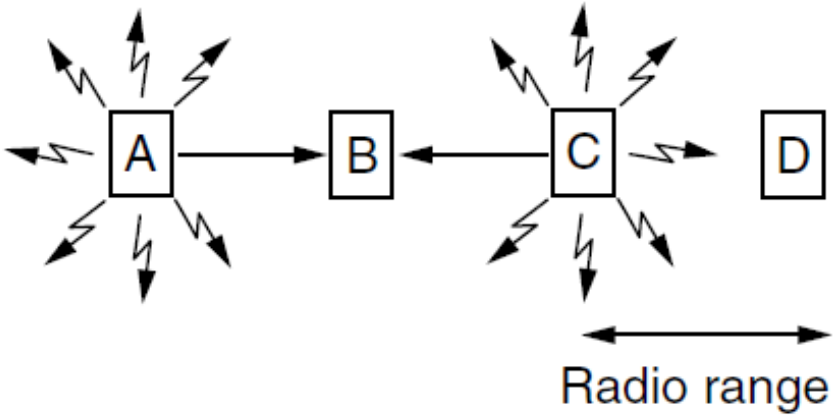
Redes Inalámbricas

Introducción

Redes inalámbricas (1)

- El tipo de canal es claramente un canal de difusión;
- Diferencias notables con una LAN cableada CSMA/CD.
  - No pueden detectar colisiones:
    - Al ser un sistema half-duplex, no puede escuchar al mismo tiempo que se transmite [5];
    - La señal recibida es muchas veces muy débil ya que la atenuación es muy superior a aquella experimentada en un cable
      - $a = f(d, \lambda)$
    - Se usan confirmaciones para descubrirlas;
  - Si se está fuera de rango de cobertura, la estación no podrá transmitir ni recibir tramas;
    - Problema de estación oculta.
    - Problema de estación expuesta.

Redes inalámbricas (2)

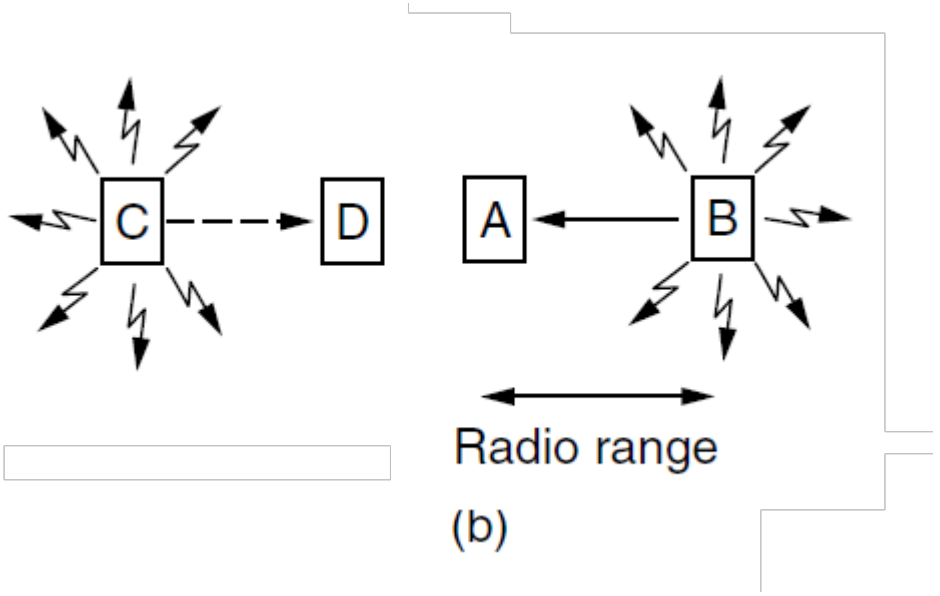


(a)

- **Estación oculta**
- 'A' y 'C' están fuera de alcance entre sí;
- Por dicho motivo creen que el canal está libre y transmiten al mismo tiempo;
- Colisión en 'B';
- Se requiere un protocolo MAC que evite las colisiones.

Redes inalámbricas (3)

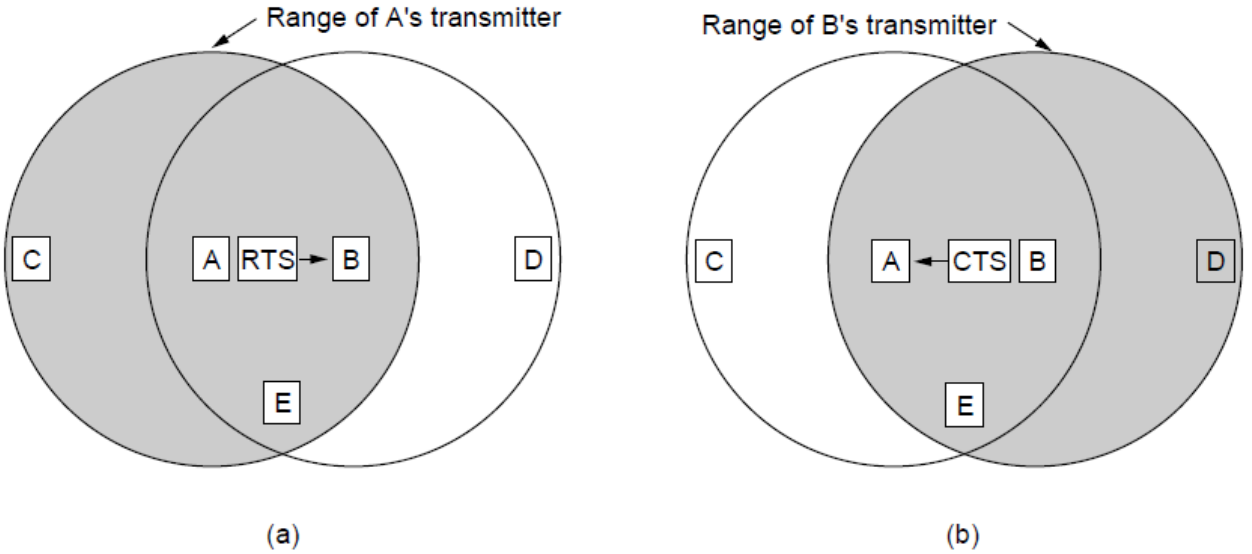
- **Estación expuesta**
- 'B' desea enviar a 'A' y 'C' a 'D';
- 'D' detiene la señalización puesto que entiende que el canal está ocupado por 'A';
- Sin embargo, dado que 'C' y 'B' están fuera de alcance, las transmisiones hacia 'D' 'A' habrían sido exitosas.
- Se desperdicia ancho de banda.



Redes inalámbricas (4)

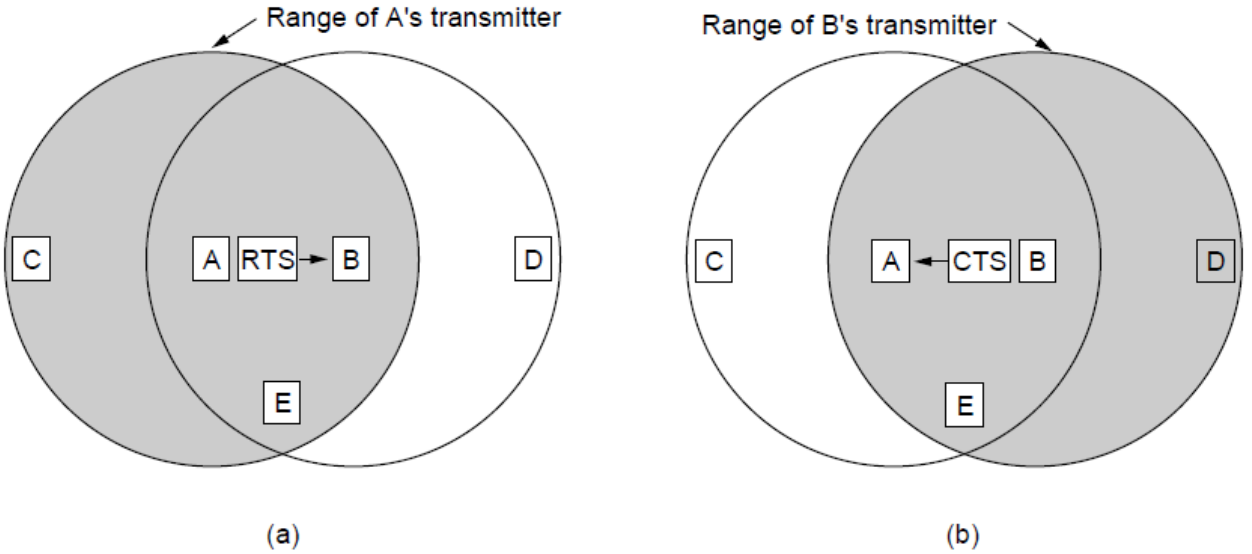
- El primer protocolo que surgió se llamó MACA (Multiple Access / Collision Avoidance) [1];
- El emisor envía una trama corta al receptor;
- Las estaciones cercanas lo notan;
  - No envían nada.
- Se utiliza ésta técnica en lugar de exclusivamente detectar señal de portadora.

Redes inalámbricas (5)



- 'A' envía una trama corta RTS (Request to Send) que incluye la longitud de datos que pretende enviar a 'B';
- 'B' devuelve otra trama corta CTS (Clear to Send) e incluye el mismo valor de longitud de datos que obtuvo en el mensaje RTS;
- Sólo luego de recibir correctamente el mensaje CTS, 'A' comienza la transmisión.

