

WiFi & Bluetooth

Μιλτιάδης Αναγνώστου

4/5/2022

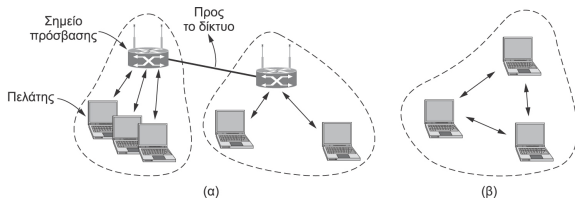
WiFi

- Το φυσικό επίπεδο
- Το υπο-επίπεδο MAC
- Δομή του πλαισίου 802.11
- Υπηρεσίες

Bluetooth

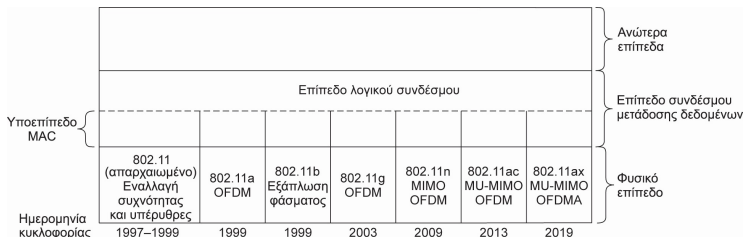
- Αρχιτεκτονική
- Φυσικό στρώμα
- Στρώμα 2

Τρόποι (modes) χρήσης WiFi



- ▶ Με τον *τρόπο υποδομής* (infrastructure mode) κάθε πελάτης (client) συνδέεται με ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης στο δίκτυο.
- ▶ Περισσότερα του ενός σημεία πρόσβασης μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους, κατά κανόνα μέσω ενός ενσύρματου δικτύου.
- ▶ Με τον *ad hoc* τρόπο οι υπολογιστές μπορούν να στέλνουν απ' ευθείας ο ένας στον άλλον πλαίσια, χωρίς τη χρήση σημείου πρόσβασης.

Η στίβα πρωτοκόλλων 802.11 - επίπεδο 2

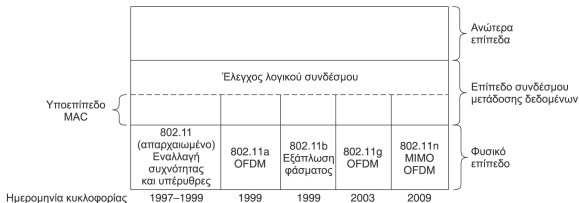


Το στρώμα 2 χωρίζεται σε δυο υπο-στρώματα

MAC Medium Access Control που καθορίζει τη διανομή του ασύρματου μέσου,

LLC (Logical Link Control) που προσφέρει μια ομοιόμορφη διεπαφή προς το επίπεδο δικτύου.

Το φυσικό επίπεδο ως το 2009



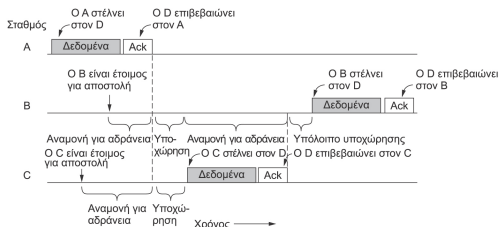
- ▶ Στο φυσικό επίπεδο η αρχική τεχνική εναλλαγής συχνότητας στο υπέρυθρο και η αναπήδηση συχνότητας (frequency hopping) είναι πλέον εκτός χρήσης.
- ▶ Η τρίτη αρχική τεχνική εξάπλωσης φάσματος στη ζώνη των 2.4 GHz επεκτάθηκε ώστε να στηρίζει ρυθμούς ως 11 Mbps (802.11b).
- ▶ Οι επόμενες δύο τεχνικές δίνουν 54 Mbps και βασίζονται στο OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): Το 802.11a στη ζώνη των 5 GHz και το 802.11g στη ζώνη των 2.4 GHz.
- ▶ Το 802.11n (WiFi 4) χρησιμοποιεί 4 κεραίες (Multiple-Input Multiple-Output antennas - MIMO) σε ρυθμούς 54-600 Mbps στις ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz.

