιήσουν την ενεργειακή απόδοση, να εγγυηθούν μια αξιόπιστη σύνδεση, να ικανοποιήσουν την αντιλαμβανόμενη ποιότητα εμπειρίας από το χρήστη και ούτω καθεξής.

Οι αποφάσεις ελέγχου και διαχείρισης που λαμβάνονται από τους γνωσιακούς ενεργοποιητές αντιμετωπίζονται από τους ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης, έτσι ώστε να ενεργοποιηθούν σε ότι αφορά τους κατάλληλους πόρους, τις εφαρμογές και τους actors.



Εικόνα 4. Προτεινόμενο γνωσιακό πλαίσιο αρχιτεκτονικής για το μελλοντικό Διαδίκτυο

Σημειώνεται ότι, χάρη στα συγκεντρωτικά σημασιολογικά μεταδεδομένα που παρέχονται από τους ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης, ο έλεγχος και οι λειτουργίες διαχείρισης που περιλαμβάνονται στους σημασιολογικούς ενεργοποιητές έχουν μια ουδέτερη από τεχνολογική άποψη, πολύπλευρη, πολυδικτυακή άποψη των περιβαλλόντων actors, πόρων και εφαρμογών. Συνεπώς, η εμπλουτισμένη με πληροφορίες φύση (πλήρως γνωσιακή) των συγκεντρωτικών μεταδεδομένων, τα οποία χρησιμεύουν ως εισοδοί των γνωσιακών ενεργοποιητών, σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο σχεδιασμό των αλγορίθμων γνωσιακών ενεργοποιητών (π.χ., πολυκριτηριακός προηγμένος έλεγχος και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης), οδηγούν σε βελτιστοποίηση που τέμνει τα επίπεδα (cross-layer) και τα δίκτυα (cross-network).

Το γνωσιακό πλαίσιο μπορεί να εκμεταλλευτεί έναν ή περισσότερους από τους γνωσιακούς ενεργοποιητές με δυναμικό τρόπο: έτσι, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση, το γνωσιακό πλαίσιο ενεργοποιεί και ρυθμίζει σωστά τους απαιτούμενους ενεργοποιητές.

Επιπλέον, σε κάθε συγκεκριμένο περιβάλλον, οι λειτουργίες του γνωσιακού πλαισίου πρέπει να είναι σωστά κατανοημένες στις διάφορες οντότητες του δικτύου (π.χ. φορητά τερματικά, σταθμούς βάσης, οντότητες του δικτύου κορμού). Η επιλογή και η απεικόνιση των λειτουργιών του γνωσιακού πλαισίου στις οντότητες του δικτύου, είναι ένα κρίσιμο έργο που πρέπει να εκτελείται κατά περίπτωση, υιοθετώντας μια διαφανή προσέγγιση σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα, έτσι ώστε να ευνοηθεί μια ομαλή μετάβαση (smooth migration).

Η προσέγγιση που προτείνεται στην εργασία [80] επιτρέπει να ξεπεραστούν οι τρεις ανωτέρω αναφερθέντες περιορισμοί:

- Η συγκέντρωση του ελέγχου και των λειτουργιών διαχείρισης σε ένα ενιαίο γνωσιακό πλαίσιο καθιστά πολύ πιο εύκολο να ληφθούν συνεπείς και συντονισμένες αποφάσεις. Ειδικότερα, η συγκέντρωση των λειτουργιών ελέγχου σε ένα ενιαίο πλαίσιο επιτρέπει την υιοθέτηση αλγορίθμων και διαδικασιών που είναι εναρμονισμένα μεταξύ τους, ακόμη και την από κοινού αντιμετώπιση προβλημάτων με «ένα βήμα» (one-shot way). Τα προβλήματα αυτά παραδοσιακά αντιμετωπίζονται ξεχωριστά και χωρίς συντονισμό.
- Το γεγονός ότι οι αποφάσεις ελέγχου μπορούν να βασίζονται σε κατάλληλα επιλεγμένα, συναθροισμένα μεταδεδομένα που περιγράφουν σε πραγματικό χρόνο, τους πόρους, actors και εφαρμογές επιτρέπει τον έλεγχο τύπου «κλειστού βρόχου», δηλαδή τα δίκτυα γίνονται γνωσιακά. Ειδικότερα, οι γνωσιακοί actors μπορούν, ενδεχομένως, να εκλεπτούν τον έλεγχο,

χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που προέρχονται από όλα τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων και από όλα τα δίκτυα. Υπεραπλουστεύοντας, σύμφωνα με την προτεινόμενη *πλήρως γνωσιακή* προσέγγιση, δυνητικά όλα τα στρώματα θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τις πληροφορίες που προέρχονται από όλα τα στρώματα όλων των δικτύων, επιτρέποντας έτσι να εκτελεστεί μια βελτιστοποίηση που τέμνει πλήρως τα επίπεδα και τα δίκτυα.

