اینترنت اشیاء

Internet of Things (IoT)

مدرس: سعدون عزیزی

s.azizi@uok.ac.ir

دانشکده مهندسی - گروه کامپیوتر

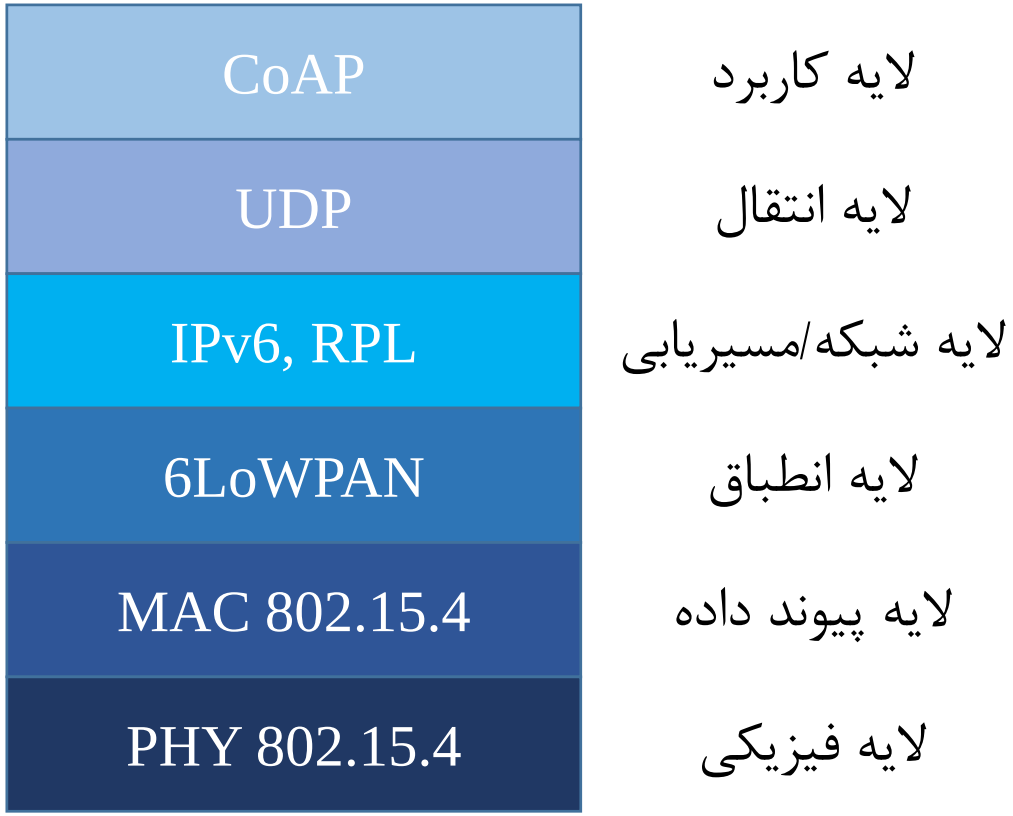
نیمسال دوم ۹۷-۹۶

اهداف این فصل

* در این فصل انتظار می‌رود که دانشجو با مباحث زیر آشنا شود:

- دید کلی نسبت به پشته پروتکل اینترنت اشیاء
- لایه پیوند داده (مانند IEEE 802.15.4، Zigbee)
- پروتکل‌های لایه شبکه (مانند 6LoWPAN، RPL)
- پروتکل‌های لایه کاربرد (مانند COAP، MQTT)

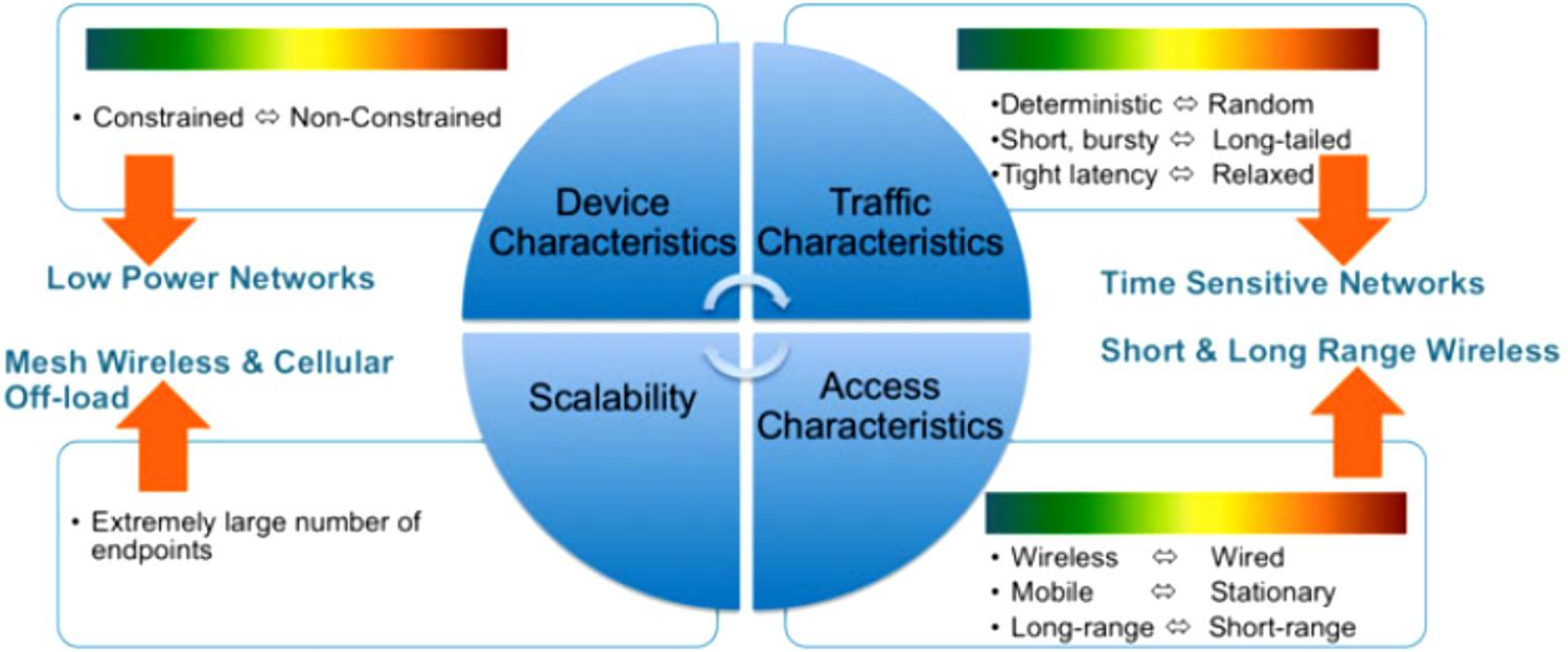
پشته پروتکل اینترنت اشیاء



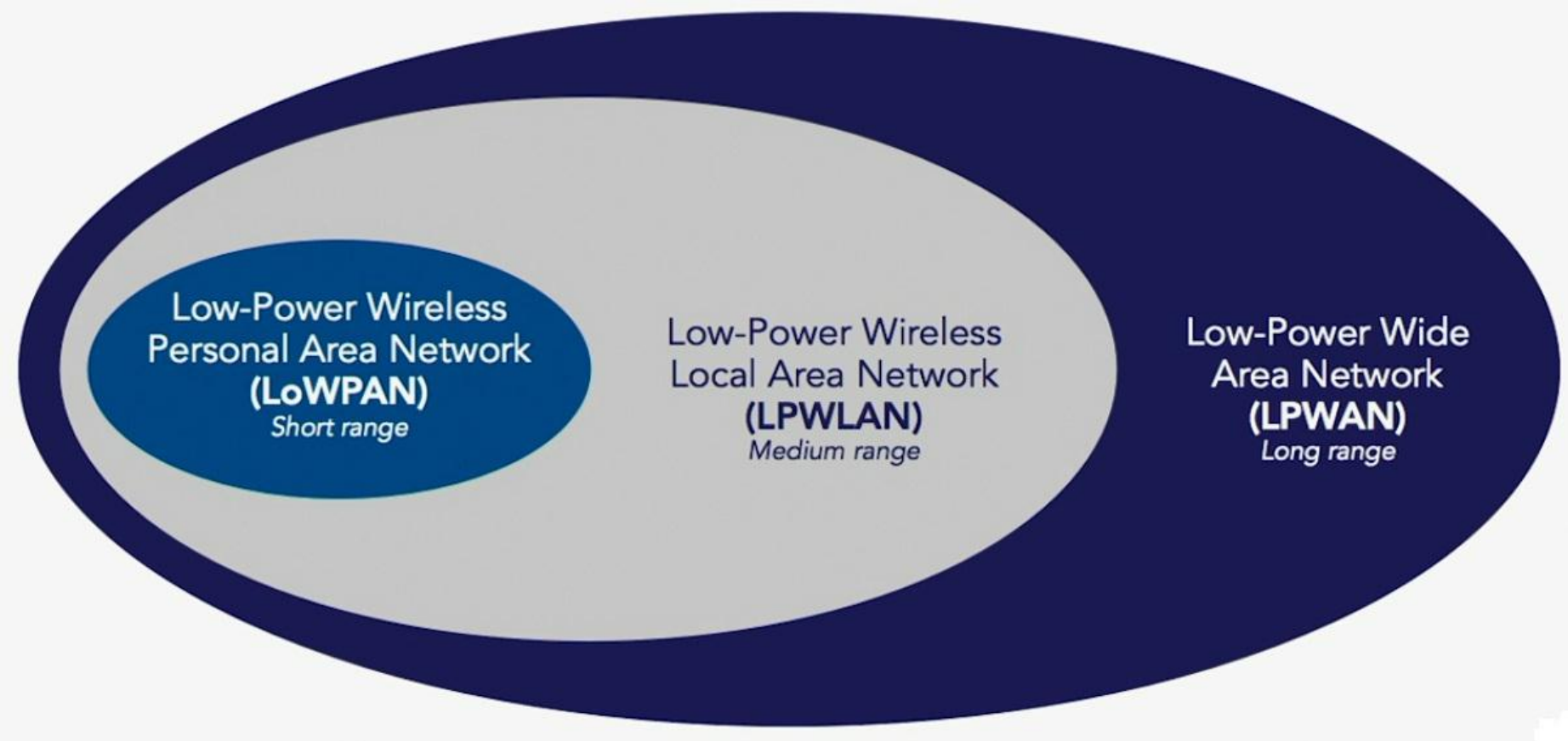
چالش‌های لایه پیوند داده

- مشخصات دستگاه
  - طیف وسیع اشیاء از گره‌های محاسباتی با تمام قابلیت‌ها تا دستگاه‌های با محدودیت بسیار
  - فناوری‌های ارتباطی برای پشتیبانی از دستگاه‌های کم توان باید بهینه باشند
- مشخصات ترافیک
  - بعضی از برنامه‌ها نیازمندی‌های ریلکسی برای تلفات بسته، تاخیر و جیتر دارند (مانند برنامه نظارت بر هواشناسی) و بعضی نیازمندی‌های سفت و سختی دارند (مانند برنامه کنترل موتور یک جت)
  - هر دو کاربرد از حسگرهای نوع یکسانی استفاده می‌کنند (حسگرهای دما، حسگرهای فشار)
- مشخصات دسترسی
  - فناوری‌های سیمی یا بی‌سیم، برد کوتاه یا برد بلند، حالت دستگاه ثابت یا متحرک
- مقیاس‌پذیری
  - تعداد بسیار زیادی نقاط انتهایی
  - چالش‌های مربوط به تأخیر، همگرایی آهسته