Redes inalámbricas (6)

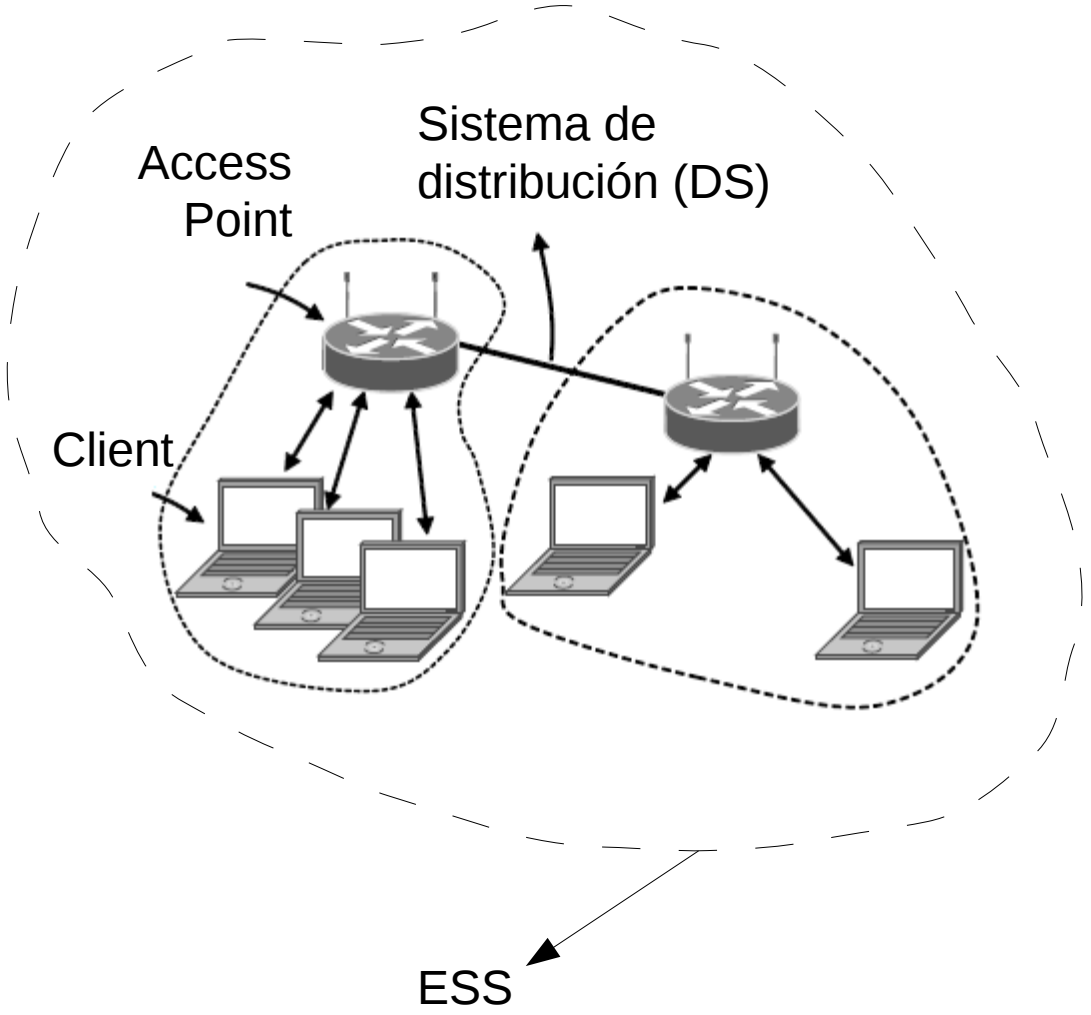


- Todas las estaciones que escuchen el RTS, están cerca de 'A' y deben permanecer en silencio el tiempo suficiente para que 'A' reciba el CTS;
- Cualquier estación que escuche el CTS debe permanecer en silencio puesto que sabe que se producirá una transmisión de datos.
- Incluso con estas precauciones se pueden producir colisiones. De ser así, se esperará un tiempo aleatorio y se intentará de nuevo a posteriori.

IEEE 802.11 (1)

- Es un estándar que define una interfaz inalámbrica útil tanto entre clientes y estaciones base (access point) así como entre clientes pares;
- Define las capas PHY y MAC (la capa LLC está definida en 802.2);
- El proceso de estandarización comenzó en 1990.

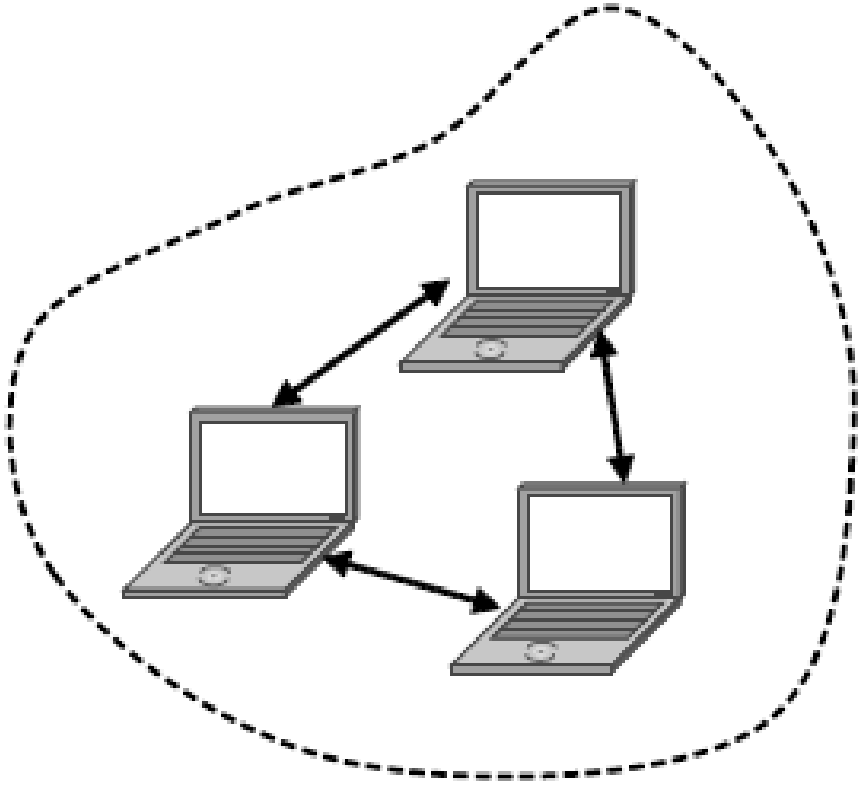
IEEE 802.11 (2) – Modo Infraestructura



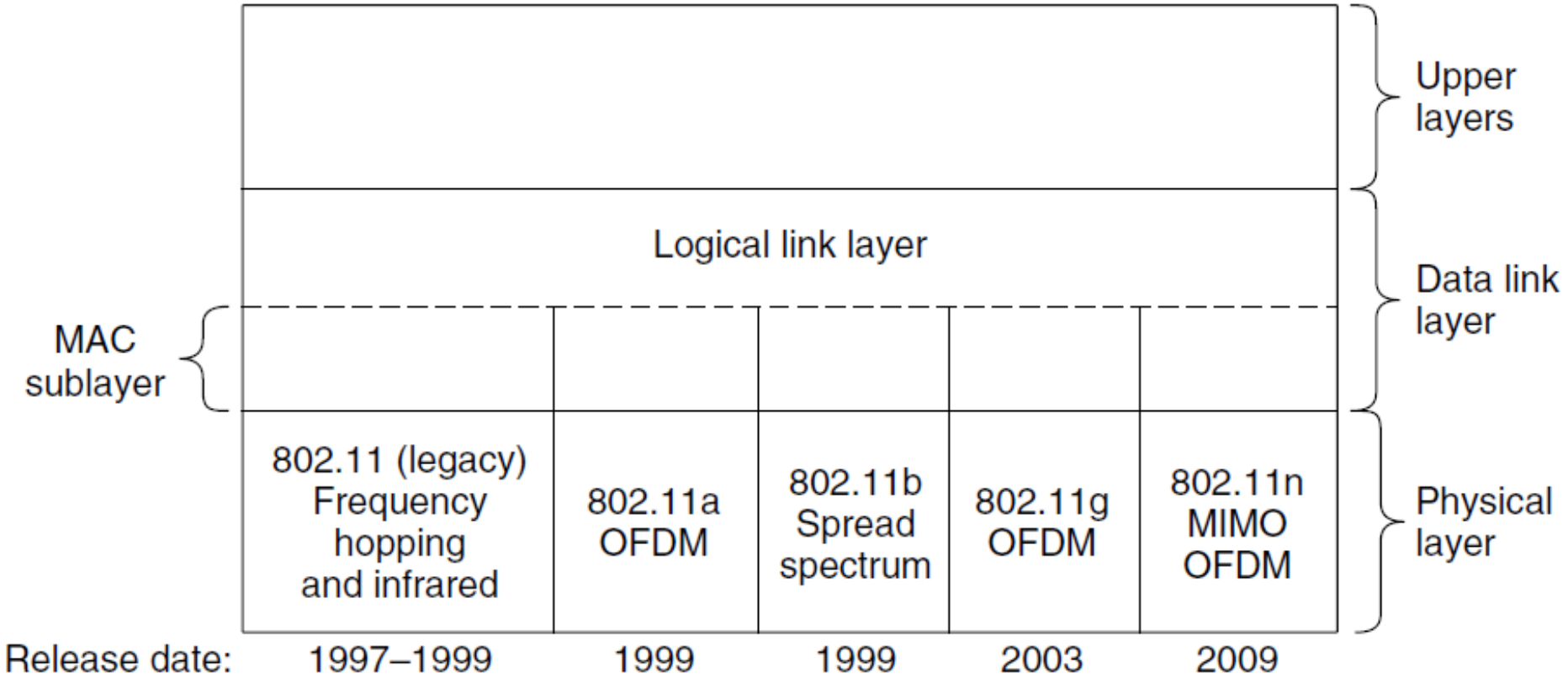
- En este modo, las estaciones se 'asocian' a un punto de acceso o AccesPoint (AP);
- El cliente envía y recibe sus tramas -siempre- a través del AP.
- Cada set AP+Clients forman un BSS (Basic Service Set);
- En una configuración típica, el 'AP' tiene acceso a una LAN Ethernet, (en otras palabras, hace las veces de un bridge Ethernet/802.11), que, unido a otro BSS mediante un Sistema de Distribución, forman un ESS (Extended Service Set).