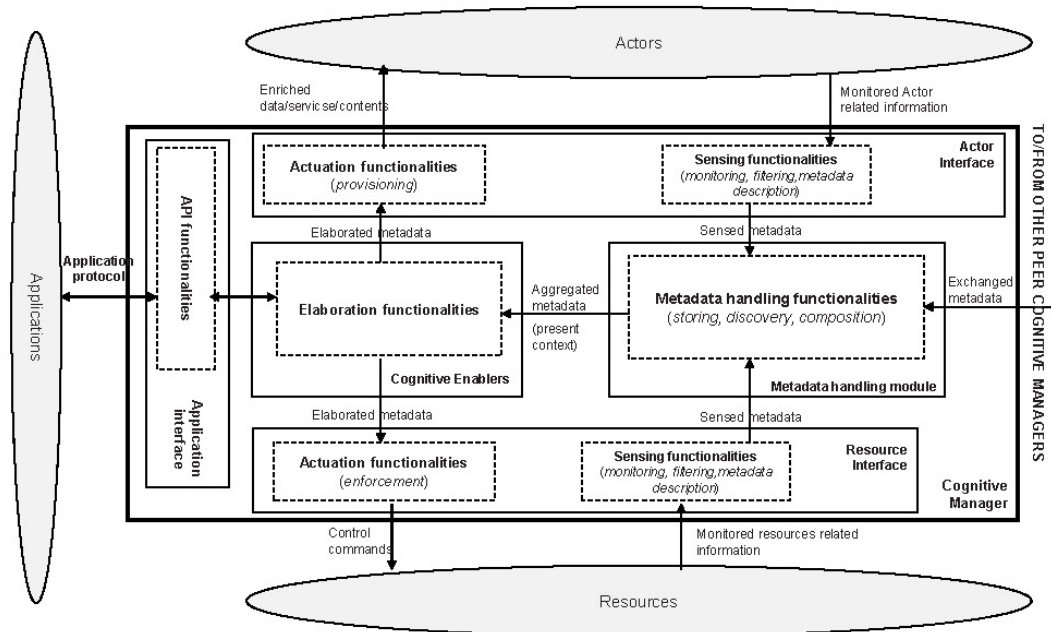
- Οι αποφάσεις ελέγχου που σχετίζονται με την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, μπορούν να γίνουν με ένα τεχνολογικά ανεξάρτητο και εικονικό τρόπο, δηλαδή οι συγκεκριμένες τεχνολογίες και η φυσική θέση πίσω από τους πόρους, actors και εφαρμογές μπορούν να μην ληφθούν υπόψη. Ειδικότερα, η αποσύνδεση του γνωσιακού πλαισίου από τα υποκείμενα επίπεδα μεταφοράς τεχνολογίας από τη μία πλευρά, και από τα επίπεδα υπηρεσίας/περιεχομένου από την άλλη πλευρά, επιτρέπει να ληφθούν αποφάσεις ελέγχου σε ένα αφηρημένο (abstract) επίπεδο, ευνοώντας έτσι την υιοθέτηση προηγμένων μεθόδων ελέγχου (π.χ. βελτιστοποίηση με περιορισμούς, προσαρμοστικός έλεγχος, εύρωστος έλεγχος, θεωρία παιγνίων κ.λπ.), οι οποίες μπορεί να είναι κλειστού βρόχου. Επιπλέον, οι διαδικασίες διαλειτουργικότητας μεταξύ ετερογενών πηγών, πρακτόρων και εφαρμογών γίνεται πιο εύκολη και πιο φυσική.

4.3 Γνωσιακό πλαίσιο αρχιτεκτονικής του μελλοντικού Διαδικτύου

Το γνωσιακό πλαίσιο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα αποτελείται από ένα εννοιολογικό πλαίσιο, το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί (deployed) ως ένα καταναμημένο λειτουργικό πλαίσιο. Μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων γνωσιακών πρακτόρων ενδιάμεσων λογισμικών (cognitive

middleware-based Agents), οι οποίοι στο εξής θα καλούνται *γνωσιακοί διαχειριστές*. Οι γνωσιακοί διαχειριστές θα πρέπει να ενσωματωθούν με διαφάνεια σε κατάλληλες οντότητες του δικτύου (π.χ. φορητά τερματικά, σταθμούς βάσης, φορείς του δικτύου κορμού). Δεν υπάρχει μια μοναδική απεικόνιση μεταξύ του προτεινόμενου εννοιολογικού πλαισίου πάνω από ένα ήδη υπάρχον δίκτυο τηλεπικοινωνιών. Ωστόσο, στην εργασία [80] παρατίθεται ένα σενάριο επικύρωσης της προσέγγισης (proof of concept) όπου το εννοιολογικό πλαίσιο έχει τεθεί σε λειτουργία σε ένα πραγματικό οικιακό δίκτυο (real home area network). Στο παράδειγμα αυτό καταδεικνύεται πως το γεγονός ότι ο γνωσιακός διαχειριστής έχει υλοποιηθεί ως λογισμικό, επιτρέπει τη διαφανή ενσωμάτωσή του στους δικτυακούς κόμβους. Μπορεί να αναπτυχθεί με την εγκατάσταση ενός υλικολογισμικού (firmware) ή μιας ενημερωμένης έκδοσης προγράμματος οδήγησης σε κάθε στοιχείο του δικτύου. Όταν εκτελείται ο γνωσιακός διαχειριστής, ο δικτυακός κόμβος ενισχύεται με λειτουργίες μελλοντικού Διαδικτύου.

Η Εικόνα 5 περιγράφει την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική ενός γενικού γνωσιακού διαχειριστή, δείχνοντας τη διασύνδεση του με πόρους, actors και εφαρμογές. Επίσης αποκαλύπτει ότι ο γνωσιακός διαχειριστής θα περιλαμβάνει πέντε υψηλού επιπέδου αρθρωτές (modular) λειτουργίες, δηλαδή τις λειτουργίες αίσθησης, χειρισμού μεταδεδομένων, επεξεργασίας, ενεργοποίησης και API (Application Protocol Interface). Οι λειτουργίες ανίχνευσης, ενεργοποίησης και API είναι ενσωματωμένες στη συσκευή που συνδέει τον γνωσιακό διαχειριστή με τους πόρους (Resource Interface), με τους actors (Actor Interface) και με τις εφαρμογές (Application Interface). Οι διεπαφές αυτές πρέπει να είναι προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες των διασυνδεδεμένων πόρων, πρακτόρων και εφαρμογών.



Εικόνα 5. Αρχιτεκτονική γνωσιακού διαχειριστή

Οι λειτουργίες Χειρισμού των μεταδεδομένων ενσωματώνονται στη λεγόμενη Ενότητα (module) Χειρισμού Μεταδεδομένων, ενώ οι λειτουργίες επεξεργασίας κατανέμονται μεταξύ ενός συνόλου γνωσιακών ενεργοποιητών. Ο χειρισμός μεταδεδομένων και οι λειτουργίες επεξεργασίας (και ειδικότερα, οι γνωσιακοί ενεργοποιητές που αποτελούν τον πυρήνα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής) είναι στοιχεία ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες των περιβαλλόντων (surrounding) πόρων, actors και εφαρμογών.