چالش‌های لایه پیوند داده



انواع شبکه بی‌سیم کم‌توان



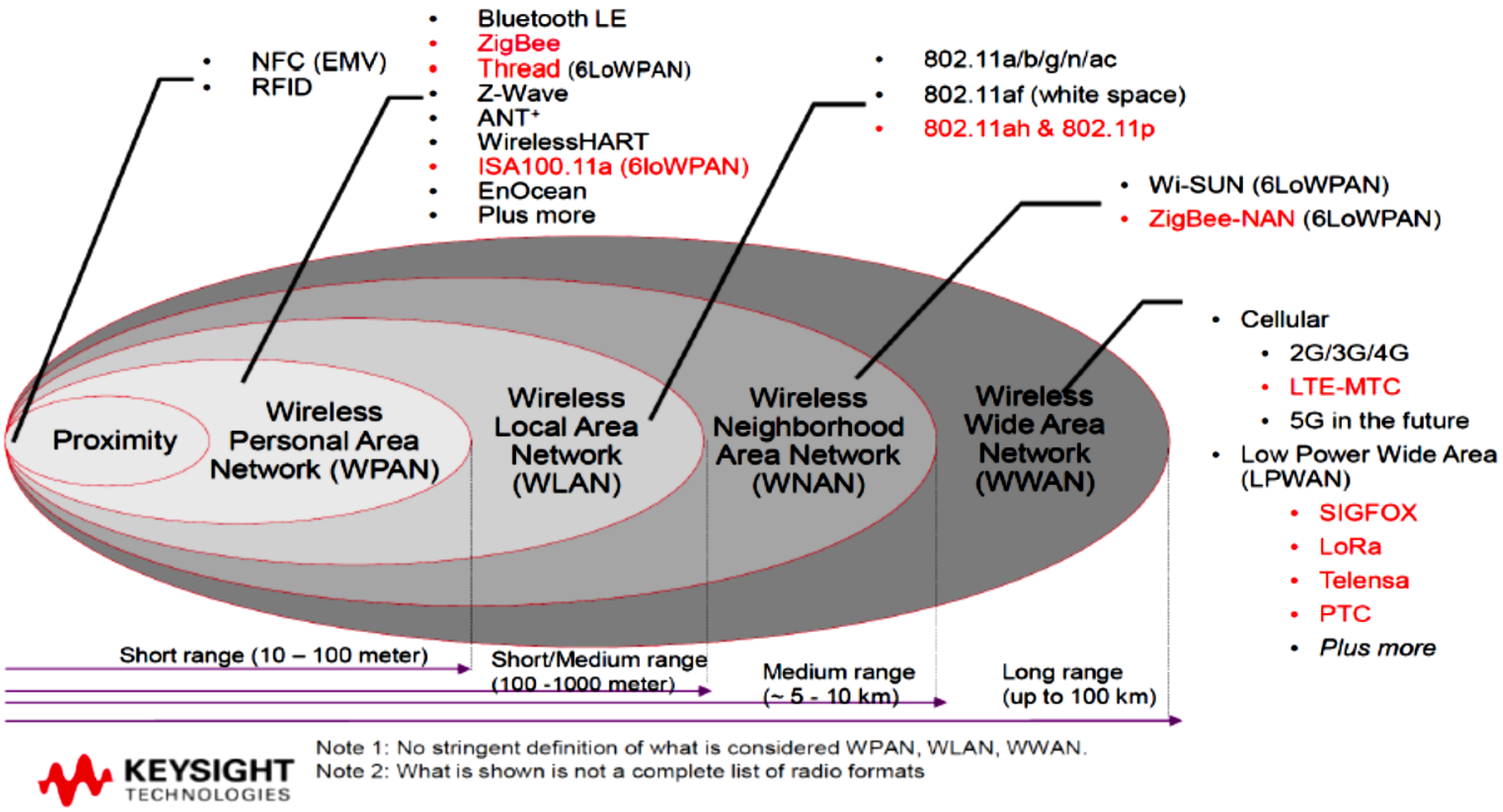
شبکه‌های بی‌سیم کم‌توان با برد کوتاه

- IEEE 802.15.4
- Zigbee
- Z-Wave
- Wireless HART
- ISA 100
- NRF
- Bluetooth Low Energy (BLE) یا Smart Bluetooth
- NFC
- RFID

شبکه‌های بی‌سیم کم‌توان با برد بالا

- GSM
- LTE-A
- LoRa
- SigFox
- NB-IoT

فناوری‌های بی‌سیم مطرح در اینترنت اشیاء



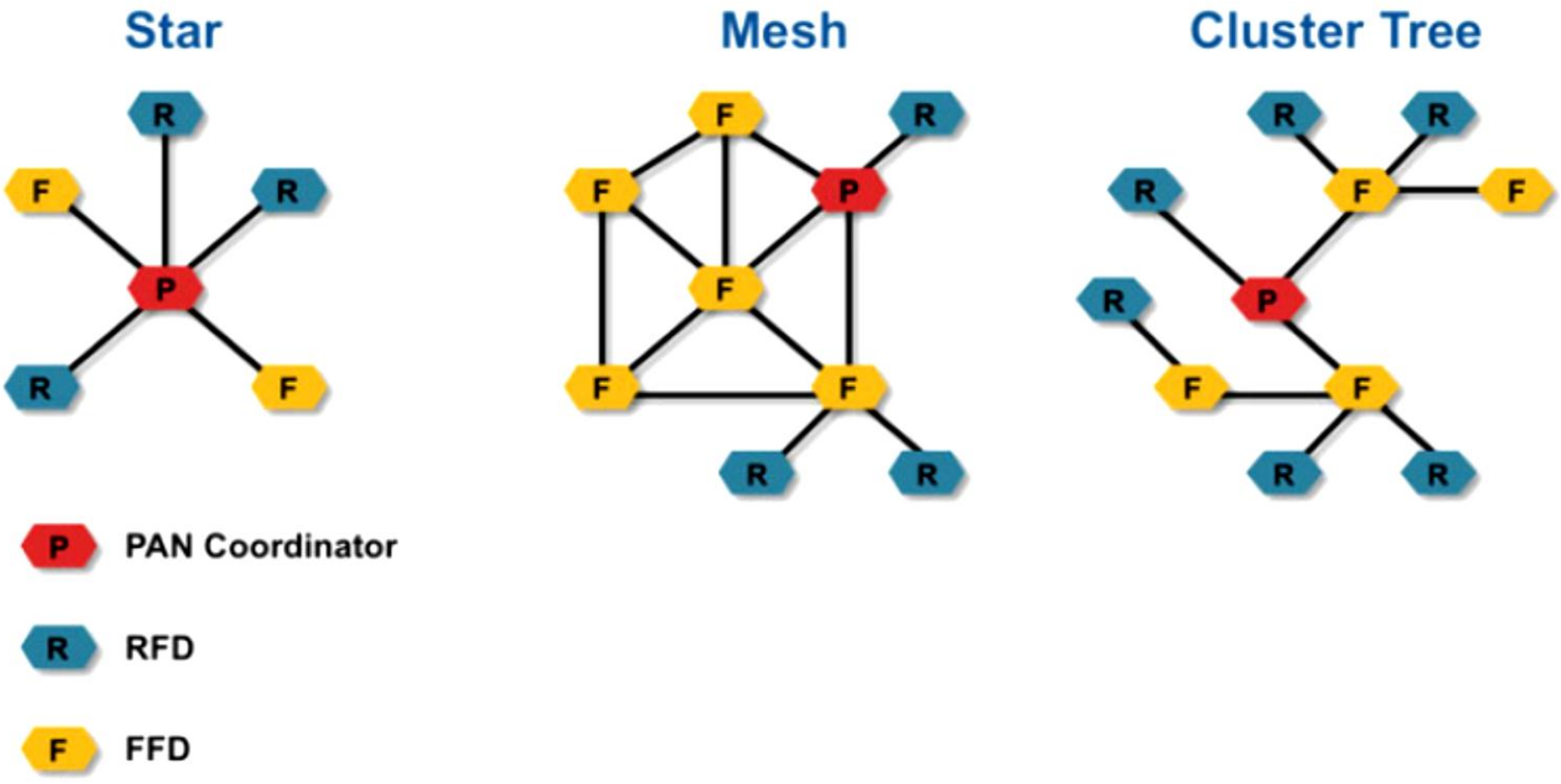
KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Note 1: No stringent definition of what is considered WPAN, WLAN, WWAN.
Note 2: What is shown is not a complete list of radio formats

IEEE 802.15.4

- هدف این گروه:
  - بررسی یک راه‌حل بهینه برای اتصال بی‌سیم با نرخ داده پایین با تمرکز روی پیچیدگی بسیار پایین و گسترش طول عمر باتری از چندین ماه تا چندین سال
  - تمرکز روی شبکه‌های شخصی بی‌سیم کم‌توان
- چند نمونه کاربرد: خودکارسازی خانه‌ها، کنترل‌های از راه دور
- پشتیبانی از نرخ‌های داده 1 Mbps, 850, 250, 100, 40, 20 kbps
- انتقال قابل اطمینان
- اندازه فریم در نسخه اصلی 127 بایت است
- در نسخه IEEE 802.15.4g، حداکثر اندازه فریم به 2047 بایت افزایش یافته است
- پروتکل‌های Zigbee، Wireless HART، ISA 100 و RPL بر اساس این استاندارد کار می‌کنند

انواع توپولوژی در IEEE 802.15.4



IEEE 802.11ah

- فناوری بی‌سیم IEEE 802.11 (WiFi) به دو دلیل زیر نمی‌تواند نیازمندی‌های IoT را برآورده کند:
  - مصرف انرژی بالا
  - باندهای فرکانسی نامناسب (2.4-5 GHz)
- IEEE 802.11ah
  - پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه با منابع محدود (بیش از 8,191)
  - استفاده از باندهای sub-1 GHz (برد بالاتر به دلیل نفوذ بهتر از موانعی مانند دیوار)
  - برد انتقال بیش از 1 km - مناسب برای فضاهای بیرونی (outdoors)
  - نرخ ارسال از 150 kbps تا 340 Mbps