IEEE 802.11 (3) – Modo Ad-Hoc

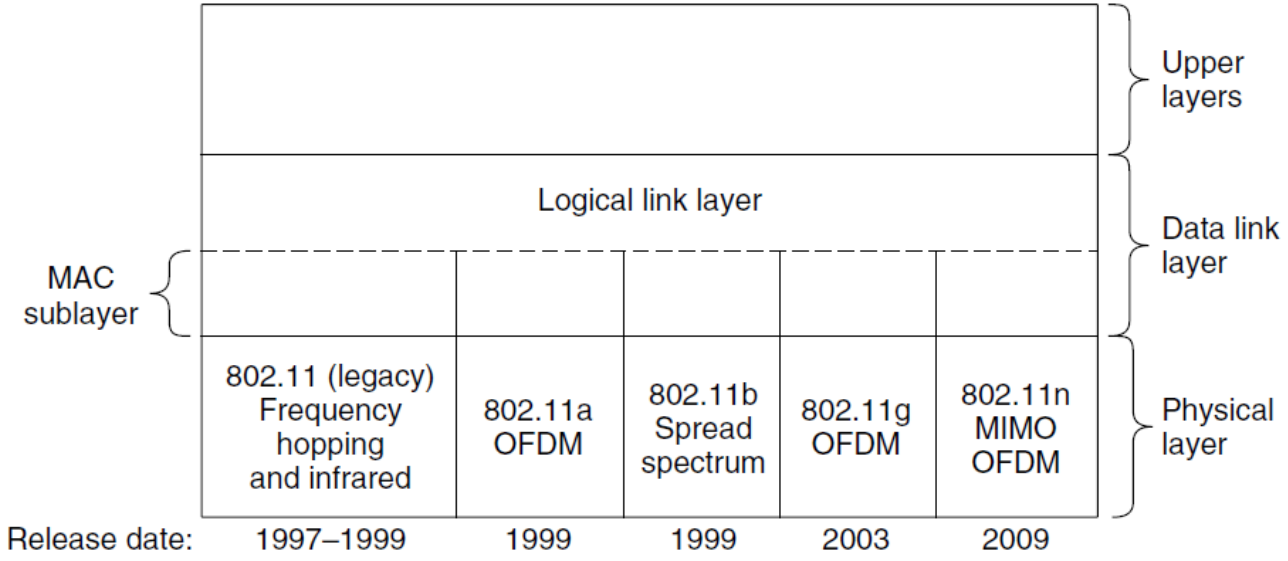
- En este modo, las estaciones se 'asocian' entre sí y no hay punto de acceso;
- Aplicaciones típicas incluyen compartir datos ante la ausencia de un 'AP', como conferencias, por ejemplo



IEEE 802.11 (4) - Stack de protocolos

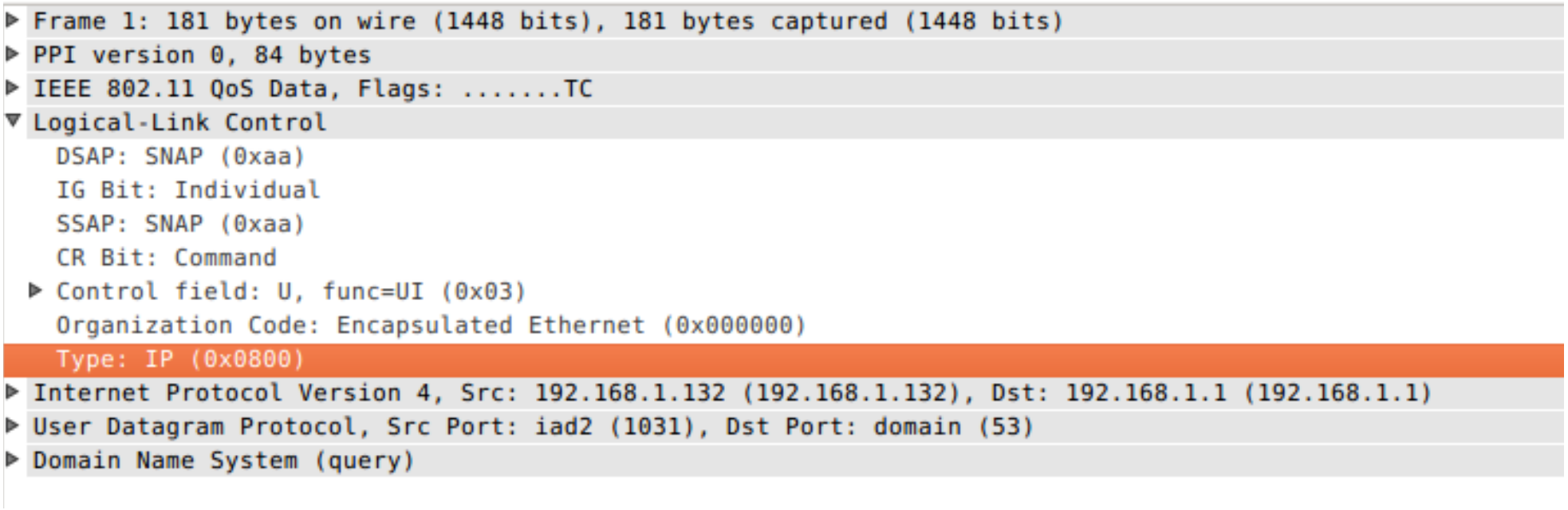


IEEE 802.11 (5) - Stack de protocolos



- La capa física se corresponde bien con el modelo OSI;
- La subcapa MAC es la encargada de correr los algoritmos que asignan el canal (quién transmite). Es la misma tanto en los clientes como en los 'AP';
- Por compatibilidad con otros estándares IEEE 802, la capa LLC permite la interacción, por ejemplo, con las capas superiores (es decir, se incluye aquí el campo Ethertype).

IEEE 802.11 (6) - Stack de protocolos



Capa Física

Capa Física (1)

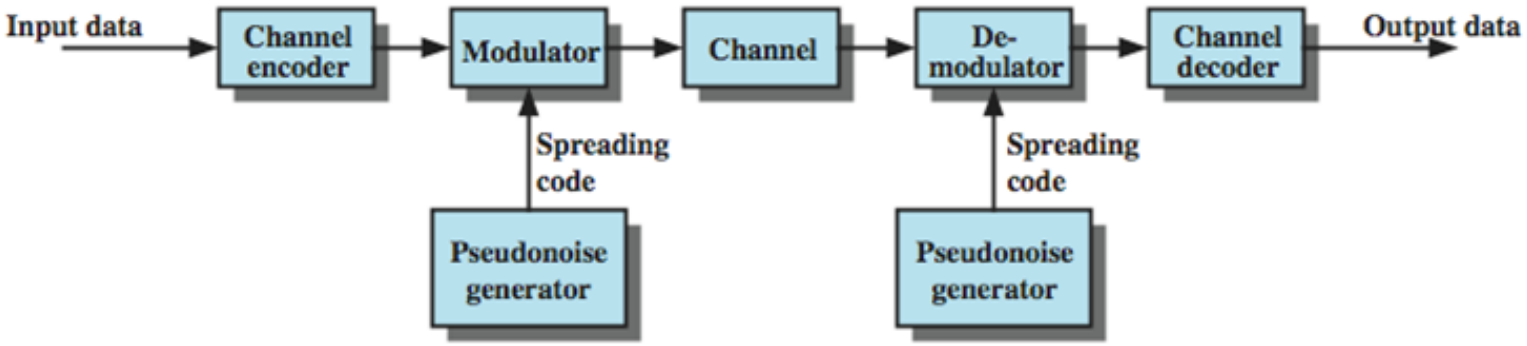
- Todas las versiones de 802.11 usan enlaces de radiofrecuencia en la banda ISM a 2.4GHz o 5GHz.
- Las tasas de transferencia dependen básicamente del esquema de codificación y modulación (MCS – Modulation and Coding Scheme) y de la banda utilizada:
  - Infrarrojos (IR);
  - Espectro expandido de secuencia directa (DSSS);
  - Espectro expandido con salto de frecuencia (FHSS);
  - Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM)
  - Múltiples entradas/Múltiples salidas -diversidad de antenas- (MIMO – Multiple Input/Multiple Output) sobre OFDM.

Capa Física (2) - IR

- 802.11 sobre enlaces infrarrojos no es prácticamente utilizado (de hecho está casi extinto);
- Sólo uso interno;
- Tasa de transferencia: 1-4Mbps;
- Requiere línea de vista (LOS);
- Modulación: ASK.

