

Redes de sensores inalámbricos (RSI)

Protocolos de acceso al medio (MAC)

Leonardo Steinfeld

Inst. de Ingeniería Eléctrica, Fac. de Ingeniería
Universidad de la República (Uruguay)



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Disclaimer: The European Commission support for the production of this website does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Objetivos

- Objetivos
 - Introducir conceptos de MAC en RSI
 - Describir los diferentes mecanismos de MAC de bajo consumo
 - Describir los métodos de acceso IEEE 802.15.4
 - Dar ejemplos de implementación

Agenda

- Conceptos
 - Características & clasificación
 - Problemas clásicos
- Consideraciones para RSI
 - Consumo & otras
 - Protocolos para RSI
- Protocolos de IEEE 802.15.4 MAC
 - Métodos de acceso: CSMA etc.
 - ContikiMAC
 - TSCH

Características y desafíos

- Características del medio inalámbrico
 - Medio compartido: imposible Rx y Tx simultáneamente (mismo canal)
 - Interferencias: transmisor no puede saber si el receptor recibió bien.
 - Pérdida de paquetes: dificultan la señalización
- Requerimientos
 - Usual: high throughput, low overhead, low error rates, ...
 - Se agrega: energy-efficient, apagado de radio

Clasificación clásica

- Protocolos basados en
 - Reserva
 - Contienda (*contention*)

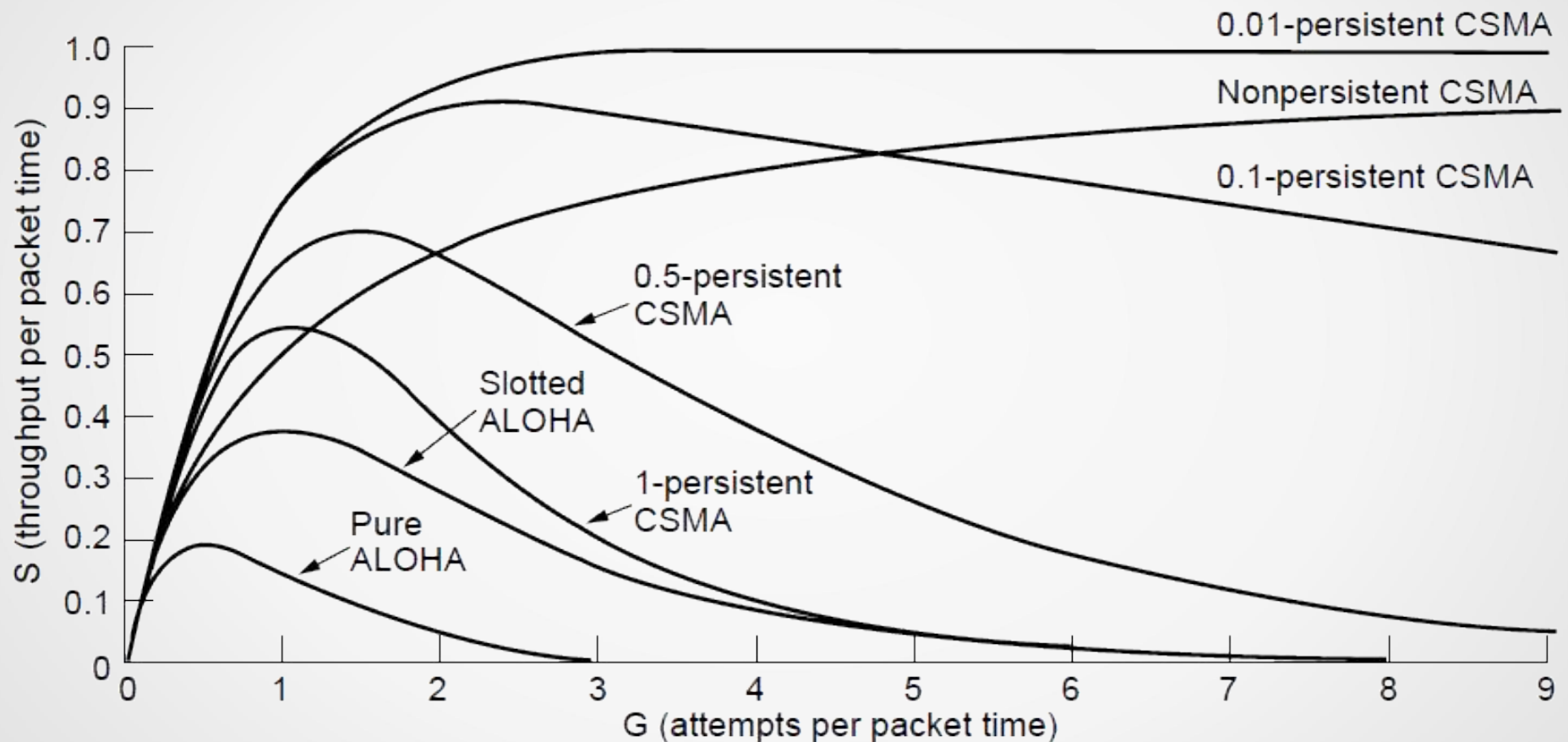
Protocolos basados en reserva

- Idea básica
 - Cada nodo es asignado a un slot (derecho a transmitir)
 - Existe un *schedule* para acceder y comunicarse (link, rx, tx)
- Ejemplo:
 - TDMA
- Ventajas
 - Evita colisiones
 - Latencia predecible
 - *Throughput* alto para tráfico alto aunque limitado (individualmente)
 - Justo
- Desventajas
 - Necesidad de sincronización

Protocolos basados en contienda

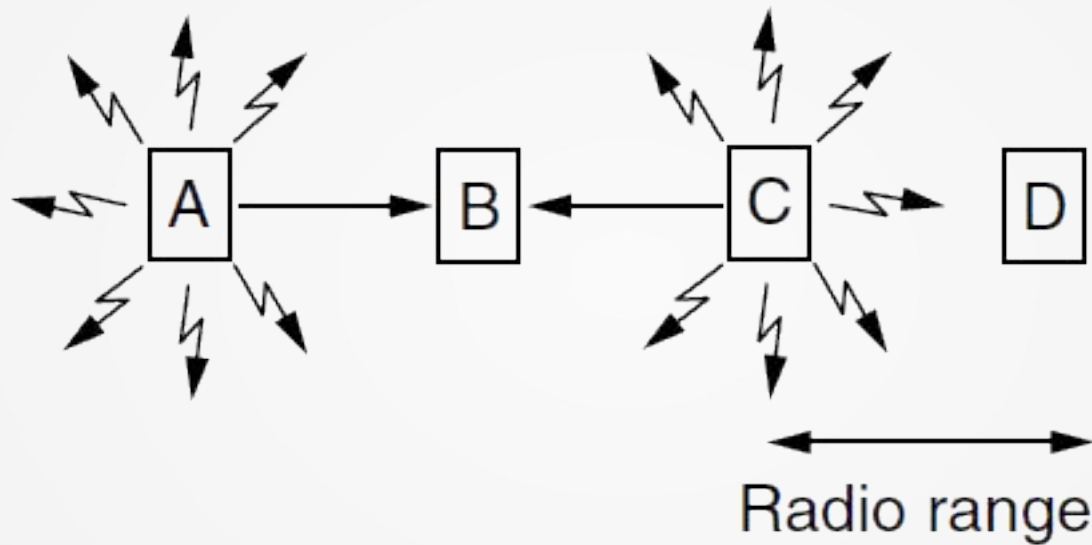
- Idea básica
 - Nodos compiten por el canal, ganador usa el canal para transmitir
- Ejemplos:
 - ALOHA: simplemente transmite
 - CSMA-CA (**C**arrier-**S**ense **M**ultiple **A**ccess with **C**ollision **A**voidance): antes sondea el canal (múltiples variantes: slotted vs unslotted, 1 o p-persistente)
- Ventajas
 - Simple (no requiere sincronización)
 - Descentralizado
- Desventajas
 - Propenso a colisiones
 - *Throughput* decae si tráfico aumenta
 - Eficiencia en término de uso de capacidad de canal menor a *reserva*

Protocolos de contención: *throughput*



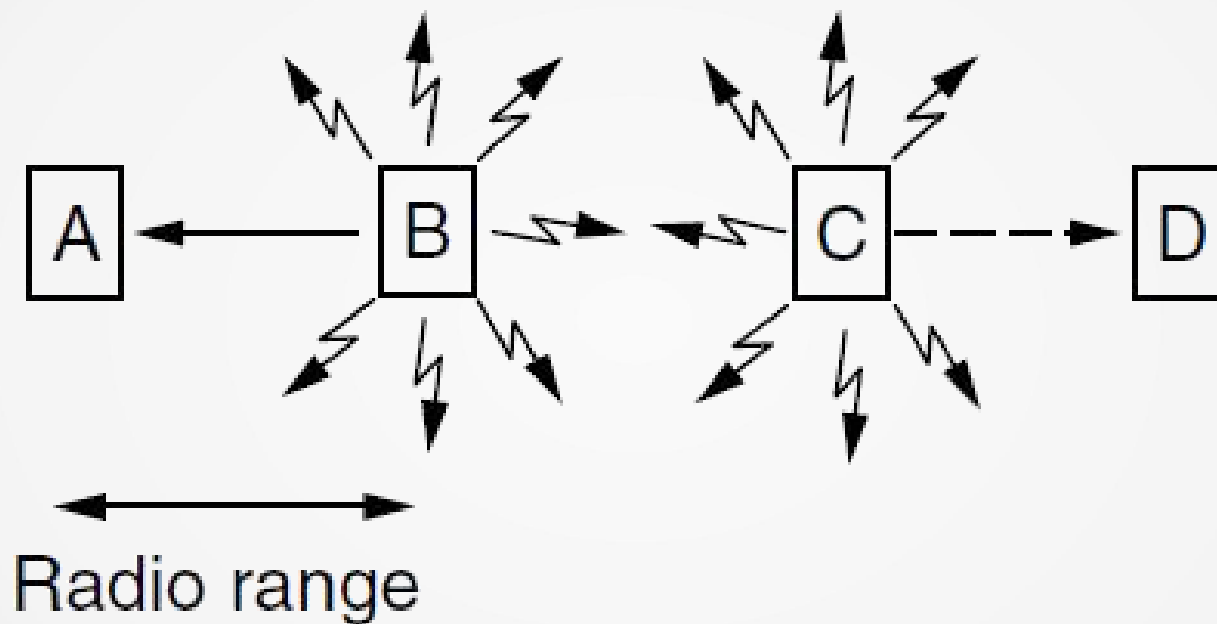
Computer Networks, Fifth Edition by Andrew Tanenbaum and David Wetherall, © Pearson Education-Prentice Hall, 2011