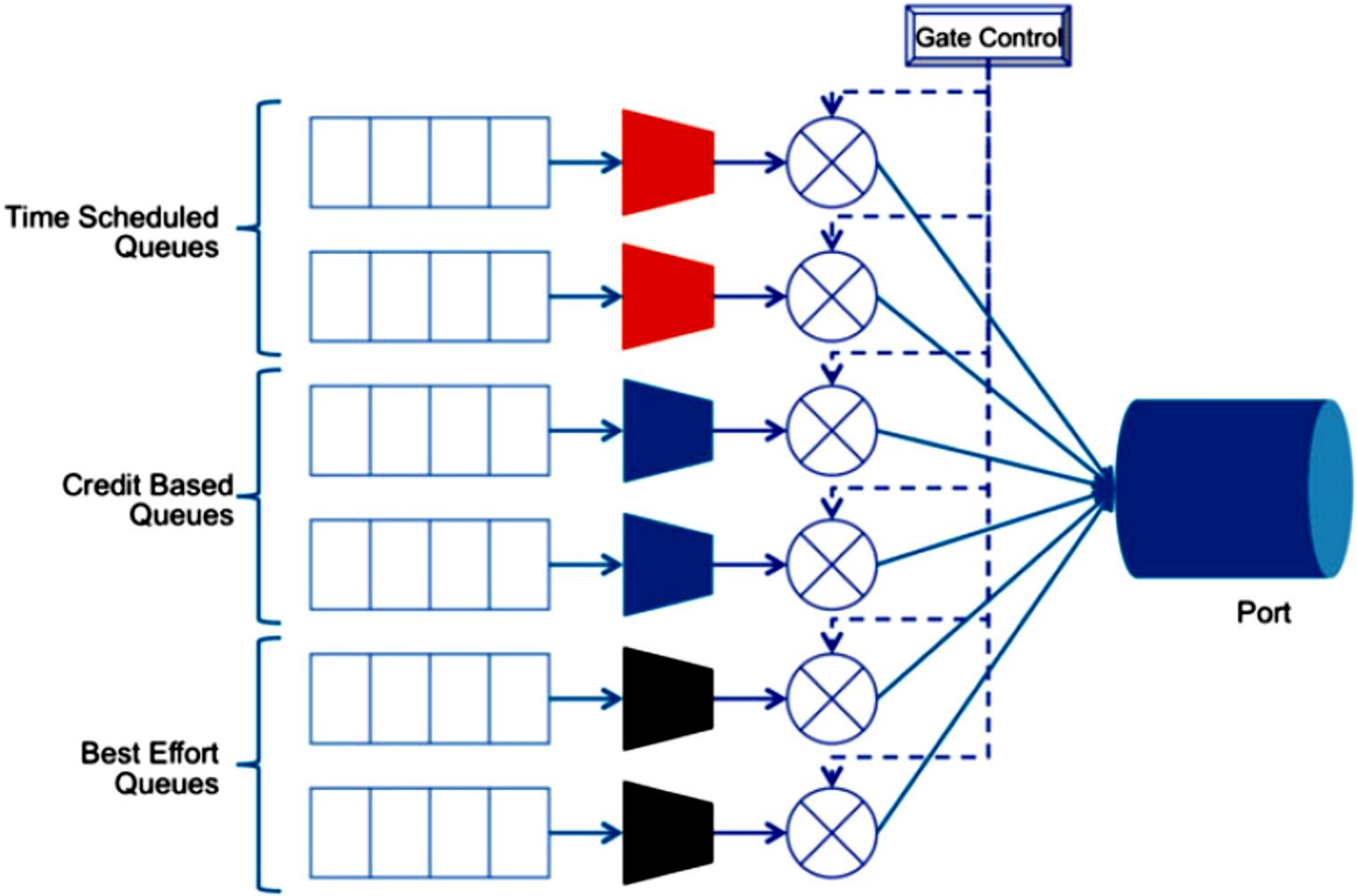
Zigbee

- این پروتکل مخصوص شبکه‌های بی‌سیم شخصی (WPAN) است
- بر پایه استاندارد IEEE 802.15.4 ساخته شده است.
- در باند فرکانس ۸۶۸ مگاهرتز ،۹۱۵ مگاهرتز و ۲.۴ گیگا هرتز عمل می کند.
- ماکزیمم نرخ انتقال داده ۲۵۰ کیلو بیت در ثانیه است.
- برد محیطی این پروتکل بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر است
- می تواند بیش از ۶۴۰۰۰ وسیله را از طریق شبکه به هم متصل کند.
- مصرف انرژی کم و طول عمر زیاد باتری

شبکه‌های حساس به زمان

- این نوع شبکه‌ها دلالت بر کاربردهایی دارند که نیازمند پاسخ بلادرنگ هستند (مانند اتوماسیون صنعتی و شبکه‌های خودرو)
- در اتوماسیون صنعتی:
  - گستره شبکه‌ها نسبتا بزرگ است (از یک تا چند کیلومتر)
  - ممکن است که شامل بیش از ۶۴ گام برای یک کارخانه یا بیش از ۵ گام داخل یک سلول کاری (مانند ربات)
- در این شبکه‌ها علاوه بر ترافیک‌های بلادرنگ، ترافیک‌های دم بلند (long-tail) نیز وجود دارد (مانند ویدئو یا انتقال فایل‌های بزرگ)
  - یکی از نیازمندی‌های کلیدی برای چنین شبکه‌هایی این است که برای تأخیر به صورت قطعی و قابل پیش‌بینی باشد
  - در اتوماسیون صنعتی، تأخیر داخل یک سلول کاری نباید بیشتر از 5 us باشد و برای محدوده کارخانه نباید از 125 us تجاوز کند

IEEE 802.11Qbv



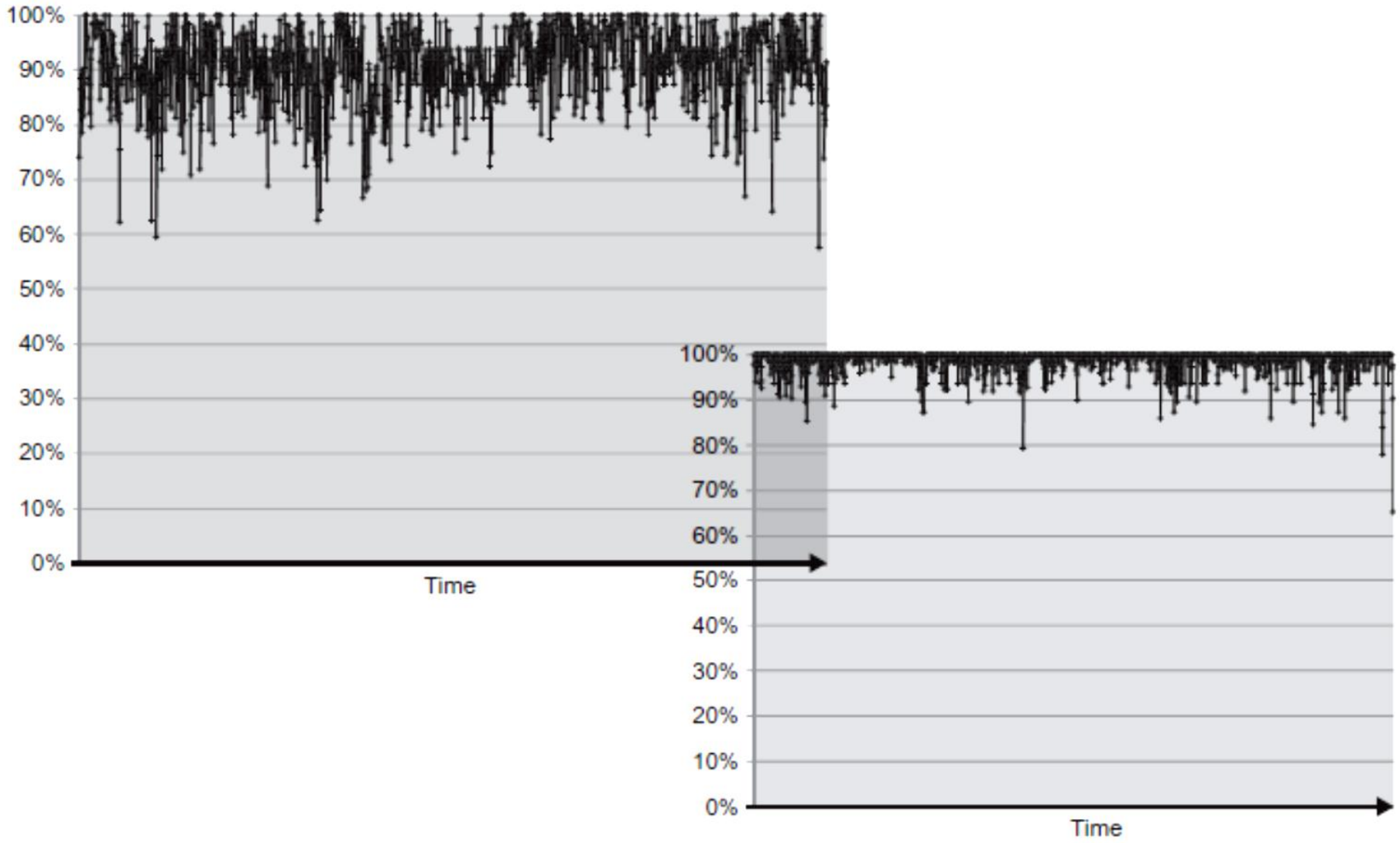
لایه شبکه (لایه اینترنت)

- بیشتر سیستم‌های IoT بر پایه شبکه‌های کم‌توان و پراتلاف ساخته می‌شوند
  - Low-power and Lossy Networks (LLNs)
- شبکه‌هایی شامل تعداد زیادی (معمولا چندین هزار) دستگاه تعبیه‌شده با محدودیت در منابعی مانند توان، حافظه و پردازش
- در این نوع شبکه‌ها، دستگاه‌ها از طریق فناوری‌هایی همچون IEEE 802.15.4، بلوتوث، Wi-Fi و PLC با هم در ارتباط خواهند بود
- چند نمونه از کاربردهایی که بر پایه این نوع شبکه‌ها کار می‌کنند:
  - نظارت صنعتی
  - اتوماسیون خانه و ساختمان
  - سلامت و مراقبت‌های بهداشتی
  - نظارت بر محیط
  - شبکه هوشمند انرژی

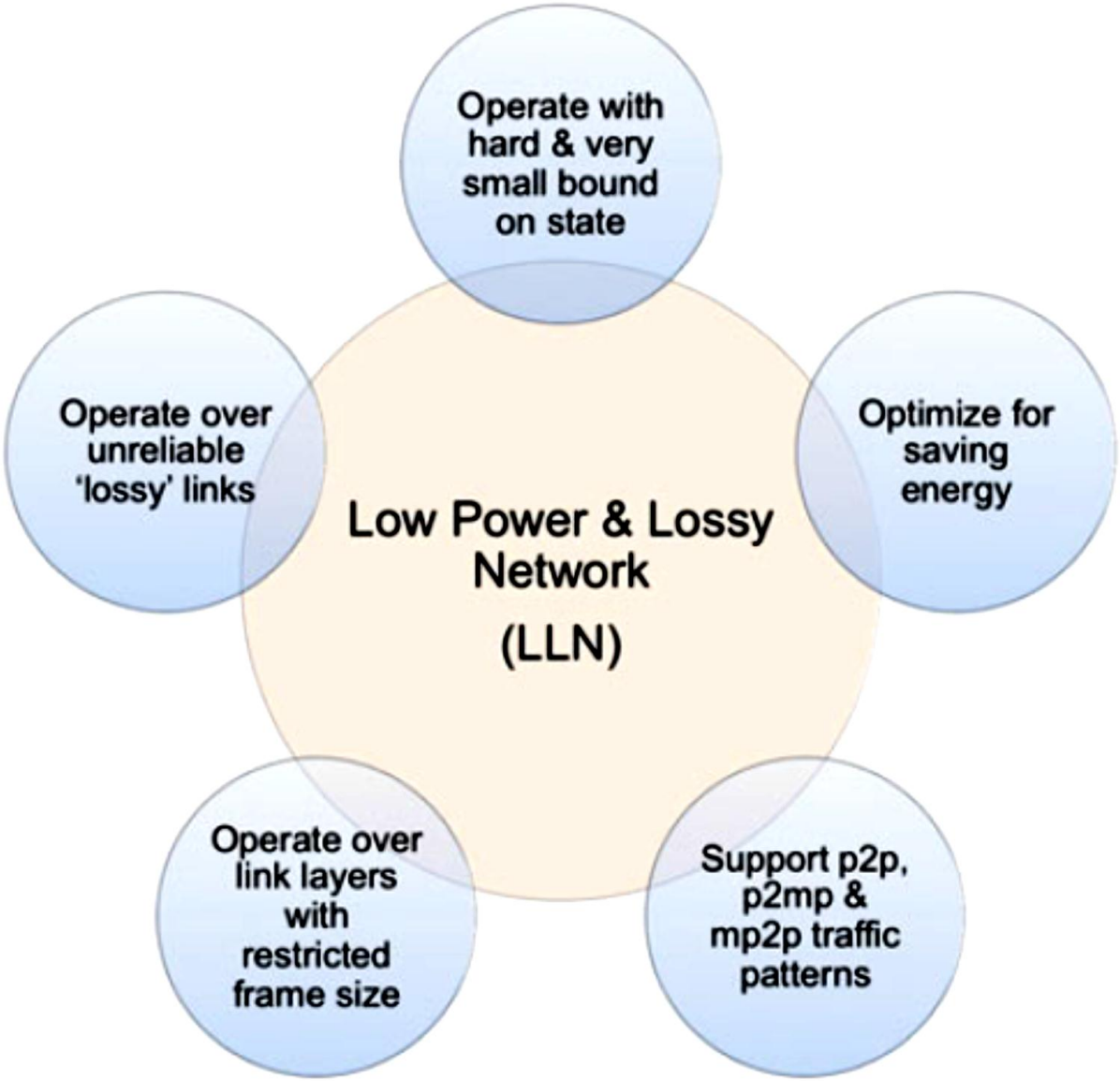
چالش‌های لایه شبکه

- گره‌ها در LLNs دارای **حافظه بسیار کمی** برای نگهداری حالت توپولوژی یا مسیریابی هستند
- **بهینه‌سازی مصرف انرژی** در LLNs
- **الگوهای ترافیکی** در LLNs
  - point-to-point
  - multipoint-to-point
  - point-to-multipoint
- فناوری‌های لایه پیوند داده در LLNs معمولا دارای **محدودیت اندازه فریم** هستند
- **قابلیت اطمینان لینک‌ها** در LLNs در طول زمان متغیر است
  - Bit Error Rate (BER)
  - دور انداختن بسته به دلایل مختلف (تداخل)

