

Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Κλίμακας και Χαμηλής
Ενεργειακής Κατανάλωσης

Κώστας Μαλιάτσος
Επίκουρος Καθηγητής

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

2

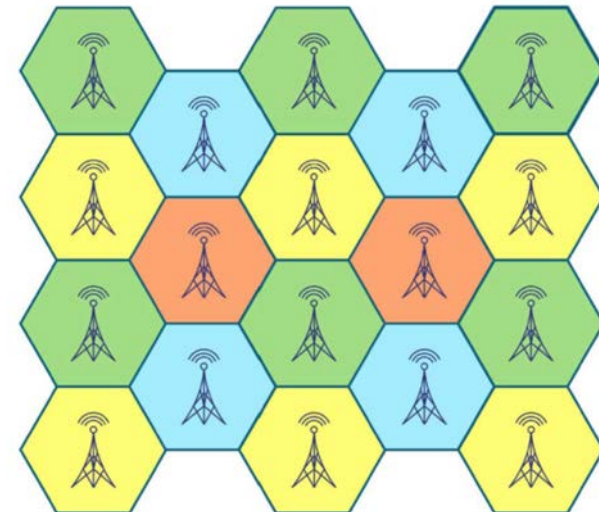
- Τα δίκτυα αυτά προσφέρουν **εκτεταμένη ραδιοκάλυψη** (radiocoverage) και διακρίνονται σε:
 - Κυψελωτά δίκτυα (cellular networks) για κινητούς χρήστες
 - Δίκτυα Παγκόσμιας Διαλειτουργικότητας για Μικροκυματική Πρόσβαση (Worldwide Interoperability for Microwave Access – WiMax) για σταθερούς και κινητούς χρήστες
 - Δορυφορικά Δίκτυα
 - Στρατοσφαιρικά Δίκτυα

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

3

□ Κυψελωτά Δίκτυα

- Στα δίκτυα αυτά, οι περιοχές κάλυψης χωρίζονται σε «**κυψέλες**» (cells)
- Η πλέον κατάλληλη μορφή της κυψέλης είναι το κανονικό εξάγωνο γιατί προσεγγίζει την επιφάνεια του κύκλου, δεν εμφανίζει κενά και επικαλυπτόμενες περιοχές και απαιτεί μικρότερο αριθμό κυψελών
- Κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από τον δικό της σταθμό βάσης που αποτελείται από κεραία, πομπό και δέκτη



Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

4

□ Κυψελωτά Δίκτυα (συνέχεια)

- Οι σταθμοί βάσης επιτρέπουν τη σύνδεση κινητών συσκευών με το κύριο τηλεφωνικό δίκτυο, όταν η συσκευή είναι στην εμβέλεια λήψης και εκπομπής τους
- Όταν η συσκευή βγει από την εμβέλεια του αρχικού σταθμού βάσης μπαίνει στην εμβέλεια ενός άλλου σταθμού, οπότε η σύνδεση με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο διατηρείται
- Η κάθε κυψέλη έχει τις δικές της ζώνες συχνοτήτων
- Γειτονικές κυψέλες χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες για να αποφύγουμε την παρεμβολή

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

5

□ Κυψελωτά Δίκτυα (συνέχεια)

- Η βασική αρχή λειτουργίας ενός κυψελωτού συστήματος είναι η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης καναλιών
- Σκοπός είναι να επαναχρησιμοποιήσουμε τα ίδια κανάλια σε κυψέλες που είναι μακριά
- Οι κυψέλες διακρίνονται σε:
 - Μεγακυψέλες (Megacells) με κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών
 - Μακροκυψέλες (Macrocells) με ακτίνα μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα
 - Μικροκυψέλες (Microcells) με ακτίνα μέχρι 1-2 km
 - Πικοκυψέλες (Picocells) με ακτίνα μέχρι 100-200 m

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

6

□ Εξέλιξη Κυψελωτών Δικτύων

1G	2G	3G	4G	5G
1981	1992	2001	2010	2020(?)
2 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	100 Mbps	10 Gbps
Basic voice service using analog protocols	Designed primarily for voice using the digital standards (GSM/CDMA)	First mobile broadband utilizing IP protocols (WCDMA / CDMA2000)	True mobile broadband on a unified standard (LTE)	'Tactile Internet' with service-aware devices and fiber-like speeds
				

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

7

□ Δίκτυα WiMAX

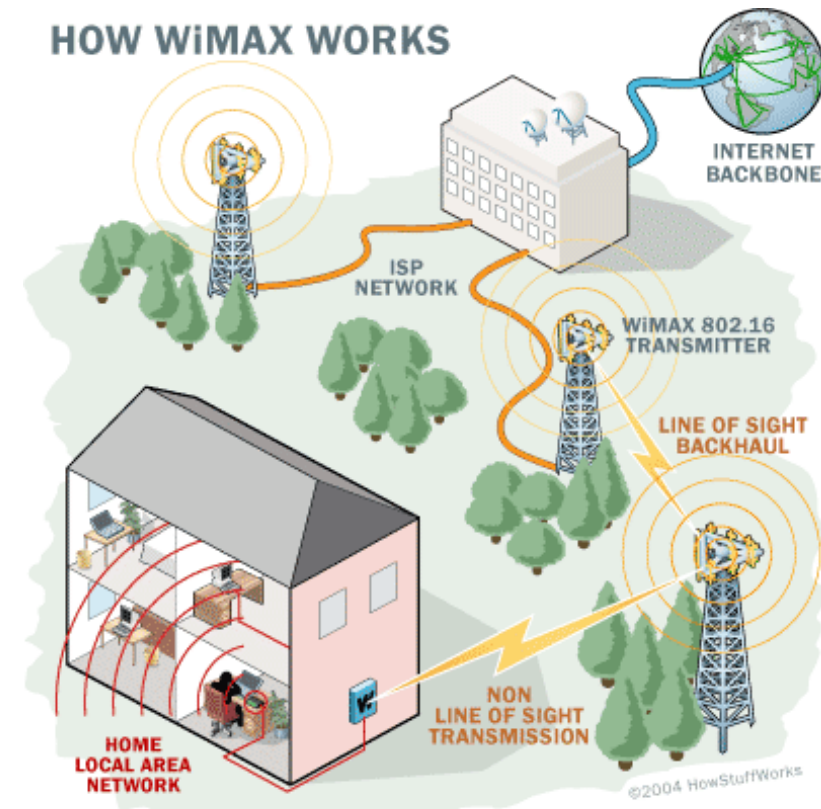
- Το WiMAX είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στο πρότυπο 802.16 της IEEE και αποτελεί εναλλακτική λύση στις ενσύρματες συνδέσεις και στην τεχνολογία DSL
- Το WiMAX είναι σε θέση να παρέχει σταθερή, φορητή και κινητή ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση με ακτίνα 10 km (θεωρητικά έως 50 km), χωρίς να είναι απαραίτητη η άμεση οπτική επαφή (line-of-sight – LoS) με έναν σταθμό βάσης
- Το πρότυπο IEEE 802.16 σχεδιάστηκε, ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων, η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz και υποστηρίζει ταχύτητες ασύρματης μετάδοσης ως και 70 Mbps

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας

8

□ Δίκτυα WiMAX (συνέχεια)

- Στην Ελλάδα άρχισε να λειτουργεί πιλοτικά το δίκτυο WiMAX του ΟΤΕ το Σεπτέμβριο του 2008 με δοκιμαστική εκπομπή στο Άγιο Όρος
- Ακολούθησε πιλοτική εκπομπή για ερευνητικές-εκπαιδευτικές δραστηριότητες στο Ηράκλειο Κρήτης
- Σήμερα, παρέχονται επιτυχώς ειδικές υπηρεσίες και υπηρεσίες φωνής και Internet με τη χρήση των υπηρεσιών COSMOTE WiMAX σε αρκετές περιοχές



Δορυφορικές Επικοινωνίες και IoT

9

- Τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών ως βασικό μέρος της παγκόσμιας υποδομής τηλεπικοινωνιών προσφέρουν υπηρεσίες τηλεφώνου, δεδομένων και εικόνας και υποστηρίζουν συνδέσεις point-to-point, point-to-multipoint και broadcasting
- Αναμένεται να συμβάλλουν στα ετερογενή δίκτυα επόμενης γενιάς (5G) για την ανταλλαγή δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και να παρέχουν υπηρεσίες υποστήριξης κορμού του IoT
- Ενδεικτικές εφαρμογές: Ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα, περιβαλλοντική παρακολούθηση, διαχείριση κρίσιμων καταστάσεων, ευφυείς πόλεις, αυτόνομα και αυτό-οδηγούμενα συστήματα, ναυτιλία

Δορυφορικές Επικοινωνίες και IoT

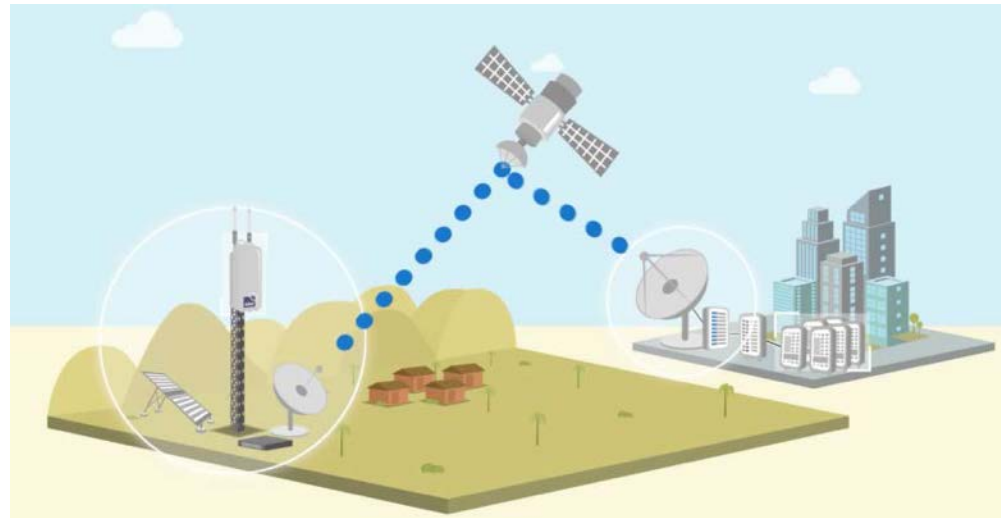
10

- Ένα δορυφορικό επικοινωνιακό σύστημα απαρτίζεται από δύο βασικά τμήματα, το **επίγειο** και το **δορυφορικό τμήμα**, κάθε ένα από τα οποία αποτελεί το ένα από τα δύο επικοινωνιακά άκρα
- Το επίγειο τμήμα περιλαμβάνει τους **επίγειους σταθμούς**, που μπορεί να είναι κινητοί, εγκατεστημένοι σταθερά σε κάποια περιοχή της Γης, εναέριοι ή θαλάσσιοι
- Το δορυφορικό τμήμα αποτελείται από τους **δορυφόρους**, καθώς επίσης και τις **επίγειες εγκαταστάσεις** για τη διαχείριση των λειτουργιών των δορυφόρων

Δορυφορικές Επικοινωνίες και IoT

11

- Σε μια δορυφορική ζεύξη υπάρχουν δύο διαδρομές σήματος:
 - ▣ η **άνω ζεύξη** (uplink) από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο, και
 - ▣ η **κάτω ζεύξη** (downlink) από το δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό
- Σε κάθε μια από αυτές τις ζεύξεις χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες



Δορυφορικές Επικοινωνίες και IoT

12

- Οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την πλειονότητα των υπηρεσιών επικοινωνιών για την άνω/κάτω ζεύξη είναι οι ζώνες C (6/4 GHz), Ku (14/11 GHz) και Ka (30/20 GHz)
- Η ζώνη C (6/4 GHz) παρέχει εύρος ζώνης (bandwidth) 1000 MHz σε κάθε κατεύθυνση. Παρόμοιο εύρος ζώνης διατίθεται στη ζώνη Ku (14/11 GHz)
- Περίπου 2 GHz εύρους ζώνης διατίθενται για τα δορυφορικά συστήματα στη ζώνη Ka (30/20 GHz)

Δορυφορικές Επικοινωνίες και IoT

13

- Η ποιότητα της δορυφορικής ζεύξης επηρεάζεται σημαντικά από το ασύρματο **περιβάλλον διάδοσης**
- Καθώς τα ραδιοκύματα διαπερνούν τα επίπεδα της ατμόσφαιρας, **μηχανισμοί εξασθένησης** μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους (τη φάση, το πλάτος, την πόλωση, τη συχνότητα, το εύρος ζώνης και τη γωνία άφιξης)
- Ορισμένοι από αυτούς τους μηχανισμούς είναι τα φαινόμενα που σχετίζονται με τον **δείκτη διάθλασης**, όπως η πολυδιαδρομική διάδοση και η σκέδαση
- Άλλοι μηχανισμοί σχετίζονται με τις απώλειες που προκαλούνται από **υδρομετεωρίτες** (π.χ. βροχή, πάγος, σύννεφα, ομίχλη)

Πλεονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών

14

- Δυνατότητα Ευρείας Αναμετάδοσης
- Παράκαμψη των Επίγειων Δικτύων
- Δυνατότητα εύκολης εγκατάστασης νέων κυκλωμάτων
- Δυνατότητα ελέγχου του ιδιωτικού δικτύου από το χρήστη



Πλεονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών

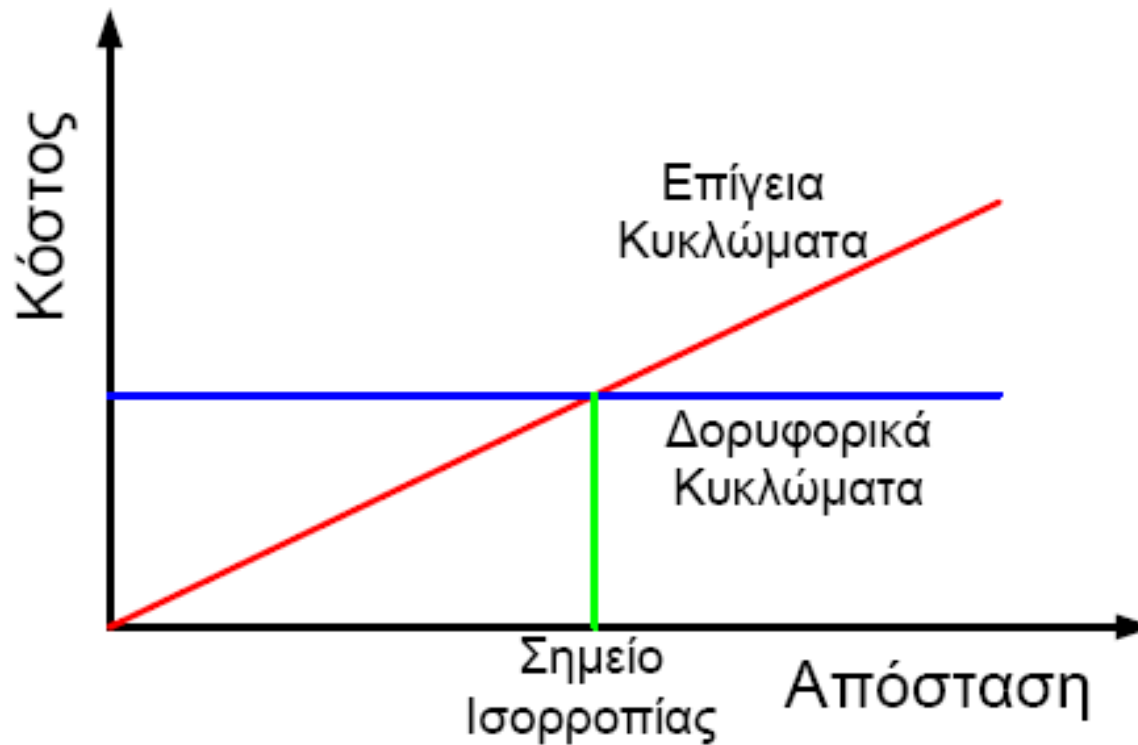
15

- Παροχή υπηρεσιών σε περιοχές που τα επίγεια αδυνατούν (π.χ. πλοία, αεροπλάνα)
- Παροχή υπηρεσιών σε περιοχές με περιορισμένη ή και χωρίς επίγεια υποδομή
- Παροχή παγκόσμιας κάλυψης
- Παροχή Κινητών Υπηρεσιών συμπληρωματικά ως προς τα επίγεια (backhaul)
- Παροχή υπηρεσιών σε περιπτώσεις αδυναμίας λειτουργίας των επίγειων δικτύων (πόλεμοι, καταστροφές)

Πλεονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών

16

- Κόστος κυκλωμάτων ανεξάρτητο της απόστασης



Μειονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών

17

- Υψηλό αρχικό κόστος για την τοποθέτηση και λειτουργία τους
- Καθυστέρηση μετάδοσης, προβλήματα διάδοσης και παρεμβολές
- Συμφόρηση στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες
- Συμφόρηση στη γεωστατική τροχιά
- Μεγάλες απαιτήσεις στην κρυπτογράφηση, λόγω της αύξησης της τρωτότητας (vulnerability) εξαιτίας της εκπομπής στον αέρα

Εναέριες Πλατφόρμες και IoT

18

- Η **Google** με το «Project Loon» έχει επιχειρήσει να προσφέρει πρόσβαση στο διαδίκτυο ακόμα και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές με ταχύτητες έως 10 Mbps, μέσω τεράστιων **μπαλονιών** που πετούν σε μεγάλο ύψος (στη στρατόσφαιρα) και επικοινωνούν με επίγειους σταθμούς, αλλά και μεταξύ τους

<https://loon.com>



Εναέριες Πλατφόρμες και IoT

19



Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Εναέριες Πλατφόρμες και IoT

20

- Το **Facebook** έχει ξεκινήσει πρόγραμμα παροχής Internet μέσω **drones**, σε περιοχές με ελλειπείς υποδομές. Υπολογίζεται ότι περισσότεροι από 1 δισ. άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στο Internet
- Το μη επανδρωμένο drone, με την ονομασία Aquila έχει άνοιγμα φτερών 42 μέτρων (όσο ένα αεροπλάνο Μπόινγκ 737), θα πετά σε ύψος 20 έως 30 χιλιομέτρων πάνω από τους αεροδιαδρόμους των κανονικών αεροπλάνων, αλλά και πάνω από τις καταιγίδες.
- Θα μπορεί να μένει στον αέρα, χωρίς ανεφοδιασμό για 90 συνεχόμενες ημέρες
- Θα παρέχονται ταχύτητες της τάξης των 10 Gbps, με χρήση ασύρματων οπτικών επικοινωνιών (FSO) που θα μεταφέρουν τα δεδομένα από τον ουρανό στο έδαφος και αντίστροφα

Εναέρια Πλατφόρμες και IoT

21

- Τα drones θα διανύουν στον αέρα έναν κύκλο διαμέτρου τριών χιλιομέτρων και εκτιμάται ότι θα παρέχει διαδικτυακή πρόσβαση στο έδαφος σε μια περιοχή ακτίνας περίπου 50 χιλιομέτρων
- Το Facebook σχεδίαζε έναν στόλο έως 1000 τέτοιων αεροσκαφών
- Το 2018 σταμάτησε τη λειτουργία του



Εναέρια Πλατφόρμες και IoT

22

- Η **Microsoft** με το πειραματικό project «Pegasus II» επιχείρησε να αξιολογήσει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών IoT σε πραγματικό χρόνο, μέσω **μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (Unmanned Aerial Vehicle – UAV)** με 38 αισθητήρες και 6 κάμερες σε ύψος περίπου 30 km
- Συγκεκριμένα, το project αφορούσε εφαρμογές τηλεμετρίας (μετρήσεων δηλαδή από απόσταση), επικοινωνίας με το UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης, λήψη μηνυμάτων από το UAV καθώς πετυχαίνει τους στόχους και σύνδεση UAV με τη πλατφόρμα **IoT Azure**



Σύγκριση Ασύρματων Τεχνολογιών Μεγάλης Εμβέλειας

23

Τεχνολογία	Φάσμα	Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
LTE	700 MHz - 2.6 GHz	~75 Mbps	Χρήση της υποδομής κινητής τηλεφωνίας 3ης γενιάς	Υψηλό κόστος αδειοδότησης, μικρές δυνατότητες αναβάθμισης
WiMAX (IEEE 802.16m)	<3.6 GHz	100 Mbps (κινητές) και 1 Gbps (σταθερές)	Λειτουργία και υπό συνθήκες πολυδιαδρομικής διάδοσης (NLoS)	Σημαντικός περιορισμός του ρυθμού μετάδοσης με την απόσταση
FSO	THz	Έως 2.5 Gbps	Χαμηλό κόστος εγκατάστασης, δεν απαιτείται αδειοδότηση	Υψηλή εξασθένιση από καιρικά φαινόμενα
Δορυφορικά Συστήματα	Ζώνες C, Ku, Ka	~155 Mbps	Πολύ μεγάλη γεωγραφική κάλυψη	Πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

24

- Η σύγχρονη τάση για περισσότερο εύρος ζώνης και μεγαλύτερη ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ασύρματων δικτύων επικοινωνιών **ακατάλληλων για κάποιες εφαρμογές IoT**, λόγω της πολυπλοκότητας του υλικού, της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και συνολικά του μεγάλου κόστους
- Για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του IoT, πρέπει να στραφούμε σε τεχνολογίες **χαμηλής κατανάλωσης**
- Στην περίπτωση των δικτύων μεγάλης εμβέλειας οι τεχνολογίες αυτές ονομάζονται Low-Power Wide-Area (**LPWA**) και περιλαμβάνουν τα LoRa, Sigfox, Ingenu και Weightless

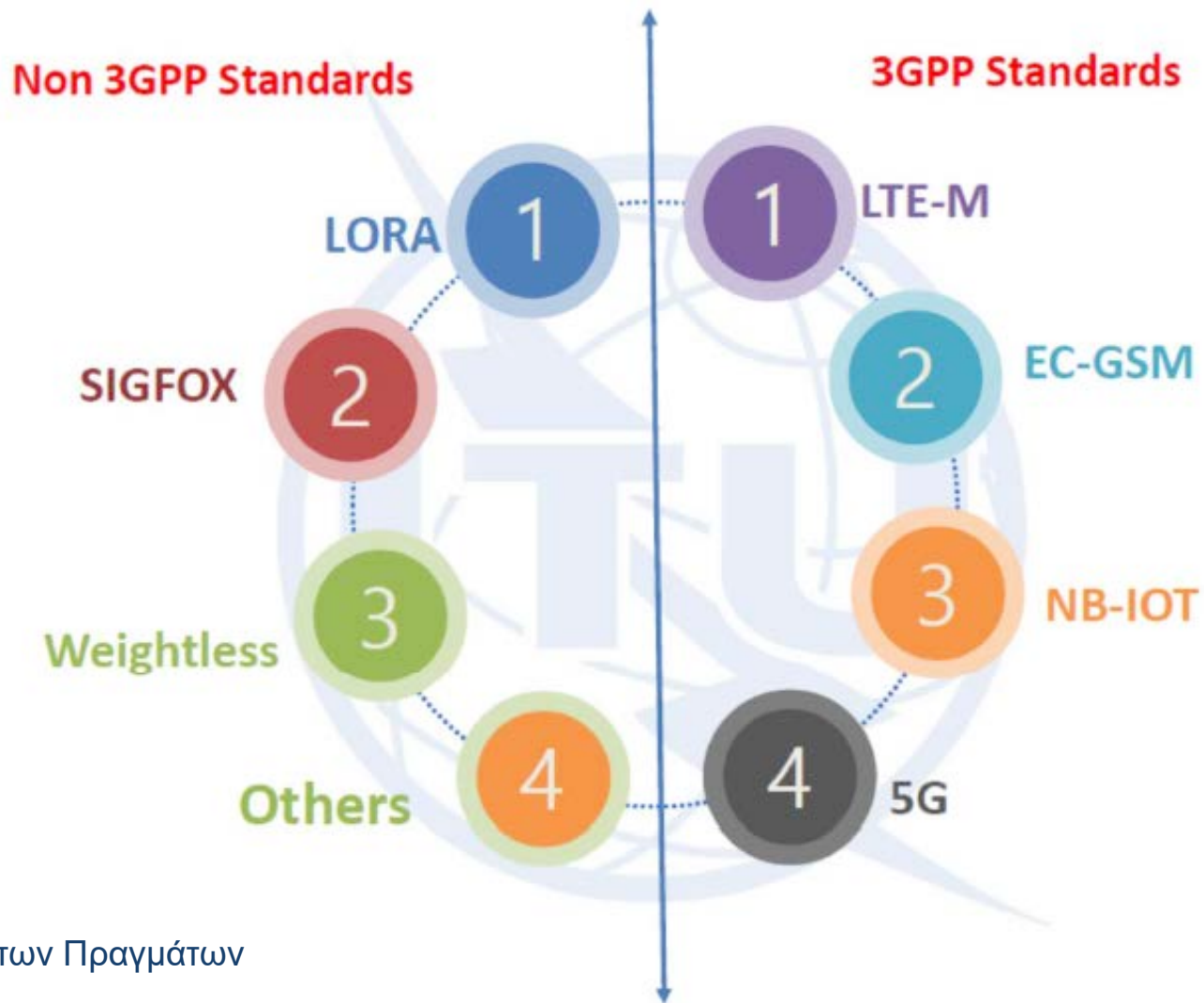
Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

25

- Οι τεχνολογίες LPWA υποστηρίζουν γενικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών (things), οι οποίες ενσωματώνουν συνήθως αισθητήρια τροφοδοτούμενα από μπαταρία
- Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), μια συμφωνία συνεργασίας μεταξύ των σημαντικότερων ρυθμιστικών φορέων στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, πρότεινε επιπλέον τις εξής τεχνολογίες που βασίζονται στα κυψελωτά δίκτυα:
 - Extended Coverage GSM for the Internet of Things (EC-GSM-IoT)
 - Long-Term Evolution for Machines (LTE-M)
 - Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT)

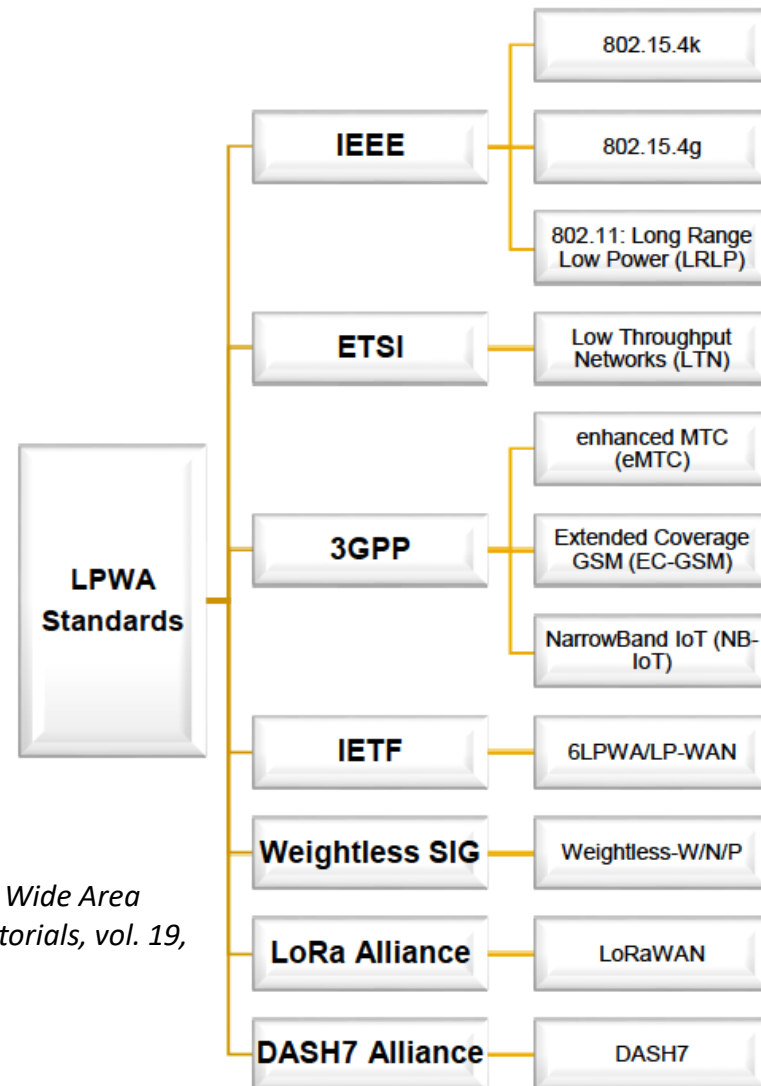
Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

26



Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

27



Πηγή: U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Secondquarter 2017.

Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

28

□ Απαιτήσεις Δικτύων LPWA

- Εύκολη εγκατάσταση και χαμηλό κόστος του δικτύου
- Υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών χαμηλού κόστους
- Αυξημένος χρόνος ζωής μπαταρίας
- Μεγάλη εμβέλεια



Ασύρματα Δίκτυα Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλών Ενεργειακών Απαιτήσεων

29

□ Απαιτήσεις Δικτύων LPWA

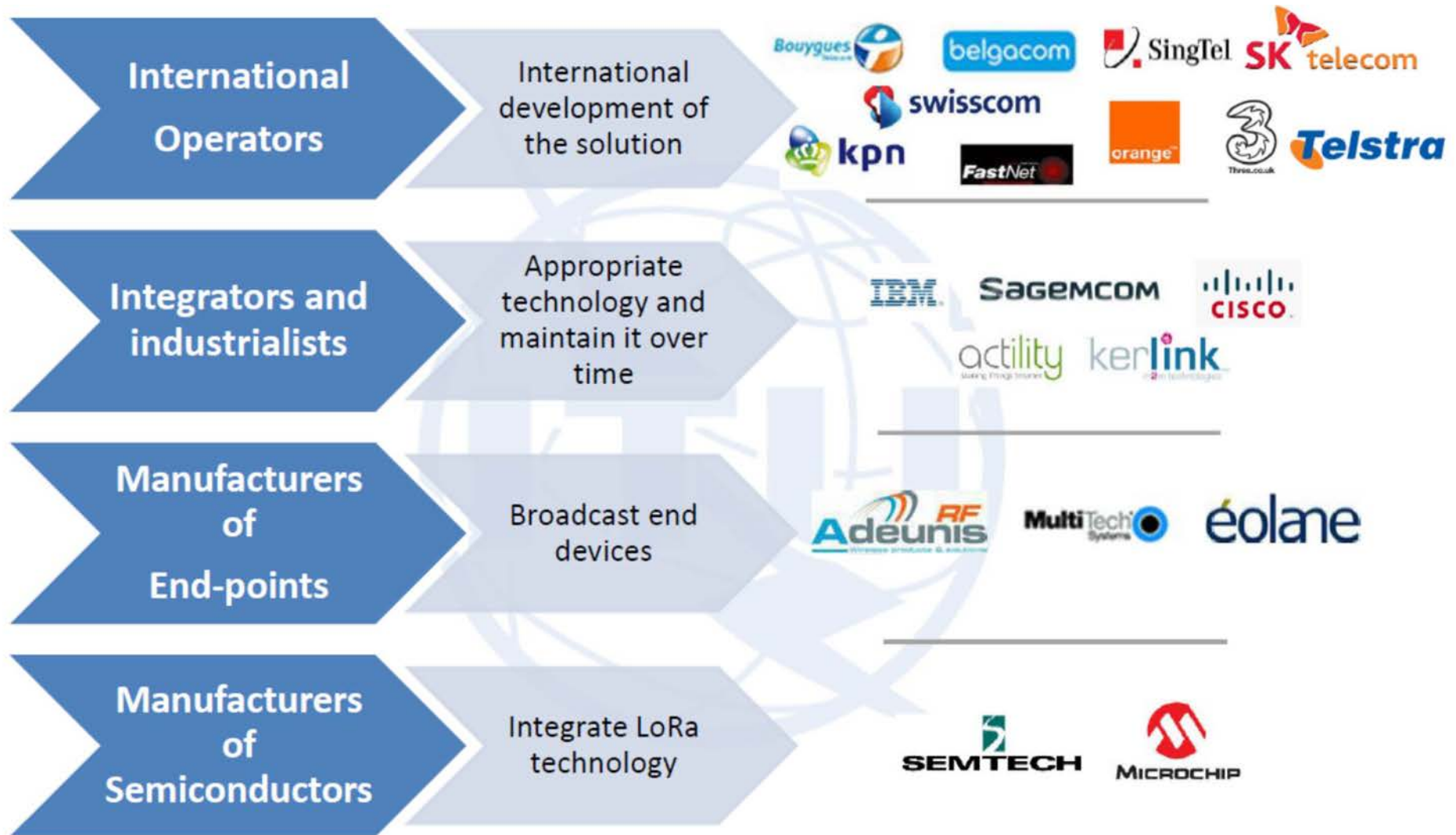
Characteristic	Target Value for LPWAN Technologies
Long range	5 – 40km in the open field
Ultra low power	Battery lifetime of 10 years
Throughput	Depends on the application, but typically a few hundred bit / s or less
Radio chipset costs	\$2 or less
Radio subscription costs	\$1 per device and year
Transmission latency	Not a primary requirement for LPWAN. IoT applications are typically insensitive to latency.
Required number of base stations for coverage	Very low. LPWAN base stations are able to serve thousands of devices.
Geographic coverage, penetration	Excellent coverage also in remote and rural areas. Good in-building and in-ground penetration (e.g. for reading power meters).