Το φυσικό επίπεδο μετά το 2009

- ▶ 802.11ac - 2013 ("WiFi 5"), εισήγαγε κανάλια μεγαλύτερης χωρητικότητας (80/160 MHz αντί των 40 MHz) στην ζώνη των 5 GHz, διαμόρφωση ως 256-QAM (+1024-QAM από προϊόντα εκτός τυποποίησης) αντί της 64-QAM, και προσθήκη MIMO πολλών χρηστών (Multi-user MIMO), με αποτέλεσμα ρυθμούς μετάδοσης ως 6.77 Gbps αθροιστικά.
- ▶ 802.11ad (WiGig) (2009-2012) στα 60 GHz, για αποστάσεις 1-10 m, με ρυθμό μετάδοσης ως 7 Gbps. Οι πρώτοι 802.11ad routers κυκλοφόρησαν το 2016.
- ▶ IEEE 802.11af ("White-Fi", "Super Wi-Fi") - 2014, στο κενό τηλεοπτικό φάσμα ανάμεσα στις ζώνες VHF και UHF μεταξύ 54 and 790 MHz, χρησιμοποιεί τεχνικές cognitive radio για να εκπέμπει σε μη χρησιμοποιούμενα τηλεοπτικά κανάλια, συλλέγοντας και πληροφορίες από γεωγραφικές βάσεις δεδομένων για να μάθει ποια κανάλια χρησιμοποιούνται σε μια περιοχή.
- ▶ 802.11ax ("Wi-Fi 6") κάνει χρήση MIMO πολλών χρηστών (Multi-user MIMO) προκειμένου να στέλνει χωριστές δέσμες ανά πελάτη. Η τεχνική μετάδοσης είναι η Orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA), που είναι μια επέκταση της OFDM) και δίνει διαφορετικά υποσύνολα καναλιών (sub-carriers) σε διαφορετικούς χρήστες.

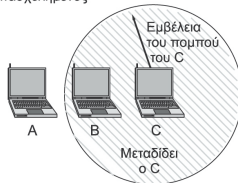
Υποεπίπεδο MAC: Αποφυγή συγκρούσεων

- ▶ Το 802.11 χρησιμοποιεί το CSMA/CA (με Collision Avoidance).
- ▶ Ο σταθμός περιμένει να ακούσει άδειο το κανάλι και να περάσει χρόνος DIFS (DCF InterFrame Spacing).
- ▶ Κατόπιν μετράει ένα τυχαίο αριθμό κενών σχισμών (μεταξύ 0 και N), σταματώντας τη μέτρηση όταν μια σχισμή δεν είναι κενή, και μετά εκπέμπει το πλαίσιο.
- ▶ Ο παραλήπτης εφόσον λάβει το πλαίσιο σωστά στέλνει επιβεβαίωση.
- ▶ Αν ο αποστολέας δεν λάβει επιβεβαίωση διπλασιάζει το N , επαναλαμβάνει την τυχαία αναμονή και επανεκπέμπει το ίδιο πλαίσιο.



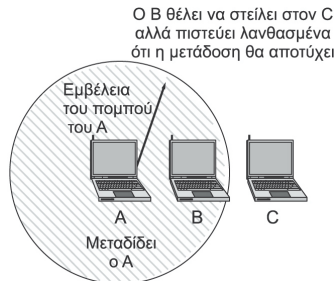
Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού

Ο Α θέλει να στείλει στον Β
αλλά δεν μπορεί να ακούσει
ότι ο Β είναι απασχολημένος



- ▶ Δεδομένου ότι δεν είναι όλοι οι σταθμοί στο πεδίο εμβέλειας όλων, μεταδόσεις που γίνονται σε ένα μέρος του δικτύου μπορεί να μην είναι αντιληπτές σε ένα άλλο.
- ▶ Ο σταθμός C μεταδίδει προς τον B.
- ▶ Ο σταθμός A δεν έχει γνώση αυτής της μετάδοσης και μπορεί να αρχίσει επίσης μια μετάδοση προς τον B.
- ▶ Επομένως προκύπτει σύγκρουση κατά τη λήψη από τον B.