Capa Física (3) – Spread Spectrum

- El método Spread Spectrum se basa en la idea de expandir la energía de la señal transmitida de tal forma que utilice un espectro mucho más amplio y relativamente independiente de la tasa de bits de información original;
- Un método para expandir el espectro de una señal es modulándola una segunda vez por una señal expansora de banda ancha [2];

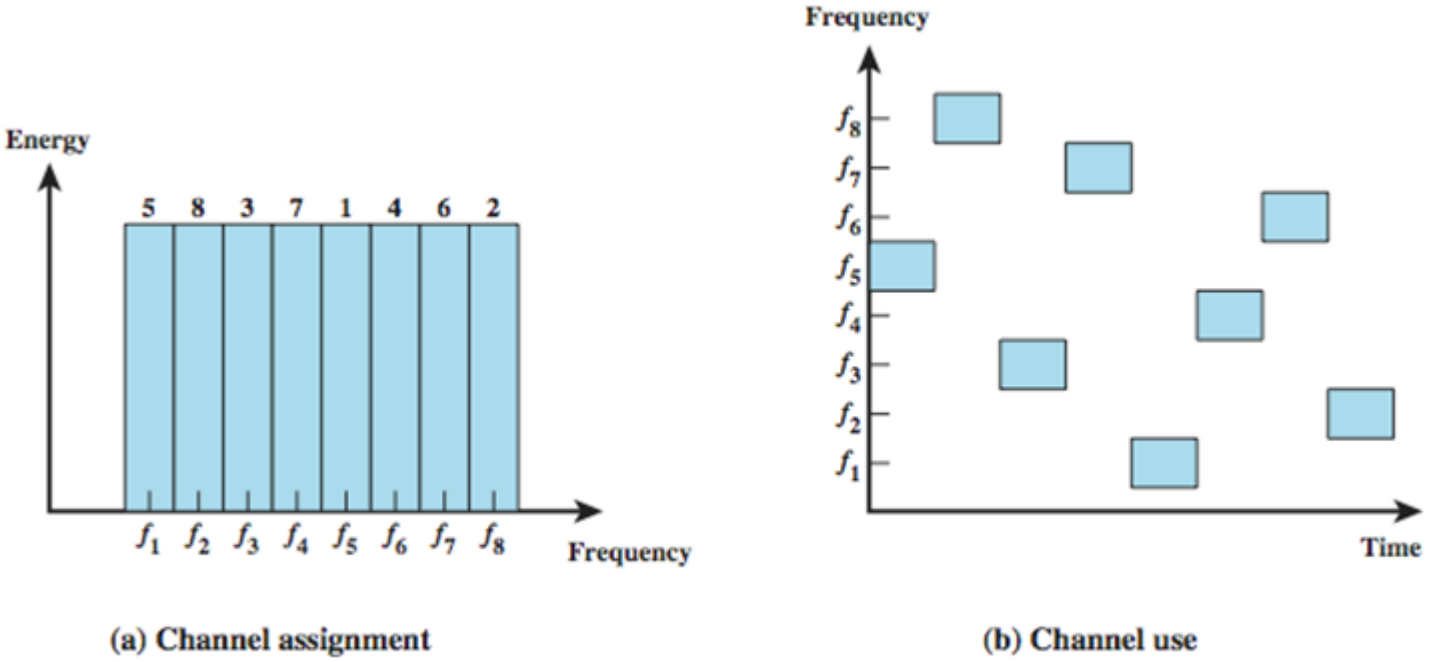


Capa Física (4) – Spread Spectrum

- Existen dos métodos para expandir el espectro:
  - **Frequency hopping (FH)**: transmite sobre distintos canales siguiendo una secuencia pseudo-aleatoria;
  - **Direct Sequence (DS)**: cada bit de información de la trama es reemplazado por una secuencia de 'm' chips en la señal a transmitir. Esta secuencia es conocida tanto en el emisor como en el receptor.
    - El ancho de banda en este caso se expande en relación directa con el valor 'm'.

Capa Física (5) - FHSS

- Prácticamente ya no se utiliza en 802.11;
- Banda ISM @2.4GHz;
- En EEUU la FCC estableció el uso de 79 canales de 1MHz, con frecuencia central en 2.402GHz;
- Tanto el transmisor como el receptor, deben compartir la secuencia de saltos, para poder modular/demodular la señal apropiadamente.



Capa Física (6) - FHSS

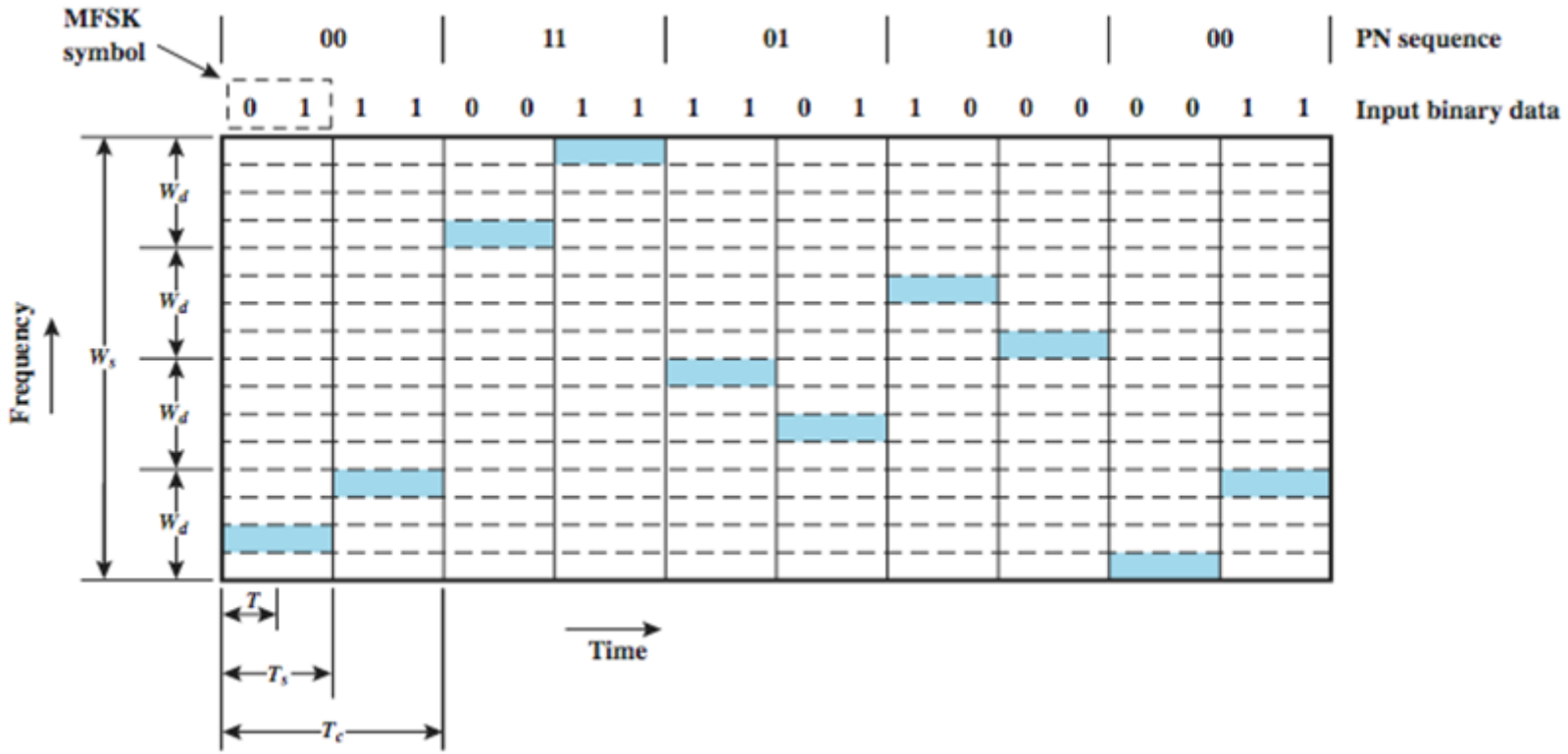
- Si consideramos la modulación digital FSK [3] para la información, la señal se puede escribir de la siguiente manera:

$$x(t) = A\, sen\left\{ \int_0^t \left[\omega_c + (\Delta_w) \cdot p(t) \right] dt \right\}$$

- Donde:
  - ω_c es la portadora central;
  - *p(t)* es la secuencia de bits de información que en conjunto con el código pseudo aleatorio PN van modificando Δ_W y finalmente provoca el cambio de ω_c [4]
  - Sin el código PN, la fórmula describe una señal modulada solamente en FSK
  - El valor entre corchetes [ ] es simplemente la frecuencia instantánea:
    - $\omega_i = d\Theta / dt$