نرخ تحویل بسته برای دو لینک IEEE 802.15.4



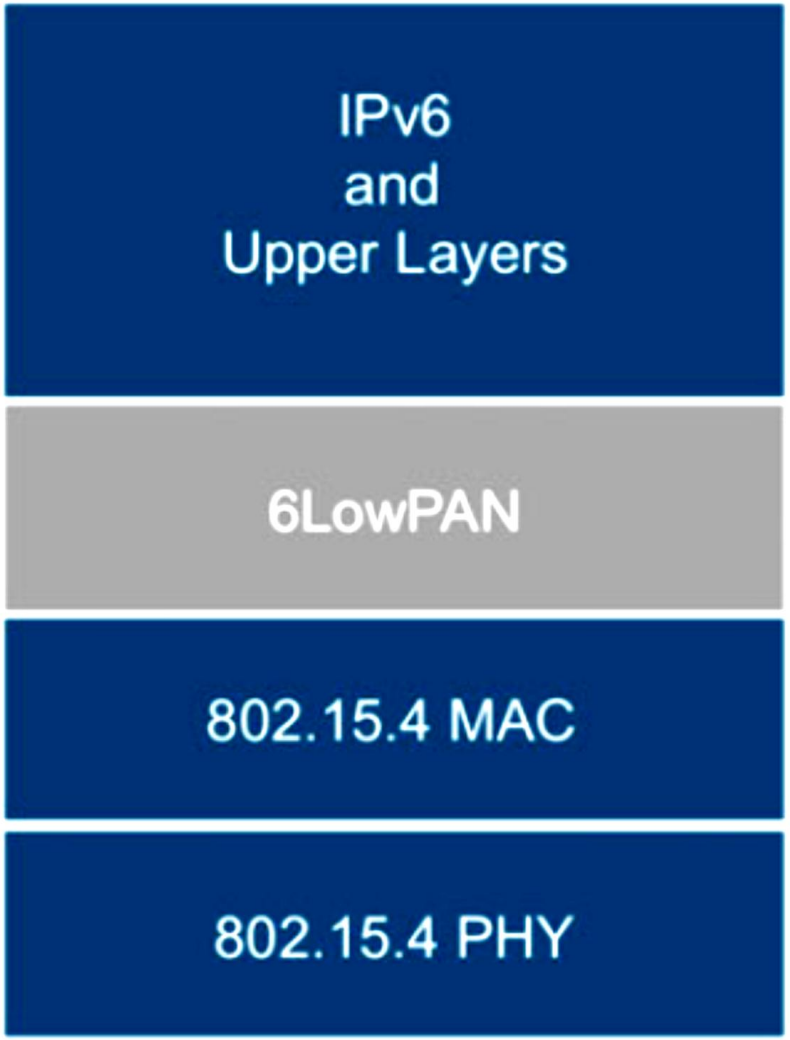
چالش‌های اینترنت اشیاء برای لایه شبکه



پروتکل 6LoWPAN

- مخفف IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks
- RFC 6282
- 6LoWPAN یک لایه انطباق برای اجرای IPv6 روی شبکه‌های IEEE 802.15.4 است
- بیشترین نرخ انتقال (Maximum Transmission Unit - MTU) برای Ethernet حدود ۱۵۰۰ بایت است در حالی که برای IEEE 802.15.4 برابر است با ۱۲۷ بایت
- از این ۱۲۷ بایت، ۲۵ بایت برای سرآیند فریم و ۲۱ بایت برای امنیت لایه پیوند داده لازم است

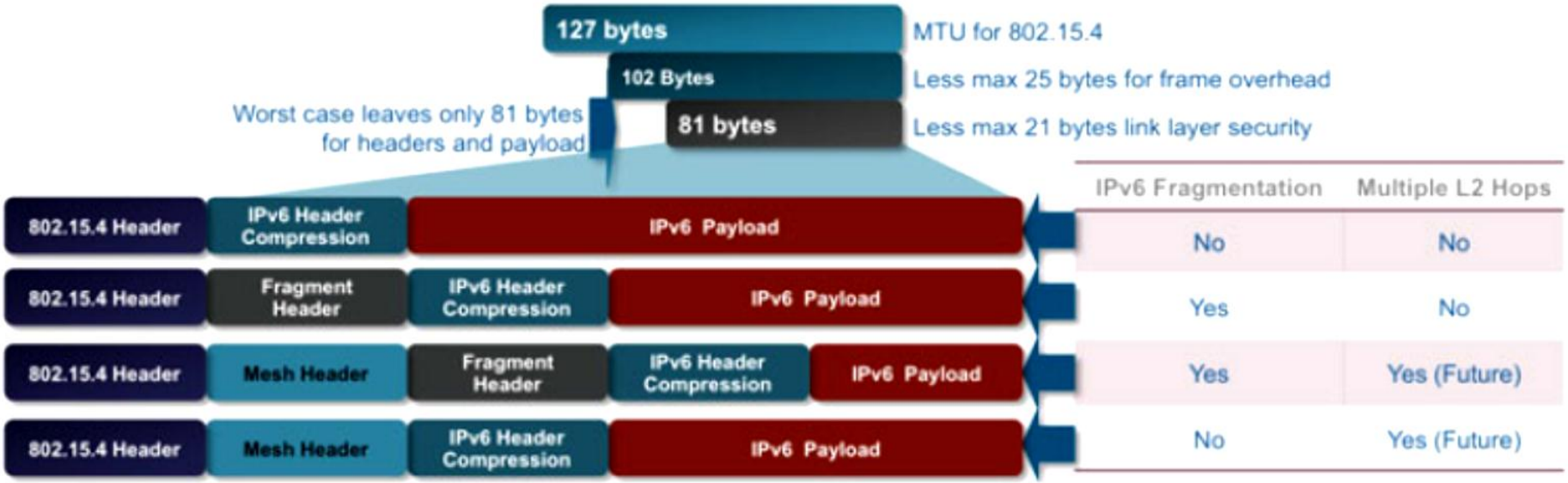
پروتکل 6LoWPAN



پروتکل 6LoWPAN

- دو مشکل اصلی در ارتباط با استفاده از IPv6 در اینترنت اشیاء:
  - طول سرآیند بسته IPv6 برابر ۴۰ بایت است
  - IPv6 تکه‌سازی و بازسازی دیتاگرام‌ها را انجام نمی‌دهد
- سه وظیفه اصلی پروتکل 6LoWPAN:
  - فشرده‌سازی سرآیند IPv6 (IPv6 header compression)
  - تکه‌سازی و بازسازی دیتاگرام‌های IPv6 (IPv6 packet fragmentation and reassembly)
  - ارسال لایه ۲ (Layer 2 Forwarding) - تحت عنوان mesh under هم شناخته شده است

پروتکل 6LoWPAN



IPv6 Fragmentation	Multiple L2 Hops
No	No
Yes	No
Yes	Yes (Future)
No	Yes (Future)

نیازمندی‌های مسیریابی برای لایه شبکه

- پشتیبانی از unicast/anycast/multicast
- مسیریابی تطبیقی
  - در نظر گرفتن شرایط شبکه
- مسیریابی مبتنی بر محدودیت
  - در نظر گرفتن محدودیت‌های گره و لینک (مانند انرژی، توان محاسباتی، حافظه، کیفیت لینک)
- مشخصات ترافیک
  - P2P ،P2MP ،MP2P
  - پشتیبانی از مسیرهای موازی
- مقیاس‌پذیری
  - پشتیبانی از شبکه‌های با بیش از چندین هزار گره

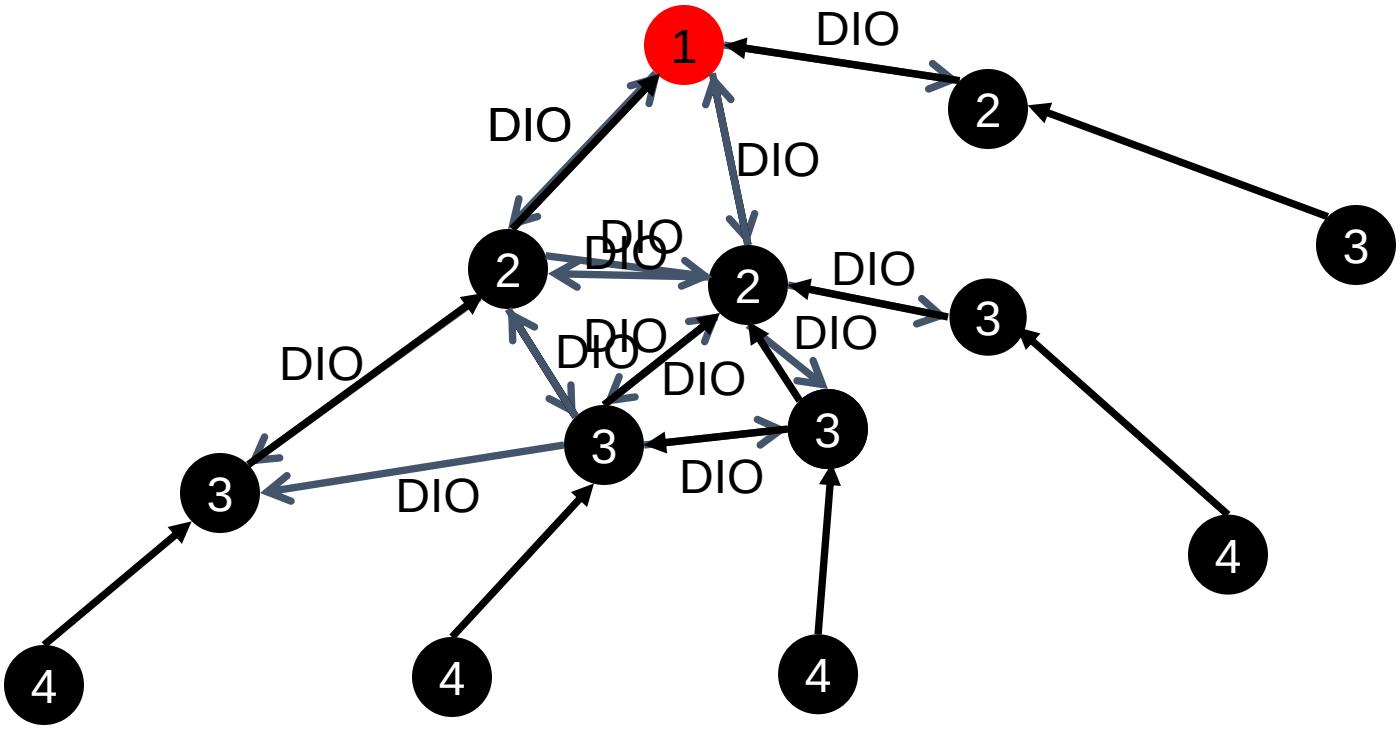
نیازمندی‌های مسیریابی برای لایه شبکه (ادامه)