Το πρόβλημα του εκτεθειμένου τερματικού

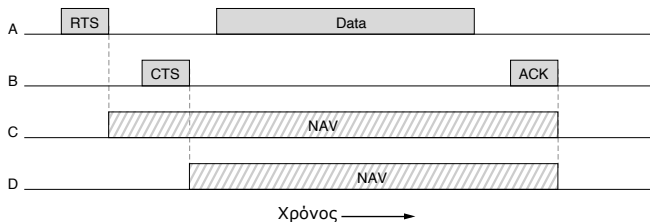


- ▶ Ο σταθμός *B* έχει να στείλει ένα πλαίσιο στον *C*.
- ▶ Την ίδια στιγμή ακούει ότι ο *A* εκπέμπει και αναβάλλει τη μετάδοσή του.
- ▶ Ωστόσο αν η μετάδοση του *A* είναι προς τον *D* (εκτός σχήματος), θα μπορούσε να είχε προχωρήσει στη μετάδοση.

NAV - Network Allocation Vector

- ▶ Κάθε πλαίσιο φέρει ένα πεδίο NAV όπου δηλώνεται το συνολικό μήκος της ακολουθίας πλαισίων στην οποία ανήκει το πλαίσιο, περιλαμβανομένων των επιβεβαιώσεων (ACK).
- ▶ Όλοι οι σταθμοί που έχουν ακούσει ένα πλαίσιο απέχουν από εκπομπές στο δηλωμένο διάστημα.
- ▶ Ο προαιρετικός μηχανισμός RTS/CTS (request to send, clear to send) χρησιμοποιεί το NAV για να αποφύγει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού.

Σενάριο χρήσης RTS/CTS/NAV



- ▶ Οι σταθμοί A, B, C, D είναι σε αποστάσεις τέτοιες που ο A είναι εκτός εμβελείας του D και αντίστροφα.
- ▶ Ο A έχει ένα πλαίσιο για τον B και στέλνει RTS στον B . Ο B απαντάει με CTS.
- ▶ Ο C ακούγοντας το RTS ρυθμίζει το δικό του NAV ως το τέλος. (Το NAV δεν είναι πλαίσιο, είναι εσωτερικός προγραμματισμός κάθε σταθμού.) Ο D ακούγοντας το CTS ρυθμίζει επίσης το δικό του NAV ως το τέλος.

Μηχανισμοί για τον έλεγχο της επίδοσης

- ▶ Αν υπάρχουν πολλές παρεμβολές οι μηχανισμοί επαναμετάδοσης δεν θα βοηθήσουν πολύ.
- ▶ Ο βασικός μηχανισμός βελτίωσης της επιτυχίας στη μετάδοση είναι η χρήση πιο αξιόπιστης διαμόρφωσης σε πιο χαμηλό ρυθμό. Αντίστροφα, όταν τα σφάλματα είναι ελάχιστα, ο ρυθμός μπορεί να αυξάνεται προδευτικά.
- ▶ Μικρότερα πλαίσια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να καταφέρουν να μεταδοθούν χωρίς να χρειάζονται επαναμετάδοση. Το μέγεθος πλαισίου μπορεί να περιοριστεί από το επίπεδο δικτύου ή με κατατεμαχισμό από το ίδιο το 802.11 μέσω του σημείου πρόσβασης. Τα τεμάχια αριθμούνται και στέλνονται με Stop-and-Wait.