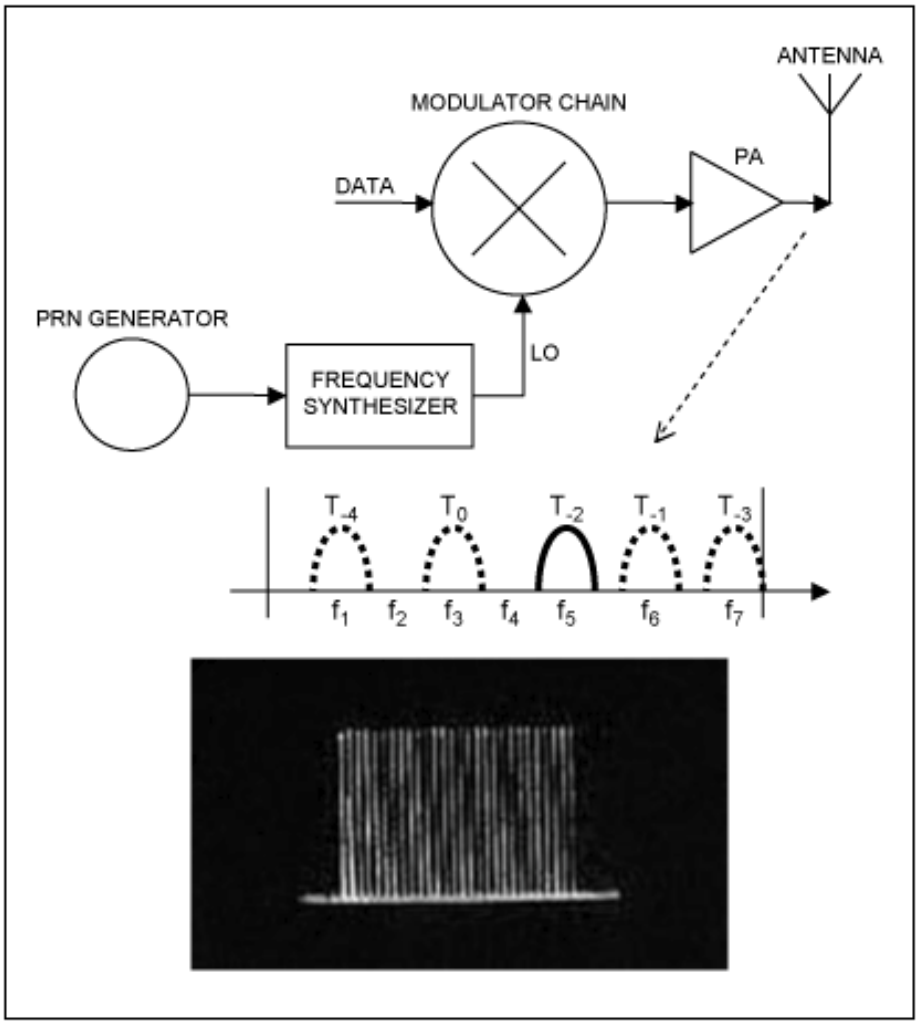
Capa Física (7) - FHSS

- En la imagen se aprecia como ejemplo el caso de tener un PRN de 2 bits y nuestra información a 2bits/símbolo
  - Esto quiere decir que, sin aplicar FHSS, necesitaríamos 4 frecuencias para enviar nuestra información.
  - Al utilizar FHSS con un PRN de 2 bits, necesitamos entonces 16 frecuencias.



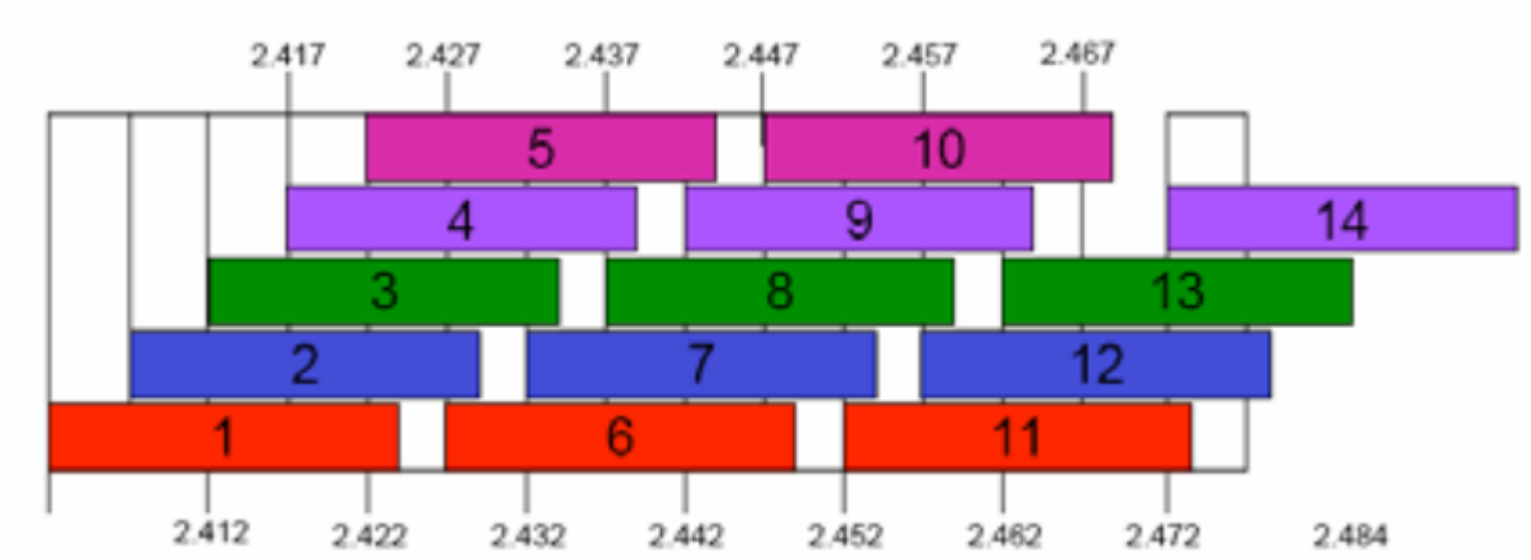
Capa Física (8) - FHSS

- Entonces, para aplicar FHSS se debe modificar la frecuencia central a saltos discretos.
- El espectro ocupado es simplemente N veces la cantidad de bandas disponibles, siendo N el ancho de banda un subcanal.
- El sintetizador de frecuencia produce una senoidal de amplitud constante cuya frecuencia está dictaminada por el PRN provisto [4].



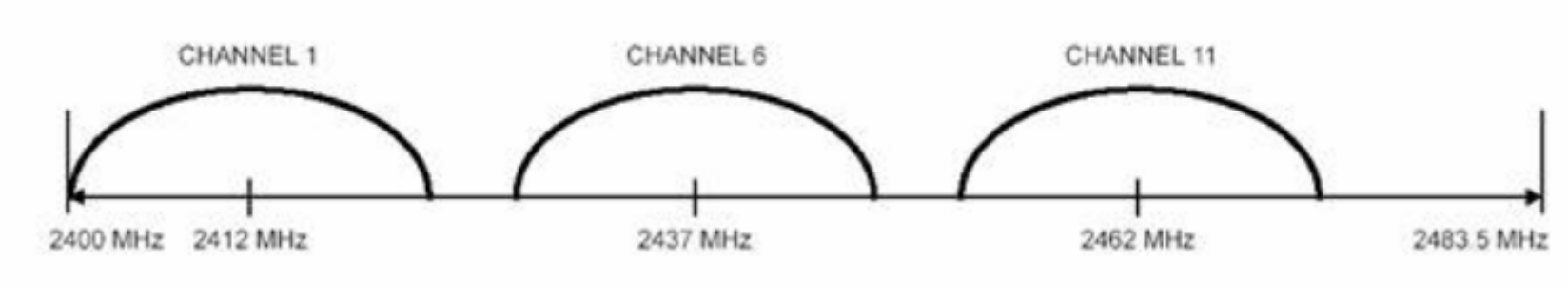
Capa Física (9) - DSSS

- Banda ISM @2.4GHz;
- La banda se divide en 14 canales de 22MHz cada uno.
- Para prevenir interferencias, sólo los canales 1, 6 y 11 son utilizados.



Capa Física (10) - DSSS

- Aquí se observan los canales 1, 6 y 11 y sus respectivas frecuencias centrales.

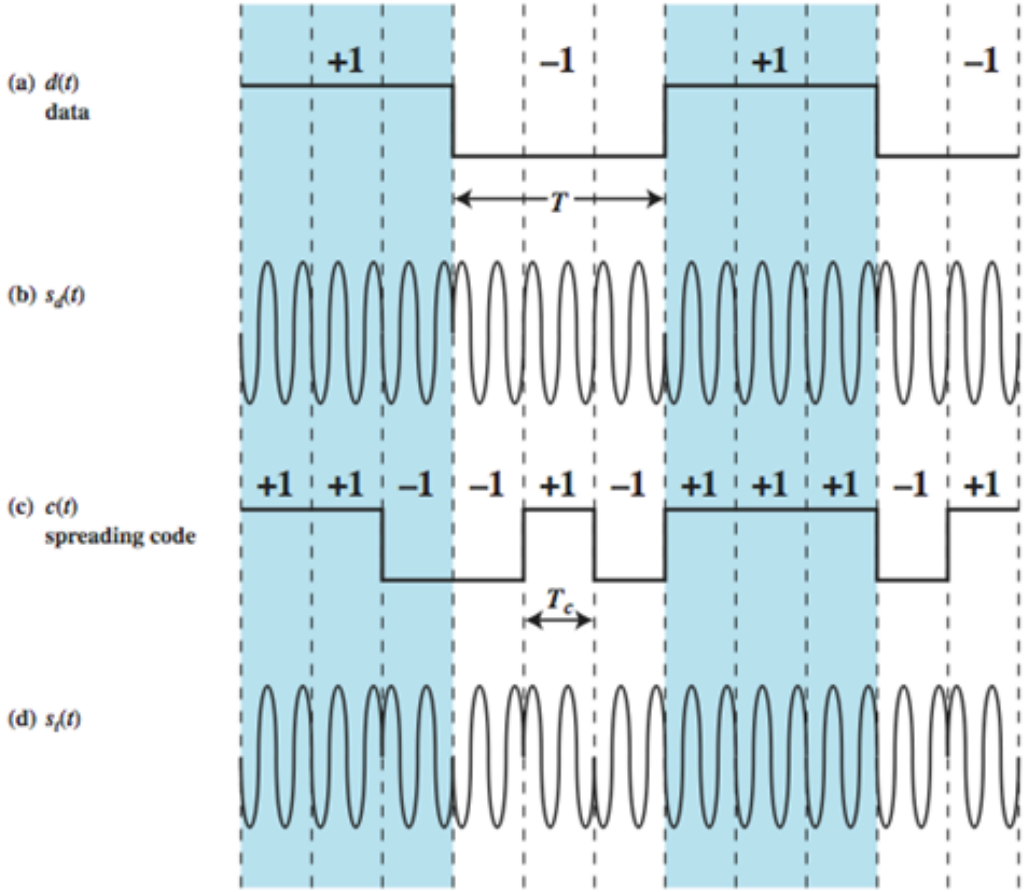


Capa Física (11) - DSSS

- El método de Direct Sequence Spread Spectrum se basa en el uso de códigos de Barker: $+1,-1,+1,+1,-1,+1,+1,+1,-1,-1,-1$
- Son códigos ortogonales: sólo se demodula si se conoce la secuencia correcta;
- Se modula por segunda vez la señal con dicho código y se consigue así la expansión de la señal por sobre todo el espectro.
- Variantes:
  - 1Mbps: 11Chips/1bit con modulación BPSK;
  - 2Mbps: 11Chips/2bit con modulación QPSK;
    - En ambos casos todos los elementos (AP y estaciones) usan la misma sequencia de Barker;
  - Para 5.5 y 11Mbps, se utiliza modulación CCK (Complementary Code Keying)
    - 5.5Mbps: 8Chips/4bits
    - 11Mbps: 8Chips/8bits