- Τα ασύρματα δίκτυα LPWA τεχνολογίας **LoRa** (Long Range) είναι σχεδιασμένα για την υποστήριξη συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και ασύρματων ζεύξεων μεγάλης εμβέλειας σε τοπικό, εθνικό ή παγκόσμιο επίπεδο
- Οι συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δικτύων LoRa μπορούν να είναι **ενεργειακά αυτόνομες**, με την μπαταρία να αντέχει έως και δέκα χρόνια
- Λειτουργούν σε ραδιοσυχνότητες **κάτω του 1 GHz** της ζώνης ISM (Industrial, Scientific and Medical), χωρίς να απαιτείται αδειοδότηση για χρήση συχνοτήτων

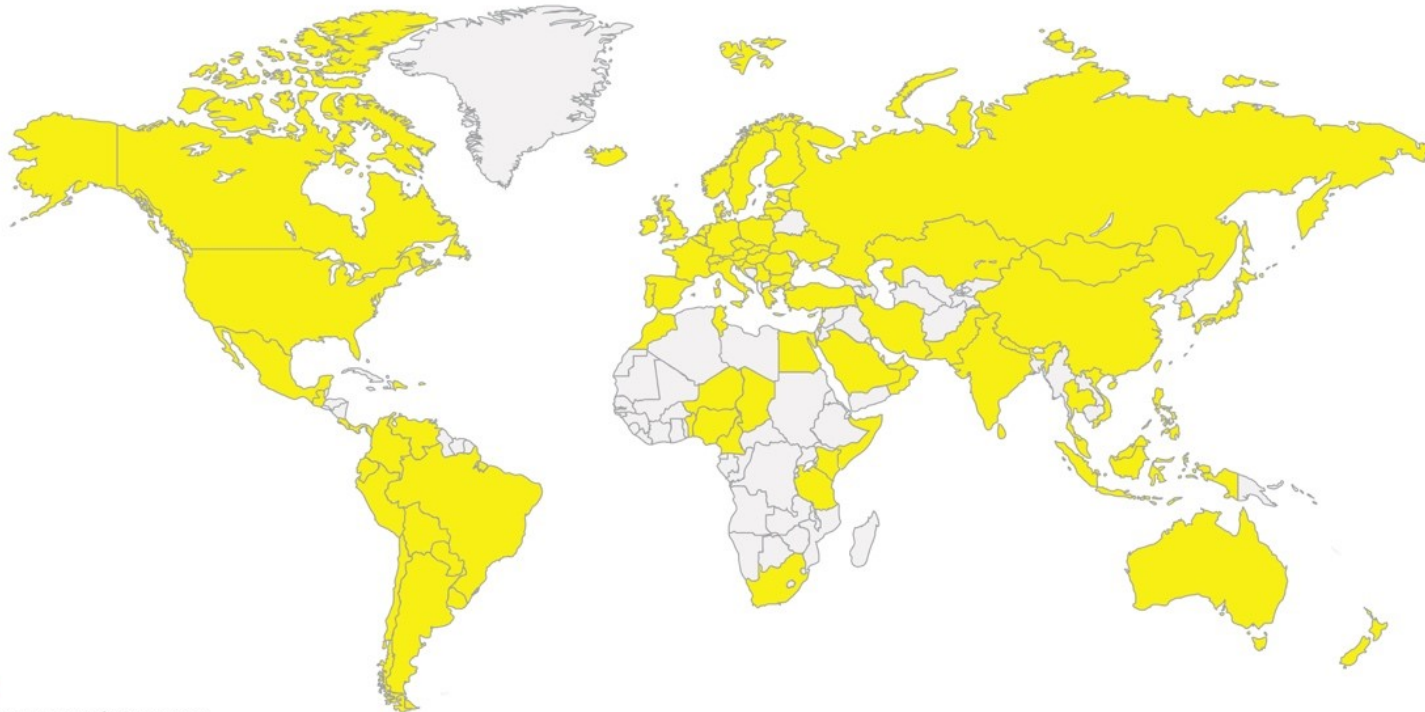
- Ο **ρυθμός μετάδοσης** δεδομένων κυμαίνεται από 0.3 kbps έως 50 kbps
- Το **εύρος ζώνης** των ραδιοδιαύλων είναι 125 kHz, 250 kHz ή 500 kHz, ανάλογα με την περιοχή ή την κατανομή συχνοτήτων
- Η **εμβέλεια** φτάνει τα 2-5 km σε αστικά (urban) και 15 km σε προαστιακά (suburban) περιβάλλοντα και εξαρτάται από την κεραία της συσκευής, από τη θέση (εάν υπάρχουν εμπόδια, όπως κτίρια και βουνά) και τις καιρικές συνθήκες (π.χ. συνθήκες καθαρού ουρανού ή βροχής)
- Η ισχύς εκπομπής στην Ευρώπη (868 MHz) περιορίζεται στα **14 dBm** (25 mW)

LoRa

32



LoRaWAN™ NETWORK COVERAGE



100+

LoRaWAN™ Network Operators

100+ Countries With LoRaWAN Deployments

December 2018

All information contained herein is current at time of publishing - LoRa Alliance is not responsible for the accuracy of information presented

□ Τεχνικές Διαμόρφωσης

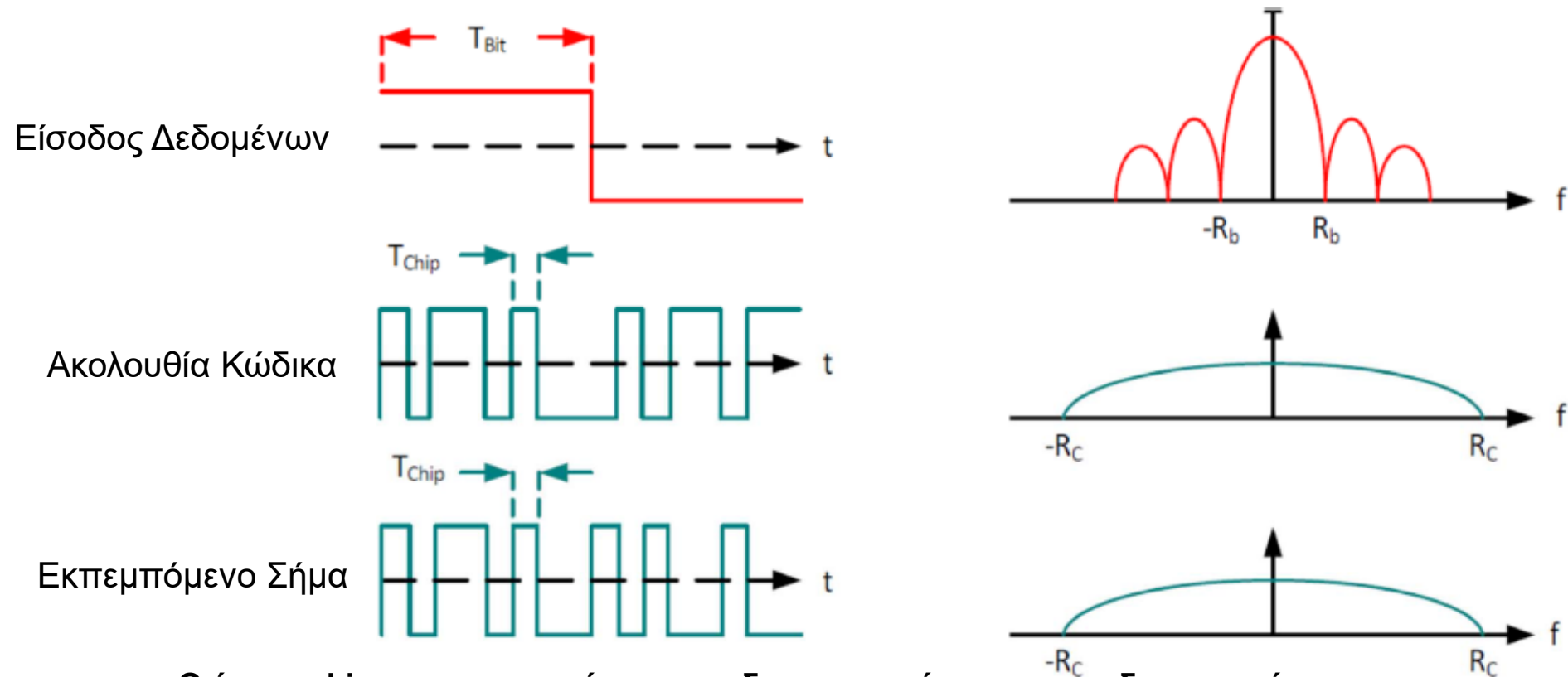
- Για να αντιμετωπιστεί ο θόρυβος, η πολυδιαδρομική διάδοση και το φαινόμενο Doppler, η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί διαμόρφωση διασποράς φάσματος, μέσω σήματος chirp (Chirp Spread Spectrum – **CSS**)
- Στο σήμα **chirp** η συχνότητα αυξάνει ή μειώνεται χρονικά
- Η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος αλλάζει σύμφωνα με μία ακολουθία κώδικα (code sequence) και προκύπτει ένα σήμα ως γινόμενο του αρχικού σήματος και ενός κώδικα διασποράς (spreading code), γνωστού και ως ακολουθία chip (chip sequence)

- Τεχνικές Διαμόρφωσης (συνέχεια)
 - Τελικά, το μεταδιδόμενο σήμα χρησιμοποιεί εύρος ζώνης πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης που πραγματικά καταλαμβάνει η πληροφορία που μεταφέρει, με ταυτόχρονη μείωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος, ώστε η συνολική του ισχύς να παραμένει σταθερή

LoRa

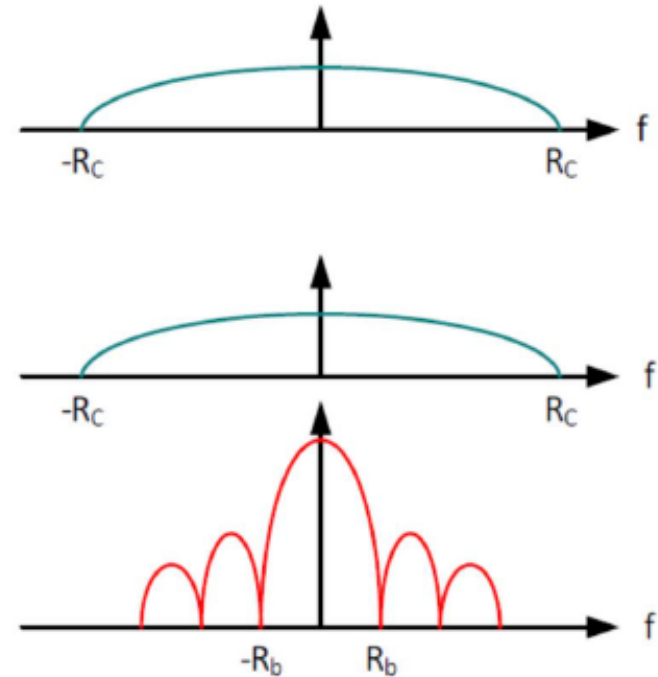
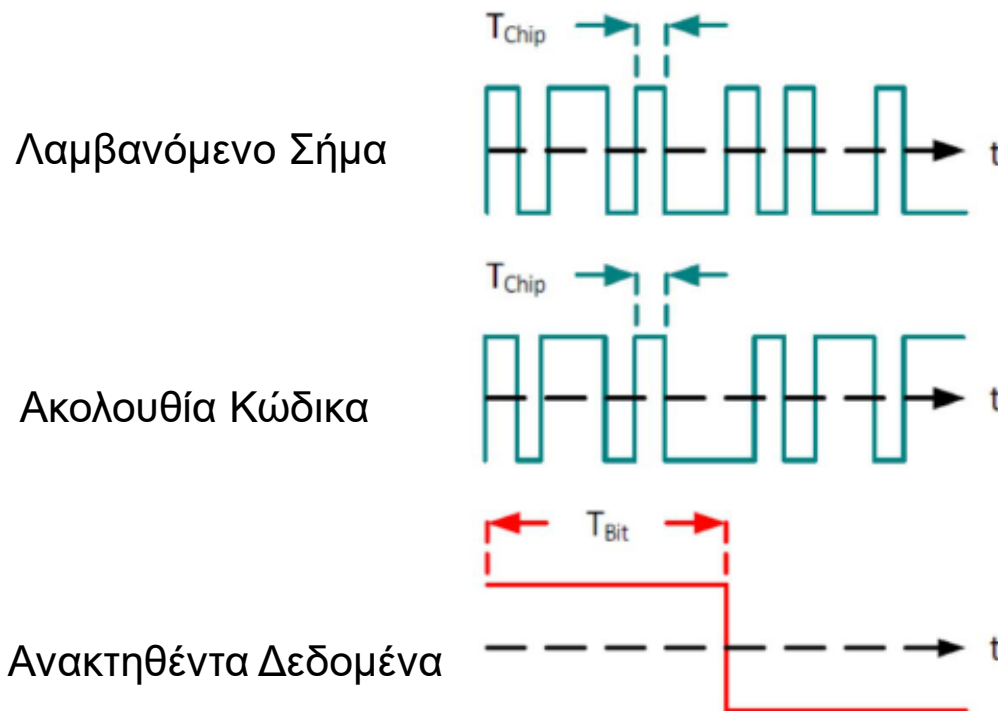
36

□ Διαμόρφωση (Modulation)/Διασπορά Φάσματος (Spread Spectrum)



Ο όρος «chip» χρησιμοποιείται για να διαφοροποιήσουμε τα κωδικοποιημένα και τα μη-κωδικοποιημένα bits του σήματος πληροφορίας.