Μηχανισμοί για τον έλεγχο της ισχύος

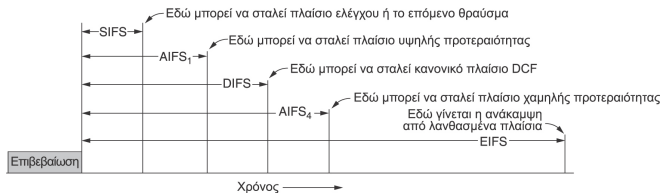
- ▶ Ο βασικός μηχανισμός είναι τα *πλαίσια φάρου* (beacon frames¹) που εκπέμπονται περιοδικά από το AP (π.χ. κάθε 100 msec).
- ▶ Τα πλαίσια αυτά διαφημίζουν την παρουσία του IP στους πελάτες του και περιλαμβάνουν το όνομά του και χρήσιμες παραμέτρους, μεταξύ άλλων και παραμέτρους ασφάλειας.
- ▶ Ένας πελάτης μπορεί να θέσει ένα bit σε πλαίσιο που απευθύνει στο AP για να ειδοποιήσει ότι μπαίνει σε ύπνο (sleep mode).
- ▶ Το AP αποθηκεύει την κίνηση προς τον πελάτη και στο επόμενο πλαίσιο φάρου βάζει μια ειδοποίηση σε ένα «χάρτη κίνησης» που αποτελεί μέρος του πλαισίου φάρου.
- ▶ Όταν ο πελάτης δει στο χάρτη κίνησης ότι υπάρχει κίνηση που πρέπει να παραλάβει, στέλνει ένα μήνυμα (poll) στο AP, που στέλνει στον πελάτη την αποθηκευμένη κίνηση.
- ▶ Στη συνέχεια ο πελάτης ξαναμπαίνει στην κατάσταση ύπνου.

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Beacon_frame

APSD - Automatic Power Save Delivery

- ▶ Είναι μια προσθήκη του 2005 στο 802.11e.
- ▶ Ο πελάτης είναι σε κατάσταση ύπνου ως τη στιγμή που έχει πλαίσια προς αποστολή.
- ▶ Το AP στο μεταξύ αποθηκεύει πλαίσια και τα στέλνει αμέσως μόλις λάβει πλαίσια από τον πελάτη.
- ▶ Είναι OK αν υπάρχει αρκετή κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις, π.χ. σε VoIP.

Προτεραιότητα μέσω χρονισμού κατά 802.11e, I



Γίνεται διαφοροποίηση του χρόνου αναμονής μετά από τη μετάδοση ενός πλαισίου, ορίζοντας διαφορετικά διαστήματα ως εξής:²

- ▶ Το διάστημα ανάμεσα σε κανονικά πλαίσια λέγεται DIFS – DCF (Distributed Coordination Function) Interframe Spacing, με τους συνήθεις κανόνες, περιλαμβανομένης της εκθετικής υπαναχώρησης.

Προτεραιότητα μέσω χρονισμού κατά 802.11e, II

- ▶ Το πιο σύντομο διάστημα που λέγεται SIFS (Short InterFrame Spacing) είναι για την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου όπως RTS, CTS, ACK ή για το επόμενο fragment.
- ▶ Το AIFS₁ (Arbitration InterFrame Space) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κίνηση προτεραιότητας.
- ▶ Το AIFS₄ είναι για κίνηση χαμηλής προτεραιότητας. Ορίζονται συνολικά 4 βαθμίδες με διαφορετικό μήκος διαστήματος και διαφορετικές παραμέτρους υπαναχώρησης.
- ▶ Το μεγαλύτερο διάστημα, το EIFS (Extended InterFrame Spacing), χρησιμοποιείται από ένα σταθμό για να ειδοποιήσει ότι έχει λάβει ένα κατεστραμμένο ή άγνωστο πλαίσιο.

Ανωμαλία ρυθμών (rate anomaly)

- ▶ Η συνύπαρξη στο ίδιο τοπικό δίκτυο σταθμών με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και με ίδιο μήκος πλαισίου, όταν αυτοί έχουν την ίδια πιθανότητα να στείλουν ένα πλαίσιο οδηγεί σε άνιση κατανομή χρόνου εις βάρος των γρήγορων σταθμών. Π.χ. ένα πλαίσιο σταθμού στα 6 Mbps είναι περίπου δεκαπλάσιο σε χρόνο από ένα πλαίσιο σταθμού στα 54 Mbps.
- ▶ Αν p είναι το μήκος πλαισίου, r_1, r_2 δυο διαφορετικοί ρυθμοί, r'_1, r'_2 οι ρυθμοί που προκύπτουν μετά το ανακάτεμα των πλαισίων εναλλάξ:

$$r'_1 = \frac{\frac{p}{r_1}}{\frac{p}{r_1} + \frac{p}{r_2}} \times r_1 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