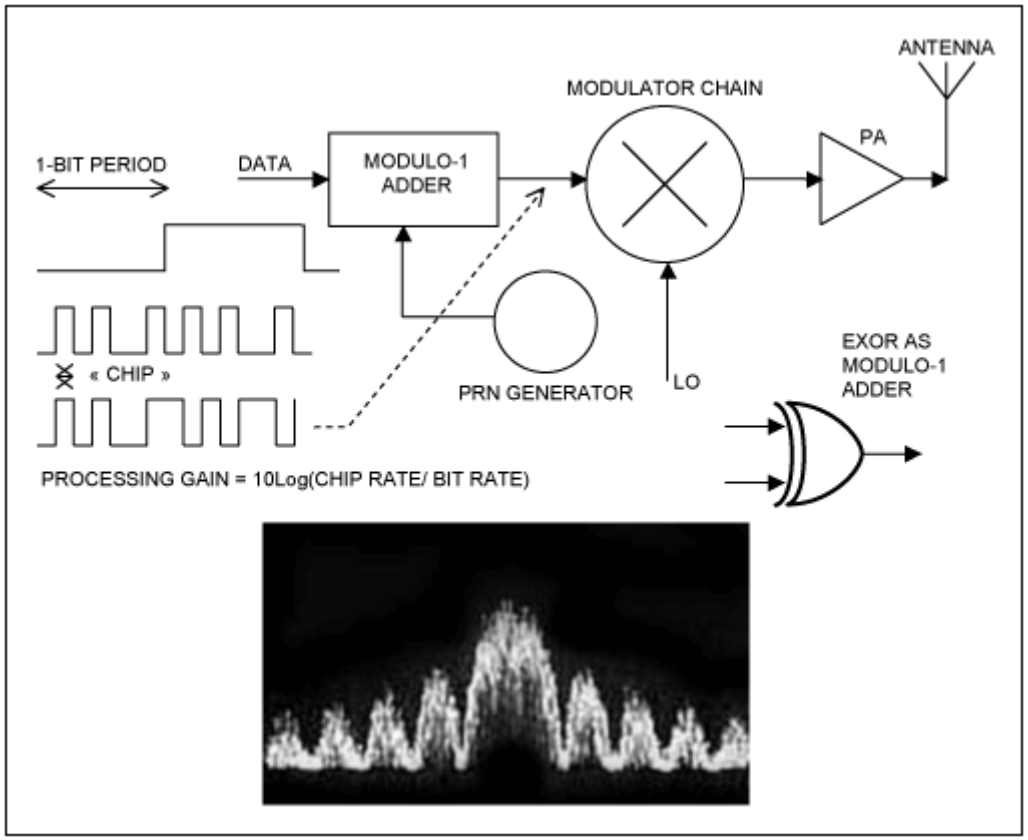
Capa Física (12) - DSSS

- Usando modulación BPSK: $x(t) = A \cdot c(t) \cdot d(t) \cdot \cos(w_c t)$
- En la fórmula, *c(t)* representa el código de expansión mientras que *d(t)* es la información propiamente dicha.



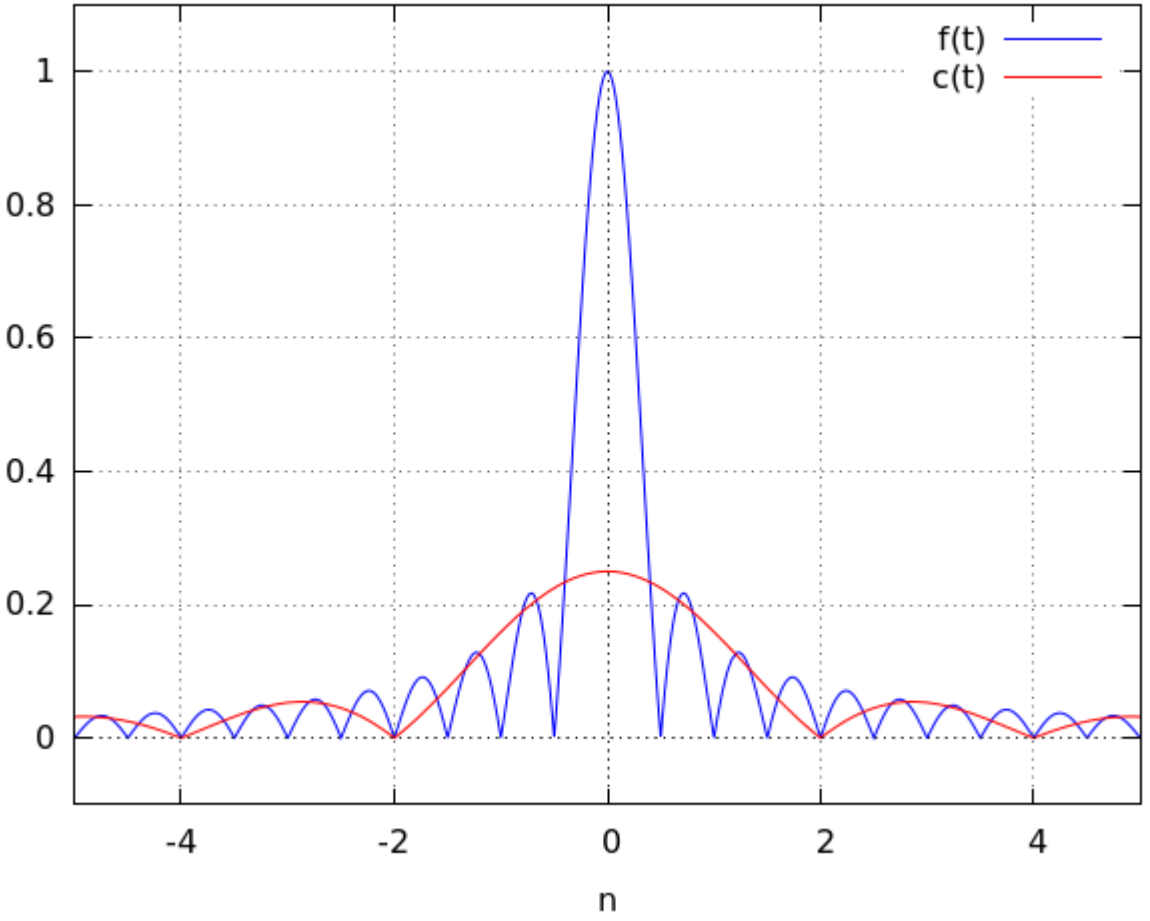
Capa Física (13) - DSSS

- Entonces, para aplicar DSSS, se deben modificar los bits de información aplicando chips/bits.
- El espectro ocupado se puede analizar obteniendo los coeficientes de la serie de Fourier para la señal cuadrada.



Capa Física (14) - DSSS

$$a_{n_{bit}} = \frac{\sin\left(\frac{8\pi n T_{chip}}{T_0}\right)}{\pi n} \quad ; \quad a_{n_{chip}} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi n T_{chip}}{T_0}\right)}{\pi n} \quad ; \quad T_{bit} = 4 \cdot T_{chip}$$