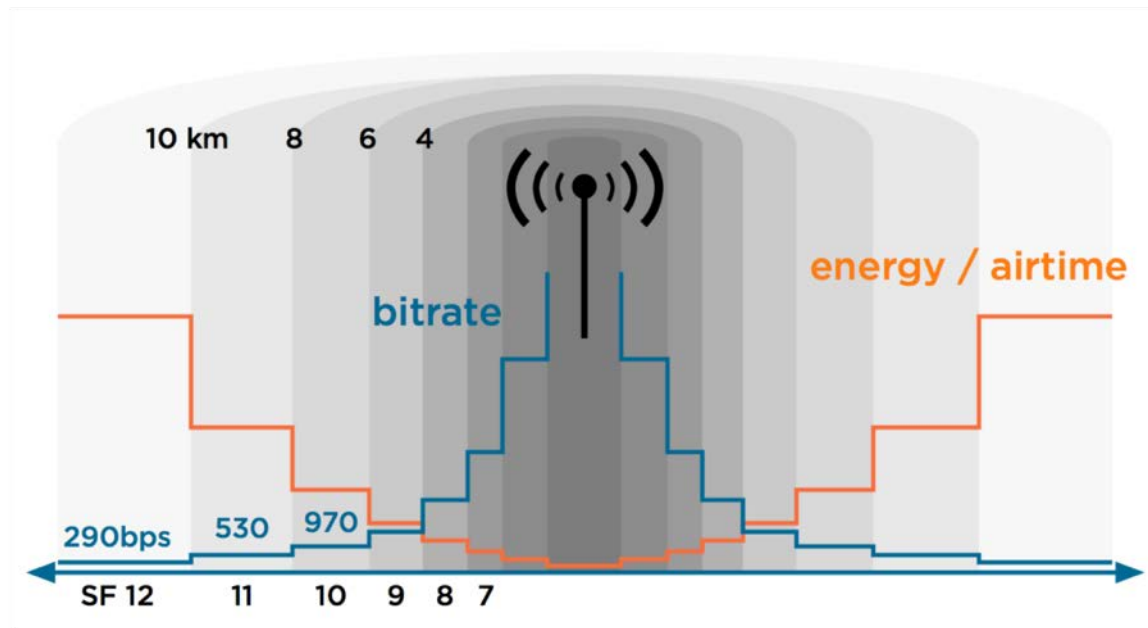
- Αποδιαμόρφωση (Demodulation)/Αποδιασπορά Φάσματος (De-spreading)



LoRa

38

- Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων
 - ▣ Υποστηρίζει μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης
 - ▣ Μέχρι 11kbps data rate



□ Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (συνέχεια)

- Ο ρυθμός μετάδοσης bits (σε bit/s) του διαμορφωμένου σήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$R_b = SF \frac{B}{2^{SF}} \text{ bits/sec} \quad SF = \log_2 \left(\frac{R_c}{R_s} \right)$$

- όπου B είναι το εύρος ζώνης, SF είναι ο παράγοντας διασποράς (spreading factor) με τιμές συνήθως από 6 έως 12 και 2 είναι ο αριθμός των chips ανά σύμβολο
- Χαμηλή τιμή του SF αντιστοιχεί σε μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων
- Η αύξηση του SF βελτιώνει το SNR, την εμβέλεια και την αξιοπιστία του συστήματος

□ Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (συνέχεια)

- Η περίοδος συμβόλου (symbol period) ορίζεται ως:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B} \text{ sec}$$

- Ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (symbol rate) και ο ρυθμός μετάδοσης των chips (σε chip/s) μπορούν να εκφραστούν ως:

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{B}{2^{SF}} \text{ symbols/sec}$$

$$R_c = R_s 2^{SF} \text{ chips/sec}$$

- Προσέξτε ότι:

$$R_c = \frac{B}{2^{SF}} 2^{SF} = B \text{ chips/sec}$$

□ Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (συνέχεια)

- Ένας τρόπος να μελετήσουμε την απόδοση της τεχνολογίας LoRa είναι να συγκρίνουμε την χρόνο συνοχής (coherence time) T_c με την περίοδο συμβόλου T_s
- Ο χρόνος συνοχής εκφράζει το μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο ραδιοδίαυλος παραμένει χρονικά αμετάβλητος και είναι αντιστρόφως ανάλογος με την ολίσθηση (shift) Doppler:

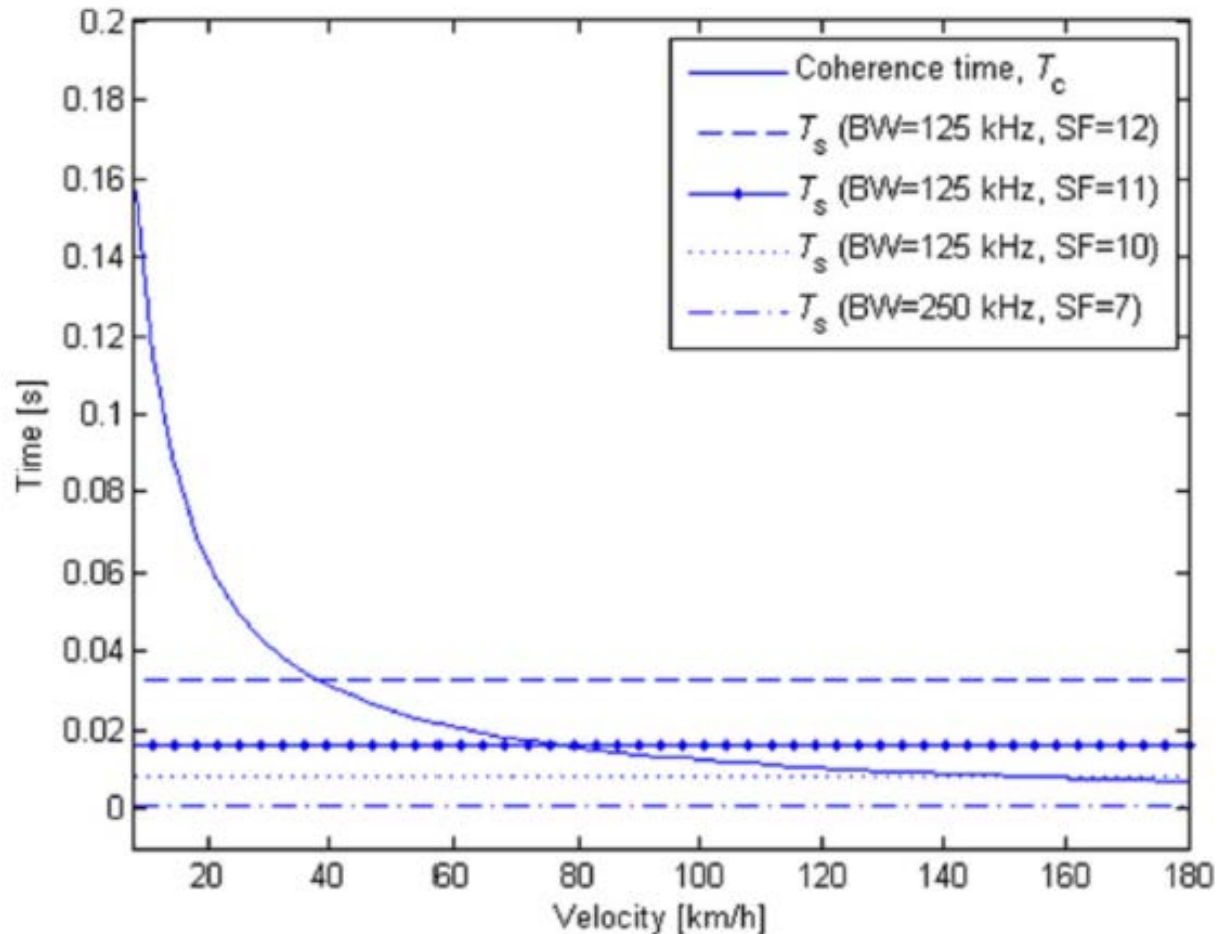
$$T_c = \frac{1}{f_D}$$

- Εάν $T_s > T_c$, τότε το φαινόμενο Doppler οδηγεί σε γρήγορες διαλείψεις (fast fading) και αλλοίωση των συμβόλων, άρα και παραμόρφωση του σήματος

LoRa

42

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πιθανότητα να χαθούν πακέτα σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες (μικρότερες από 80 km/h) για SF = 11 και SF = 12.



Σύγκριση του χρόνου συνοχής και της περιόδου του συμβόλου για διαφορετικό παράγοντα διασποράς στη συχνότητα 868 MHz

□ Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (συνέχεια)

- Η διαμόρφωση περιλαμβάνει μία μεταβλητή διόρθωση σφαλμάτων **FEC** (Forward Error Correction), η οποία κάνει το σήμα πιο εύρωστο απέναντι σε παρεμβολές, αλλά εισάγει πλεονασμούς μέσω ενός κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων (Error-Correcting Code – ECC). Ο ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης bits (σε bit/s) με FEC μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$R_b = SF \frac{\left(\frac{4}{4 + CR} \right)}{\left(\frac{2^{SF}}{B} \right)}$$

- όπου CR είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης (coding rate) και παίρνει τιμές από 1 έως 4

□ Θόρυβος στον Δέκτη

- Είναι ένα ανεπιθύμητο σήμα, χωρίς περιεχόμενο πληροφορίας, το οποίο προστίθεται στο ωφέλιμο σήμα και μειώνει την ικανότητα του δέκτη να αναπαράγει ικανοποιητικά τη μεταδιδόμενη πληροφορία
- Περιγράφεται μαθηματικά ως μία τυχαία διαδικασία και αποτελείται από ασυσχέτιστα σήματα διαφορετικής προέλευσης που συντίθενται κατά τυχαίο τρόπο
- Συνήθως εργαζόμαστε με σήματα πολύ χαμηλής ισχύος, λόγω των μεγάλων αποστάσεων και της σημαντικής εξασθένησης του σήματος
- Για να ανταποκριθούμε στις απαιτήσεις του λόγου SNR, η στάθμη του θορύβου πρέπει να ελαχιστοποιηθεί

□ Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)

- Η ισχύς του θορύβου σε θερμοκρασία δωματίου είναι:

$$N = k \cdot T_o \cdot B \text{ (Watt)}$$

$$N(dBW) = -228.6 \text{ dBW/K/Hz} + T_o(\text{dBK}) + B(\text{dBHz})$$

$$\begin{aligned} N(dBW) &= -228.6 \text{ dBW/K/Hz} + 24.6 + B(\text{dBHz}) \\ &= -204 + B(\text{dBHz}) \end{aligned}$$

$$N(dBm) = -174 + B(\text{dBHz})$$

- όπου $k = 1.39 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = -228.6 \text{ dBW/K/Hz}$ είναι η σταθερά του Boltzmann, $T_o = 290 \text{ K}$ είναι η θερμοκρασία δωματίου και B είναι το εύρος ζώνης

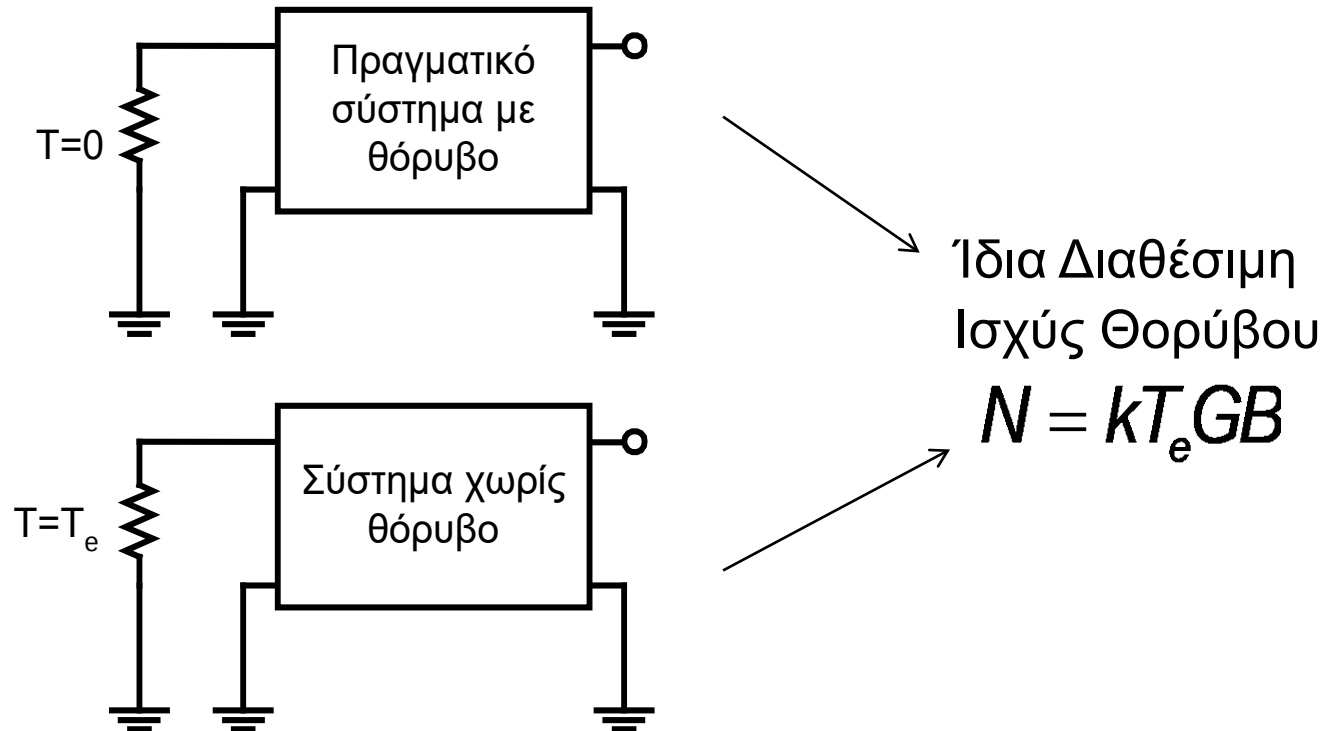
□ Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)

- Για να προσδιορίσουμε την επίδοση ενός συστήματος λήψης και να βρούμε τη συνολική ισχύ του θορύβου έναντι της οποίας πρέπει να αποδιαμορφωθεί το σήμα, πρέπει να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος ή **ενεργό θερμοκρασία θορύβου** T_e .
- Η θερμοκρασία T_e στην **είσοδο** ενός συστήματος είναι η θερμοκρασία θορύβου μιας πηγής θορύβου που βρίσκεται στην είσοδο ενός αθόρυβου συστήματος (συνήθως δέκτη) και δίνει την ίδια ισχύ θορύβου με το αρχικό σύστημα μετρούμενη στην έξοδο του συστήματος ως εξής:

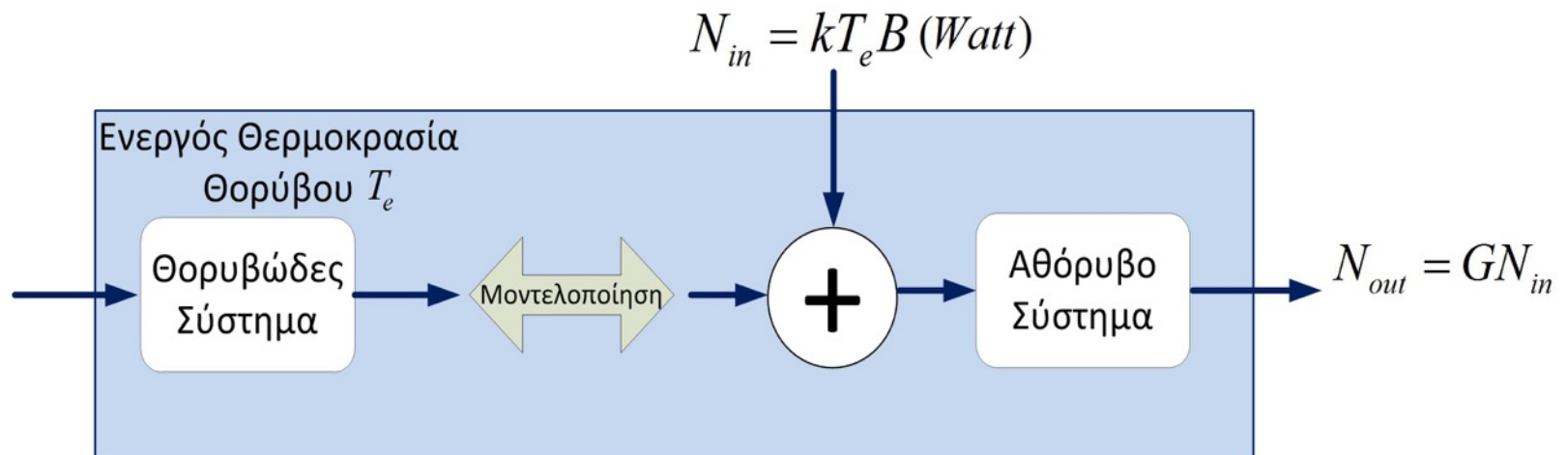
$$N = GkT_eB \text{ (Watt)}$$

- όπου G το κέρδος ισχύος του συστήματος και B το εύρος ζώνης

- Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)
 - ▣ Ενεργός Θερμοκρασία Θορύβου Τετραθύρου



- Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)
 - ▣ Σχέση ενεργού θερμοκρασίας θορύβου και ισχύος θορύβου



□ Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)

■ Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

- Ορίζεται ως ο λόγος της ολικής διαθέσιμης ισχύος θορύβου στην έξοδο του στοιχείου προς τη συνιστώσα (κλάσμα, ποσοστό) της ισχύος θορύβου στην έξοδο που παράγεται από μια πηγή στην είσοδο με θερμοκρασία θορύβου $T_o=290\text{ K}$
- Θεωρούμε σύστημα με κέρδος ισχύος G , εύρος ζώνης B , και ότι συνδέεται με πηγή θορύβου T_o
- Η ολική ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι

$$Gk(T_e + T_o)B$$

- Η συνιστώσα από την πηγή θορύβου είναι

$$GkT_oB$$

- Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)
 - ▣ Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)
 - Άρα ο συντελεστής θορύβου είναι

$$F = \frac{Gk(T_e + T_o)B}{GkT_oB} = \frac{T_e + T_o}{T_o} = 1 + \frac{T_e}{T_o}$$

$$F(dB) = 10 \log \left(1 + \frac{T_e}{T_o} \right)$$

- Και

ΟΧΙ σε dB

$$T_e = (F - 1)T_o \quad (Kelvin)$$

□ Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)

▣ Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)

■ Παράδειγμα

Ένας ενισχυτής έχει συντελεστή θορύβου $F = 2.5$ dB. Ποια είναι η ισοδύναμή του θερμοκρασία θορύβου;

■ Λύση

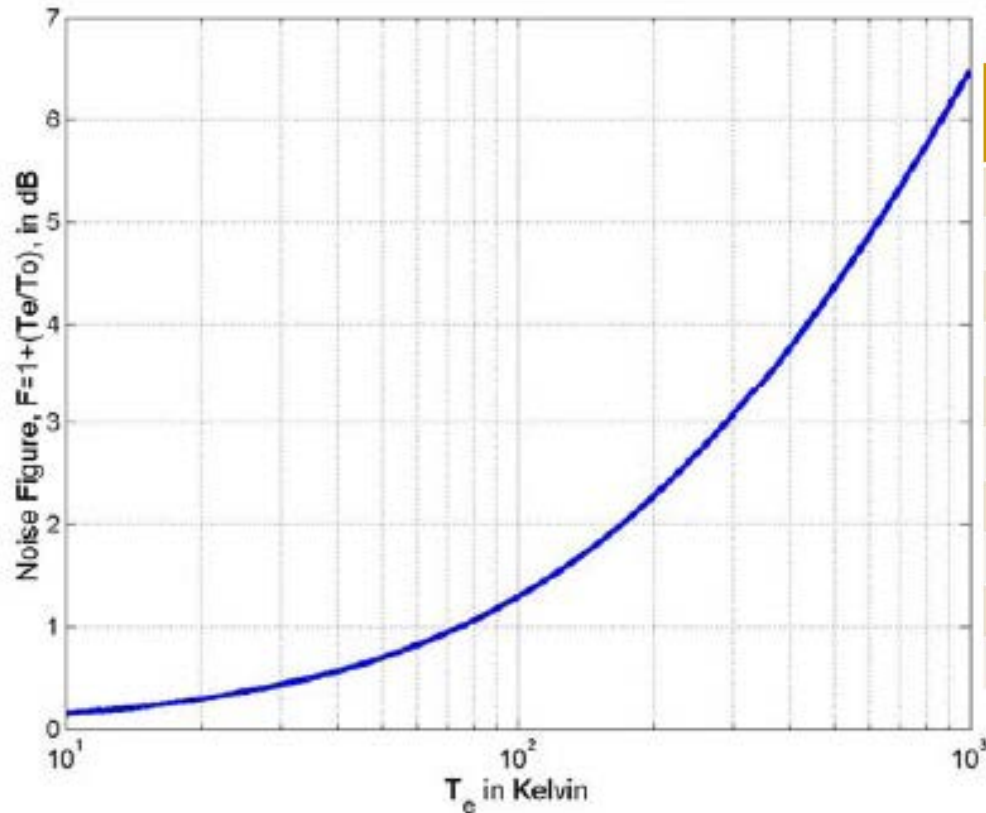
Ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} T_e &= (F - 1)T_o \\ &= (10^{2.5/10} - 1)290 \\ &= (1.78 - 1)290 \\ &= 226 \text{ Kelvin} \end{aligned}$$

LoRa

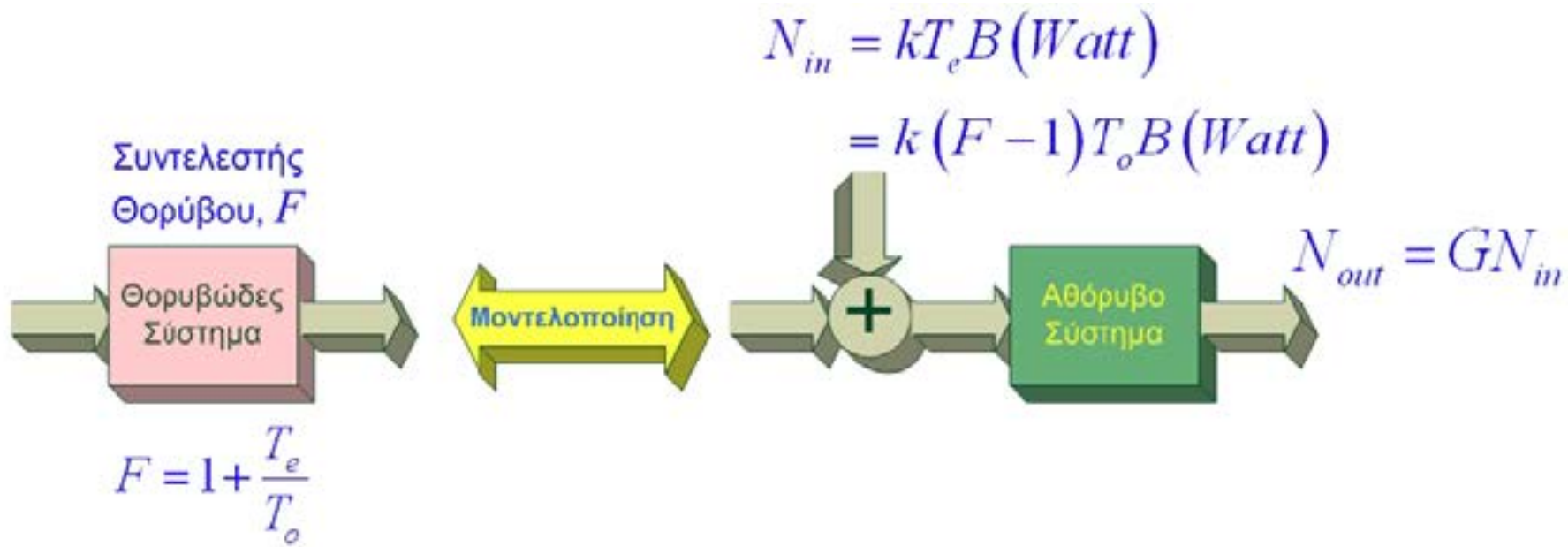
52

- Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)
 - ▣ Συντελεστής Θορύβου (Noise Figure)



Θερμοκρασία Θορύβου (K)	Συντελεστής Θορύβου (dB)	Θερμοκρασία Θορύβου (K)	Συντελεστής Θορύβου (dB)
0	0	400	3.8
20	0.29	600	4.9
40	0.56	800	5.8
60	0.82	1000	6.5
80	1.06	1500	7.9
100	1.29	2000	9.0
120	1.50	3000	10.5
150	1.81	4000	11.7
200	2.28	5000	12.6
290	3.0	10000	15.5

- Θόρυβος στον Δέκτη (συνέχεια)
 - ▣ Σχέση ενεργού θερμοκρασίας θορύβου, συντελεστή θορύβου και ισχύος θορύβου



□ Ευαισθησία στον Δέκτη

- Είναι η ελάχιστη τιμή του σήματος που πρέπει να λαμβάνει ο δέκτης, έτσι ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος SNR να είναι αρκετά μεγάλος για να πραγματοποιηθεί η αποδιαμόρφωση
- Μια τυπική ευαισθησία ενός δέκτη είναι **-142 dBm** (gateways) και **-137 dBm** (end nodes)
- Για δεδομένη ισχύ εκπομπής, η **ευαισθησία** (sensitivity) S ενός δέκτη σε θερμοκρασία δωματίου T_0 μειώνεται (και παράλληλα αυξάνεται η αξιοπιστία) με την αύξηση του SF (το SNR είναι αντιστρόφως ανάλογο του SF).
- Ισχύει ότι:

$$S(dBm) = -174 + B(dBHz) + F(dB) + SNR_{min}(dB)$$

- όπου SNR_{min} είναι ο ελάχιστος επιτρεπόμενος λόγος SNR

□ Προϋπολογισμός Ζεύξης (Link Budget)

- Η λαμβανόμενη ισχύς εξαρτάται γενικά από την ισχύ εκπομπής P_{tx} και όλα τα κέρδη και τις απώλειες της ζεύξης:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - L_{FS} - L_m + G_{rx} - L_{rx}$$

- όπου G_{tx} είναι το κέρδος της κεραίας σε dBi, L_{tx} είναι οι απώλειες στον πομπό σε dB, L_{FS} είναι οι απώλειες ελεύθερου χώρου (free-space loss) σε dB, L_m είναι οι διάφορες απώλειες σε dB, G_{rx} είναι το κέρδος της κεραίας λήψης σε dBi και L_{rx} είναι οι απώλειες του δέκτη σε dB

□ Προϋπολογισμός Ζεύξης (συνέχεια)

- Για να πραγματοποιήσουμε προϋπολογισμό της ζεύξης (link budget) και να βρούμε τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες διάδοσης, αρκεί να γνωρίζουμε την εκπεμπόμενη ισχύ και την ευαισθησία του δέκτη

$$L_{FS,max} = P_{tx} - S$$

- Για λόγους απλοποίησης, δεν θα λάβουμε υπόψη τα κέρδη των κεραιών και τις υπόλοιπες απώλειες
- Αν γνωρίζουμε τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος), μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη

□ Προϋπολογισμός Ζεύξης (συνέχεια)

▣ Παράδειγμα

■ Δίνονται:

- $P_{tx} = 14 \text{ dBm}$
- $SNR = -20 \text{ dB}$
- $F = 6 \text{ dB}$
- $B = 125 \text{ kHz}$
- $f = 865 \text{ MHz}$

- Υπολογίστε τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες ελεύθερου χώρου και τη μέγιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη

□ Προϋπολογισμός Ζεύξης (συνέχεια)

▣ Λύση

$$\begin{aligned} S &= -174 + B(\text{dBHz}) + F(\text{dB}) + \text{SNR}_{\min}(\text{dB}) \\ &= -174 + 10 \cdot \log_{10}(125000) + 6 - 20 \\ &= -174 + 51 + 6 - 20 \\ &= -137 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{FS,\max} &= P_{tx} - S \\ &= 14 - (-137) \\ &= 151 \text{ dB} \end{aligned}$$

Μπορούμε να έχουμε απώλειες 151 dB και ο δέκτης να μπορεί να αποδιαμορφώσει το λαμβανόμενο σήμα

$$\begin{aligned} L_{FS}(\text{dB}) &= 32.45 + 20\log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20\log_{10}(d_{\text{km}}) \Rightarrow \\ \log_{10}(d_{\text{km}}) &= [L_{FS}(\text{dB}) - 32.45 - 20\log_{10}(f_{\text{MHz}})] / 20 \Rightarrow \\ \log_{10}(d_{\text{km}}) &= [151 - 32.45 - 58.74] / 20 \Rightarrow \\ \log_{10}(d_{\text{km}}) &\approx 3 \Rightarrow \\ d_{\text{km},\max} &\approx 1000 \text{ km} \end{aligned}$$

LoRa

59

□ Τυπικές τιμές

<i>SpreadingFactor</i> (RegModulationCfg)	Spreading Factor (Chips / symbol)	LoRa Demodulator SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

→ Τυπική τιμή

<i>CodingRate</i> (RegTxCfg1)	Cyclic Coding Rate	Overhead Ratio
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

→ Τυπική τιμή

Για SF=7 (128 chips/symbol), B=125kHz και CR=4/5 → 8kbps

Για SF=12 (4096 chips/symbol), B=125kHz και CR=4/8 → 150bps

LoRa

60

□ Τυπικές τιμές

- ▣ Για κανάλι εύρους ζώνης 125kHz

Spreading Factor	Chips/symbol	Sensitivity (dBm)	SNR limit	Time-on-air (ms) (10-byte packet)	Bitrate (bps)
7	128	-124	-7.5	56	5469
8	256	-127	-10	103	3125
9	512	-130	-12.5	205	1758
10	1024	-133	-15	371	977
11	2048	-135	-17.5	741	537
12	4096	-137	-20	1483	293

SF=7 σημαίνει ότι χρειάζεται SNR=-7.5dB για να αποκωδικοποιηθεί την πληροφορία

LoRa

61

Προσοχή στις μετατροπές!!!

dBm	dBW	Watts	Milliwatts
+60	+30	1000	10^{+6}
+40	+10	10	10^{+4}
+30	0	1	10^{+3}
+20	-10	0.1	100
+13	-17	0.02	20
+10	-20	0.01	10
+6	-24	0.004	4
+3	-27	0.002	2
0	-30	0.001	1
-3	-33	0.0005	0.5
-6	-36	0.00025	0.25
-10	-40	0.0001	0.1

Διαδίκτυο των Πραγμάτων

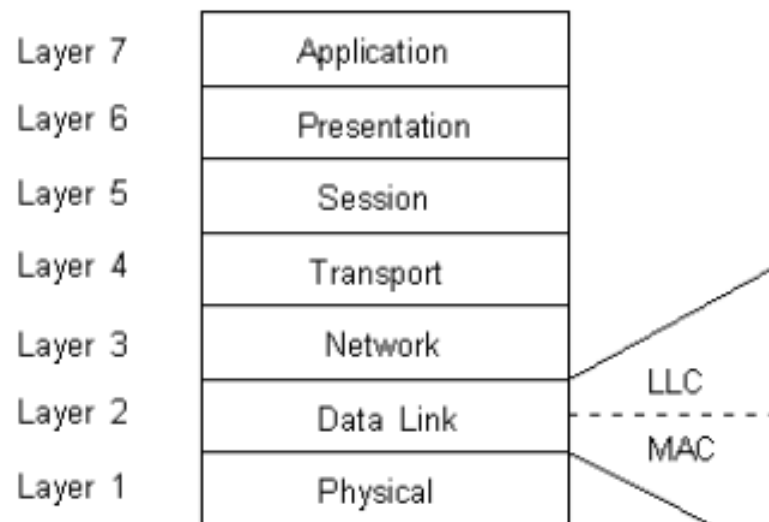
LoRa

62

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 +8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kpbs				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

- Αν και η τεχνολογία LoRa τοποθετείται στο φυσικό επίπεδο, το πρωτόκολλο **LoRaWAN** (Long Range Wide Area Network) τοποθετείται στο υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (media access control – **MAC**) του μοντέλου OSI, καθορίζει λεπτομέρειες σχετικά με το ποιος θα έχει σειρά για μετάδοση δεδομένων σε κανάλια πολλαπλής πρόσβασης και οι προδιαγραφές του καθορίζονται από την **LoRa Alliance** (<https://www.lora-alliance.org>)