Σε σχέση με την Εικόνα 5, οι λειτουργίες αίσθησης, χειρισμού μεταδεδομένων, ενεργοποίησης και API είναι ενσωματωμένες στους ενεργοποιητές σημασιολογικής εικονικοποίησης, ενώ οι λειτουργίες επεξεργασίας είναι ενσωματωμένες στους γνωσιακούς ενεργοποιητές. Οι ρόλοι των προαναφερθεισών λειτουργιών είναι οι ακόλουθοι:

- Οι λειτουργίες αίσθησης είναι υπεύθυνες για (i) την παρακολούθηση και το προκαταρκτικό φιλτράρισμα τόσο των πληροφοριών που σχετίζονται με actors που προέρχονται από το στρώμα υπηρεσίας/περιεχομένου (λειτουργίες αίσθησης που

είναι ενσωματωμένες στη διεπαφή του actor) όσο και των πληροφοριών που σχετίζονται με τους πόρους (λειτουργίες αίσθησης που είναι ενσωματωμένες στη διεπαφή πόρων). Η παρακολούθηση αυτή πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με διαφανείς τεχνικές και (ii) την τυπική περιγραφή των προαναφερθεισών ετερογενών παραμέτρων, δεδομένων, υπηρεσιών και περιεχομένων με ομοιογενή μεταδεδομένα χρησιμοποιώντας κατάλληλες γλώσσες που βασίζονται σε οντολογίες (όπως η OWL - γλώσσα οντολογίας του παγκοσμίου ιστού).

- Οι λειτουργίες χειρισμού μεταδεδομένων είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση, την ανακάλυψη και σύνθεση των μεταδεδομένων που προέρχονται από τις λειτουργίες ανίχνευσης και/ή από τα μεταδεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ των ομότιμων γνωσιακών διαχειριστών, προκειμένου να αντλήσουν δυναμικά τα συγκεντρωτικά μεταδεδομένα που μπορούν να χρησιμεύσουν ως εισροές για τους γνωσιακούς ενεργοποιητές. Αυτά τα συγκεντρωτικά μεταδεδομένα αποτελούν την καλούμενη «*τρέχουσα κατάσταση*» (present context). Αξίζει να τονιστεί ότι η εν λόγω τρέχουσα κατάσταση έχει ένα πολύ δυναμικό χαρακτήρα.
- Οι λειτουργίες εκλέπτυνσης είναι ενσωματωμένες σε ένα σύνολο γνωσιακών ενεργοποιητών. Οι λειτουργίες αυτές, ακολουθώντας τα ειδικά πρωτόκολλα εφαρμογών και έχοντας ως βασικές εισροές τα συγκεντρωτικά μεταδεδομένα που αποτελούν την τρέχουσα κατάσταση, παράγουν επεξεργασμένα μεταδεδομένα με σκοπό (i) τον έλεγχο των πόρων, (ii) την παροχή εμπλουτισμένων δεδομένων, υπηρεσιών και περιεχομένων για τους actors. Επιπλέον, αυτοί οι ενεργοποιητές ελέγχουν την ανίχνευση, τον χειρισμό μεταδεδομένων, την ενεργοποίηση και τις λειτουργίες API.

- Οι λειτουργίες ενεργοποίησης είναι υπεύθυνες για (i) την ενεργοποίηση των αποφάσεων ελέγχου των γνωσιακών ενεργοποιητών πάνω στους πόρους (λειτουργίες εκτέλεσης που είναι ενσωματωμένες στην διεπαφή των πόρων – πρβλ. Εικόνα 5). Η επιβολή των αποφάσεων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με διαφανείς τεχνικές, (ii) την τροφοδότηση των κατάλληλων actors με εμπλουτισμένα δεδομένων, περιεχόμενα και υπηρεσίες που παράγονται από τους γνωσιακούς ενεργοποιητές (λειτουργίες παροχής που είναι ενσωματωμένες στη διεπαφή του ενεργοποιητή – πρβλ. Εικόνα 5).
- Οι λειτουργίες API είναι υπεύθυνες για τη διασύνδεση των πρωτοκόλλων των εφαρμογών που διαχειρίζονται οι actors με τους γνωσιακούς ενεργοποιητές.

Η μονάδα *Εποπτείας και Ασφάλειας* είναι ενσωματωμένη σε κάθε γνωσιακό διαχειριστή και εποπτεύει το σύνολο του γνωσιακού διαχειριστή και, την ίδια στιγμή, εξασφαλίζει τη συνολική του ασφάλεια (π.χ., συμπεριλαμβανομένης της από-άκρο-σε-άκρο κρυπτογράφησης, πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής τόσο σε επίπεδο χρήστη όσο και συσκευής, καθώς και των υπηρεσιών ασφαλείας, ανίχνευσης εισβολών, κ.λπ.). Άλλος σημαντικός ρόλος αυτής της μονάδας είναι να αποφασίζει δυναμικά και σε συνέπεια με τα πρωτόκολλα εφαρμογής, τις λειτουργίες του γνωσιακού διαχειριστή, οι οποίες πρέπει να ενεργοποιηθούν για να χειριστούν τις εφαρμογές, καθώς και την ορθή διαμόρφωση και το χρονοδιάγραμμα της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης τους.

Η προσέγγιση που προτείνεται στην εργασία [80] και η αρχιτεκτονική έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα αποδοτικότητας και ευελιξίας, των οποίων η ποιοτική διάσταση περιγράφεται στη συνέχεια.