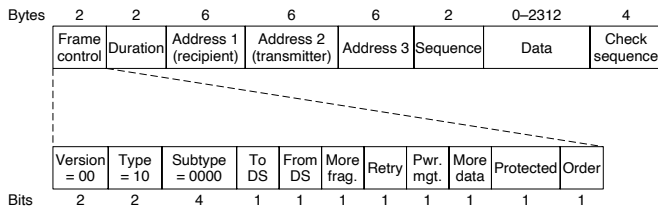
Για $r_1 = 6 \text{ Mbps}$, $r_2 = 54 \text{ Mbps}$, προκύπτει $r'_1 = r'_2 = 5.4 \text{ Mbps}$

- ▶ Το αποτέλεσμα είναι ότι οι ρυθμοί εξισώνονται προς τα κάτω, δηλαδή αν οι δύο παραπάνω σταθμοί είναι ενεργοί συγχρόνως, ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης κατεβαίνει κοντά στο ρυθμό του χαμηλότερου.

Ευκαιρία μετάδοσης (TXOP)

- ▶ Με μεταβολές που έγιναν στο 802.11e οι σταθμοί παίρνουν ίδιο ποσοστό στο χρόνο μετάδοσης.
- ▶ Η πολιτική EDCA (Enhanced distributed channel access) παρέχει πρόσβαση στον κανάλι χωρίς ανταγωνισμό για μια περίοδο που καλείται *Transmit Opportunity* (TXOP).
- ▶ Κατά συνέπεια αν δύο σταθμοί με ρυθμούς 6 Mbps και 54 Mbps μοιράζονται το κανάλι, θα εκπέμπουν με τελικούς ρυθμούς 3 Mbps και 27 Mbps.

Δομή του πλαισίου 802.11 - Frame Control



Type Data/control/management

Subtype π.χ. RTS/CTS.

To/From DS το πλαίσιο πάει προς / έρχεται από το δίκτυο που συνδέεται με το AP (distribution system).

More frag. θα ακολουθήσουν περισσότερα fragments.

Retry γίνεται επαναμετάδοση του προηγούμενου πλαισίου.

Power mgt. ο αποστολέας θα μπει σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας.

More data ο αποστολέας έχει κι άλλα πλαίσια για τον παραλήπτη.

Protected το πλαίσιο είναι κρυπτογραφημένο.

Order το υπερκείμενο επίπεδο περιμένει τα πλαίσια στη σειρά.

Δομή του πλαισίου 802.11

| | | | | | | | | |
|-------|---------------|----------|-----------------------|-------------------------|-----------|----------|--------|----------------|
| Bytes | 2 | 2 | 6 | 6 | 6 | 2 | 0-2312 | 4 |
| | Frame control | Duration | Address 1 (recipient) | Address 2 (transmitter) | Address 3 | Sequence | Data | Check sequence |

Duration είναι η δήλωση διάρκειας μαζί με το ACK για χρήση στο NAV.

Address 1/2 διεύθυνση παραλήπτη / αποστολέα.

Address3 διεύθυνση του μακρινού άκρου της επικοινωνίας.

Sequence αρίθμηση των πλαισίων για να αποφεύγονται διπλά. Τα πρώτα 4 bits είναι ο αριθ. του fragment, τα επόμενα 12 αύξων αριθμός.

Check Seq. 32 bit CRC.

Υπηρεσία συσχέτισης

- ▶ Η υπηρεσία *συσχέτισης* (association service) έχει σκοπό την αποκατάσταση σύνδεσης ενός σταθμού με το σημείο πρόσβασης με συγκεκριμένες ρυθμίσεις.
- ▶ Προϋπόθεση για την εκκίνηση αυτής της υπηρεσίας είναι να βρεθεί ο σταθμός εντός εμβελείας του σημείου πρόσβασης.
- ▶ Ο σταθμός μαθαίνει την ταυτότητα και τις δυνατότητες του AP είτε από τα πλαίσια φάρου είτε με ερώτημα προς το AP και
- ▶ Ο σταθμός κάνει αίτημα σύνδεσης.
- ▶ Το AP μπορεί να εγκρίνει ή να απορρίψει το αίτημα.