OSI Model

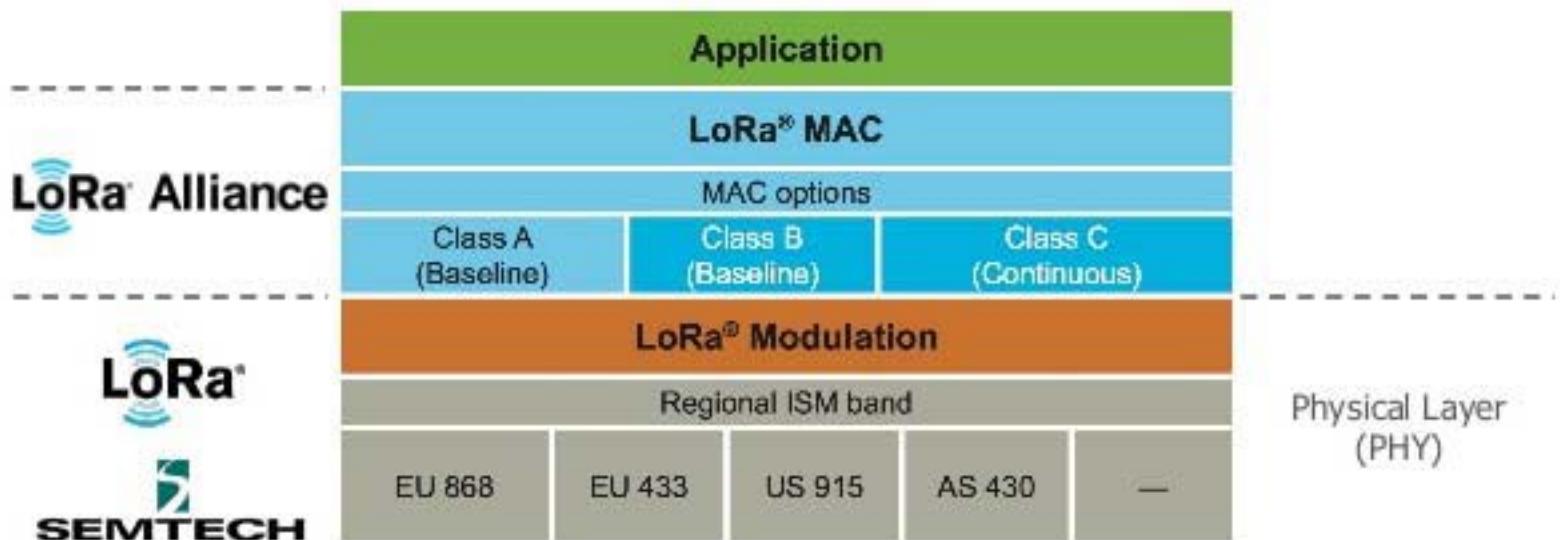


LoRaWAN

64

- Το LoRaWAN είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των πολλαπλών πυλών LPWA και των συσκευών και ορίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος για το δίκτυο
- Επιπλέον, καθορίζει τις συχνότητες, τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την ισχύ για όλες τις συσκευές, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την ασφάλεια και την ποιότητα υπηρεσίας

LoRa, LoRaWAN and the LoRa Alliance



□ Αρχιτεκτονική του Δικτύου

- Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο LoRaWAN είναι **ασύγχρονοι** και επικοινωνούν όταν έχουν έτοιμα δεδομένα να στείλουν (προγραμματισμένα ή με βάση τις τρέχουσες ανάγκες)
- Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως **πρωτόκολλο Aloha**
- Σύμφωνα με το πρωτόκολλο Aloha, δεν υπάρχει κάποιας μορφής ανατροφοδότηση στο δίκτυο, παρά μόνο ένα μήνυμα **ACK**
- Το πρώτο πακέτο στην ουρά αναμονής για αποστολή αποστέλλεται όταν είναι έτοιμο για αποστολή
- Αν δεν έρθει μήνυμα επιβεβαίωσης ACK, η αποστολή επαναλαμβάνεται για τυχαίο αριθμό επαναλήψεων

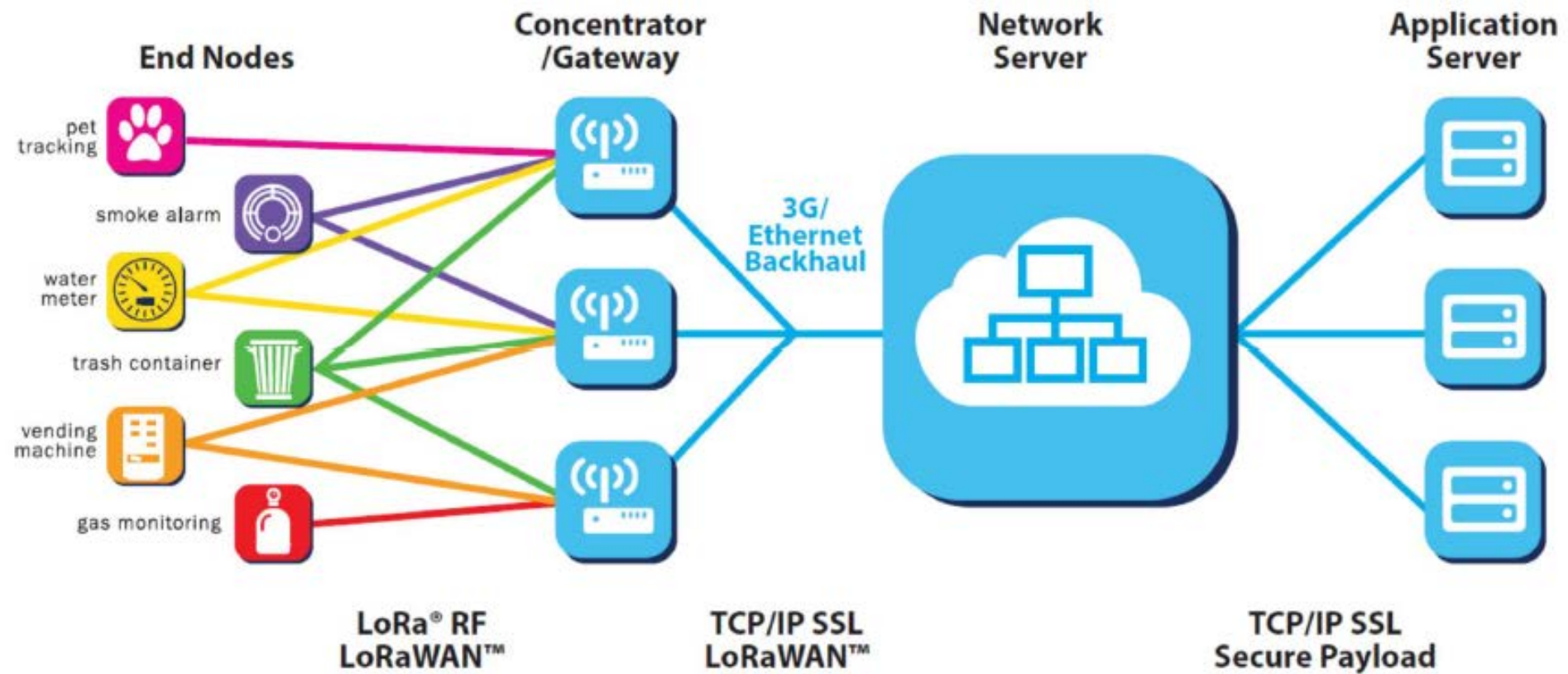
□ Αρχιτεκτονική του Δικτύου (συνέχεια)

- Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις πύλες προωθούνται σε ένα κεντρικό διακομιστή (centralized server), ο οποίος πραγματοποιεί φιλτράρισμα των πακέτων και έλεγχο ασφάλειας για κάθε μια συσκευή
- Έπειτα, τα δεδομένα προωθούνται σε διακομιστές εφαρμογών (application servers)
- Οι πύλες συνδέονται με τον διακομιστή μέσω ενός δικτύου άλλης τεχνολογίας (π.χ. κυψελωτά δίκτυα, δορυφορικά δίκτυα ή Ethernet)
- Όλη η επικοινωνία είναι αμφίδρομη
- Οι τοπολογίες αστέρα είναι ιδανικές για επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης

LoRaWAN

67

□ Αρχιτεκτονική LoRaWAN



□ Ωφέλιμο Φορτίο (Payload)

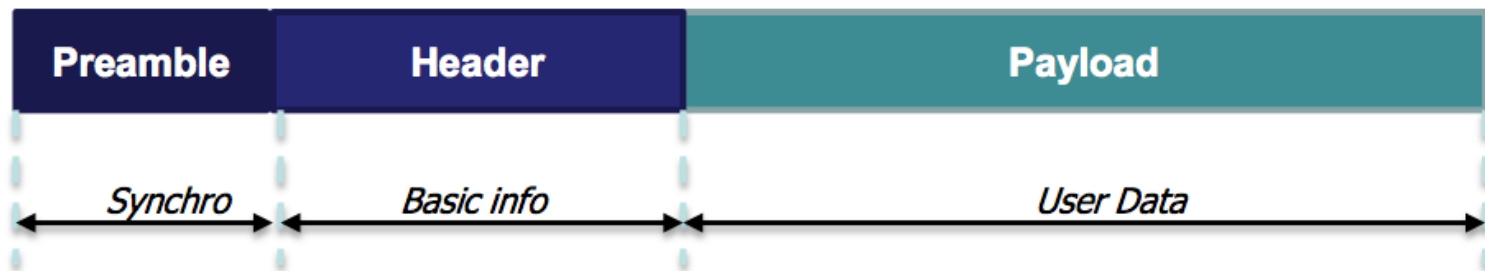
- Τα δίκτυα διαιρούν τα δεδομένα σε μικρές ενότητες που ονομάζονται πακέτα (packets), τις οποίες στέλνουν μεμονωμένα
- Για να ταξιδέψει ένα πακέτο μέσα στο δίκτυο, πρέπει πρώτα να ενθυλακωθεί μέσα σε ένα πλαίσιο (frame)
- Η διάρκεια ενός πλαισίου σε ένα δίκτυο LoRaWAN είναι το άθροισμα ενός προοιμίου (preamble) και του πραγματικού (actual) ωφέλιμου φορτίου (payload) του πακέτου:

$$T_{LoRa} = T_{preamble} + T_{packet}$$

LoRaWAN

69

□ Ωφέλιμο Φορτίο (συνέχεια)



- Chirp: synchronization preamble to allow for recognition of message
- Header: basic information for message size and error correction
- Payload (flexible): user data ranging from 1 to 242 bytes

□ Ωφέλιμο Φορτίο (συνέχεια)

- Συγκεκριμένα, για διαμόρφωση CSS ισχύει ότι:

$$T_{LoRa} = \frac{1}{R_s} \left(n_{preamble} + \left(SW + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right\rceil (CR + 4), 0 \right) \right) \right)$$

- όπου $n_{preamble} = 12.15$ είναι ο αριθμός των συμβόλων preamble, $SW = 1$ είναι το μήκος της λέξης συγχρονισμού, PL είναι ο αριθμός των bytes του ωφέλιμου φορτίου, το CRC (1 ενεργό και 0 ανενεργό) καθορίζει την παρουσία cyclic redundancy check, το IH καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας (0 για explicit mode και 1 για implicit mode) και το DE εισάγει τεχνικές βελτίωσης του ρυθμού μετάδοσης για μεγάλα SF (1 ενεργό και 0 ανενεργό)

LoRaWAN

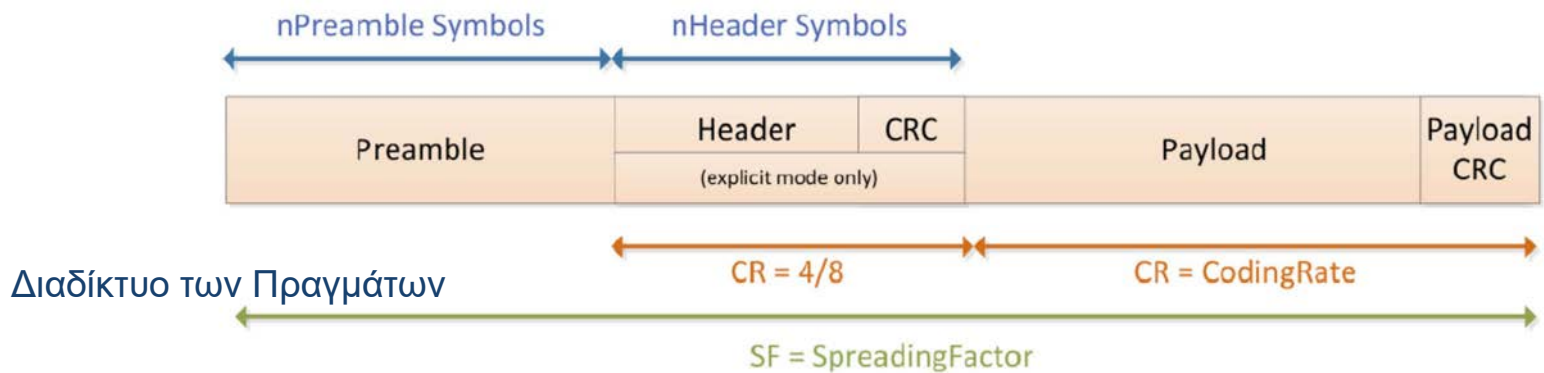
71

□ Ωφέλιμο Φορτίο (συνέχεια)

- Προσέξτε ότι το «**max**» επιστρέφει τη μέγιστη τιμή μεταξύ των δύο ορισμάτων στην παρένθεση που είναι χωρισμένα με κόμμα, ενώ το «**ceil**» μετατρέπει ένα πραγματικό αριθμό στον πλησιέστερο ακέραιο

□ Παράδειγμα Μεγέθους Ωφέλιμου Φορτίου

GPS coordinates	➡	6 bytes
Temperature	➡	2 bytes
Speed reporting	➡	1 byte
Object status	➡	1 byte
«Keep alive» payload	➡	0 byte

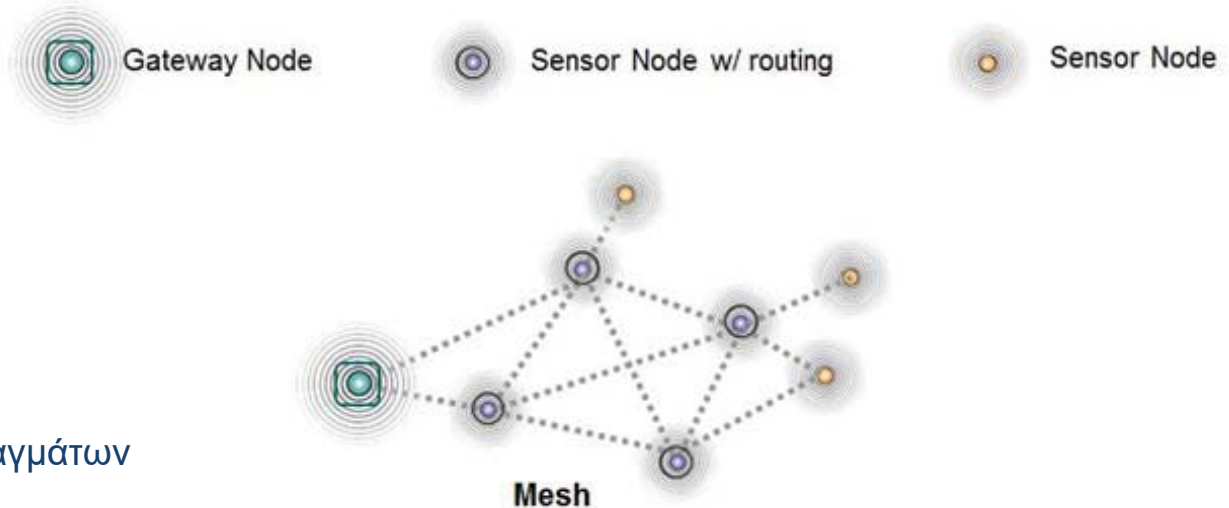


LoRaWAN

72

□ Τοπολογία Δικτύου

- Σε δίκτυα κατανεμημένης τοπολογίας (mesh topology) ή σε συγχρονισμένα δίκτυα, όπως τα κυψελωτά, οι κόμβοι πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να συγχρονίζονται με το δίκτυο και να πραγματοποιούν έλεγχο μηνυμάτων
- Αυτός ο συγχρονισμός οδηγεί στη κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας

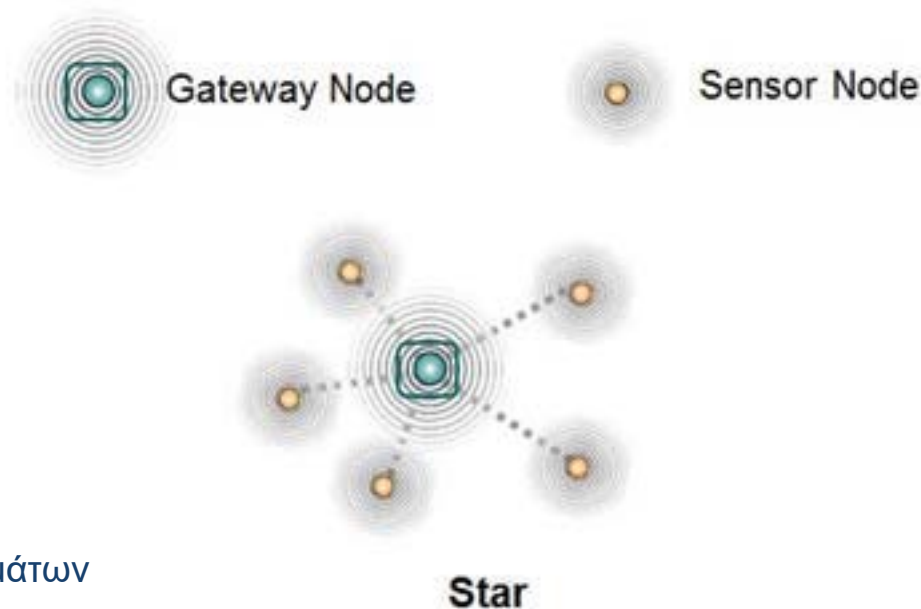


LoRaWAN

73

□ Τοπολογία Δικτύου (συνέχεια)