Problemas clásicos: nodo oculto



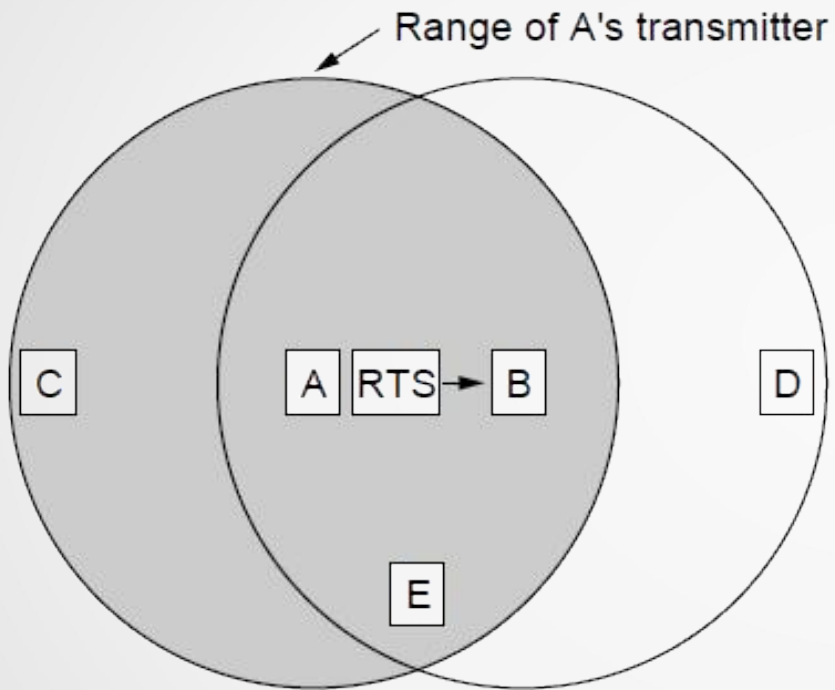
Computer Networks, Fifth Edition by Andrew Tanenbaum and David Wetherall, © Pearson Education-Prentice Hall, 2011

Problemas clásicos: nodo expuesto

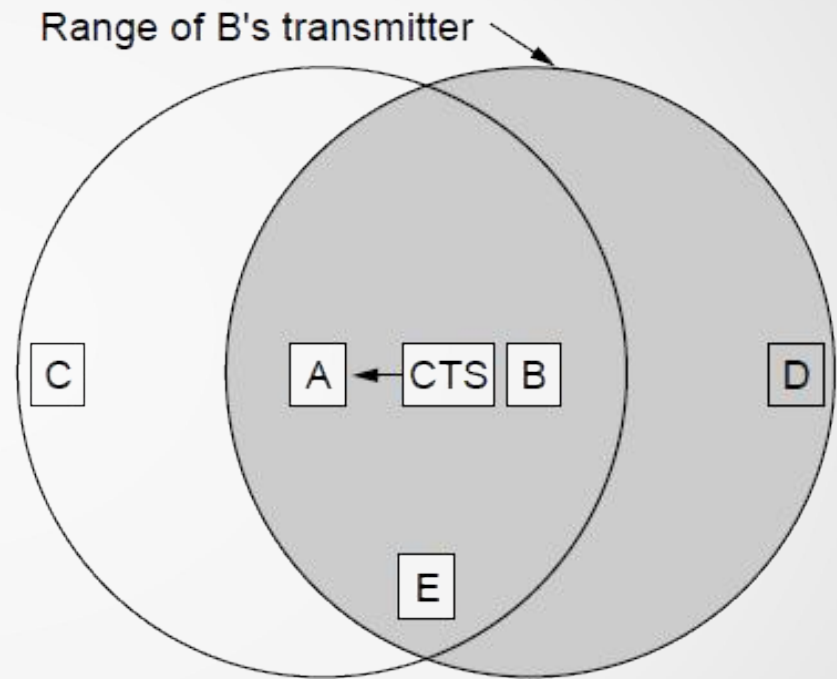


Computer Networks, Fifth Edition by Andrew Tanenbaum and David Wetherall, © Pearson Education-Prentice Hall, 2011

Solución: reducción de colisiones



(a)



(b)

No usado en RSI

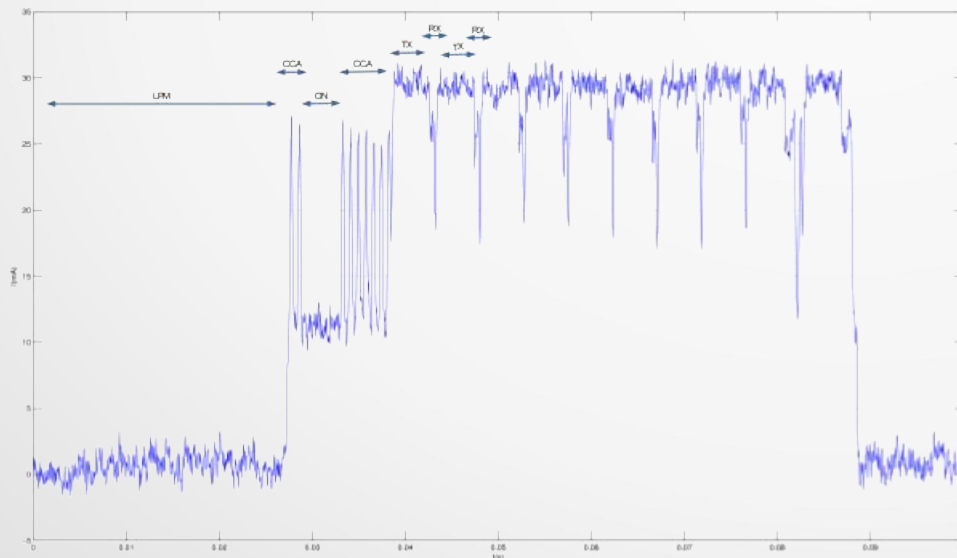
Computer Networks, Fifth Edition by Andrew Tanenbaum and David Wetherall, © Pearson Education-Prentice Hall, 2011

RSI: consideraciones para MAC

- Limitaciones
 - Energía
 - Memoria y capacidad de cómputo
- Requerimientos
 - Confiabilidad
 - Bajo tiempo de acceso (latencia)
 - *Throughput*
- En general:
foco en **energía** cuidando el resto

RSI: consumo de energía MAC

- Consumo de energía (nodos homogéneos)
 - Tx son caras
 - RX también
 - Escuchar menos, pero importante (CCA)



State	$I_{avg}(mA)$
ON	11.23
TX	29.64
RX	24.17
CCA	21.64

RSI: consumo de energía

- Afectado por:
 - Colisiones
 - *Overhearing* (escuchar pero no era para mí)
 - *Idle listening* (inútil, improductiva)
 - *Protocol overhead*
- Siempre es mejor:
solución sencilla

Protocolos específicos para RSI

- Protocolos *Scheduled*
 - Tráfico periódico de alta carga
- Protocolos con períodos activos comunes
 - Escenarios de tráfico de carga media
- Protocolos de muestreo de preámbulo
 - Carga baja (reporte de eventos esporádicos)
- Protocolos híbridos
 - Combina anteriores

Un universo de protocolos...

TABLE VI
SUMMARY OF MACs BELONGING TO THE DISCUSSED MAC FAMILIES.

Function	Protocols
Scheduled Protocols	TSMP [27], IEEE 802.15.4 [5], Arisha [29], PEDAMACS [30], BitMAC [31], G-MAC [32], SMACS [33], TRAMA [34], FLAMA [35], μ MAC [36], EMACs [37], PMAC [38], PACT [39], BMA [40], MMAC [41], FlexiMAC [42], PMAC [43], O-MAC [44], PicoRadio [45], Wavenis [3], f-MAC [48], Multichannel LMAC [49], MMSN [51], Y-MAC [52], Practical Multichannel MAC [53], LMAC [50], AI-LMAC [54], SS-TDMA [55], RMAC [56]
Protocols with Common Active Period	SMAC [57], TMAC [59], E2MAC [61], SWMAC [62], Adaptive Listening [63], nanoMAC [64], DSMAC [65], FPA [66], DMAC [67], Q-MAC [68], MSMAC [69], GSA [66], RL-MAC [71], U-MAC [72], RMAC [73], E2RMAC [74]
Preamble Sampling Protocols	Preamble-Sampling ALOHA [75], Preamble-Sampling CSMA [76], Cycled Receiver [77], LPL [78], Channel Polling [79], BMAC [78], EA-ALPL [80], CSMA-MPS [82], TICER [77], WOR [21], X-MAC [83], MH-MAC [84], DPS-MAC [87], CMAC [88], GeRAF [89], 1-hopMAC [90], RICER [77], WiseMAC [92], RATE EST [93], SP [20], SyncWUF [94], STEM [46], MFP [95], 1-hopMAC [90], SpeckMAC-D [85], MX-MAC [86]
Hybrid Protocols	IEEE 802.15.4 [5], ZMAC [98], Funneling MAC [100], MH-MAC [84], SCP [79], Crankshaft [102]

A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. K. Leung, "MAC essentials for wireless sensor networks," Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.