- مدیریت و پیکربندی خودکار
  - اضافه کردن گره جدید به شبکه
  - جداسازی گره‌های با رفتار غیرطبیعی
- صفت گره
  - پشتیبانی از به خواب رفتن گره‌ها (sleeping mode)
- کارایی
  - همگرایی سریع در صورت وجود شکست در مسیر
  - پشتیبانی از تحرک گره‌ها و همگرایی سریع
- امنیت
  - احراز هویت، رمزنگاری

پروتکل مسیریابی RPL

- مخفف IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
- RFC 6550
- RPL یک پروتکل مسیریابی از نوع **بردار مسافت** است
  - پشتیبانی از محدودیت حافظه در LLNs
- RPL بر اساس یک تابع هدف و مجموعه‌ای از معیارها و محدودیت‌ها یک گراف بدون دور جهت‌دار مبتنی بر مقصد را محاسبه می‌کند
  - Objective Function (OF)
  - Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG)
- DODAG یک توپولوژی منطقی است که روی شبکه فیزیکی ساخته می‌شود تا نیازمندی‌های مورد نظر را تأمین کند
  - DODAG بر اساس OF ساخته می‌شود

Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG)



CISCO

تفاوت معیار و محدودیت

- **معیار (metric):** مقادیر اسکالری که به عنوان پارامترهای ورودی به تابع هدف داده می‌شود تا بهترین مسیر انتخاب گردد
  - تأخیر لینک
  - سطح انرژی گره
- **محدودیت (constraint):** حذف گره‌ها یا لینک‌هایی که شرایط تعیین شده را نداشته باشند
  - لینکی که از رمزنگاری لایه پیوند داده برخوردار نیست
  - گره‌ای که با باتری کار می‌کند

معیارهای مسیریابی در LLNs

- تجمیع شده در مقال ضبط شده
  - مثال: فرض کنید که تمام لینک‌های شبکه دارای برچسب هزینه باشند (هزینه می‌تواند هر معیاری باشد). حال اگر بخواهیم هزینه یک مسیر از مبدأ به مقصد را حساب کنیم:
  - تجمیع شده = مجموع هزینه تمام لینک‌هایی که در مسیر وجود دارند
  - ضبط شده = ضبط هزینه تک تک لینک‌هایی که در مسیر وجود دارند
- محلی در مقابل سراسری
  - یک معیار محلی است اگر اطلاعات آن در راستای DODAG منتشر نشود
- صفت یا حالت گره
  - توان پردازشی گره، مقدار حافظه در دسترس آن
- سطح انرژی گره
  - حالت توان گره (main-powered, battery-powered, energy harvesting)
  - تخمین طول عمر باقی‌مانده (در حالتی که گره دارای باتری است)

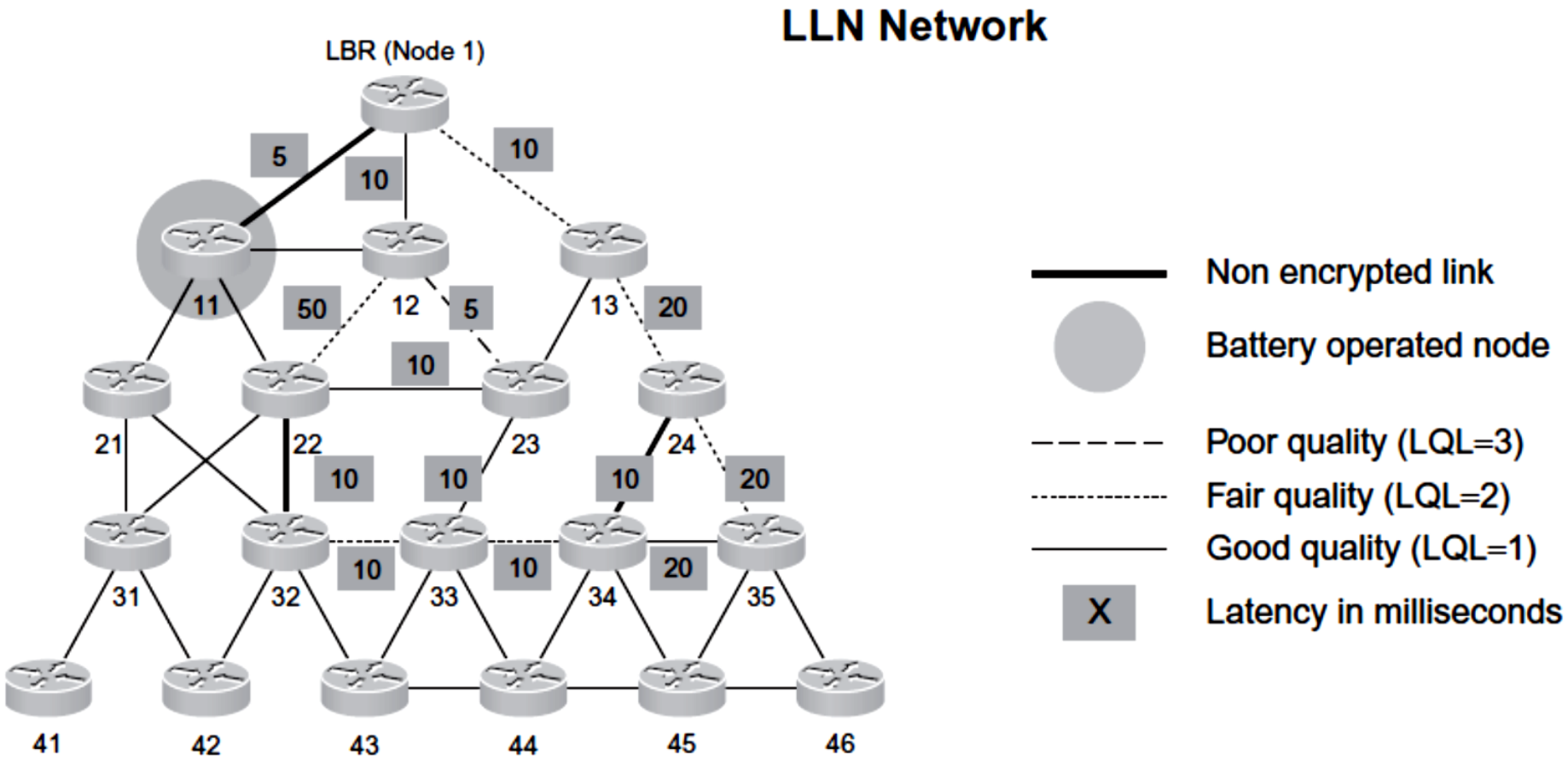
معیارهای مسیریابی در LLNs

- تعداد گام
  - تعداد گام‌های لازم تا رسیدن به مقصد
- گذردهی
  - نرخ تحویل داده روی یک لینک
- تأخیر
  - زمان مورد نیاز برای ارسال یک بسته روی یک لینک
- قابلیت اطمینان لینک
  - مثال: تعداد ارسال‌های مورد انتظار برای انتقال موفقیت‌آمیز یک بسته (ETX)
  - $ETX=1/(D_r*D_f)$
  - D_r: احتمال اینکه بسته توسط همسایه دریافت شود D_f: احتمال اینکه تصدیق بسته به طور موفقیت‌آمیز دریافت شود
- صفت رنگ‌های لینک
  - مثال: در نظر گرفتن رنگ آبی برای نشان دادن اینکه لینک دارای رمزنگاری لایه پیوند داده است

تابع هدف

- تابع هدف در پروتکل مسیریابی RIP: انتخاب مسیر با کمترین تعداد گام
- تابع هدف در پروتکل مسیریابی OSPF: انتخاب مسیر با کمترین هزینه (انتساب هزینه استاتیک به هر لینک)
- تابع هدف در پروتکل مسیریابی MPLS: انتخاب مسیری که پهنای باند مورد نظر را برای رزرو داشته باشد
- در LLNs، ممکن است که هم لینک‌ها و گره‌های با مشخصات مختلف وجود داشته باشد و هم اینکه کاربردهای مختلفی با نیازمندی‌های متفاوت روی آن اجرا شوند
  - لینک‌های با پهنای باند بالا و پایین
  - گره‌های main-powered و battery-powered
  - کاربردهای حساس به زمان و کاربردهای عادی

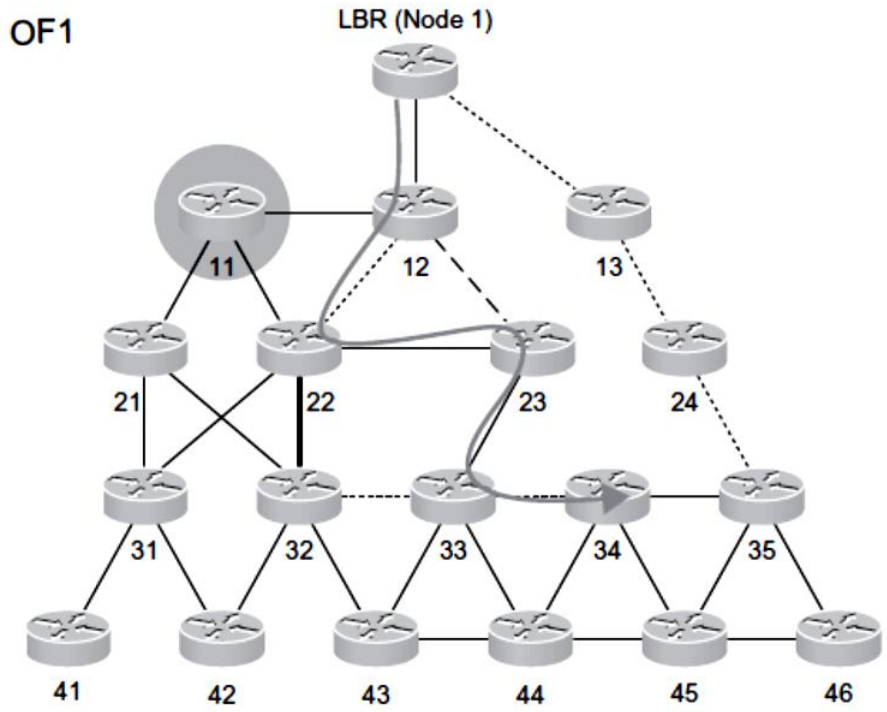
تابع هدف

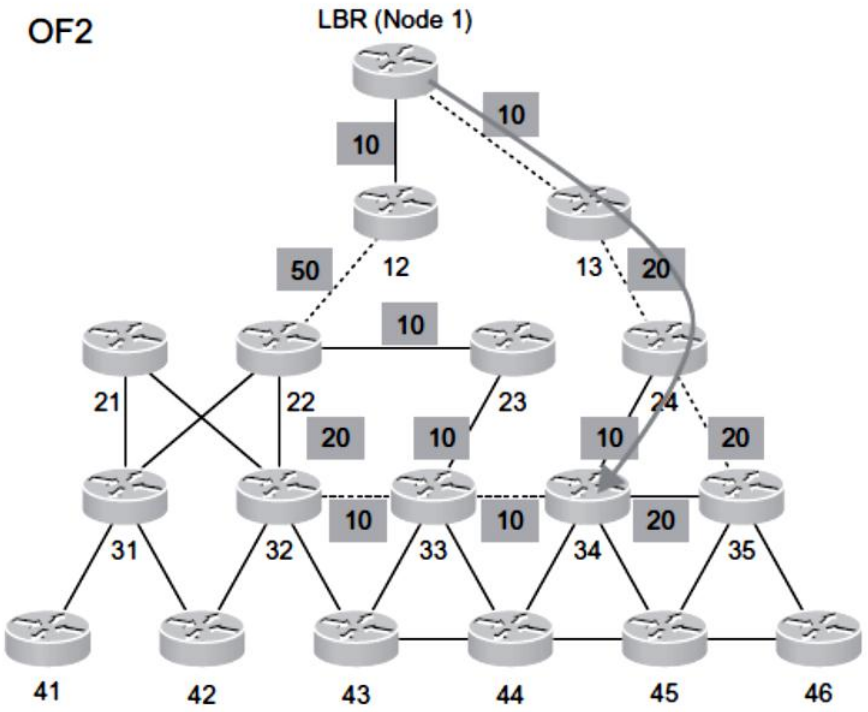

LLN Network
LBR (Node 1)
5
10
10
11
50
12
5
13
20
10
21
22
23
24
10
10
10
20
10
10
20
31
32
33
34
35
41
42
43
44
45
46
Non encrypted link
Battery operated node
Poor quality (LQL=3)
Fair quality (LQL=2)
Good quality (LQL=1)
X
Latency in milliseconds