Υπηρεσία επανασυσχέτισης & υπηρεσία διάλυσης της συσχέτισης

- ▶ Η υπηρεσία επανασυσχέτισης (reassociation service) έχει σκοπό την μετακίνηση ενός σταθμού από ένα σημείο πρόσβασης σε ένα άλλο χωρίς απώλεια πληροφορίας.
- ▶ Η υπηρεσία διάλυσης της συσχέτισης (disassociation service) έχει σκοπό τον τερματισμό μιας συσχέτισης.
- ▶ Μπορεί να ξεκινήσει είτε από τον σταθμό είτε από το σημείο πρόσβασης.
- ▶ Η χρήση της υπηρεσίας μπορεί να γίνει από ένα σταθμό που αφήνει ένα δίκτυο ή από ένα AP που τίθεται εκτός λειτουργίας (λόγω συντήρησης, χρονικού προγραμματισμού ή επέμβασης του διαχειριστή).

WPA2 authentication

- ▶ Κάθε σταθμός πρέπει να περάσει από αυθεντικοποίηση πριν επιτραπεί να στείλει πλαίσια μέσω του AP, εκτός αν το δίκτυο είναι «ανοιχτό».
- ▶ Το WPA2 (WiFi Protected Access 2) υλοποιεί την ασφάλεια κατά 802.11i.³
- ▶ Το AP επικοινωνεί με ένα εξυπηρετητή αυθεντικοποίησης που κάνει έλεγχο τύπου login name / password ή ένα εκ των προτέρων διανεμημένο κλειδί.
- ▶ Ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης του WPA2 βασίζεται στο AES (Advanced Encryption Standard).

³https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_Protected_Access

Λοιπές υπηρεσίες

Υπηρεσία προγραμματισμού της κίνησης κατά QoS χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα προτεραιοποίησης της κίνησης.

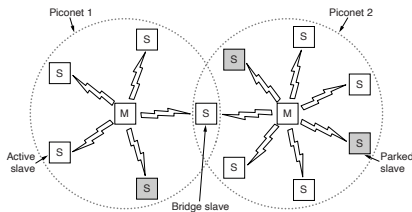
Transmit power control service δίνει σε κάθε σταθμό την απαραίτητη πληροφορία για το κανονιστικό πλαίσιο σε σχέση με την επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής σε κάθε περιοχή.

Dynamic frequency execution δίνει πληροφορία για τις επιτρεπόμενες συχνότητες στη ζώνη των 5 GHz.

Εξέλιξη του Bluetooth

- ▶ 1994-97: Η Ericsson θέλει να συνδέσει ασύρματα τα κινητά της τηλεφωνα με άλλες συσκευές. Η IBM θέλει να συνδέσει το IBM Thinkpad (φορητό υπολογιστή) με κινητό σε συνεργασία με την Ericsson.
- ▶ 1998: Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba σχηματίζουν ένα Special Interest Group για το *Bluetooth* project.
- ▶ 1999: Το Bluetooth 1.0 δημοσιοποιήθηκε το 1999 για σύνδεση συσκευών ως 10 m, με ισχύ ως 100 mW και ταχύτητα ως 0.7 Mbps.
- ▶ 2002: Το Bluetooth 1.1 υιοθετήθηκε ως IEEE Standard 802.15.1.
- ▶ 2004: Το Bluetooth 2.0 ως 3 Mbps, σε απόσταση ως 10 m, με ισχύ ως 2.5 mW.
- ▶ 2009: Το Bluetooth 3.0 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με 802.11 σε ταχύτητα ως 24 Mbps, ως 1 m, με ισχύ ως 1 mW.
- ▶ Δεκ. 2009: Το Bluetooth 4.0, περιλαμβάνει το Low Energy (BLE), ως 0.5 m.
- ▶ Δεκ. 2016: Bluetooth 5.0 με ταχ. 2Mbps, 1Mbps, 500kbps, 125kbps.
- ▶ Ιαν. 2019: Bluetooth 5.1 (Angle of Arrival (AoA) and Angle of Departure (AoD), Advertising Channel Index, GATT - Generic Attribute Profile - caching).
- ▶ Δεκ. 2019: Bluetooth 5.2, Low Energy Audio, Enhanced Attribute Protocol κ.α.