Protocolos de IEEE 802.15.4 MAC

- Agenda
 - Estructuras de “super” frames
 - Métodos de acceso
 - ContikiMAC
 - TSCH

Estructuras de “super” frames

- Beacon superframe

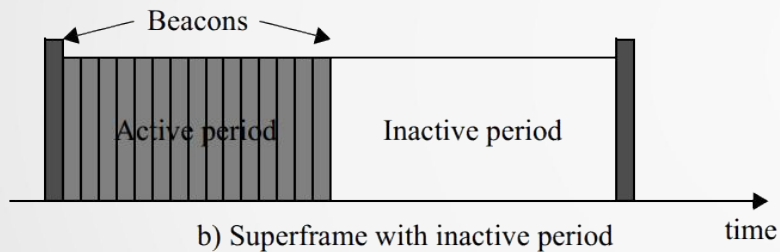
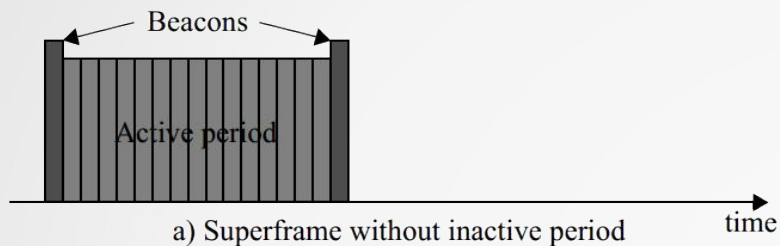


Figure 5-5—Superframe structure

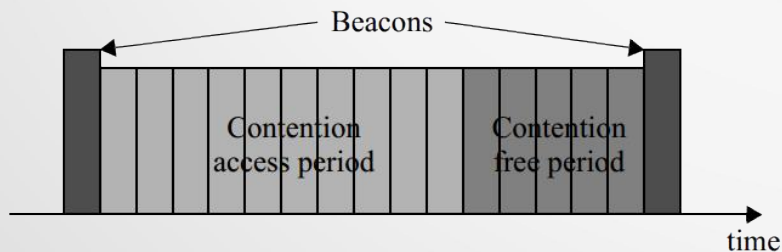


Figure 5-6—Structure of the active periods with GTSSs

- Slotframes

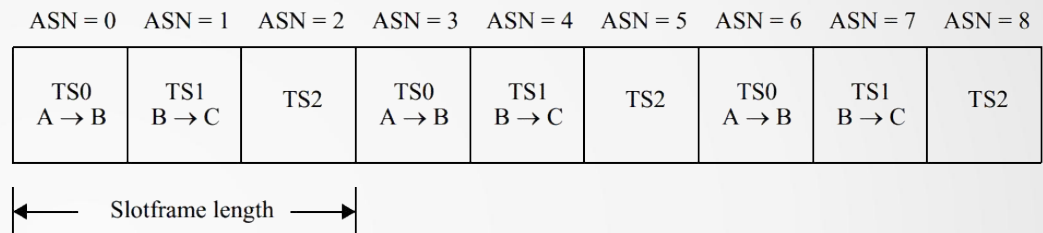


Figure 6-9—Example of a three time-slot slotframe

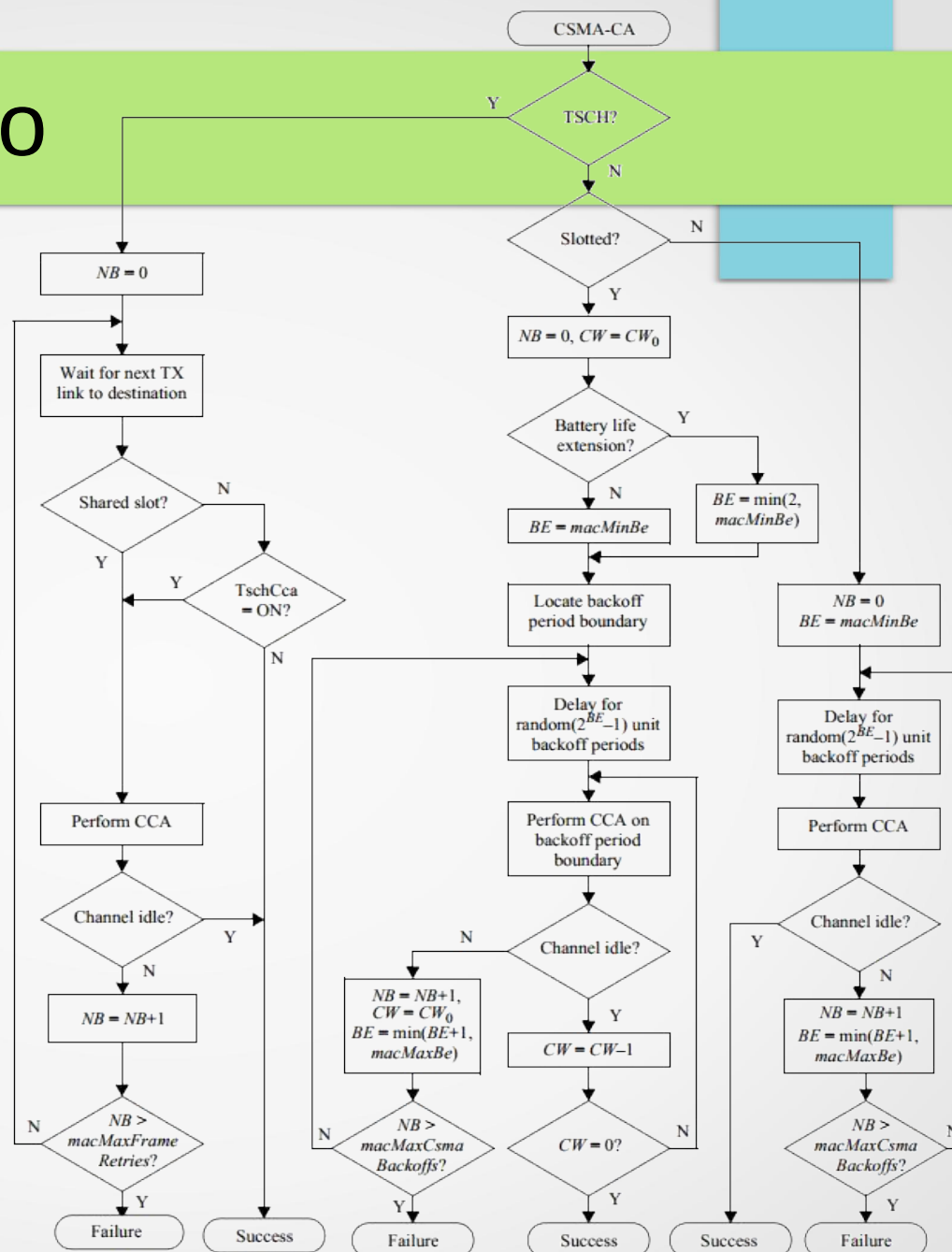
- Libre (sin beacon/superframe)

Métodos de acceso

- Tipos de PANs y métodos de acceso
 - Nonbeacon-enabled (libre): unslotted CSMA-CA
 - Beacon-enabled: slotted CSMA-CA
 - TSCH (slotframe)
 - TSCH CCA: non-shared slots
 - TSCH CSMA-CA: shared slots
 - otros