4.3.1 Πλεονεκτήματα που αφορούν την αποδοτικότητα

1. Η τρέχουσα κατάσταση, η οποία είναι η βασική είσοδος για τους γνωσιακούς ενεργοποιητές, περιλαμβάνει πληροφορίες πολλαπλών actors και πολλαπλών πόρων, οπότε δυνητικά παρέχει τη δυνατότητα να εκτελέσει λειτουργίες εκλέπτυνσης που κάνουν χρήση εμπλουτισμένων πληροφοριών ανάδρασης.
2. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, και ειδικότερα τα χαρακτηριστικά (i) της ανεξαρτησίας των λειτουργιών εκλέπτυνσης από την τεχνολογία, καθώς και (ii) της πληροφορίας εισόδου που παρέχεται από την τρέχουσα κατάσταση, επιτρέπει να λαμβάνονται όλες οι αποφάσεις με έναν γνωσιακό, αφηρημένο, συντονισμένο και συνεργατικό τρόπο μέσα σε ένα σύνολο από αυστηρά συνεργατικούς γνωσιακούς ενεργοποιητές. Η συγκέντρωση των λειτουργιών ελέγχου σε γνωσιακούς ενεργοποιητές αυτού του τύπου επιτρέπει την υιοθέτηση αλγορίθμων και διαδικασιών πολλαπλών αντικειμένων (multi-object), τα οποία αντιμετωπίζουν από κοινού τα προβλήματα που παραδοσιακά αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, χωρίς συντονισμό και σε διαφορετικά επίπεδα. Έτσι, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει τη μετάβαση από την παραδοσιακή διαεπιπεδική προσέγγιση (όπου κάθε επίπεδο του κάθε δικτύου λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις, χωρίς κεντρικό συντονισμό) σε ένα σενάριο στο οποίο, δυνητικά, όλα τα επίπεδα όλων των δικτύων επωφελούνται από τις πληροφορίες που προέρχονται από όλα τα επίπεδα όλων των δικτύων, επιτρέποντας έτσι μία βελτιστοποίηση που τέμνει τα επίπεδα και τα δίκτυα.
3. Οι εμπλουτισμένες πληροφορίες ανάδρασης που αναφέρονται ανωτέρω στο αντικείμενο 1 της παρούσας λίστας, μαζί με την ανεξαρτησία από την τεχνολογία που αναφέρεται στο αντικείμενο 2 της παρούσας λίστας, επιτρέπουν την υιοθέτηση καινοτόμων και αφηρημένων μεθοδολογιών «κλειστού

βρόχου» (π.χ. βελτιστοποίηση με περιορισμούς, εξόρυξη δεδομένων, προσαρμοστικός έλεγχος, εύρωστος έλεγχος, θεωρία παιγνίων, κ.λπ.) για τους αλγορίθμους και τους κανόνες που είναι ενσωματωμένοι στους γνωσιακούς ενεργοποιητές, κάτι που αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα.

4.3.2 Πλεονεκτήματα που αφορούν την ευελιξία

1. Λόγω του γεγονότος ότι οι γνωσιακοί διαχειριστές έχουν την ίδια αρχιτεκτονική και λειτουργούν σύμφωνα με την ίδια προσέγγιση, ανεξάρτητα από τις διασυνδεδεμένες ετερογενείς εφαρμογές, πόρους και actors, οι διαδικασίες διαλειτουργικότητας γίνονται ευκολότερες και πιο φυσικές.
2. Τόσο η διαφάνεια που παρέχει η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, όσο και το γεγονός ότι ο γνωσιακός διαχειριστής έχει σχεδιαστεί στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής ως ενδιάμεσο λογισμικό καθιστά σχετικά εύκολη την ενσωμάτωση του σε οποιαδήποτε σταθερή/κινητή οντότητα του δικτύου (π.χ. φορητά τερματικά, σταθμοί βάσης, οντότητες του δικτύου κορμού). Οι πιο κατάλληλες οντότητες του δικτύου για τη φιλοξενία των γνωσιακών διαχειριστών θα πρέπει να επιλέγονται σε κάθε περιβάλλον ξεχωριστά. Επιπλέον, οι λειτουργίες των γνωσιακών διαχειριστών μπορούν να προστεθούν, αναβαθμιστούν ή διαγραφούν μέσω απομακρυσμένου (ενσύρματου ή και ασύρματου) ελέγχου.
3. Η τμηματικότητα (modularity) των λειτουργιών του γνωσιακού διαχειριστή επιτρέπει το εύρος τους να κυμαίνεται από πολύ απλές υπολογιστικές εφαρμογές που διαθέτουν εξειδικευμένες διεργασίες παρακολούθησης, επεξεργασίας και ενεργοποίησης, έως ιδιαίτερα πολύπλοκες εφαρμογές που τέμνουν επίπεδα, δίκτυα και λειτουργίες. Ειδικότερα, για κάθε γνωσιακό διαχειριστή, οι σχετικές λειτουργίες ενεργοποίησης-

τηλεπισκόπησης, οι συγκεντρωτικές πληροφορίες που αποτελούν την τρέχουσα κατάσταση, καθώς και οι σχετικές λειτουργίες εκλέπτυνσης πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για κάθε περιβάλλον ξεχωριστά, ισορροπώντας τα πλεονεκτήματα που επιτυγχάνονται όσον αφορά την αποτελεσματικότητα με την συνεπαγόμενη επιπρόσθετη πολυπλοκότητα σε επίπεδο υλικού και λογισμικού καθώς και σε υπολογιστική πολυπλοκότητα.

4. Χάριν της ευελιξίας που προσφέρεται από τα αντικείμενα (1) έως (3) της παρούσας λίστας, οι γνωσιακοί διαχειριστές διατηρούν την ίδια αρχιτεκτονική, ανεξάρτητα από τους διασυνδεδεμένους πόρους, actors και εφαρμογές. Έτσι, υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται μια κατάλληλη προσαρμογή με το εκάστοτε περιβάλλον, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα διαφορετικής κλιμάκωσης, ξεκινώντας από περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από λίγες δικτυακές οντότητες με αυξημένες δυνατότητες επεξεργασίας και φθάνοντας σε περιβάλλοντα αυτά με πολλές δικτυακές οντότητες οι οποίες έχουν χαμηλή επεξεργαστική ισχύ (π.χ. Διαδίκτυο των πραγμάτων).
5. Τα ανωτέρω ζητήματα ευελιξίας ευνοούν μια *ομαλή μετάβαση* προς την προτεινόμενη προσέγγιση. Πράγματι, αναμένεται ότι οι λειτουργίες του γνωσιακού διαχειριστή θα προστίθενται σταδιακά, ξεκινώντας από τους πιο κρίσιμους κόμβους δικτύου και ότι οι λειτουργίες ελέγχου θα πρέπει σταδιακά να ανατεθούν στις γνωσιακές μονάδες.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω πλεονεκτήματα, στην εργασία [80] προτείνεται η μετάβαση στο Μελλοντικό Διαδίκτυο μέσα από μια ομαλή εξέλιξη. Σε αυτή την εξέλιξη, οι γνωσιακοί διαχειριστές οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με τις κατάλληλα επιλεγμένες λειτουργίες, σταδιακά ενσωματώνονται σε κατάλληλα επιλεγμένες οντότητες του