تابع هدف

OF1: کیفیت لینک (معیار) و لینک رمزنگاری نشده (محدودیت)

OF2: تأخیر (معیار) و لینک‌های با کیفیت ضعیف و گره‌های دارای باتری (محدودیت)





تابع هدف

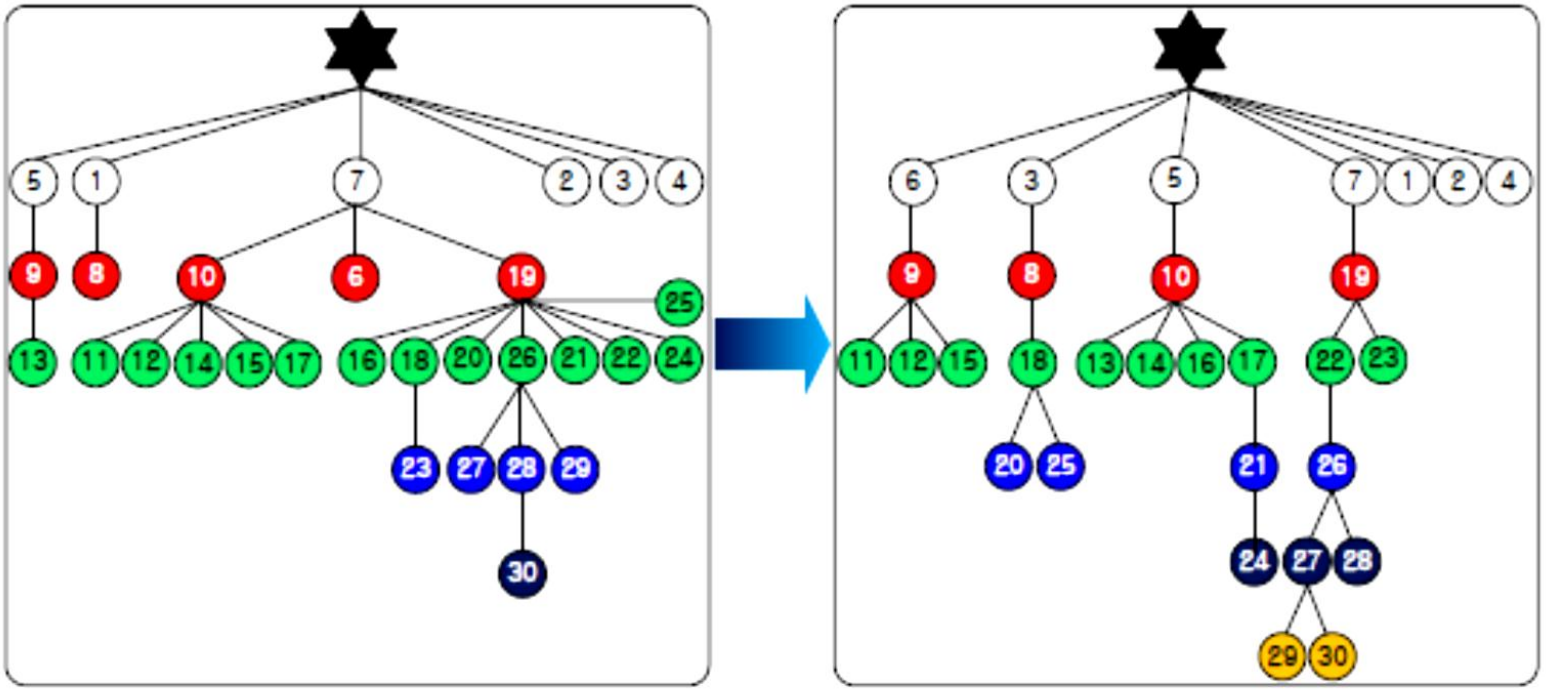


Fig. 12. Routing topology change from the default RPL to *QU-RPL*.

Source: Kim, H.S., Kim, H., Paek, J. and Bahk, S., 2017. Load balancing under heavy traffic in RPL routing protocol for low power and lossy networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *16*(4), pp.964-979.

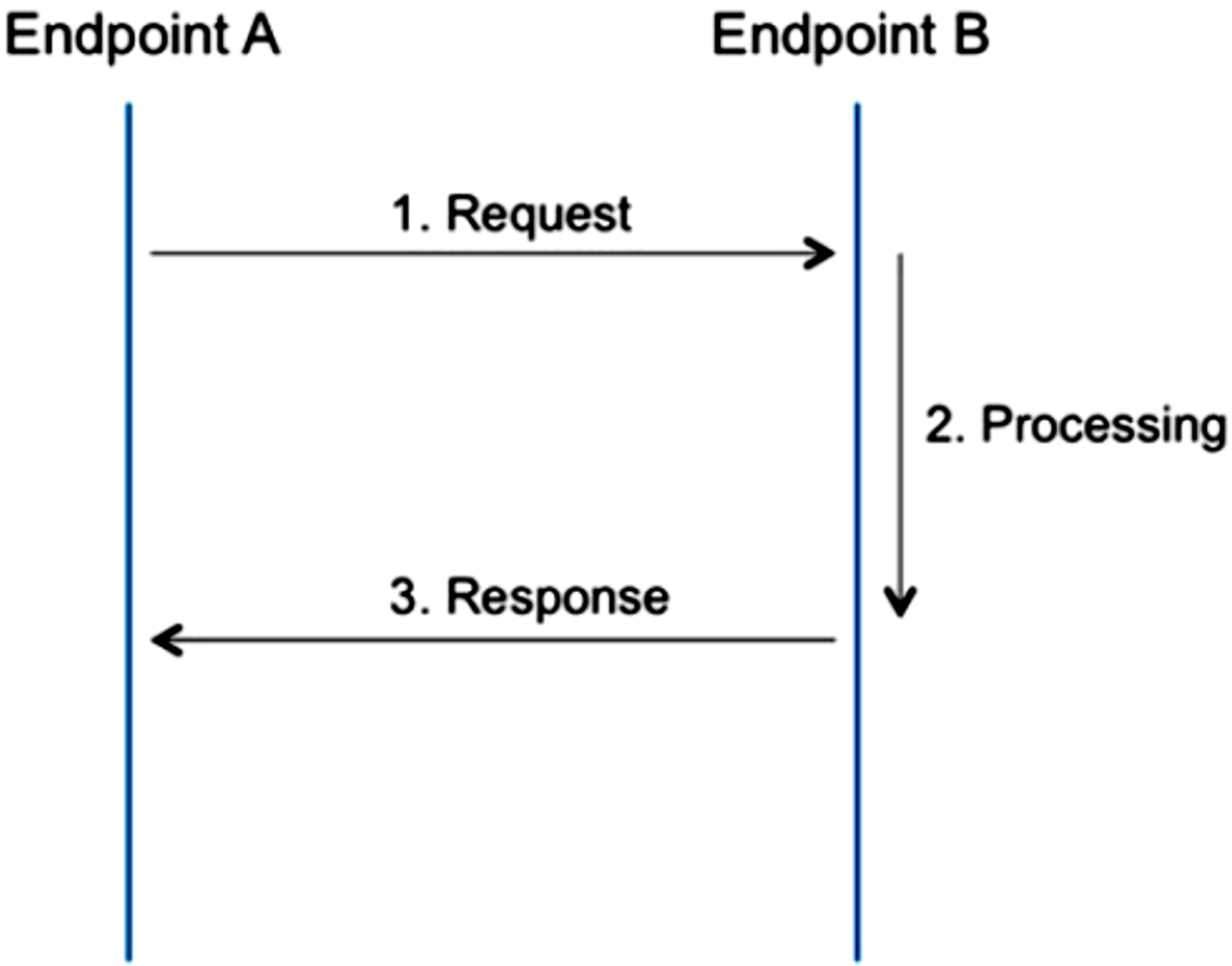
چند نکته

- ریشه DODAG معمولا یک مسیریاب مرزی است که LLN را به شبکه اصلی (backbone) وصل می‌کند
- به ریشه DODAG رتبه ۱ انتساب داده می‌شود
- رتبه گره‌ها بر اساس تابع هدف تعیین می‌شود
- مقدار رتبه با حرکت از ریشه به سمت گره‌های برگ افزایش پیدا می‌کند
- RPL یک پروتکل فعال (proactive) است.
  - مسیرهای جایگزین به عنوان بخشی از توپولوژی محاسبه می‌شوند
- RPL تعمیر محلی را به تعمیر سراسری ترجیح می‌دهد
  - پیدا کردن مسیر پشتیبان به صورت محلی

لایه کاربرد

- پروتکل‌های لایه کاربردی مسئول برقراری ارتباط بین نقاط انتهایی هستند
  - اشیاء یا دروازه‌های اتصال و برنامه‌های کاربردی
- چالش‌های اصلی این نوع پروتکل‌ها:
  - قابل پیاده‌سازی روی دستگاه‌های با منابع محدود
  - نگاشت بین فرمت‌های استفاده شده در دستگاه‌های با منابع محدود و برنامه‌های WWW