Métodos de acceso

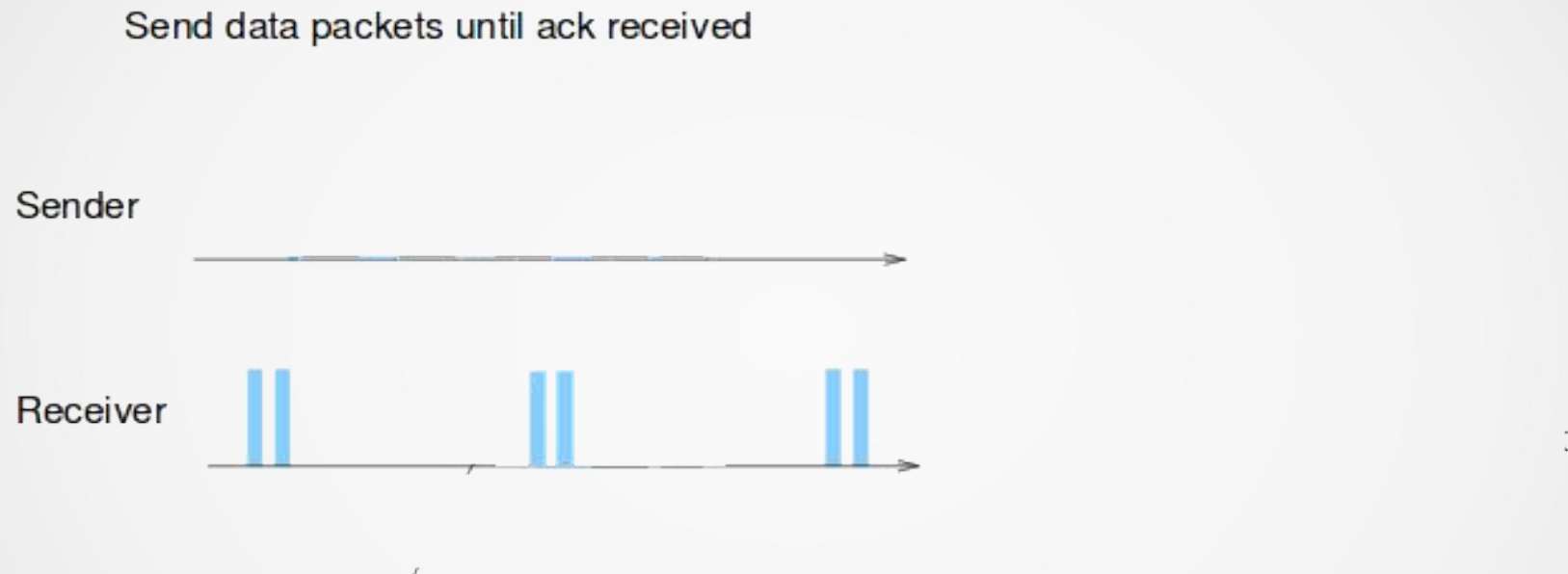
- Algoritmo CSMA-CA



ContikiMAC: fundamentos

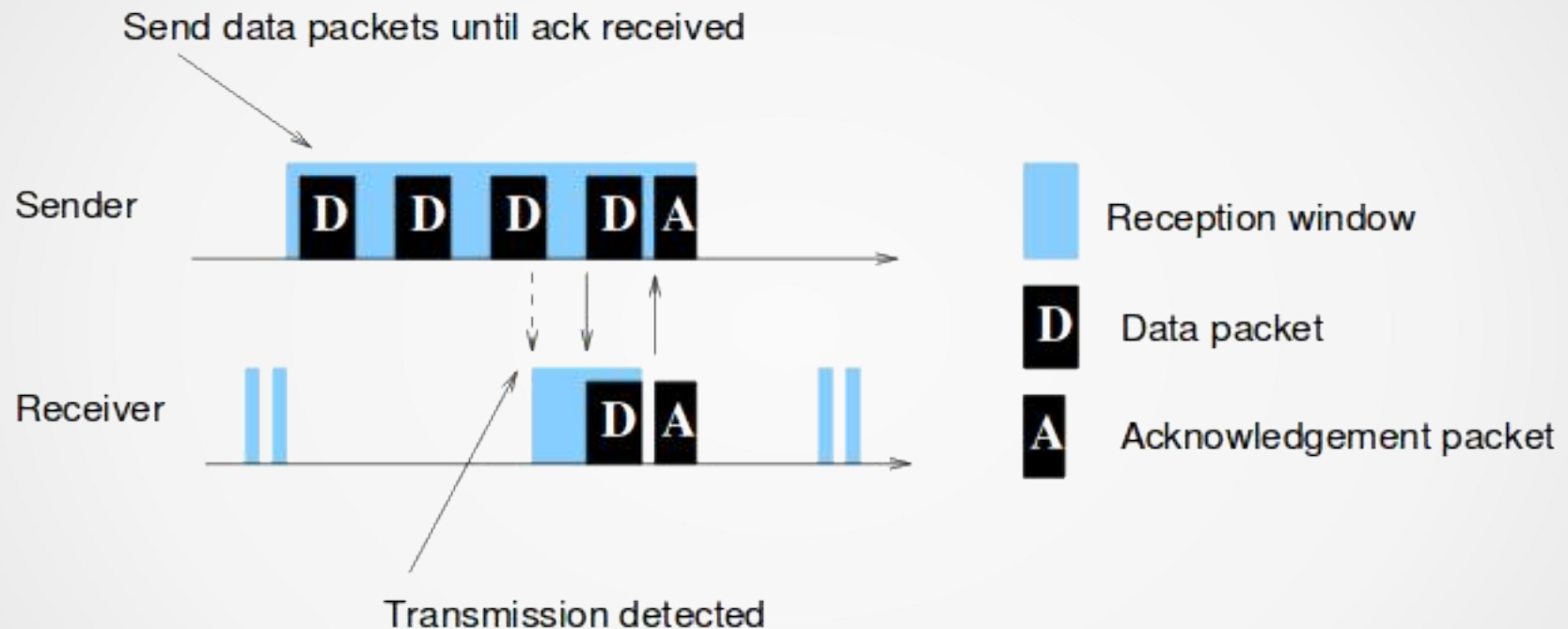
- ContikiMAC
 - protocolo de tipo “muestreo de preámbulo”
 - evolución que toma ideas de muchos protocolos
- Funcionamiento
 - muestreo periódico del canal para recibir *frames*
 - transmisión de tren de *frames*
 - unicast hasta recibir ACK, luego phase-lock
 - broadcast durante todo el período

ContikiMAC: muestreo de canal (CCA)



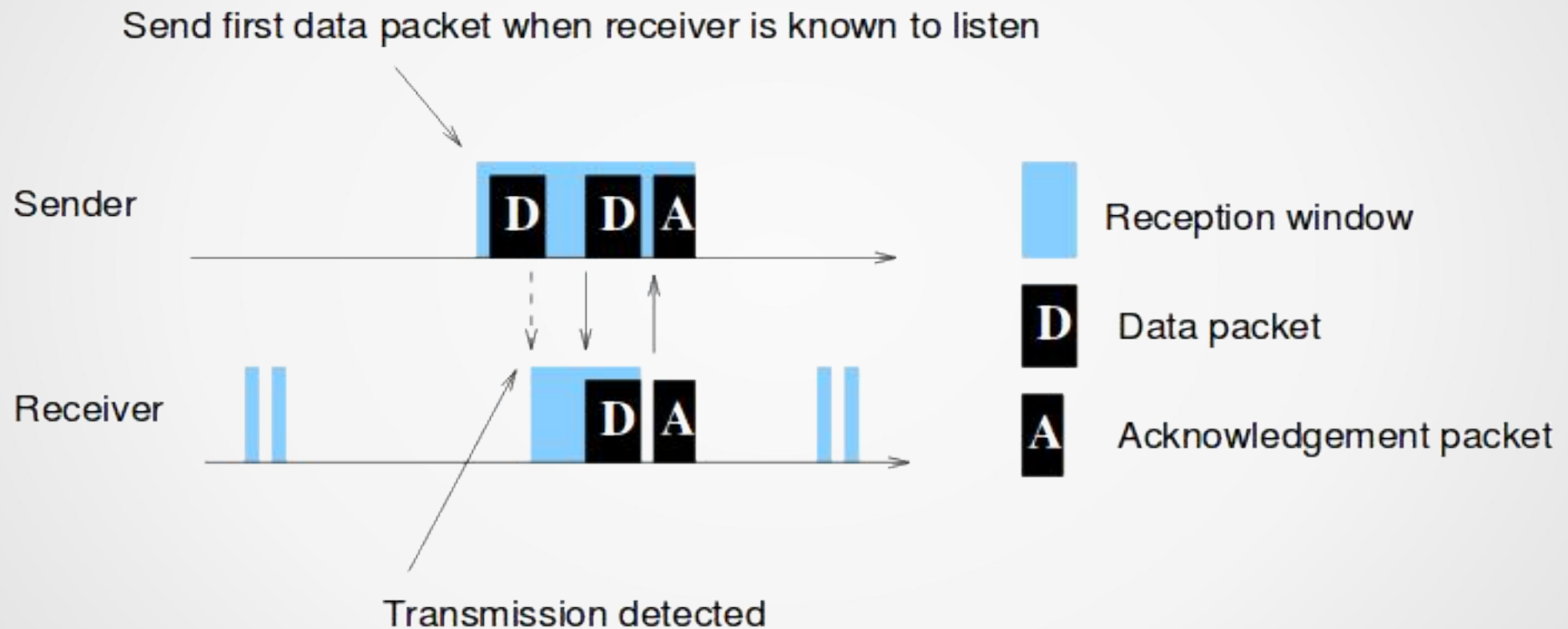
A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

ContikiMAC: unicast



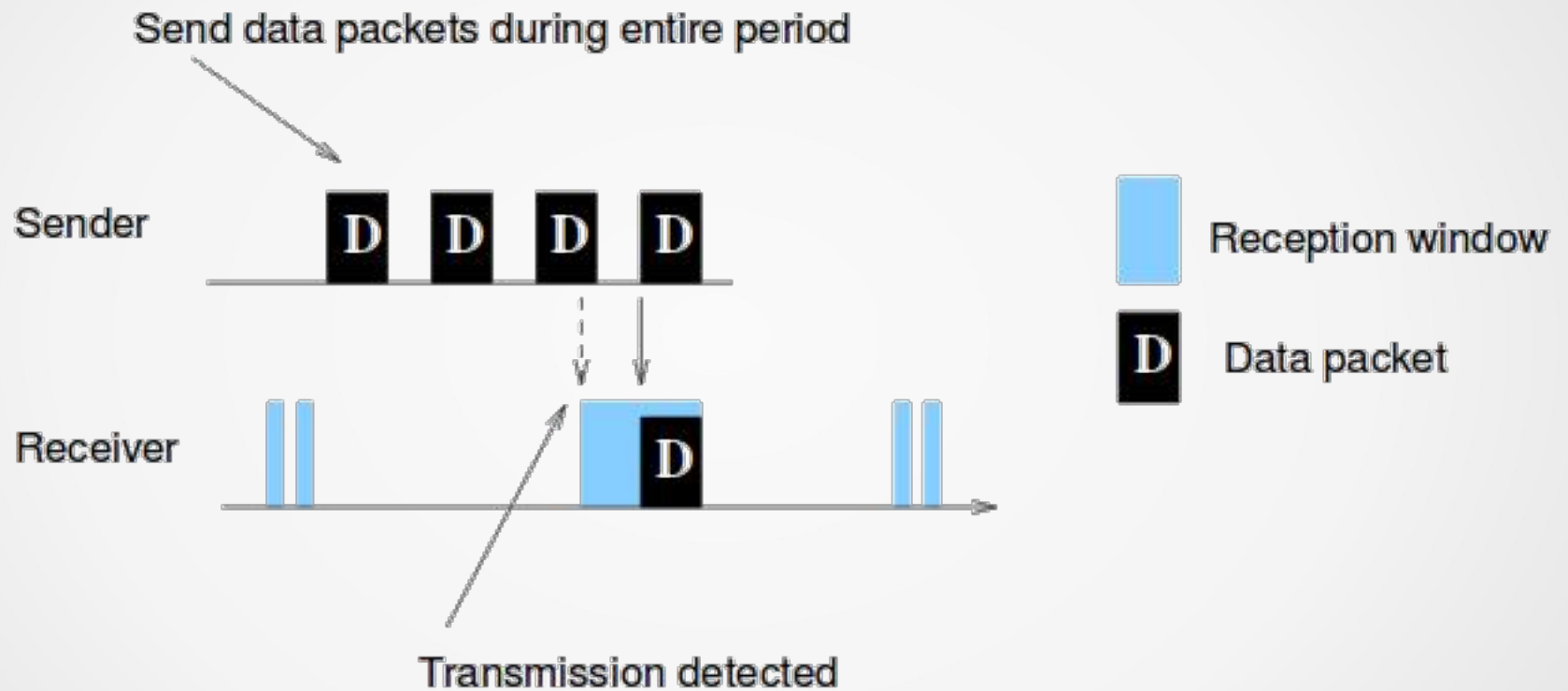
A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