δικτύου, με στόχο τη σταδιακή αντικατάσταση του υφιστάμενου ελέγχου τύπου «ανοικτού βρόχου», με έναν γνωσιακό έλεγχο τύπου «κλειστού βρόχου» που προσπαθεί να επιτύχει συνδυαστικά τη βελτιστοποίηση ετερογενών actors, εφαρμογών και πόρων. Φυσικά, η προσεκτική επιλογή των λειτουργιών των γνωσιακών διαχειριστών και των οντοτήτων του δικτύου στις οποίες αυτές οι λειτουργίες πρέπει να ενσωματωθούν είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτραπεί η επεκτασιμότητα και να επιτευχθούν πλεονεκτήματα αποτελεσματικότητας με ικανοποιητική σχέση κόστους/ωφέλειας, λαμβάνοντας υπ' όψιν την αύξηση πολυπλοκότητας του υλικού και του λογισμικού.

Η ακόλουθη υποενότητα παρουσιάζει ένα παράδειγμα εφαρμογής των προαναφερθεισών εννοιών.

4.4 Πειραματικά Αποτελέσματα

Το πλαίσιο που περιγράφηκε στην παρούσα ενότητα έχει δοκιμαστεί στα πλαίσια ενός σεναρίου χρήσης σε οικιακό περιβάλλον, για μια επιβεβαίωση της εφαρμοσιμότητας της προσέγγισης. Εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών ισχύουν επίσης και σε ευρύτερα σενάρια, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων πρόσβασης και/ή δικτύων ευρείας περιοχής.

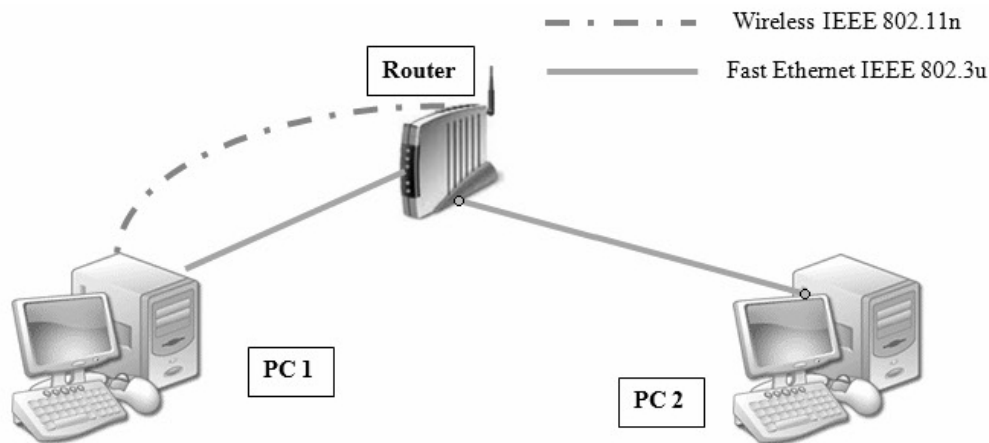
Θεωρούμε ένα υβριδικό οικιακό δίκτυο, όπου η συνδεσιμότητα μεταξύ των συσκευών παρέχεται με τη χρήση ετερογενών ασύρματων (Π.χ., WiFi, UWB) και ενσύρματων (π.χ., Ethernet, PLC) τεχνολογιών επικοινωνιών. Για τους σκοπούς της δοκιμής, μόνο μια απλοποιημένη έκδοση του γνωσιακού διαχειριστή έχει υλοποιηθεί σε κάθε κόμβο του δικτύου, η οποία περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- *Τον προσαρμογέα υπηρεσιών και περιεχομένου (Service and Content adapter):* έχει υλοποιηθεί μια μονάδα προσαρμογέα ποιότητας υπηρεσιών (QoS adapter module), η οποία έχει τη

δυνατότητα να αποκτήσει πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ροών που πρέπει να μεταδοθούν μέσω του δικτύου, όσον αφορά τις προδιαγραφές κυκλοφορίας (TSpec) και τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών, και να τα απεικονίσει σε προκαθορισμένα αναγνωριστικά ροών (flow identifiers)

- *Τον προσαρμογέα εντολών και μετρήσεων (Command and measurement adapter):* έχει υλοποιηθεί μία μηχανή παρακολούθησης, προκειμένου να αποκτήσει πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία του δικτύου και την κατάσταση των συνδέσμων, ενώ έχει επίσης χρησιμοποιηθεί μια μονάδα *ενεργοποιητή* για την επιβολή των αποφάσεων που αφορούν το δίκτυο μεταφοράς, και πιο συγκεκριμένα προκειμένου να τροποποιηθεί ο πίνακας προώθησης (forwarding table) που χρησιμοποιείται από τον κόμβο για να αποφασίσει για τη διεπαφή δικτύου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των πακέτων
- *Η λειτουργία αποθήκευσης/χειρισμού μεταδεδομένων (Metadata handling storing functionality):* όλες οι ετερογενείς πληροφορίες που συλλέγονται από τον προσαρμογέα υπηρεσιών/περιεχομένου και από τον προσαρμογέα εντολών/μετρήσεων μεταφράζονται χρησιμοποιώντας κοινή σημασιολογία και αποθηκεύονται σε κατάλληλη βάση δεδομένων, έτοιμες να χρησιμοποιηθούν από τις λειτουργίες εκλέπτυνσης.
- *Τον γνωσιακό ενεργοποιητή σύνδεσης (Cognitive connectivity enabler):* το στοιχείο αυτό έχει υλοποιηθεί προκειμένου να εκτελεί ανεξάρτητους από την τεχνολογία αλγόριθμους διαχείρισης των πόρων, με σκοπό να διασφαλιστεί ότι οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των ροών ικανοποιούνται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των πακέτων της εκάστοτε ροής μέσω του δικτύου.