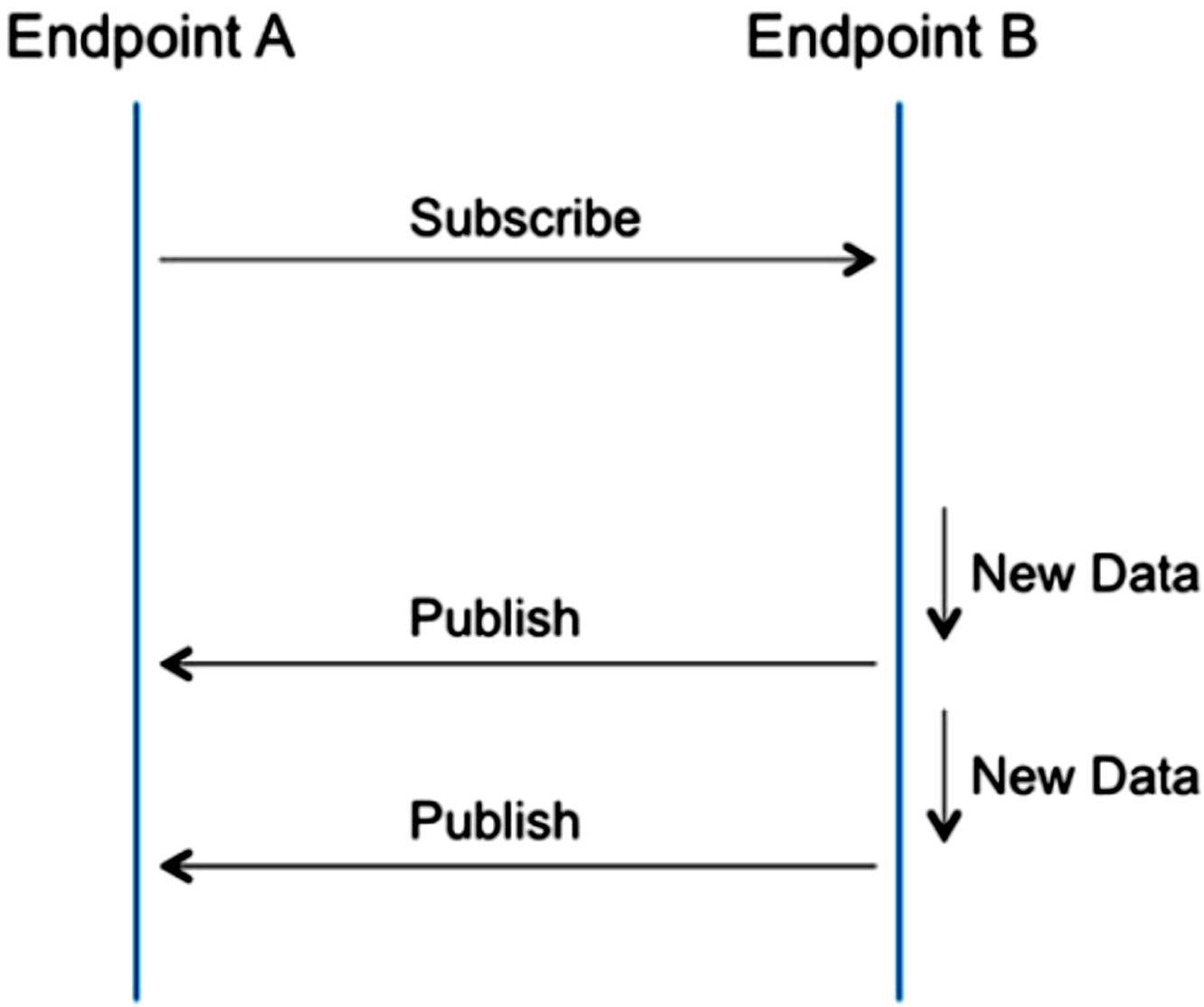
پارادایم درخواست/پاسخ



پارادایم درخواست/پاسخ

- برقراری ارتباط دو طرفه بین نقاط انتهایی
- این نوع پارادایم برای کاربردهای مناسب است که دارای یک یا چندتا از مشخصات زیر باشند:
  - معماری مشتری/سرویس‌دهنده
  - هر دو نقطه انتهایی اطلاعاتی برای ارسال به یکدیگر داشته باشند (interactive communication)
  - دریافت‌کننده اطلاعات نیاز به تصدیق داشته باشد (برای قابلیت اطمینان)

پارادایم انتشار/اشتراک



پارادایم انتشار/اشتراک

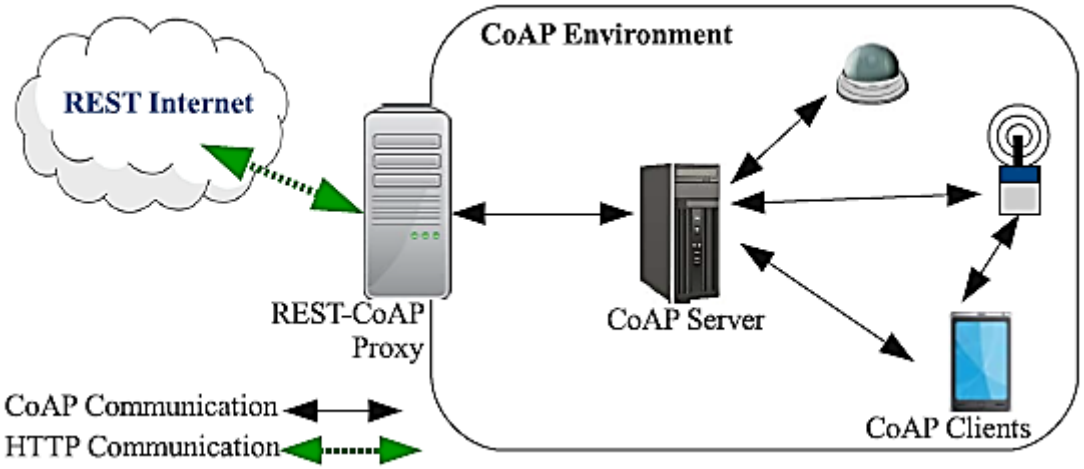
- اغلب تحت عنوان Pub/Sub شناخته می‌شود
- مناسب برقرای ارتباط یک طرفه
  - from a publisher to one or more subscribers
- مشترکان علاقه خود به موضوع یا کلاس خاصی را اعلام می‌کنند؛ وقتی نشردهنده داده جدیدی از آن کلاس در دسترس داشته باشند آن را با استفاده از پیام‌هایی برای مشترکان مورد نظر منتشر می‌کند.
- این نوع پارادایم برای کاربردهای مناسب است که دارای مشخصات زیر باشند:
  - اتصال یک طرفه بیان نقاط انتهایی
  - مقیاس‌پذیری بهتر با بکارگیری قابلیت‌های موازی‌سازی و چندپخشی بستر شبکه انتقالی

پروتکل‌های لایه کاربرد

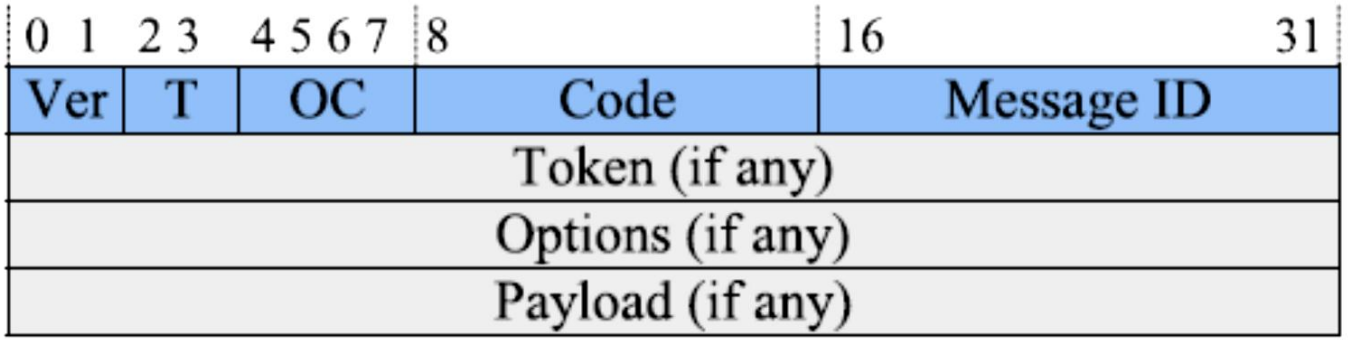
- CoAP
- MQTT
- AMQP
- XMPP
- SIP
- DDS
- IEEE 1888
- WebSocket

پروتکل CoAP

- CoAP مخفف Constraint Application Protocol
- RFC 7252
- نسخه سبک شده پروتکل HTTP
- برخلاف HTTP، پروتکل CoAP روی UDP اجرا می‌شود



فرمت پیام در پروتکل CoAP

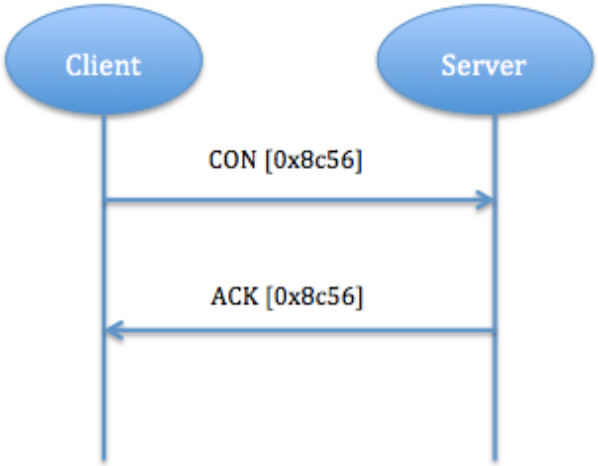


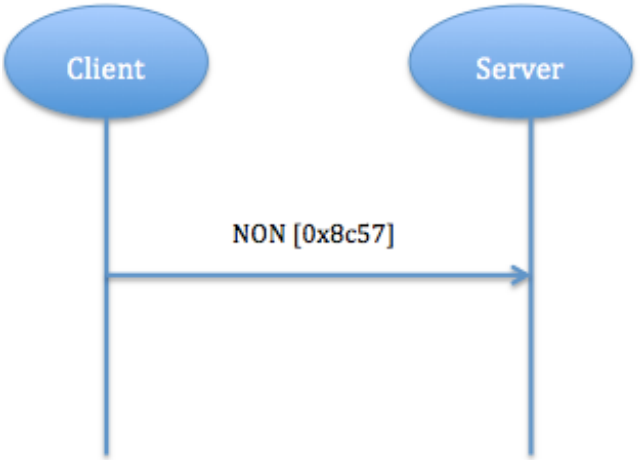
- Ver: نسخه پروتکل
- T: نوع پیام (CON، NON، RESET، ACK)
- OC: اندازه فیلد توکن
- Code: کلاس پیام (request، response و ...)
- Message ID: شناسه پیام

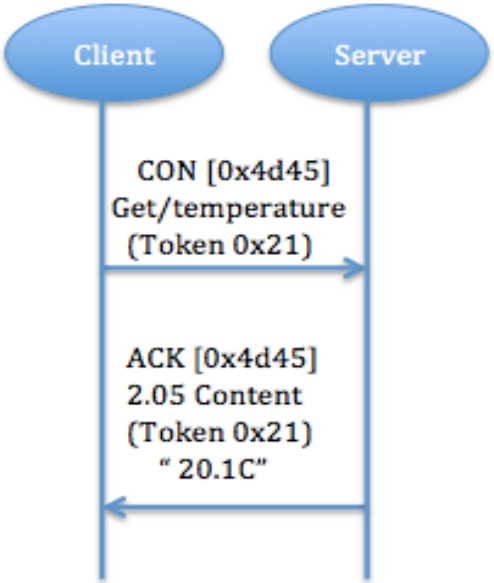
انواع پیام در CoAP

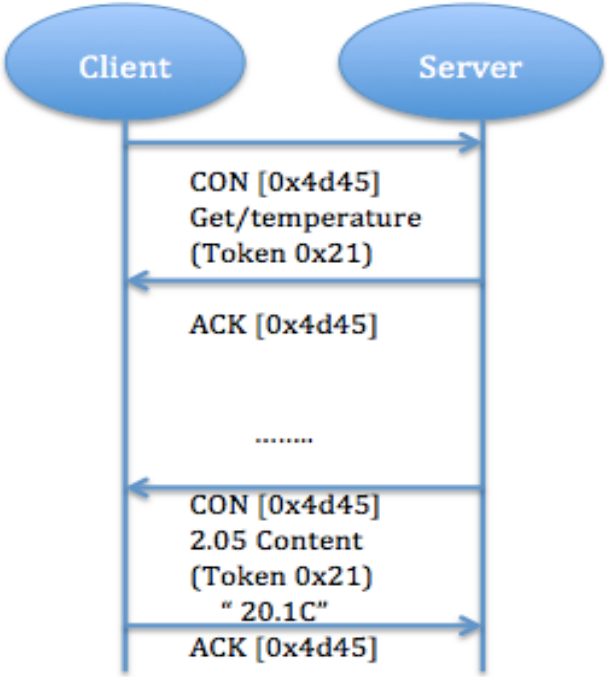
- نیاز به تصدیق (confirmable)
- عدم نیاز به تصدیق (non-confirmable)
- تصدیق (acknowledgement)
- دوباره ارسال کردن (reset)
- پاسخ جداگانه (separate response)
- پاسخ کولی (piggybacked response)