Αρχιτεκτονική του Bluetooth



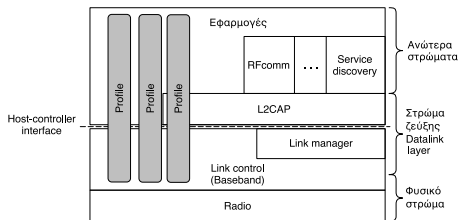
- ▶ Το βασικό μικρο-δίκτυο (piconet) αποτελείται από ένα κύριο κόμβο (master) και το πολύ 7 υποτελείς κόμβους (slaves) σε απόσταση < 10 m.
- ▶ Πολλαπλά μικρο-δίκτυα μπορούν να συνδεθούν με μια γέφυρα και να αποτελέσουν ένα «διασκορπισμένο δίκτυο» (scatternet).
- ▶ Μέσα στο piconet μπορούν να υπάρχουν ως 255 «παρκαρισμένοι» κόμβοι (parked nodes), που βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής ισχύος μέχρι να ενεργοποιηθούν από τον κύριο κόμβο.

Προφίλ και εφαρμογές

Η ομάδα προδιαγραφής του Bluetooth έχει ως τώρα προδιαγράψει 36 διαφορετικές στίβες πρωτοκόλλων για διαφορετικές εφαρμογές, που καλούνται *προφίλ* (profiles). Ενδεικτικά:

- ▶ *Advanced Audio Distribution Profile (A2DP)* Καθορίζει με ποιο τρόπο θα γίνει μεταφορά στερεοφωνικού ήχου ανάμεσα σε συσκευές, π.χ. από ένα κινητό σε ακουστικά, και υποστηρίζονται συγκεκριμένα format ήχου, όπως mp2, mp3, aac, atrac.
- ▶ *Basic Imaging Profile (BIP)* δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής φωτογραφιών με πιθανή μεταβολή του τύπου και του μεγέθους.
- ▶ *Health Device Profile (HDP)* για την μεταφορά ιατρικών δεδομένων.
- ▶ *Hands-Free Profile (HFP)* για τις επικοινωνίες με κινητό μέσα στο αυτοκίνητο.
- ▶ *Human Interface Device Profile (HID)* για την υποστήριξη περιφερειακών όπως ποντικιών, πληκτρολογίων, joysticks κ.λπ. με πρόβλεψη για χαμηλή κατανάλωση και ασφάλεια.

Η στίβα πρωτοκόλλων του Bluetooth



- ▶ Το φυσικό επίπεδο υλοποιεί την ασύρματη μετάδοση.
- ▶ Το επίπεδο ζεύξης (ή συνδέσμου - link) καθορίζει τα πλαίσια και τον χρονισμό. Ο διαχειριστής ζεύξης διαχειρίζεται τα λογικά κανάλια μεταξύ συσκευών, όπου περιλαμβάνονται θέματα ισχύος, ποιότητας υπηρεσίας και ασφάλειας. Ότι φαίνεται κάτω από τη διακεκομμένη γραμμή είναι στο Bluetooth chip.
- ▶ Πάνω από τη γραμμή είναι το πρωτόκολλο L2CAP (Logical Link Control Adaptation Protocol), που χειρίζεται μηνύματα μεταβλητού μήκους και παρέχει αξιοπιστία προαιρετικά.
- ▶ Το πρωτόκολλο RFcomm (ραδιο-επικοινωνίας) εξομοιώνει μια σειριακή θύρα για συνδέσεις π.χ. πληκτρολογίου, ποντικιού κ.α. με άλλες συσκευές.