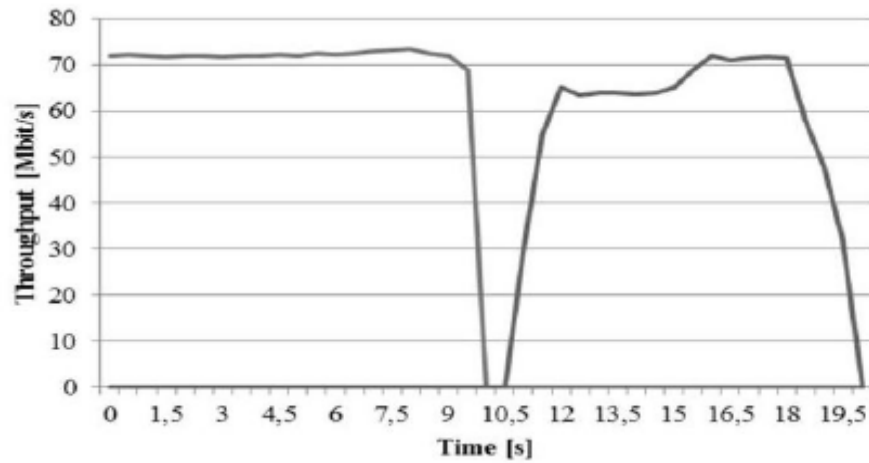
Το πλαίσιο έχει υλοποιηθεί ως ένα Linux Kernel Module και έχει εγκατασταθεί σε πλατφόρμες δοκιμών και σε δρομολογητή παλαιάς τεχνολογίας (legacy router) για αξιολόγηση των επιδόσεων. Η Εικόνα 6 δείχνει τρεις κόμβους που συνδέονται μεταξύ τους (α) μέσω ενός συνδέσμου IEEE 802.11n στα 300 Mbit/s και (β) δύο IEEE 802.3u συνδέσμους στα 100 Mbit/s.



Εικόνα 6. Δοκιμαστικό σενάριο

Για να δοκιμαστούν οι επιδόσεις μεταβίβασης σύνδεσης (handover), έχει διεξαχθεί στο σύνδεσμο Ethernet μια FTP συνεδρία μεταφόρτωσης (μέγεθος αρχείου 175 MB). Μετά από περίπου 10 δευτερόλεπτα, το ένα άκρο από το καλώδιο Ethernet έχει αποσυνδεθεί φυσικά από την υποδοχή του, και η ροή έχει ανακατευθυνθεί αυτόματα στην ασύρματη σύνδεση χάρη σε μια απόφαση που συνυπολογίζει την περιβάλλουσα πληροφορία (context-aware decision) και η οποία λαμβάνεται από τον γνωσιακό ενεργοποιητή σύνδεσης. Η μεταγωγή στη σύνδεση Wi-Fi προκαλεί περισσότερες αναμεταδόσεις στο επίπεδο του TCP και αυξημένο χρόνο μεταφοράς. Αυτό είναι φυσικό, αφού το Ethernet και το Wi-Fi έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. Χωρίς το γνωσιακό πλαίσιο, είναι προφανές ότι η συνεδρία FTP δεν θα ολοκληρωθεί. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, ο χρόνος μεταβίβασης σύνδεσης που καταγράφεται στο πείραμα είναι περίπου 240 ms, και στο διάστημα αυτό δεν λαμβάνεται κανένα πακέτο. Η καθυστέρηση επηρεάζεται

από το χρόνο επεξεργασίας που ξοδεύει η μονάδα πλαισίου για την ενεργοποίηση και την εφαρμογή των λύσεων που αξιολογήθηκαν από τις ρουτίνες επιλογής διαδρομής που υλοποιούνται στο γνωσιακό ενεργοποιητή σύνδεσης.



Εικόνα 7. Τεχνολογία μεταβίβασης σύνδεσης

5 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μία αρχιτεκτονική αναφοράς για το μελλοντικό Διαδίκτυο, η οποία έχει ως στόχο να παράσχει μια λύση για να αντιμετωπισθούν οι υπάρχοντες περιορισμοί στο Διαδίκτυο. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται στις γνωσιακές μονάδες που μπορούν να ενσωματωθούν με διαφάνεια σε επιλεγμένες δικτυακές οντότητες. Αυτές οι γνωσιακές οντότητες έχουν μια σπονδυλωτή οργάνωση που είναι ευέλικτη και επεκτάσιμη, επιτρέποντας έτσι μια ομαλή μετάβαση προς το Διαδίκτυο του Μέλλοντος και, την ίδια στιγμή, επιτρέποντας να εφαρμοστούν μόνο οι απαραίτητες λειτουργίες σε ένα δεδομένο σενάριο. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών οντοτήτων καθίσταται εφικτή μέσω της εικονικοποίησής τους, που επιτυγχάνεται χάρη στην εισαγωγή των γνωσιακών ενεργοποιητών εικονικοποίησης. Την ίδια στιγμή, οι γνωσιακοί ενεργοποιητές που αποτελούν τον πυρήνα των γνωσιακών διαχειριστών, μπορούν να επωφεληθούν από τις πληροφορίες που προέρχονται από όλα τα επίπεδα από όλα τα δίκτυα και μπορούν να λάβουν συνεπείς και συντονισμένες αποφάσεις με επίγνωση της περιβάλλουσας κατάστασης και οι οποίες επηρεάζουν όλα τα επίπεδα. Είναι σαφές ότι παράμετροι όπως «ποιός γνωσιακός ενεργοποιητής πρέπει να ενεργοποιηθεί», «ποιές πληροφορίες εισόδου πρέπει να παρέχονται στον γνωσιακό ενεργοποιητή», «σε ποιούς αλγόριθμους θα πρέπει να βασίζονται οι γνωσιακοί ενεργοποιητές» κ.λπ., πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά κατά περίπτωση. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική έχει ένα εγγενές ισχυρό σημείο, αυτό της συγκέντρωσης όλων των εργασιών διαχείρισης και ελέγχου σε ένα επίπεδο το οποίο είναι ενιαίο και ανεξάρτητο από τεχνολογίες, υπηρεσίες & περιεχόμενο στρώμα. Με τον τρόπο αυτό, προωθείται η υλοποίηση με φυσικό τρόπο βελτιστοποιήσεων που τέμνουν τα δίκτυα και τα επίπεδα.