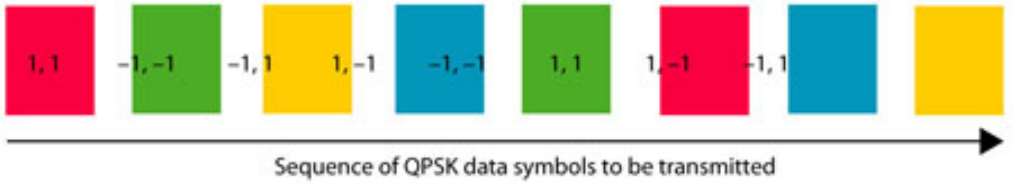


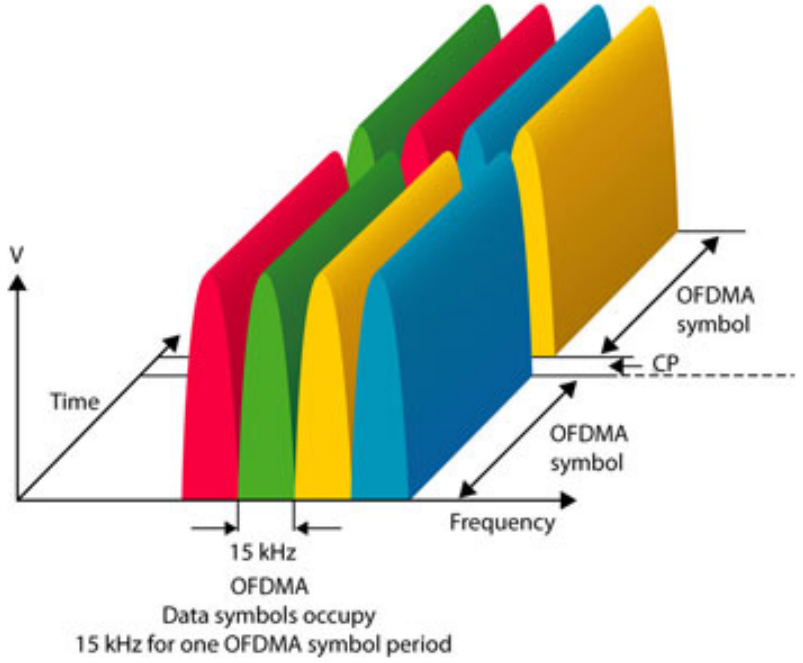
Capa Física (15) - OFDM

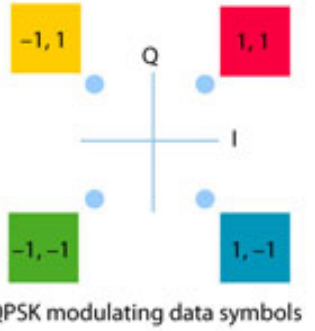
- En particular para 802.11a/g, la capa física se basa en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing);
  - 802.11a trabaja en 5Ghz mientras que 802.11g trabaja en 2.4Ghz, haciéndola compatible con 802.11b
- Los bits de información se envían a través de 52 subportadoras en paralelo
  - 48 son de datos y 4 para sincronización;
  - Cada banda modulada en QAM multinivel;
    - Se pueden usar modulaciones y codificaciones distintas según el usuario de destino;
- Implementan códigos con corrección de errores
- Tasas variables desde 6Mbps a 54Mbps

Capa Física (16) - OFDM

- Tiene buena respuesta al multi-path debido a la cantidad de frecuencias que se utilizan;
- Resumen OFDM: mezcla de técnicas FDM + TDM:

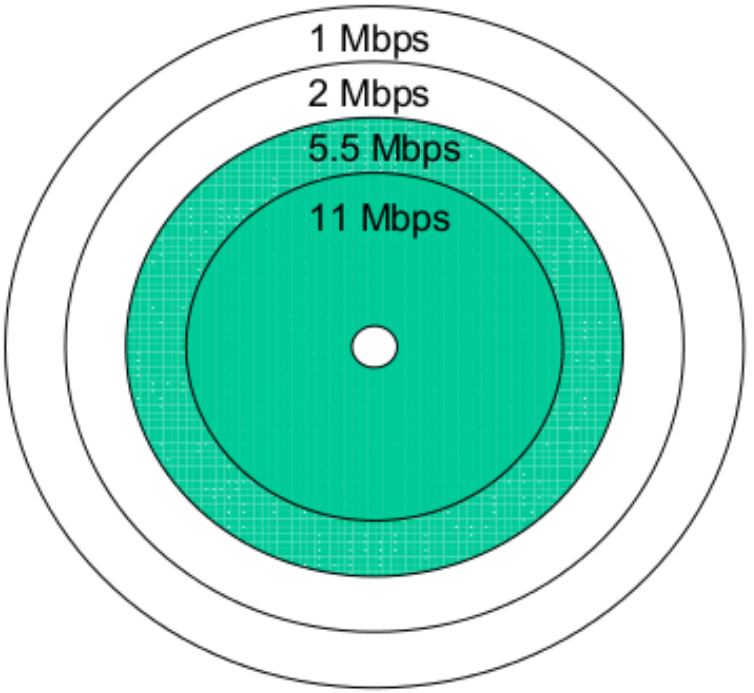






Capa Física (17) – Multi rate

- Permite adaptar las funciones de modulación y codificación de acuerdo al estado del canal;
- Conforme aumenta la distancia, la calidad del canal disminuye;
- Hace falta una relación de compromiso entre rango a cubrir y velocidad de datos.
- Si hay una considerable pérdida de paquetes, las estaciones reducen la tasa cambiando el MCS.
  - Recordemos que las tasas más bajas usan modulaciones más robustas donde la probabilidad de error es mucho menor ya que hay menos símbolos [5].



Capa Física (18) – Resumen

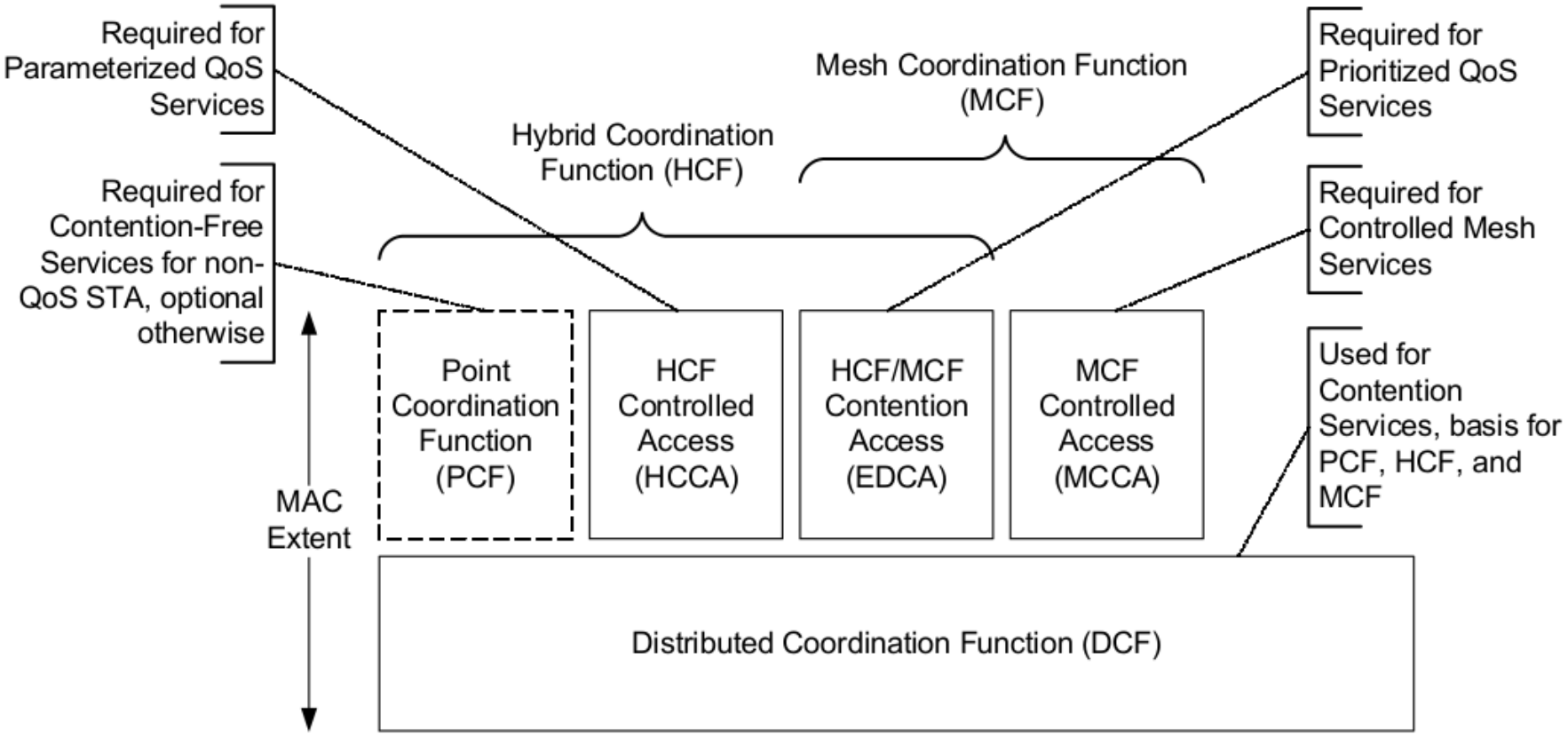
Standard	Frequency Range	Theoretical maximum	Effective throughpu	Range	Topology	Access	Spread Spectru
802.11	2.4 GHz	2 Mbps	< 1Mbps		Ad-hoc/infrastructure	CSMA/CA	FHSS/DSSS
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	5 Mbps	100 m	Ad-hoc/infrastructure	CSMA/CA	DSSS
802.11a	5 GHz	54 Mbps	11-18 Mbps	20 m	Ad-hoc/infrastructure	CSMA/CA	OFDM
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	20-25 Mbps	100 m	Ad-hoc/infrastructure	CSMA/CA	DSSS
802.11n	2.4 or 5 GHz	65 to 600 Mbps	65-600 Mbps	upto 400 m if MIMO used	Ad-hoc/infrastructure	CSMA/CA	DSSS
Bluetooth 1.x	2.4 GHz	1 Mpbs	723 Kbps	10 m	Ad-hoc	Master/Slave taking turns	FHSS
Bluetooth 2.0	2.4 GHz	2.1 Mbps	1.5 Mbps	30 m	Ad-hoc	Master/Slave taking turns	FHSS

Capa MAC

Capa MAC (1) – Conceptos Generales

- El estudio de la capa MAC de 802.11 se entiende bien comprendiendo que para acceder al medio básicamente hay que saber esperar antes de transmitir;
- Visto que no se pueden detectar las colisiones [5] es preciso ser respetuoso de los tiempos;
  - Como no se pueden detectar colisiones, se usa el algoritmo CSMA/CA **(Collision Avoidance)**
- Existen dos formas de acceder al medio (DCF y PCF) y cada una conlleva ciertos tiempos o guardas a respetar (SIFS, PIFS, DIFS);
- Existe también un tiempo aleatorio llamado retroceso aleatorio (exponential back-off) que define la duración de la ventana de contención;
- El tiempo se divide en partes, o time slots:
  - El sistema es síncrono y las estaciones se sincronizan entre sí (ad-hoc) o contra el AP (infraestructura);
  - La duración del TimeSlot depende de la capa física;
  - Cada TimeSlot tiene una duración de 20[μs] en 802.11b

Capa MAC (2) – Conceptos Generales



Capa MAC (2) – Tipos de tramas

- **Control**: son tramas de corta duración y se usan para confirmación y control de acceso al medio
  - ACK, RTS (request to send), CTS (clear to send)
- **Datos**: son los datos del usuario propiamente dicho;
- **Gestión**: son tramas que se utilizan para establecer/liberar la conexión, para la autenticación, etc.