ContikiMAC: unicast con phase-lock



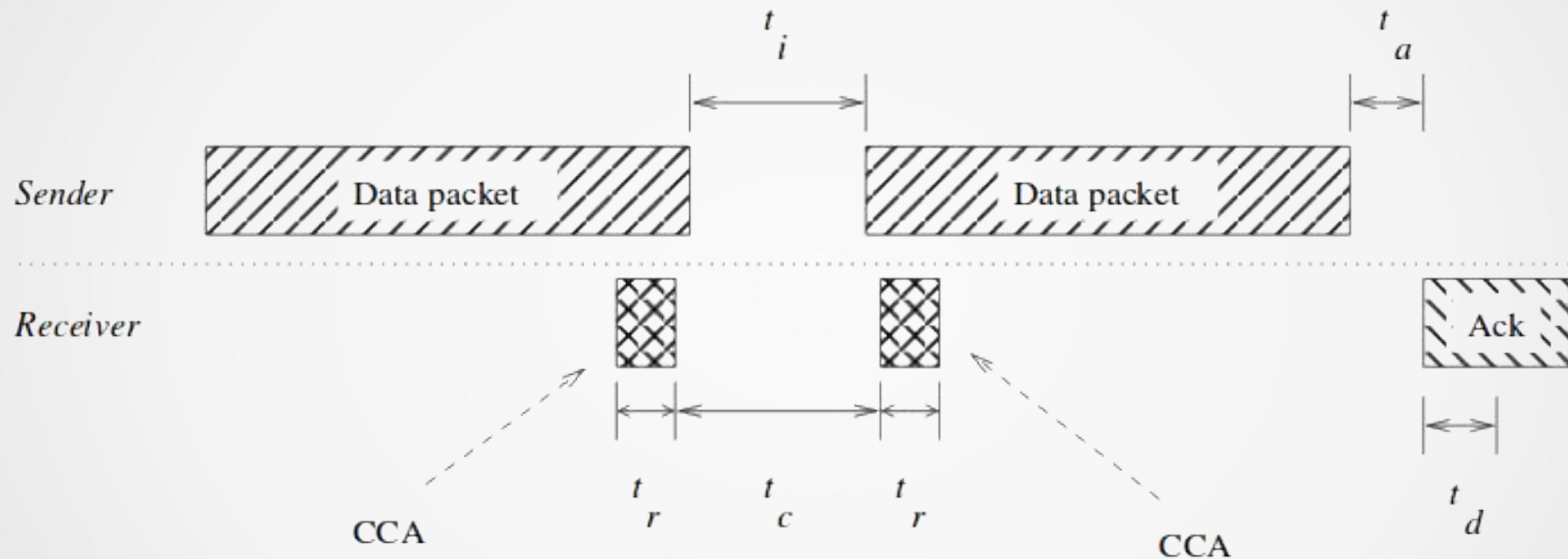
A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

ContikiMAC: broadcast



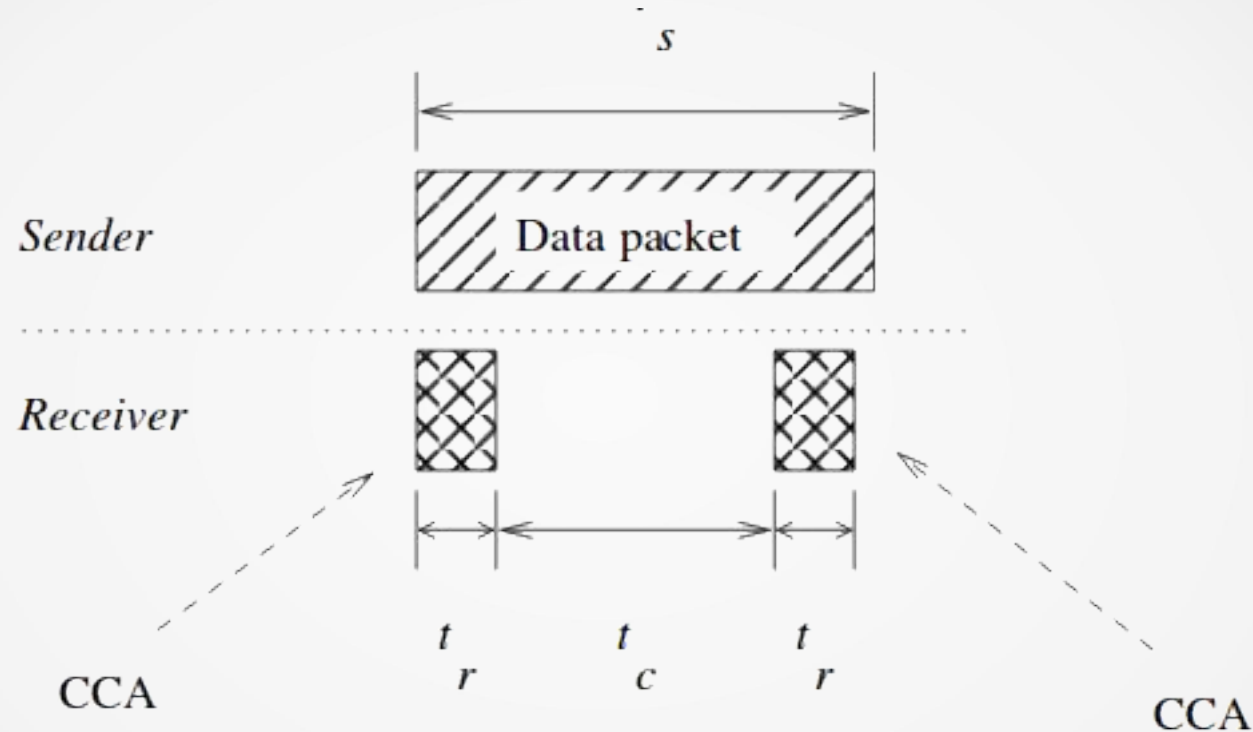
A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

ContikiMAC: doble CCA & tiempos



A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

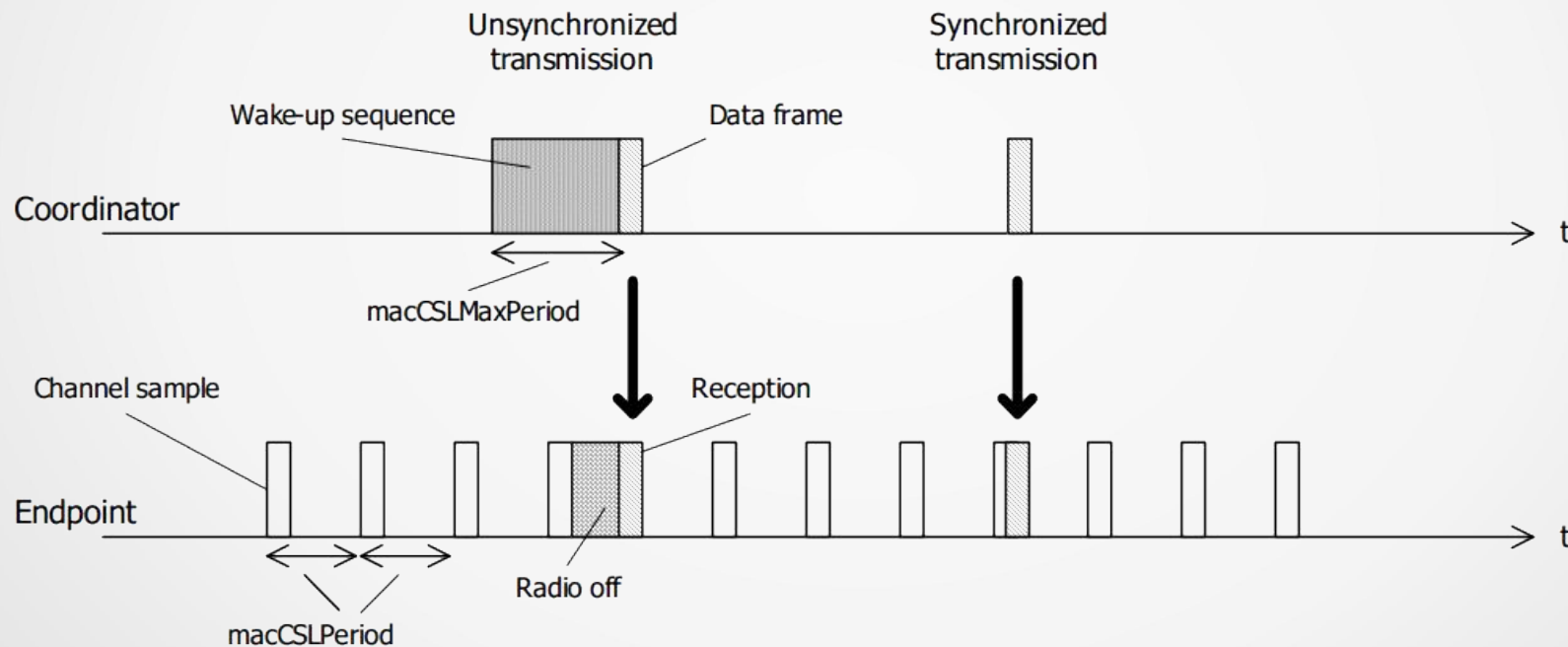
ContikiMAC: doble CCA & tiempos



A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.