Βιβλιογραφία

- [1] Georgios Tselentis, Theodore Zahariadis, Alex Galis – Towards the Future Internet (2009)
- [2] Georgios Tselentis, Theodore Zahariadis, Alex Galis – Towards the Future Internet (2009)
- [3] Henrik Abramowicz, Norbert Niebert, Stephan Baucke – A Future Internet embracing the wireless world (2009)
- [4] AKARI Project: New Generation Network Architecture AKARI Conceptual Design (ver1.1). AKARI Architecture Design Project, Original Publish (Japanese) June 2008, English Translation October 2008, Copyright © 2007-2008 NICT (2008)
- [5] Mahonen, P. (ed.), Trossen, D., Papadimitrou, D., Polyzos, G., Kennedy, D.: Future Net-worked Society., EIFFEL whitepaper (Dec. 2006)
- [6] Moors, T.: A critical review of “End-to-end arguments in system design”. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC) 2002, New-York City (New Jersey), USA (April/May 2002)
- [7] RFC 1958: The Internet and its architecture have grown in evolutionary fashion from modest beginnings, rather than from a Grand Plan
- [8] Li, T. (ed.): Design Goals for Scalable Internet Routing. Work in progress, draft-irtf-rrg-design-goals-02 (Sep. 2010)
- [9] Perry, D., Wolf, A.: Foundations for the Study of Software Architecture. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes 17, 4 (1992)
- [10] Akhlaghi, S., Kiani, A., Reza Ghanavati, M.: Cost-bandwidth tradeoff in distributed storage systems (published on-line). ACM Computer Communications 33(17), 2105–2115 (2010)
- [11] Saltzer, J.H., Reed, D.P., Clark, D.D.: End-To-End Arguments in System Design. ACM TOCS 2(4), 277–288 (1984)
- [12] Freedman, M.: Experiences with CoralCDN: A Five-Year Operational View. In: Proc. 7th USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '10) San Jose, CA (May 2010)
- [13] Dobson, S., et al.: A survey of autonomic communications. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS) 1(2), 223–259 (2006)
- [14] Evolving the Internet, Presentation to the OECD (March 2006), <http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/m.handley/slides/>

- [15]Perry, D., Wolf, A.: Foundations for the Study of Software Architecture. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes 17, 4 (1992)]
- [16]FIArch Group: Fundamental Limitations of Current Internet and the path to Future Inter-net (December 2010)
- [17]Ratnasamy, S., Shenker, S., McCanne, S.: Towards an evolvable internet architecture. SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 35(4), 313–324 (2005)
- [18]Ratnasamy, S., Shenker, S., McCanne, S.: Towards an evolvable internet architecture. SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 35(4), 313–324 (2005)
- [19]UMTS Forum White Paper: Recognising the Promise of Mobile Broadband (June 2010)
- [20]Cisco VNI: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014 (Feb. 2010)
- [21]Dohler, M., Watteyne, T., Alonso-Zárate, J.: Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm, Tutorial. In: GlobeCom'10 (Dec. 2010)
- [22]Schulze, H., Mochalski, K.: Ipoque, Internet Study 2008/2009, Ipoque (Jan. 2011)
- [23]UMTS Forum, REPORT NO 37, Magic Mobile Future 2010-2020 (April 2005)
- [24]International Telecommunication Union, Press Release: ITU sees 5 billion mobile subscriptions globally in 2010 (February 2010)
- [25]Cisco VNI: Hyperconnectivity and the Approaching Zettabyte Era (June 2010)
- [26]ETSI GTS GSM 03.02-v5.1.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) - Network architecture (GSM 03.02) (1996)
- [27]3GPP TS 23.002: Network architecture,V10.1.1, Release 10 (Jan. 2011)
- [28]3GPP TR 23.919: Direct Tunnel Deployment Guideline, Release 7, V1.0.0 (May 2007)
- [29]3GPP TS 23.401: General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Uni-versal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access,Rel.8, V8.12 (Dec. 2010)
- [30]3GPP TS 29.275, Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) based Mobility and Tunneling protocols, Stage 3, Release 10, V10.0.0 (Dec. 2010)
- [31]3GPP TS 24.303, Mobility management based on Dual-Stack Mobile IPv6, Stage 3, Re-lease 10, V10.1.0 Dec (2010)
- [32]FemtoForum: Femtocells – Natural Solution for Offload – a Femto Forum brief (June 2010)
- [33]3GPP TR 23.829: Local IP Access and Selected IP Traffic Offload, Release 10, V1.3 (2010)

- [34]Daoud, K., Herbelin, P., Crespi, N.: UFA: Ultra Flat Architecture for high bitrate services in mobile networks. In: Proc. of PIMRC'08, Cannes, France, pp. 1–6 (2008)
- [35]Daoud, K., Herbelin, P., Guillouard, K., Crespi, N.: Performance and Implementation of UFA: a SIP-based Ultra Flat Mobile Network Architecture. In: Proc. of PIMRC (Sep. 2009)
- [36]Faigl, Z., Bokor, L., Neves, P., Pereira, R., Daoud, K., Herbelin, P.: Evaluation and comparison of signaling protocol alternatives for the Ultra Flat Architecture, ICSNC, pp. 1–9 (2010)
- [37]Bokor, L., Faigl, Z., Imre, S.: A Delegation-based HIP Signaling Scheme for the Ultra Flat Architecture. In: Proc. of the 2nd IWSCN, Karlstad, Sweden, pp. 9–16 (2010)
- [38]Faigl, Z., Bokor, L., Neves, P., Daoud, K., Herbelin, P.: Evaluation of two integrated signalling schemes for the ultra flat architecture using SIP, IEEE 802.21, and HIP/PMIP pro-tocols. In: Journal of Computer Networks (2011), doi:10.1016/j.comnet.2011.02.005
- [39]Johnson, D., Perkins, C., Arkko, J.: IP Mobility Support in IPv6, IETF RFC 3775 (2004)
- [40]Koodli, R. (ed.): Fast Handoffs for Mobile IPv6, IETF RFC 4068 (July 2005)
- [41]Soliman, H., Castelluccia, C., El Malki, K., Bellier, L.: Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6), IETF RFC 4140 (Aug. 2005)
- [42]Wakikawa, R. (ed.): V.Devarapalli, G. Tsirtsis, T. Ernst, K. Nagami: Multiple Care-of Addresses Registration, IETF RFC 5648 (October 2009)
- [43]Devarapalli, V., Wakikawa, R., Petrescu, A., Thubert, P.: Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, IETF RFC 3963 (Jan. 2005)
- [44]Soliman, H. (ed.): Mobile IPv6 Support for Dual Stack Hosts and Routers, IETF RFC 5555 (June 2009)
- [45]Gundavelli, S. (ed.): K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, B. Patil: Proxy Mobile IPv6, IETF RFC 5213 (Aug. 2008)
- [46]Valko: Cellular IP: A New Approach to Internet Host Mobility, ACM SIGCOMM Comp. Commun. Rev., 29 (1), 50-65 (1999)
- [47]Ramjee, R., Porta, T.L., Thuel, S., Varadhan, K., Wang, S.: HAWAII: A Domain-Based Approach for Supporting Mobility in Wide-area Wireless Networks. In: IEEE Int. Conf. Network Protocols (1999)
- [48]Grilo, A., Estrela, P., Nunes, M.: Terminal Independent Mobility for IP (TIMIP). IEEE Communications Magazine 39(12), 34–41 (2001)