Το επίπεδο ραδιοδιαύλου (Bluetooth Radio Layer)

- ▶ Είναι το αντίστοιχο φυσικό επίπεδο. Λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz όπως και το 802.11. Η ζώνη διαιρείται σε 79 κανάλια του 1 MHz.
- ▶ Κάθε κανάλι αλλάζει συχνότητα βάσει ψευδοτυχαίας ακολουθίας 1600 φορές ανά sec. Ο χρόνος παραμονής στην ίδια συχνότητα είναι $1/1600 \text{ sec} = 625 \text{ msec}$.
- ▶ Στη διαδικασία αυτή αποφεύγονται συχνότητες που είναι κατειλημμένες από γειτονικά ασύρματα συστήματα.
- ▶ Στον βασικό ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps χρησιμοποιείται FSK. Διατίθενται επίσης από την έκδοση 2.0 και μετά 2 ή 3 Mbps με PSK.

Το επίπεδο ζεύξης Bluetooth

- ▶ Το βασικό πρωτόκολλο χρησιμοποιεί διαίρεση χρόνου, με 1600 σχισμές ανά sec (δηλ. 625 μ sec ανά σχισμή), όπου σε ένα piconet στις μισές εκπέμπει ο master, αρχίζοντας σε μια περιττή σχισμή, και στις άλλες μισές οι slaves, αρχίζοντας από μια άρτια σχισμή.
- ▶ Ένα πλαίσιο έχει μήκος 1 ή 3 ή 5 σχισμών. Έχει επικεφαλίδα 126 bits και χρόνο αποκατάστασης (για λόγους συγχρονισμού) 250-260 μ sec.
- ▶ Το φορτίο μπορεί να είναι κρυπτογραφημένο με ένα κλειδί που έχει συμφωνηθεί στη φάση του pairing.
- ▶ Όσο διαρκεί ένα πλαίσιο δεν μπορεί να γίνει αλλαγή συχνότητας.
- ▶ Ένα πλαίσιο 5 σχισμών είναι πιο αποδοτικό διότι περιορίζεται το ποσοστό της επικεφαλίδας κ.λπ.

Έλεγχος ζεύξης (link control), I

- ▶ Ο ελεγκτής ζεύξης, που βρίσκεται επίσης στο επίπεδο 2, χρησιμοποιεί λογικά κανάλια, που καλούνται ζεύξεις (*links*) ανάμεσα σε ζεύγη master-slave που έχουν συσχετισθεί μέσα από μια διαδικασία σύζευξης (*pairing*) και έχουν ανταλλάξει ένα κλειδί.
- ▶ Η διαδικασία σύζευξης περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός μυστικού 4ψήφιου αριθμού (PIN) που γνωρίζουν μόνο οι δύο πλευρές.
- ▶ Οι ζεύξεις που χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών:

SCO (Synchronous Connection Oriented) για χρήση από δεδομένα πραγματικού χρόνου όπως τηλεφωνικές συνδέσεις. Σε κάθε ζεύξη διατίθεται μια σχισμή ανά κατεύθυνση και σε κάθε ζευγάρι master-slave διατίθενται το πολύ τρεις ζεύξεις. Κάθε ζεύξη μπορεί να μεταφέρει ένα κανάλι ήχου PCM των 64 kbps. Τα λάθη αντιμετωπίζονται με κωδικοποίηση χωρίς επαναμεταδόσεις.

ACL (Asynchronous ConnectionLess) για μετάδοση πακέτων, χωρίς επαναμεταδόσεις, με μια ζεύξη για κάθε ζεύγος master-slave.

Βιβλιογραφία I



Beacon frame, Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Beacon_frame.



Gordon Colbach, *The WiFi Networking Book: WLAN Standards: IEEE 802.11 Bgn, 802.11n, 802.11ac and 802.11ax*, Independently Published, 2019.



IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks,
<http://www.ieee802.org/11/>.



Costa-Pérez, Xavier & Camps-Mur, Daniel, “AU-APSD: adaptive IEEE 802.11e unscheduled automatic power save delivery,” *ICC '06. IEEE International Conference*, Vol. 5. pp. 2020 - 2027, 2006.

Βιβλιογραφία II



H. Wu, X. Wang, Q. Zhang and X. Shen, "IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) Throughput Analysis," *2006 IEEE International Conference on Communications*, Istanbul, 2006, pp. 223-228.



Bluetooth Specification Version 4.0,
https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737.