ContikiMAC & CSL

- IEEE 802.15.4- 2015 incorpora el modo de CSL
Coordinated Sampled Listing



Time-Slotted Channel Hopping (TSCH)

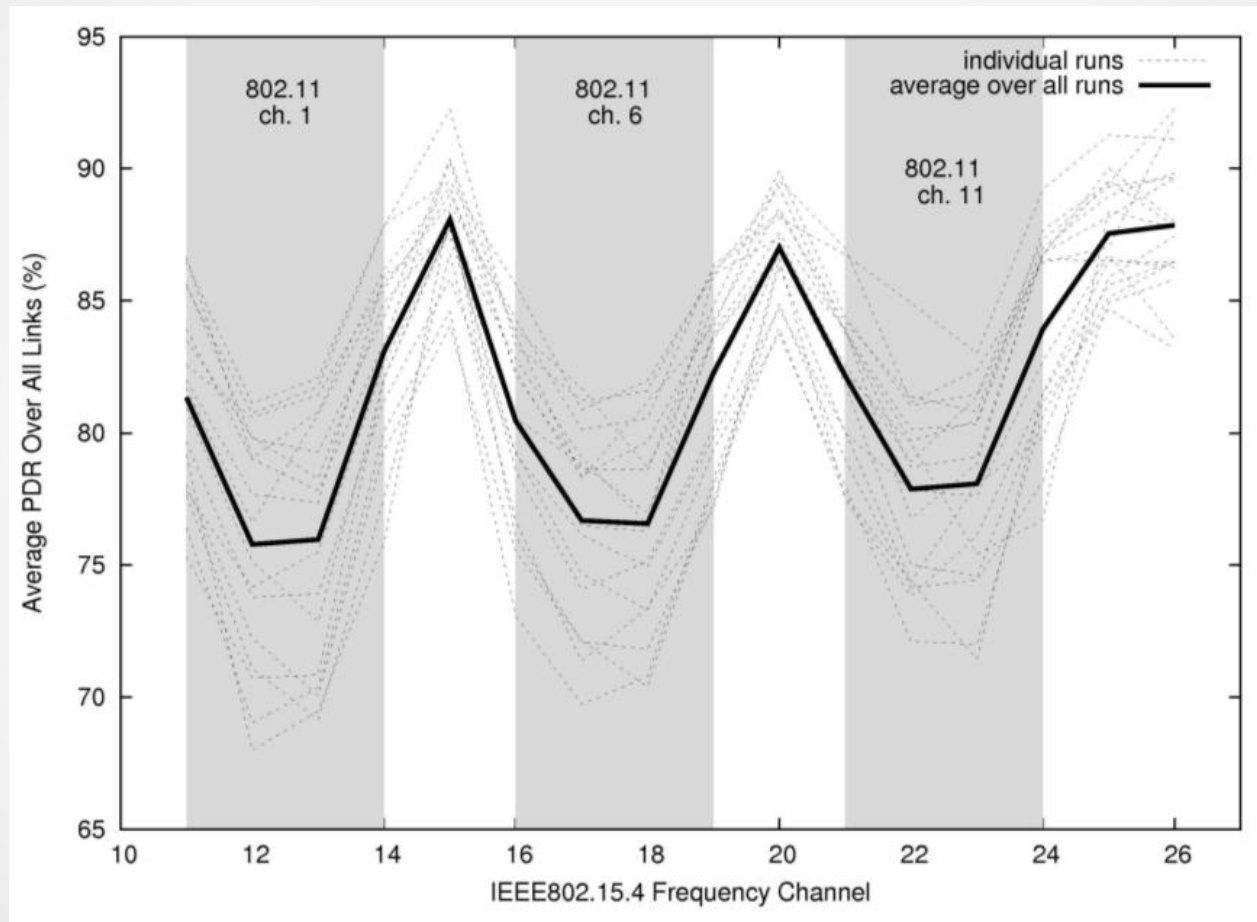
¿Qué es?

- Técnica de acceso al medio que usa:
 - **TS** (Time-Slotted): sincronización
 - **CH** (Channel Hopping): saltos de canal
- Objetivo
 - Bajo consumo (apagado de radio)
 - Mayor confiabilidad (diversidad de canales)

Motivación & antecedentes

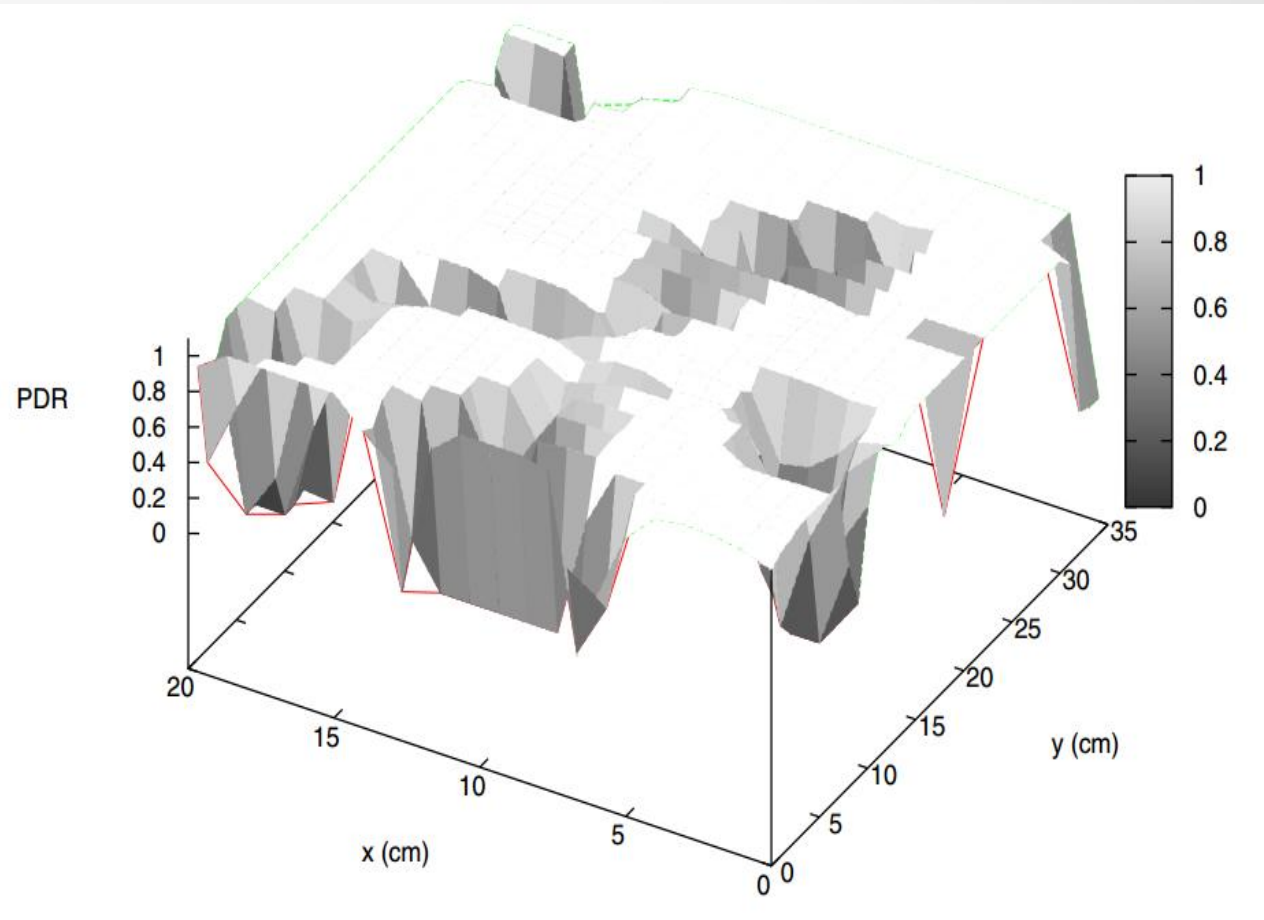
- Problema de ambientes industriales
 - Multi-path fading (desvanecimiento por múltiples caminos)
 - Interferencia
- Uso canal único: debilidad
- Solución: salto de canal
- Soluciones previas:
 - WirelessHART / ISA100.11

Motivación



Motivación

- IEEE802.15.4 (2.4 GHz)
- canal 20
- $P_{Tx} = -16\text{dBm}$
- Tx y RX separados 1m



T. Watteyne, S. Lanzisera, A. Mehta, and K. S. J. Pister, "Mitigating multipath fading through channel hopping in wireless sensor networks," in 2010 IEEE International Conference on Communications, May 2010, pp. 1-5.

Norma: IEEE 802.15.4e-2012

- IEEE 802.15.4e-2012
 - Enmienda norma existente 2006 (versión 1) => 2015
 - Define
 - Mecanismo MAC
 - NO altera capa física (sirven “viejas” radios)
 - No define
 - Política para crear y mantener agenda de comunicación (schedule)
 - Cómo se asignan time slots y canales
- Logical Link Control (LLC)
 - Entidad funcional que define “schedule”
 - Tipos:
 - Protocolo distribuido
 - Servidor centralizado

Conceptos & Definiciones

- Método de acceso usado una superestructura
- Información enviada en EB (Enhanced Beacon)
- Red TSCH iniciada por un nodo y luego une el resto
- Noción de tiempo común:
ASN (Absolute Slot Number)

Conceptos & Definiciones

- Time Slots: tiempo se divide en time slots
 - Duración suficiente para enviar un marco MAC y recibir ACK
 - Típica: 15 ms slot
- Slotframes: grupos de uno o más time slots
 - Se repite a través del tiempo
- Cell = {slotOffset, channelOffset} (celda)
- Node TSCH schedule:
 - qué hacer en cada celda
 - Opciones: transmit, receive, o sleep.