انواع پیام در CoAP









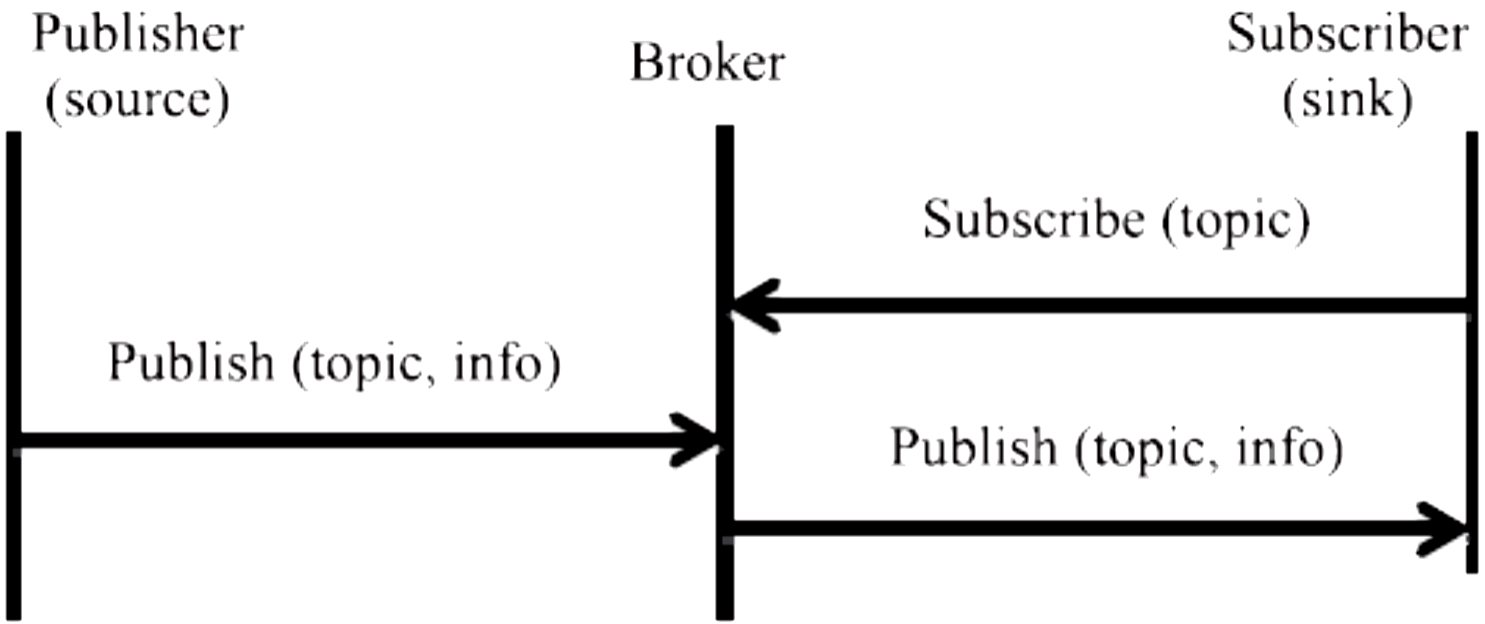
مقایسه پشته‌های CoAP و HTTP

XML	Payload	EXI
HTTP	Application (L7)	CoAP
TCP	Transport (L4)	UDP
IP	Network (L3)	6LoWPAN
Ethernet MAC	Data link (L2)	IEEE 802.15.4 MAC
Ethernet PHY	Physical (L1)	IEEE 802.15.4 PHY

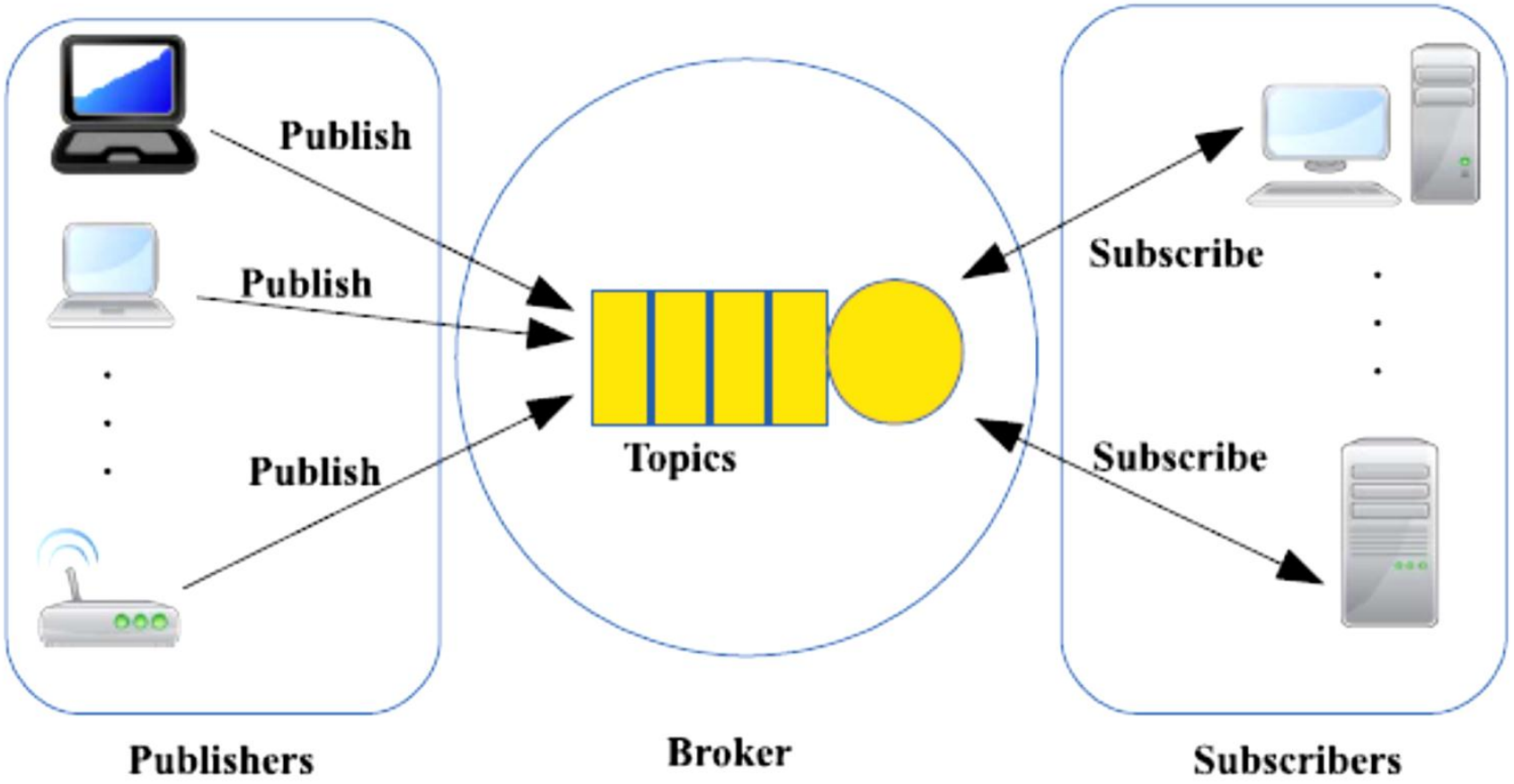
پروتکل MQTT

- مخفف Message Queue Telemetry Transport
- بر اساس پارادایم انتشار/اشترک
- بر اساس معماری مشتری/سرویس‌دهنده
- این پروتکل روی TCP اجرا می‌شود
- مناسب دستگاه‌های با منابع محدود که از لینک‌های غیرقابل اطمینان یا با پهنای باند کم استفاده می‌کنند
- مشتری اشتراک یک یا چند موضوع (topic) را می‌گیرد و به‌روزرسانی‌های مربوط به آن موضوع را دریافت می‌کند

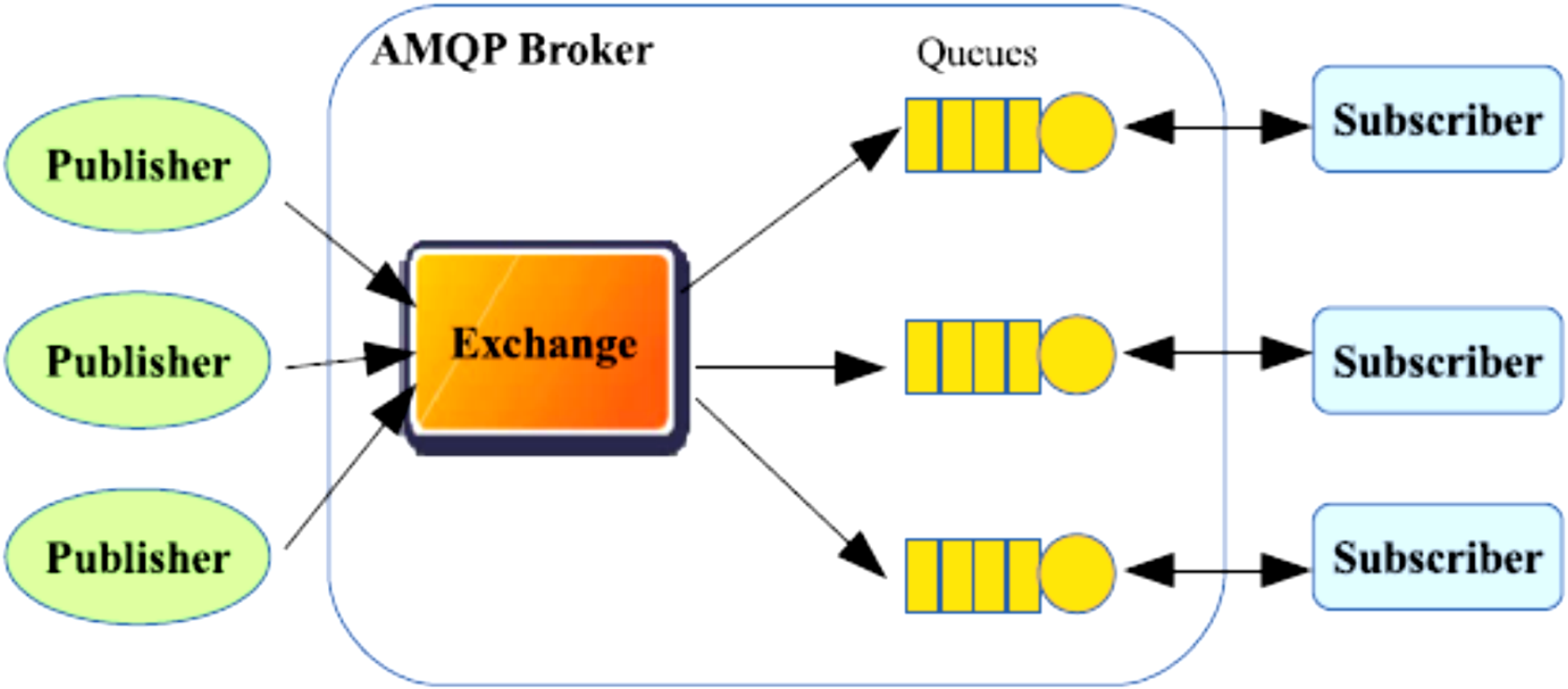
فرآیند انتشار/اشتراک در پروتکل MQTT



معماری MQTT


Publish
Publish
Publish
Topics
Subscribe
Subscribe
Publishers
Broker
Subscribers

معماری AMQP


AMQP Broker
Queues
Publisher
Publisher
Publisher
Exchange
Subscriber
Subscriber
Subscriber

معماری AMQP

Application Protocol	RESTful	Transport	Publish/ Subscribe	Request/ Response	Security	QoS	Header Size (Byte)
COAP	✓	UDP	✓	✓	DTLS	✓	4
MQTT	×	TCP	✓	×	SSL	✓	2
MQTT-SN	×	TCP	✓	×	SSL	✓	2
XMPP	×	TCP	✓	✓	SSL	×	-
AMQP	×	TCP	✓	×	SSL	✓	8
DDS	×	TCP UDP	✓	×	SSL DTLS	✓	-
HTTP	✓	TCP	×	✓	SSL	×	-

Source: Al-Fuqaha et al., Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2015