- Τα δίκτυα LoRaWAN είναι οργανωμένα σε **τοπολογία αστέρα** (star topology), στην οποία η πύλες (gateways) αναμεταδίδουν τα μηνύματα μεταξύ των συσκευών (κόμβων) και των κεντρικών διακομιστών μέσω ενός άλματος (single-hop)



□ Τοπολογία Δικτύου (συνέχεια)

■ Τα **τερματικά** (end devices) είναι ταξινομημένα σε 3 κλάσεις:

- A Class: Transmit, listen, listen again, sleep
- B Class: Transmit, listen on scheduled windows, sleep
- C Class: Transmit but keep your received windows open

Classes	Description	Intended Use	Consumption	Examples of Services
A (« all »)	Listens only after end device transmission	Modules with no latency constraint	The most economic communication Class energetically.. Supported by all modules. Adapted to battery powered modules	• Fire Detection • Earthquake Early Detection
B (« beacon »)	The module listens at a regularly adjustable frequency	Modules with latency constraints for the reception of messages of a few seconds	Consumption optimized. Adapted to battery powered modules	• Smart metering • Temperature rise
C (« continuous »)	Module always listening	Modules with a strong reception latency constraint (less than one second)	Adapted to modules on the grid or with no power constraints	• Fleet management • Real Time Traffic Management

□ Τοπολογία Δικτύου (συνέχεια)

- Οι **πύλες** (gateways) έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:
 - Είναι διάφανα στοιχεία
 - Μετάδοση δεδομένων uplink στον LoRaWAN Server
 - Μετάδοση δεδομένων downlink στους κόμβους
 - Ουρά Just-In-Time (JIT queue)
 - Επικοινωνία backhaul gateway-2-gateway
 - Έχουν τη δυνατότητα απλής προώθησης UDP πακέτων μέχρι υποστήριξης λειτουργικών συστημάτων
 - Μερικές πύλες 'τρέχουν' τις λειτουργίες ενός LoRaWAN Server
 - Δρομολογούν τα δεδομένα προς τον App Server
 - Κρυπτογραφούν και αποκρυπτογραφούν τα δεδομένα
 - Προγραμματίζουν, δρομολογούν και διαμορφώνουν το downlink
 - Υπολογίζουν το Adaptive Data Rate (ADR), δίνουν MAC εντολές και θέτουν την κατάσταση του τερματικού

□ Ασφάλεια

- Τα δίκτυα LoRa (LoRaWAN) έχουν σχεδιαστεί, ώστε να προσφέρουν ασφάλεια σε πολλά επίπεδα κατά τη διαδικασία της επικοινωνίας της συσκευής με τον διακομιστή
- Χρησιμοποιούν ένα σύνολο από κλειδιά κρυπτογράφησης συσκευών, συνόδων (sessions) και εφαρμογών για την κρυπτογράφηση δεδομένων και την μετέπειτα επαλήθευση της πρόσβασης των συσκευών στο δίκτυο
- Τα δίκτυα LoRa, επίσης προσφέρουν εναέριο έλεγχο (“over-the-air”) του σήματος που στέλνεται σε μία πύλη
- Αν το σήμα προέρχεται από συσκευή που δεν ανήκει στο δίκτυο LoRa, τότε αυτό απορρίπτεται

□ Ασφάλεια

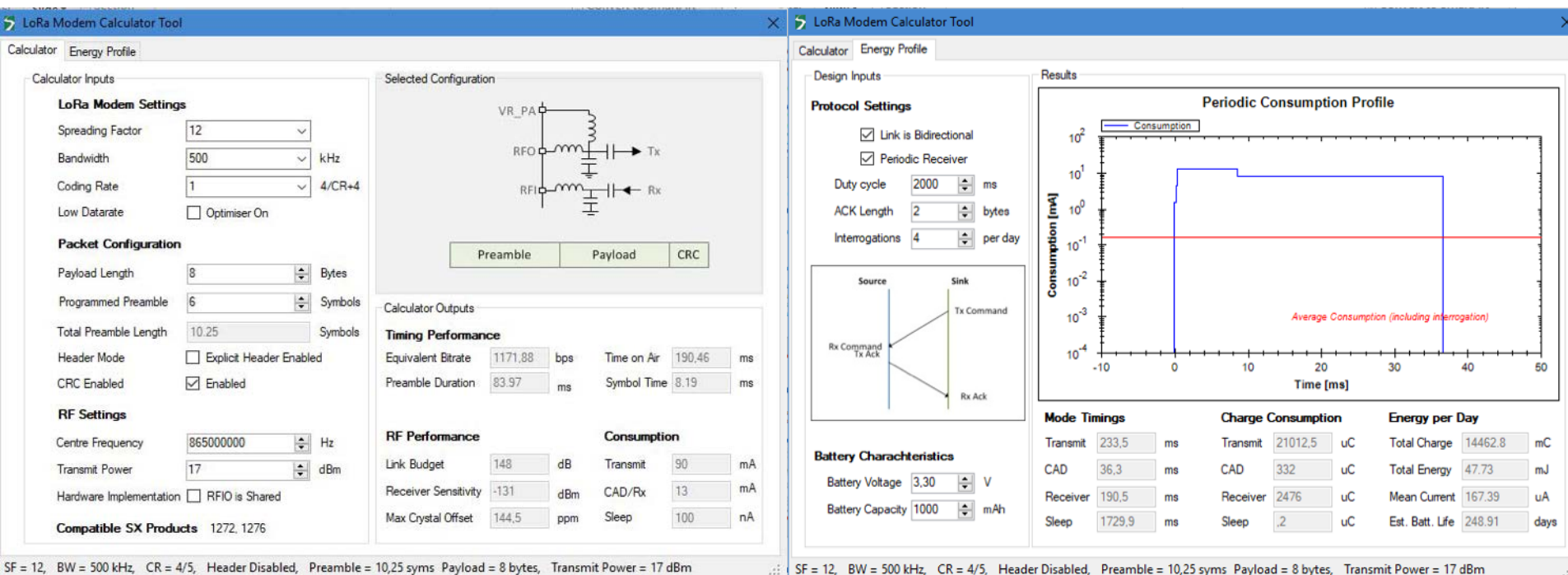
- Για τις λειτουργίες και την ασφάλεια των δεδομένων που ανταλλάσσονται, μόνο η εκάστοτε συσκευή και διακομιστής διατηρούν του κανόνες και τους κωδικούς αποκρυπτογράφησης
- Τα κρυπτογραφημένα μηνύματα απλά προωθούνται μέσω της ενδιάμεσης πύλης και ύστερα μέσω του διαδικτύου στον διακομιστή ή στη συσκευή
- Τα μηνύματα επικοινωνίας αυτά αποκρυπτογραφούνται και επεξεργάζονται μόνο στη συσκευή ή στον διακομιστή, ώστε να αποφευχθούν οι υποκλοπές στοιχείων

LoRaWAN

78

□ LoRa Modem Calculator Tool

- Είναι ένα λογισμικό (software planning tool) για την εκτίμηση της απόδοσης των δικτύων LPWA τεχνολογίας LoRa (www.semtech.com)



SF = 12, BW = 500 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10,25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 17 dBm

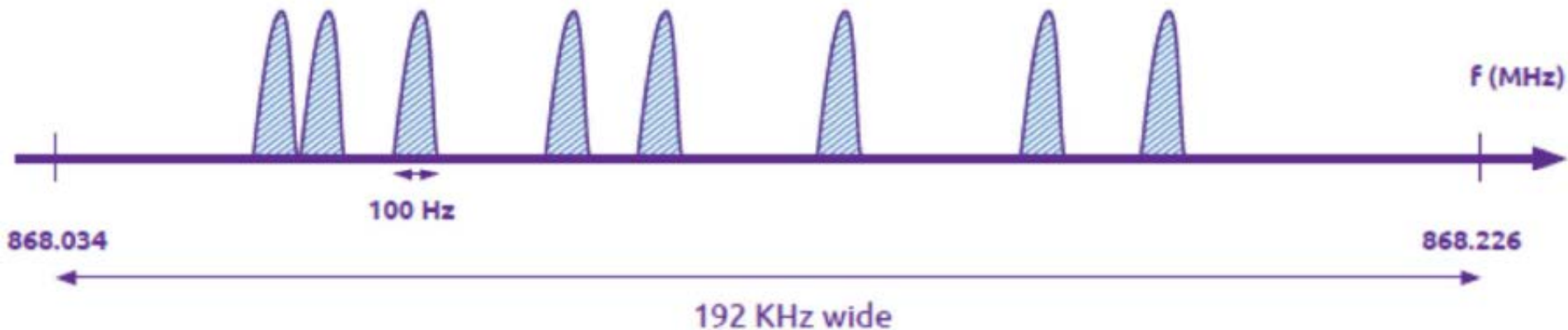
SF = 12, BW = 500 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10,25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 17 dBm

- Η τεχνολογία **SigFox** είναι μαζί με τη LoRaWAN οι πιο δημοφιλείς τεχνολογίες LPWA
- Χρησιμοποιεί τις συχνότητες 868 MHz (στην Ευρώπη) και 915 MHz (Βόρεια Αμερική) της ζώνης συχνοτήτων ISM
- Έχει εμβέλεια 3-10 km σε αστικά περιβάλλοντα και 30-50 km σε αγροτικές περιοχές
- Το σήμα μεταδίδεται σε μια εξαιρετικά στενή ζώνη συχνοτήτων (ultra narrowband – UNB) της τάξης των 100 Hz
- Λόγω της UNB, οι συσκευές λήψης έχουν πολύ υψηλή ευαισθησία και επιτυγχάνεται μεγάλη εμβέλεια

SigFox

80

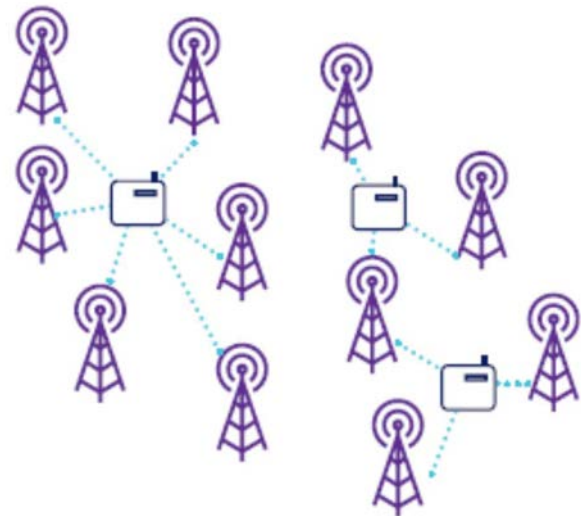
- Συγκεκριμένα, η τεχνολογία Sigfox χρησιμοποιεί 192 KHz για τη μετάδοση πληροφορίας, όπου κάθε μήνυμα έχει εύρος 100 Hz



- Επιπλέον, η τεχνολογία SigFox χρησιμοποιεί ψηφιακή διαμόρφωση BPSK

- Μέσω της τυχαίας πρόσβασης (random access) επιτυγχάνεται υψηλή ποιότητα υπηρεσίας και ρυθμός μετάδοσης δεδομένων περίπου 100 bps, με μέγιστο μέγεθος του πακέτου ωφέλιμου φορτίου 12 bytes και μέγιστο αριθμό πακέτων ανά συσκευή 14 πακέτα/μέρα
- Η εκπομπή σήματος μεταξύ των συσκευών και του δικτύου είναι ασύγχρονη
- Η συσκευή στέλνει ένα μήνυμα σε μια τυχαία συχνότητα και έπειτα στέλνει 2 αντιγραφές του σήματος σε διαφορετικές χρόνους και συχνότητες, πετυχαίνοντας διαφορισμό χρόνου και συχνότητας (time and frequency diversity)

- Σε αντίθεση με τα κυψελωτά συστήματα, όπου κάθε συσκευή επικοινωνεί με έναν σταθμό βάσης, στο SigFox το εκπεμπόμενο σήμα λαμβάνεται από οποιονδήποτε κοντινό σταθμό βάσης
- Ο μέσος αριθμός χρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης είναι τρεις (3), αρκετά χαμηλότερος από τον αντίστοιχο στην τεχνολογία LoRa, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος



□ Αρχιτεκτονική Δικτύων SigFox

- Στα δίκτυα SigFox ορίζονται 2 βασικά επίπεδα.
 - Το **επίπεδο δικτυακού εξοπλισμού** (network equipments layer) περιλαμβάνει σταθμούς βάσης και κεραίες με στόχο τη λήψη σημάτων από συσκευές και τη μεταφορά των σημάτων στο **επίπεδο συστημάτων υποστήριξης** (support systems layer)
 - Το τελευταίο αποτελεί το δεύτερο βασικό επίπεδο που έχει ως στόχο την επεξεργασία των μηνυμάτων και την αποστολή τους στο σύστημα πελατών (customer system) και επιτρέπει την αλληλεπίδραση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου, μέσω διαδικτυακών διεπαφών και APIs

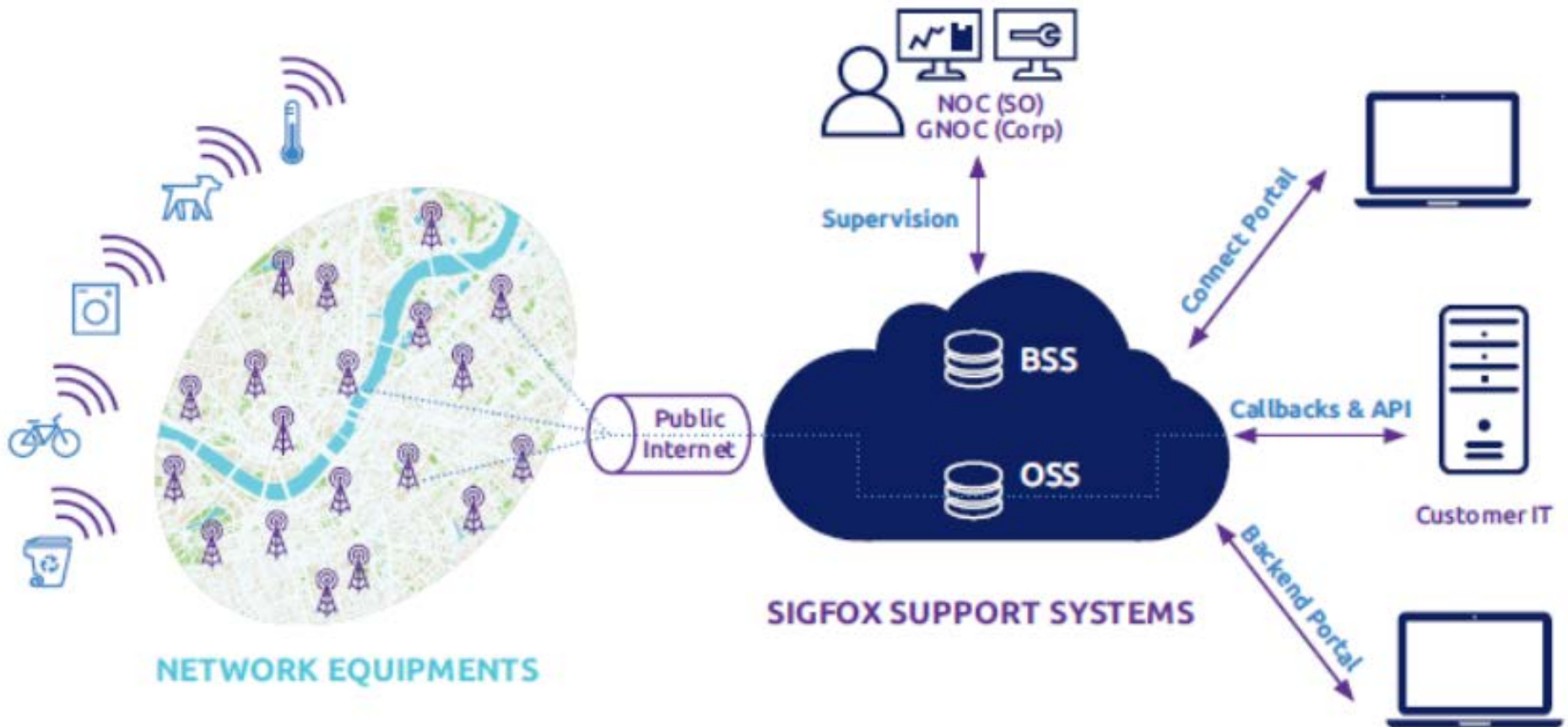
□ Αρχιτεκτονική Δικτύων SigFox

- Το επίπεδο συστημάτων υποστήριξης περιλαμβάνει επίσης διατάξεις και χαρακτηριστικά απαραίτητα για την εξασφάλιση της σωστής εγκατάστασης, λειτουργίας και επιτήρησης του δικτύου (Operation Support System – OSS), σύστημα υποστήριξης επιχειρήσεων (Business Support System – BSS) για παραγγελίες και λογαριασμούς και σύστημα σχεδίασης ραδιοδικτύων (radio planning)
- Η ασφαλής σύνδεση μεταξύ των δικτύων επιτυγχάνεται μέσω του διαδικτύου και εικονικών ιδιωτικών δικτύων (virtual private networks – VPNs)