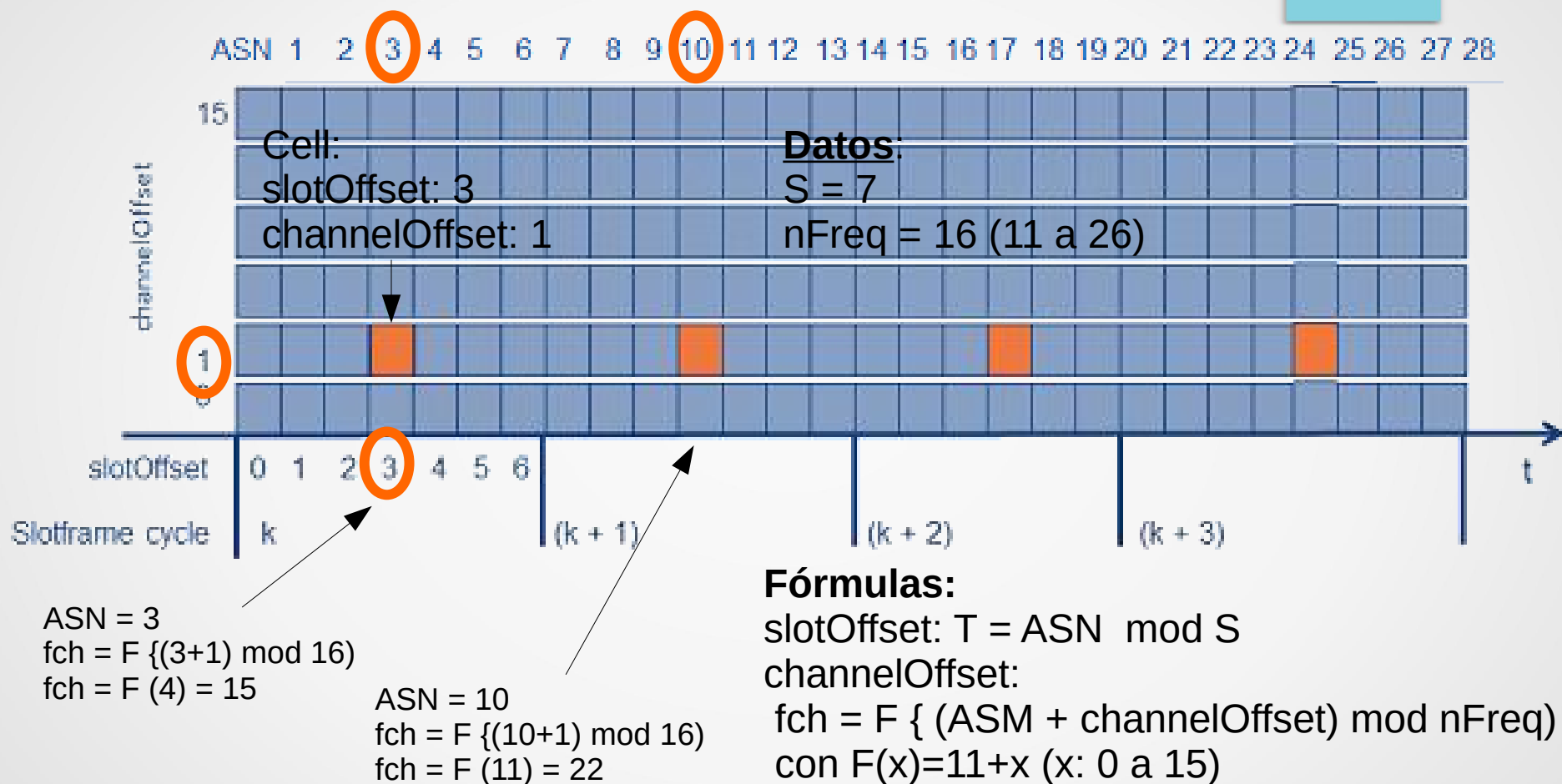
Definiciones: ASN

- Absolute Slot Number
 - Se cumple: $ASN = (k*S+T)$
 - K: slotframe cycle (i.e., numero slotframe)
 - S: tamaño de slotframe
 - T: slotOffset

Definiciones: celda

- Celda = {slotOffset, channelOffset}
- Se calcula usando ASN
 - Time-slot
 - slotOffset: $T = \text{ASN} \bmod S$
(resto de la división entera de ASN entre S)
 - S largo del slotframe
 - Channel hopping
 - frequency: $F \{(\text{ASN} + \text{channelOffset}) \bmod n\text{Freq}\}$
 - F lookup table
 - nFreq: cantidad canales (tamaño de tabla)

Slotframe: ejemplo

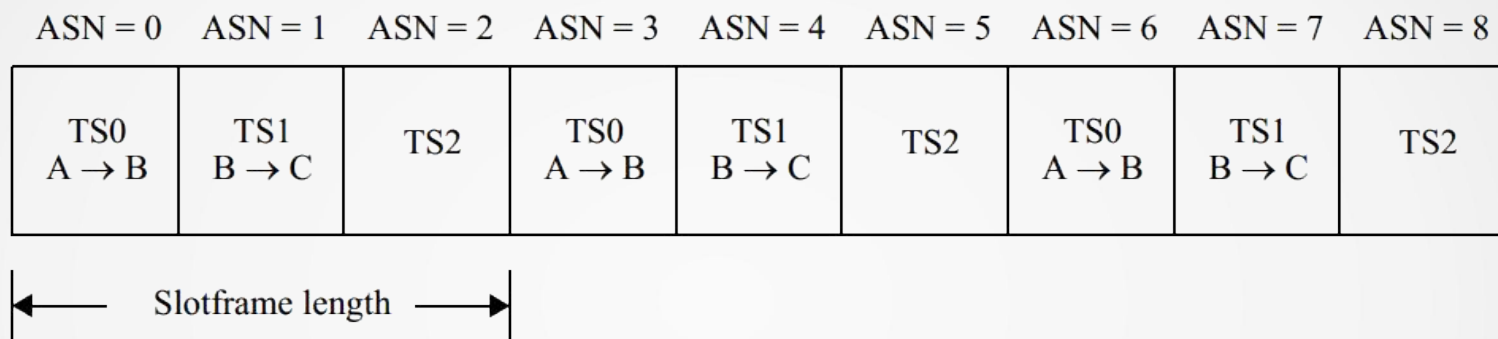


C. M. García Algora, V. Alfonso Reguera, and K. Steenhaut, "Evaluación experimental del protocolo IEEE 802.15.4 TSCH en una red 6TiSCH," Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, vol. 39, pp. 70-78, 2018.

Definiciones

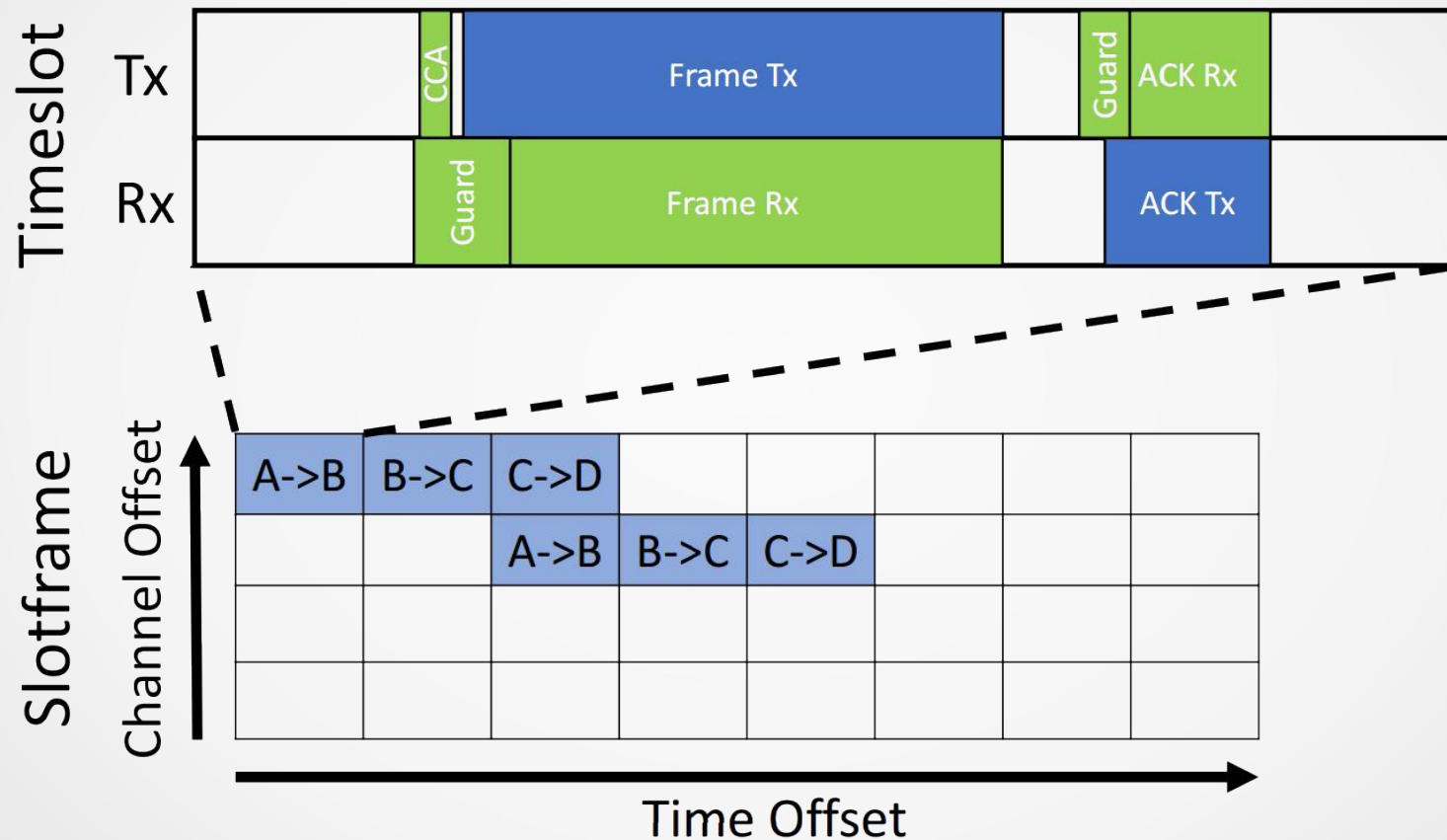
- Bundles: union de cell entre dos vecinos
 - Cada cell provee un "quantum" de ancho de banda
- Dedicated vs. Shared Cells
 - shared cell: muchos nodos pueden transmitir en el mismo time slot y frecuencia
 - Se define algortimo de backoff
- Schedule especifica: cell
 - SlotOffset
 - ChannelOffset