- [49]Melia, T., de la Oliva, A., Vidal, A., Soto, I., Corujo, D., Aguiar, R.L.: Toward IP converged heterogeneous mobility: A network controlled approach. *Com. Networks* 51 (2007)
- [50]IEEE, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks- Part 21: Media Independent Handover, IEEE Std 802.21-2008 (Jan. 2009)
- [51]3GPP TS 23.402, Architecture enhancements for non-3GPP accesses, Rel.10,V10.2 (2011)
- [52]Thubert, P., Wakikawa, R., Devarapalli, V.: Global HA to HA protocol, IETF Internet Draft, draft-thubert-nemo-global-haha-02.txt (Sept. 2006)
- [53]Fischer, M., Andersen, F.-U., Kopsel, A., Schafer, G., Schlager, M.: A Distributed IP Mobility Approach for 3G SAE. In: Proc. of 19th PIMRC, ISBN: 978-1-4244-2643-0 (Sept. 2008)
- [54]Farha, R., Khavari, K., Abji, N., Leon-Garcia, A.: Peer-to-peer mobility management for all-ip networks. In: Proc. of ICC '06, V. 5, pp. 1946–1952 (June 2006)
- [55]Bauer, M., Bosch, P., Khrais, N., Samuel, L.G., Schefczik, P.: The UMTS base station router. *Bell Labs Tech. Journal*, I. 11(4), 93–111 (2007)
- [56]Liu Yu, Zhao Zhijun, Lin Tao, Tang Hui: Distributed mobility management based on flat network architecture. In: Proc. of 5th WICON, pp. 1-5, Singapore (2010)
- [57]Moskowitz, R., Nikander, P., Jokela, P. (eds.): T. Henderson: Host Identity Protocol, IETF RFC 5201 (April 2008)
- [58]Snoeren, A.C., Balakrishnan, H.: An End-to-End Approach to Host Mobility. In: Proc. of MobiCom (Aug. 2000)
- [59]Maltz, D., Bhagwat, P.: MSOCKS: An Architecture for Transport Layer Mobility. In: Proc. INFOCOM, pp. 1037-1045 (Mar 1998)
- [60]Stewart, R. (ed.): Stream Control Transmission Protocol, IETF RFC 4960 (Sept. 2007)
- [61]Rosenberg, J., Schulzrinne, H., Camarillo, G., Johnston, A., Peterson, J., Sparks, R., Handley, M., Schooler, E.: SIP: Session Initiation Protocol, IETF RFC 3261 (June 2002)
- [62]Bertin, P., Bonjour, S., Bonnin, J.-M.: A Distributed Dynamic Mobility Management Scheme Designed for Flat IP Architectures. In: Proc. of NTMS '08, pp.1-5 (2008)
- [63]Bertin, P., Bonjour, S., Bonnin, J.: Distributed or centralized mobility? In: Proc. of the 28th IEEE conference on Global telecommunications (GLOBECOM'09), Honolulu, HI (2009)
- [64]Kassi-Lahlou, M., Jacquenet, C., Beloeil, L., Brouckaert, X.: Dynamic Mobile IP (DMI), IETF Internet-Draft, draft-kassi-mobileip-dmi-01.txt (Jan. 2003)

- [65] Song, M., Huang, J., Feng, R., Song, J.: A Distributed Dynamic Mobility Management Strategy for Mobile IP Networks. In: Proc. of 6th ITST, pp. 1045-1050 (June 2006)
- [66] Seite, P., Bertin, P.: Dynamic Mobility Anchoring, IETF Internet-Draft (May 2010)
- [67] Yan, Z., Lei, L., Chen, M.: WIISE - A Completely Flat and Distributed Architecture for Future Wireless Communication Systems, Wireless World Research Forum (Oct. 2008)
- [68] Gurtov, A., et al.: Hi3: An efficient and secure networking architecture for mobile hosts. Journal of Computer Communications 31(10), 2457–2467 (2008)
- [69] Talbot, D.: The Internet is broken, Technology Review (2006)
- [70] FISS: Introduction to content centric networking (2009)
- [71] Miller, R: Vint Cerf on the Future of the Internet. The Internet Today, The Singularity University (2009)
- [72] National Science Foundation: Networking Technology and Systems, NeTS (2008)
- [73] National Science Foundation: Network Science and Engineering, NetSE (2010)
- [74] BNN Technologies: GENI: Exploring networks of the future (2010)
- [75] Stanford Clean Slate: <http://cleanslate.stanford.edu/> (2011)
- [76] G-Lab: <http://www.german-lab.de/home/> (2008)
- [77] Jutand, F.: National Future Internet Initiatives – GRIF (2010)
- [78] AETIC: Internet del Futuro (2008)
- [79] ICT FP7 Research: Future Internet Research & Experimentation (FIRE) (2010)
- [80] Marco Castrucci, Francesco Delli Priscolli, Antonio Pietrabissa,: A cognitive future internet architecture (2011)