SigFox

85

□ Αρχιτεκτονική Δικτύων SigFox



- Η τεχνολογία **Weightless** περιλαμβάνει τρία πρότυπα, το Weightless-W, το Weightless-N και το Weightless-P
- Το Weightless-W προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 1 kbps έως 1 Mbps και διάρκεια μπαταρίας 3-5 χρόνια
- Το Weightless-N σχεδιάστηκε για να αυξήσει την εμβέλεια του Weightless-W και να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας (διάρκεια μπαταρίας έως 10 χρόνια) με κόστος την μείωση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα 100 kbps)
- Χρησιμοποιεί τεχνολογία UNB και συχνότητες 800-900 MHz

Weightless

87

- Το Weightless-P αποτελεί μια τεχνολογική λύση υψηλής απόδοσης που μπορεί να λειτουργήσει σε συχνότητες 169, 433, 470, 780, 868, 915 και 923 MHz
- Ωστόσο, το κόστος των συσκευών και η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερα από το Weightless-N (χρόνος ζωής μπαταρίας 3-8 χρόνια)

- Η τεχνολογία **Ingenu** χρησιμοποιεί συχνότητες ISM στα 2.4 GHz και βασίζεται σε τεχνικές τυχαίας πολλαπλής πρόσβασης (Random Phase Multiple Access – RPMA) και διαμόρφωση διασποράς φάσματος ευθείας ακολουθίας (direct-sequence spread spectrum – DSSS)
- Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας Ingenu είναι οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 624 kbps στην άνω ζεύξη και 156 kbps στην κάτω ζεύξη
- Εντούτοις, η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη και η εμβέλεια μικρότερη (περίπου 5-6 km), λόγω της χρήσης υψηλών συχνοτήτων

EC-GSM-IoT, LTE-M και NB-IoT

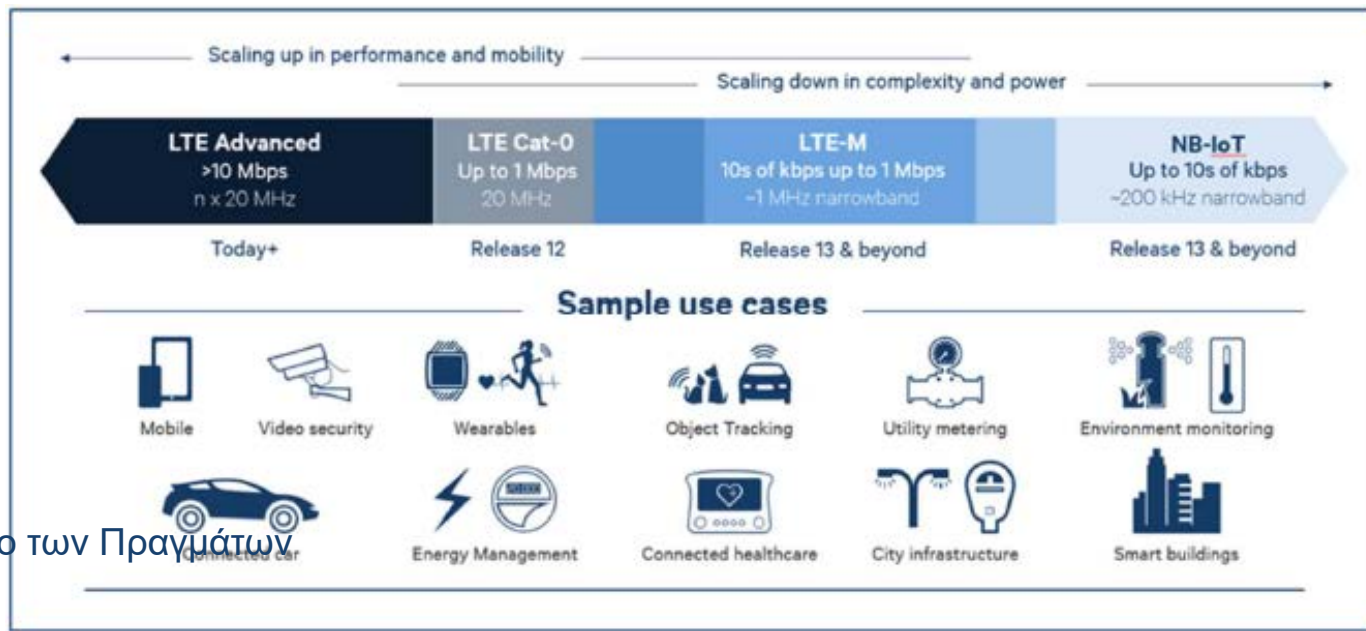
89

- ❑ Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στις αρχές των **κυψελωτών δικτύων**, αλλά είναι λιγότερο σύνθετες
- ❑ Δεν χρησιμοποιούν ζώνες συχνοτήτων ISM, αλλά ζώνες συχνοτήτων των υπαρχόντων τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών που απαιτούν αδειοδότηση
- ❑ Μέσω των τεχνολογιών αυτών, η διασύνδεση μεταξύ συσκευών γίνεται ευκολότερα και με χαμηλότερο κόστος, καθώς δεν απαιτείται η χρήση ειδικού εξοπλισμού
- ❑ Υπερτερούν σημαντικά σε ποιότητα και ασφάλεια σε σχέση με άλλες τεχνολογίες IoT, αφού η μετάδοση δεδομένων γίνεται μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας, γεγονός που επιτρέπει την καλύτερη κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους

EC-GSM-IoT, LTE-M και NB-IoT

90

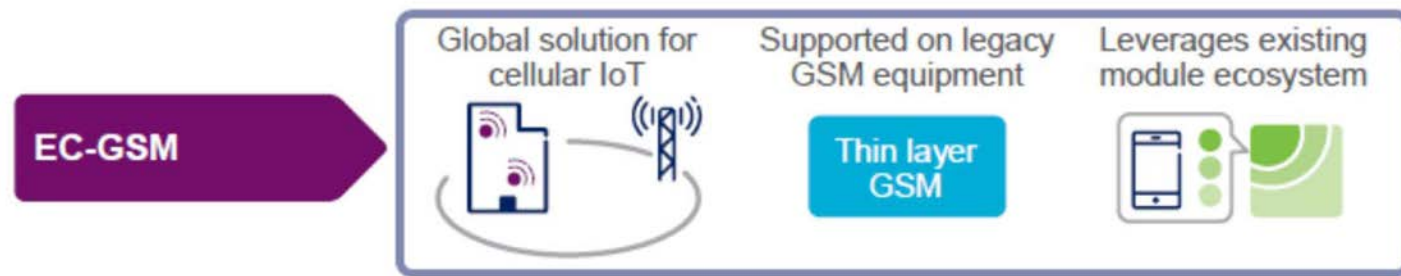
- Οι τεχνολογίες αυτές εξελίσσονται μαζί με τις τεχνολογίες 4G, δίνοντας τη δυνατότητα περαιτέρω επέκτασης, ώστε να συμπεριλάβουν μεθόδους εντοπισμού θέσης, περιαγωγής, υπηρεσιών μετάδοσης πολυμέσων και πολλών ακόμη λειτουργιών που θα εξελίξουν σημαντικά τις δυνατότητες του IoT



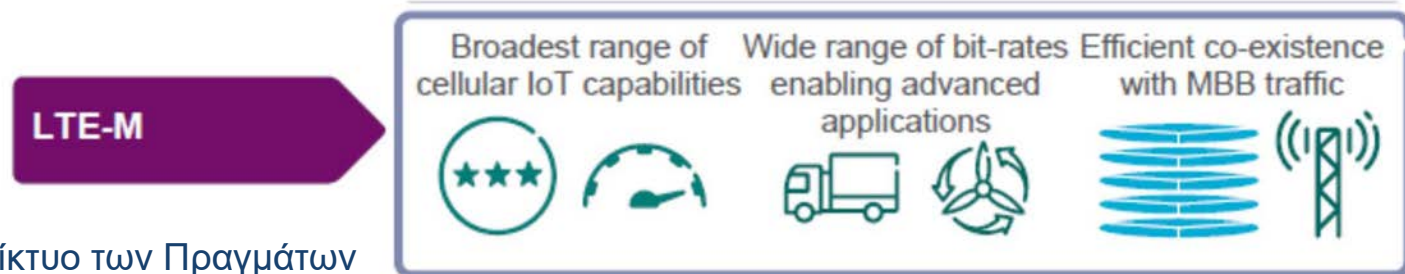
EC-GSM-IoT, LTE-M και NB-IoT

91

- Η τεχνολογία **EC-GSM-IoT** επεκτείνει τις δυνατότητες των ψηφιακών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς Global System for Mobile communications (GSM) ως προς την κάλυψη



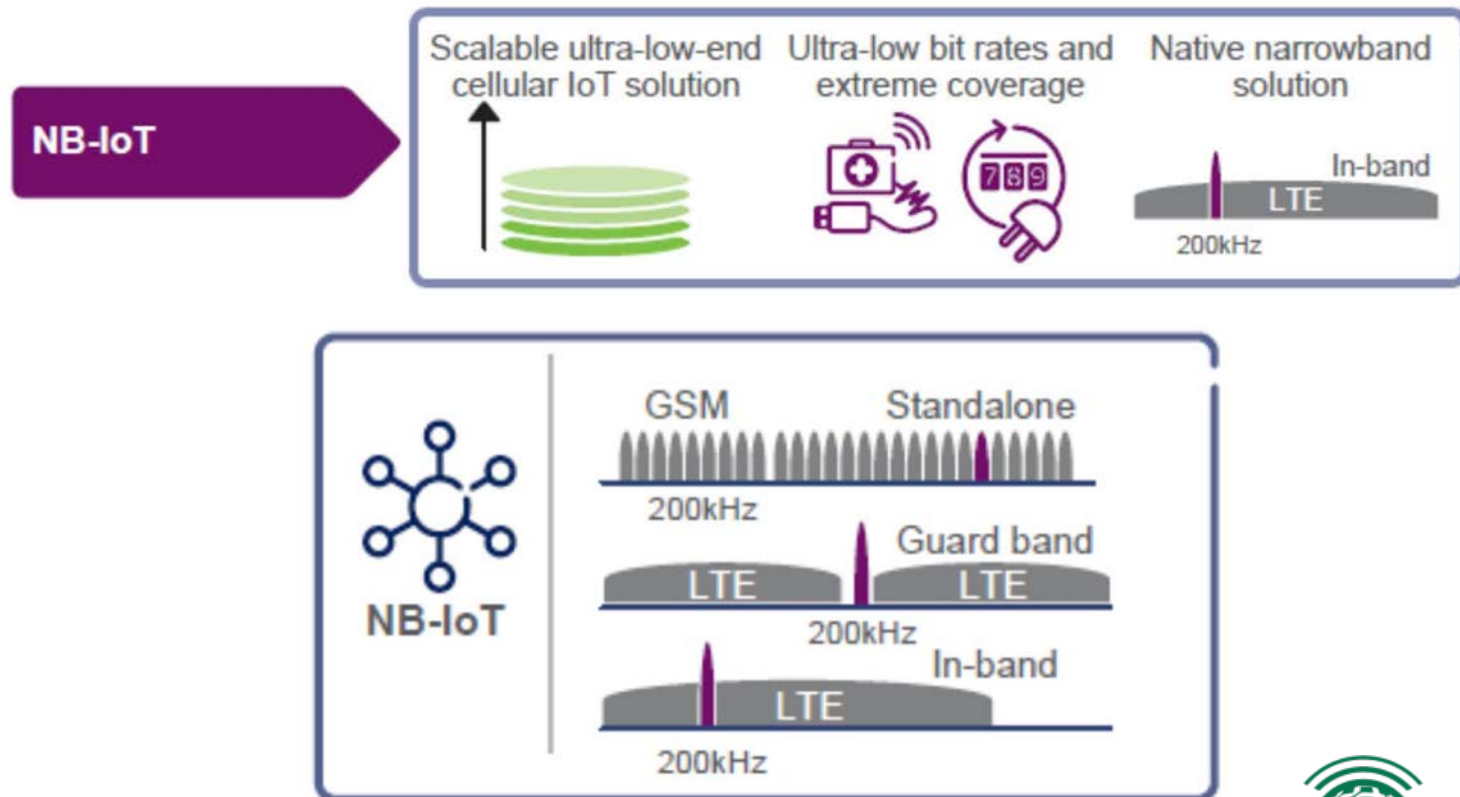
- Η τεχνολογία **LTE-M** επεκτείνει τις δυνατότητες των ψηφιακών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 4ης γενιάς Long Term Evolution (LTE) και προσφέρει διασύνδεση μηχανών



EC-GSM-IoT, LTE-M και NB-IoT

92

- Η τεχνολογία **NB-IoT** χρησιμοποιεί ένα μικρό εύρος ζώνης 200 kHz και αξιοποιεί τα υπάρχοντα δίκτυα LTE



Σύγκριση Τεχνολογιών Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλής Κατανάλωσης

93

Τεχνολογία	Διαμόρφωση	Συχνότητα	Εύρος Ζώνης	Ρυθμοί Μετάδοσης	Link Budget	Εμβέλεια
LoRaWAN	CSS/(G)FSK	868 MHz ISM (Ευρώπη)	125 – 500 kHz	0.3 – 50 kbps	155 dB	2–5 km (αστική) 15 km (προαστιακή) 45 km (αγροτική)
SigFox	UNB/BPSK	868 MHz ISM (Ευρώπη)	100 Hz	100 bps	156 dB	3–10 km (αστική) 30–50 km (αγροτική)
Weightless-N	UNB/DBPSK	868 MHz ISM (Ευρώπη)	200 Hz	100 kbps	147 dB	5 km (αστική) 20–30 km (αγροτική)
Ingenu	RPMA/DSSS	2.4 GHz ISM	1 MHz	156 – 624 kbps	163 dB	5–6 km (αστική)

Σύγκριση Τεχνολογιών Μεγάλης Εμβέλειας και Χαμηλής Κατανάλωσης

94

Τεχνολογία	Διαμόρφωση	Συχνότητα	Εύρος Ζώνης	Ρυθμοί Μετάδοσης	Link Budget	Εμβέλεια
EC-GSM Rel. 13	OFDMA	Licensed 800–900 MHz	200 kHz	<140 kbps	164 dB	<35 km
LTE-M Rel. 12/13	OFDMA	Licensed 700–900 MHz	1.4 MHz	1 Mbps	156 dB	<35 km
NB-IoT Rel. 13	OFDMA	Licensed 699–2200 MHz	200 kHz	<250 kbps	164 dB	<100 km