Conceptos & Definiciones



	ASN = 0	ASN = 1	ASN = 2	ASN = 3	ASN = 4	ASN = 5	ASN = 6	ASN = 7	
Slotframe 1 5 slots	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	TS0	TS1	TS2	...
Slotframe 2 3 slots	TS0	TS1	TS2	TS0	TS1	TS2	TS0	TS1	...

Conceptos & Definiciones



S. Duquennoy, A. Elsts, B. Al Nahas, and G. Oikonomou, "TSCH and 6TiSCH for contiki: Challenges, design and evaluation," in International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (IEEE DCOSS), 2017.

Formación / Join process

- Formación de la red TSCH
 - Nodo inicia red enviando Enhanced Beacon (EB)
 - Otros nodos se unen y envían EB
- EB contiene IEs (Information Elements):
 - TSCH Synchronization IE
 - Channel hopping IE
 - TSCH Timeslot IE
 - TSCH Slotframe and Link IE

Sincronización

- Sincronizarse con otros nodos
 - topología en árbol
 - cada nodo tiene su fuente de reloj (source)
 - elección: Join metric (distancia a root)
- Problema
 - clock drift (deriva) típica ~ 10 ppm
 - clock drift relativo ~ 20 ppm
- TSCH agrega información de tiempo a todos los paquetes
 - Data
 - ACK

Implementaciones

- Minimal configuration
 - IETF RFC 8180
Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration
- Orchestra
 - S. Duquennoy, et al. "Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled TSCH," in ACM SenSys 2015), vol. 93.
 - IETF WG
IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e (6tisch)
<https://datatracker.ietf.org/wg/6tisch/documents/>

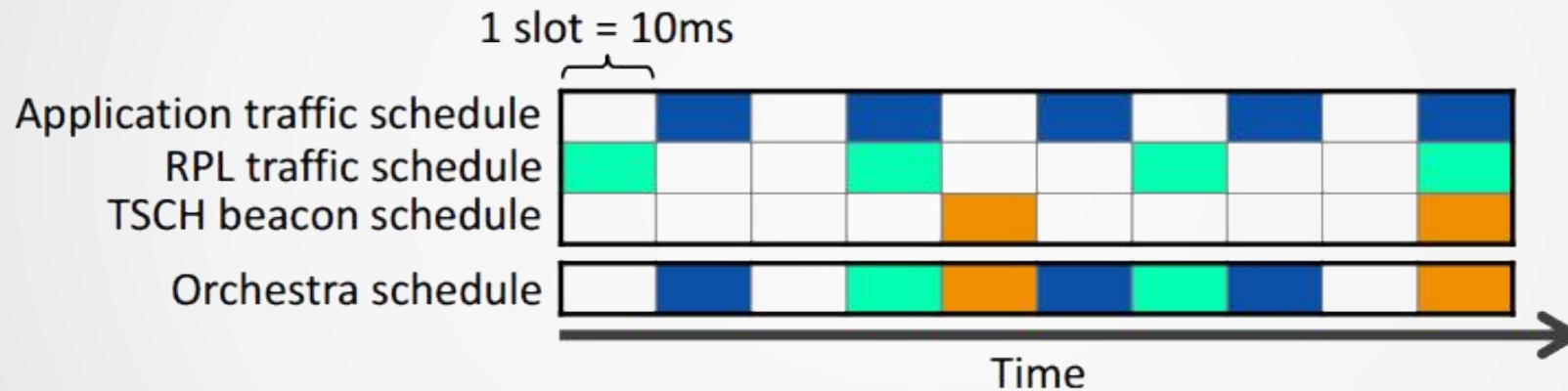
Example: Minimal Conf. (RFC8180)

Chan.	+-----+-----+					+-----+-----+		
Off.0		TxRxS/EB		OFF			OFF	
Chan.	+-----+-----+					+-----+-----+		
Off.1		OFF		OFF		...		OFF
	+-----+-----+					+-----+-----+		
	.							
	.							
	.							
Chan.	+-----+-----+					+-----+-----+		
Off.15		OFF		OFF				OFF
	+-----+-----+					+-----+-----+		
slotOffset	0			1				100

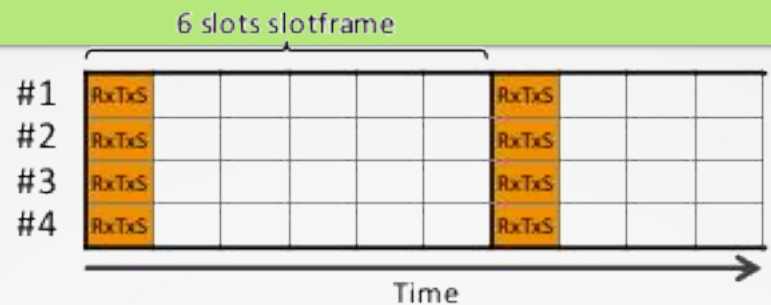
EB: Enhanced Beacon
 Tx: Transmit
 Rx: Receive
 S: Shared
 OFF: Unscheduled by this specification

Figure 2: Example Slotframe of Length 101 Timeslots

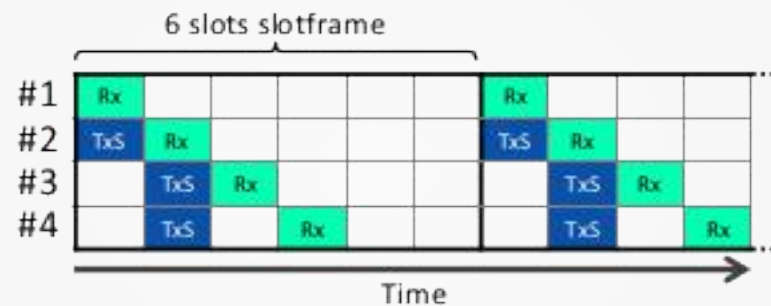
Ejemplos: Orchestra



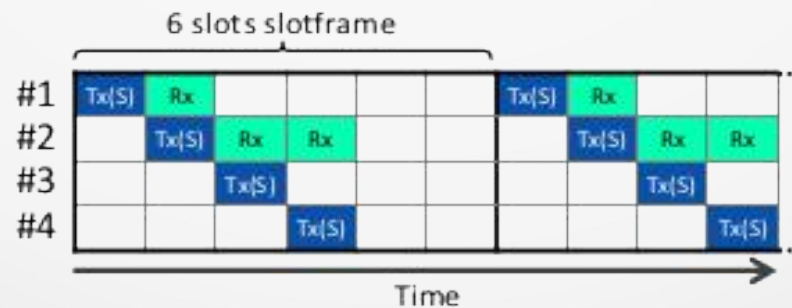
Ejemplos: Orchestra



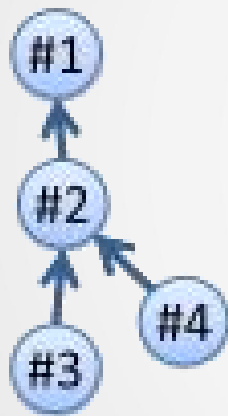
(b) Common Shared Slot



(c) Receiver-based Shared Slot



(d) Sender-based (Shared) Slot



(a) Topology

Bibliografía

- A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. K. Leung, "MAC essentials for wireless sensor networks," Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.
- "IEEE standard for Low-Rate wireless networks," IEEE Std 802.15.4-2015, pp. 1-709, Apr. 2016.
- A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol," Swedish Institute of Computer Science, Tech. Rep. T2011:13, Dec. 2011.
- T. Watteyne, et al., "Mitigating multipath fading through channel hopping in wireless sensor networks," in 2010 IEEE International Conference on Communications, May 2010, pp. 1-5.
- S. Duquennoy, et al., "TSCH and 6TiSCH for contiki: Challenges, design and evaluation," in International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (IEEE DCOSS), 2017.
- IETF RFC 8180 Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration
- S. Duquennoy, et al. "Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled TSCH," in ACM SenSys 2015), vol. 93.
- IETF draft 6TiSCH Autonomous Scheduling Function (ASF)

Planificación clases

- 1. Introducción RSI
- 2. IPv6
- 3. Plataforma de hardware
- 4. Plataforma de software: Contiki OS I
- 5. Plataforma de software: Contiki OS II
- 6. Capa de aplicación: CoAP
- 7. Capa de red: RPL
- **8. Subcapa MAC**
- 9. IEEE 802.15.4 / 6lowpan
- 10. Capa Física & antenas
- 11. IoT y las RSI



gracias... ¿más preguntas?