Capa MAC (3) – Tiempos (1/5)

- **SIFS**: Short Inter Frame Space
  - Las tramas cortas esperan SIFS antes de ser transmitidas
  - Duración: 10[μs] en 802.11b;
    - Notar que SIFS < $\text{TimeSlot}_{\text{duration}}$
  - Tiempo usual para conmutar entre transmisión y recepción;

Capa MAC (4) – Tiempos (2/5)

- **PIFS**: Point Coordination Inter Frame Space
  - Se utiliza cuando el método de acceso está dictaminado por el proceso PCF (casi no utilizado)
  - Duración: PIFS = SIFS + 1 time_slot
    - En 802.11b PIFS = 30[μs]

Capa MAC (5) – Tiempos (3/5)

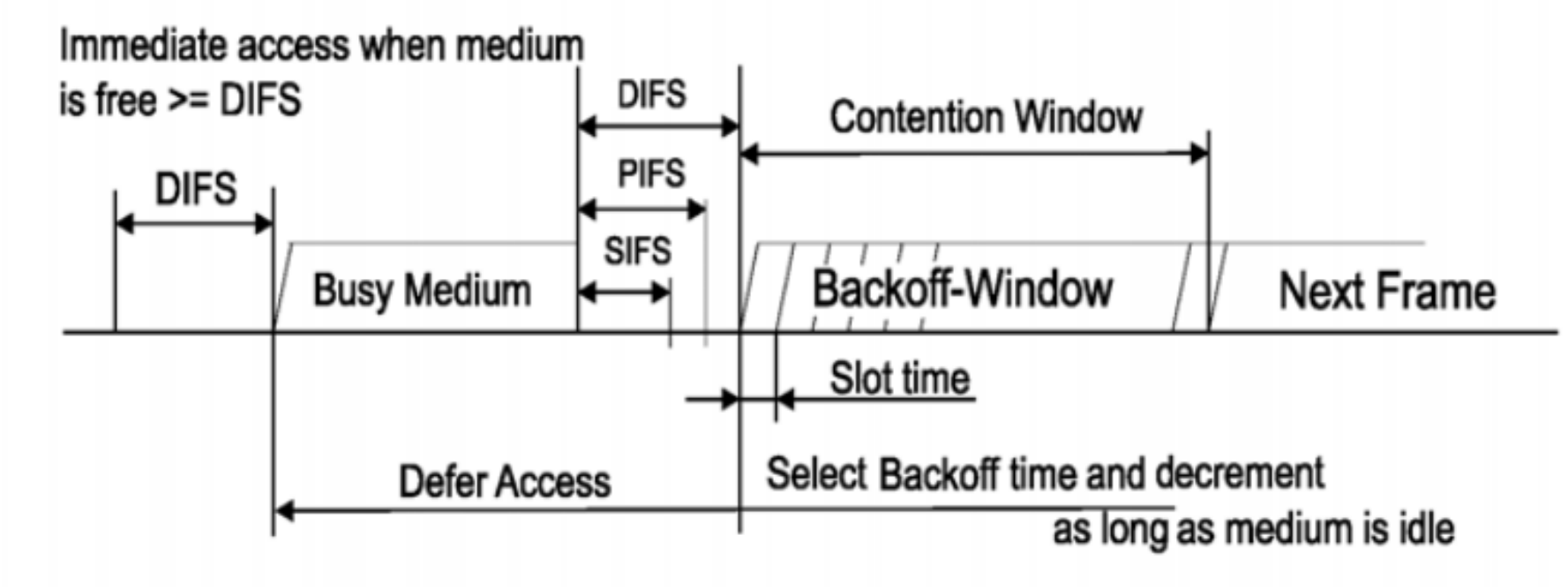
- **DIFS**: Distributed Coordination Inter Frame Space
  - Se utiliza cuando el método de acceso está dictaminado por el proceso DCF (la mayoría de los casos)
  - Duración: DIFS = SIFS + 2 x time_slot
    - En 802.11b DIFS = 50[μs]

Capa MAC (6) – Tiempos (4/5)

- **Retroceso Exponencial: Exponential Back-off, define la ventana de contención**;
- Calculado como BackoffTime = Random() x SlotTime
  - *Random()* es un entero pseudoaleatorio uniformemente distribuido, comprendido entre [0,CW], siendo $CW(i) = 2^i - 1$
  - $CW_{min} < CW < CW_{max}$. Los valores MAX y MIN de la ventana de congestión dependen de la capa física utilizada [6]
  - *i* representa la cantidad de (re)transmisiones. Para la transmisión inicial, *i* debe ser tal que represente CW_{min}.
    - Para 802.11b, $CW_{min} = 31 \Rightarrow i = 5$;
  - Cuando la transmisión es exitosa, se resetea el valor de CW_{min}, sino, se sigue incrementando.

Capa MAC (7) – Tiempos (5/5)

- Resumen de tiempos [7]:

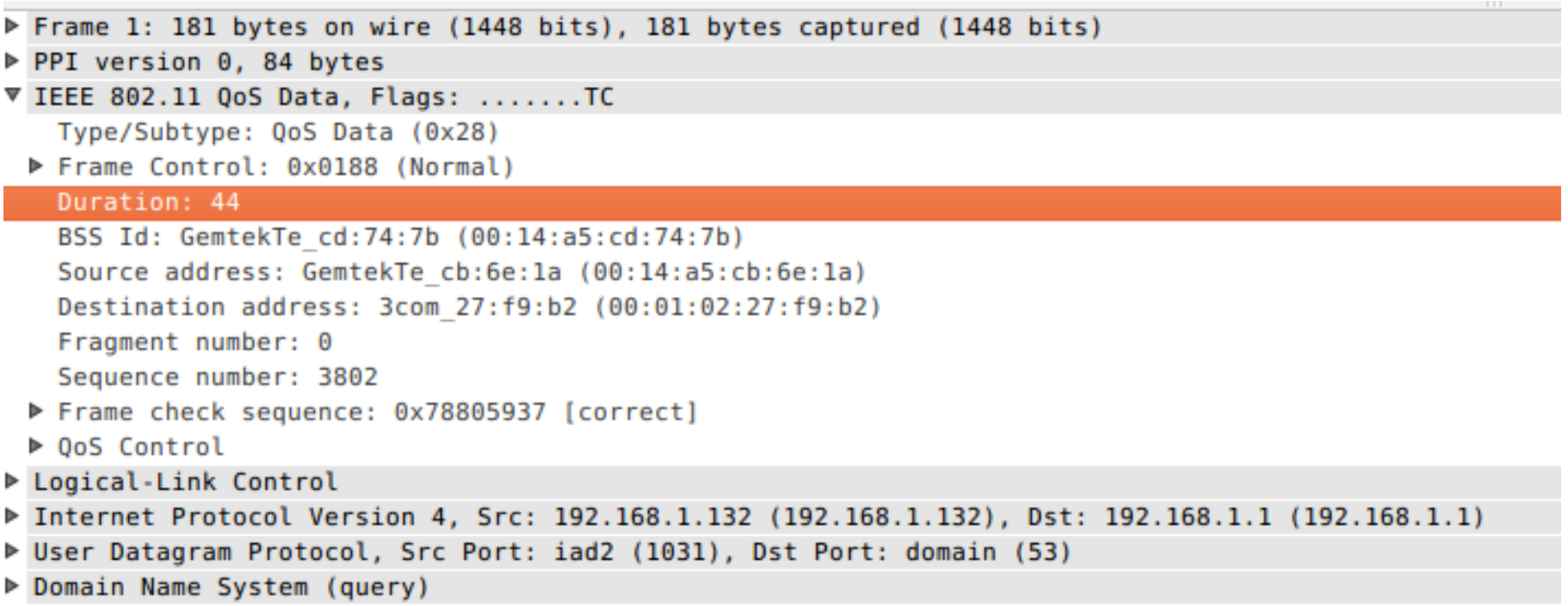


Capa MAC (8) – DCF (1/6)

- **DCF: Distributed Coordination Function**
- Todas las estaciones utilizan DCF (tanto el AP como los nodos)
- La estación debe detectar que el canal esté libre:
  - **Detección física de portadora**: Se da cuenta de que está libre puesto que no detecta señal portadora (CSMA);
  - **Detección virtual**: cada trama 802.11 lleva dentro de sí la duración de la PDU;

Capa MAC (9) – DCF (2/6)

- **NAV: Network Allocation Vector**
- Cada estación lleva un contador donde almacena la duración de la trama que está actualmente ocupando el canal.
- Las estaciones vecinas analizan el campo Duration de la trama y actualizan su contador de duración interno;
- Una vez que dicho contador llega a 0, las estaciones pueden competir de nuevo por el acceso al medio.



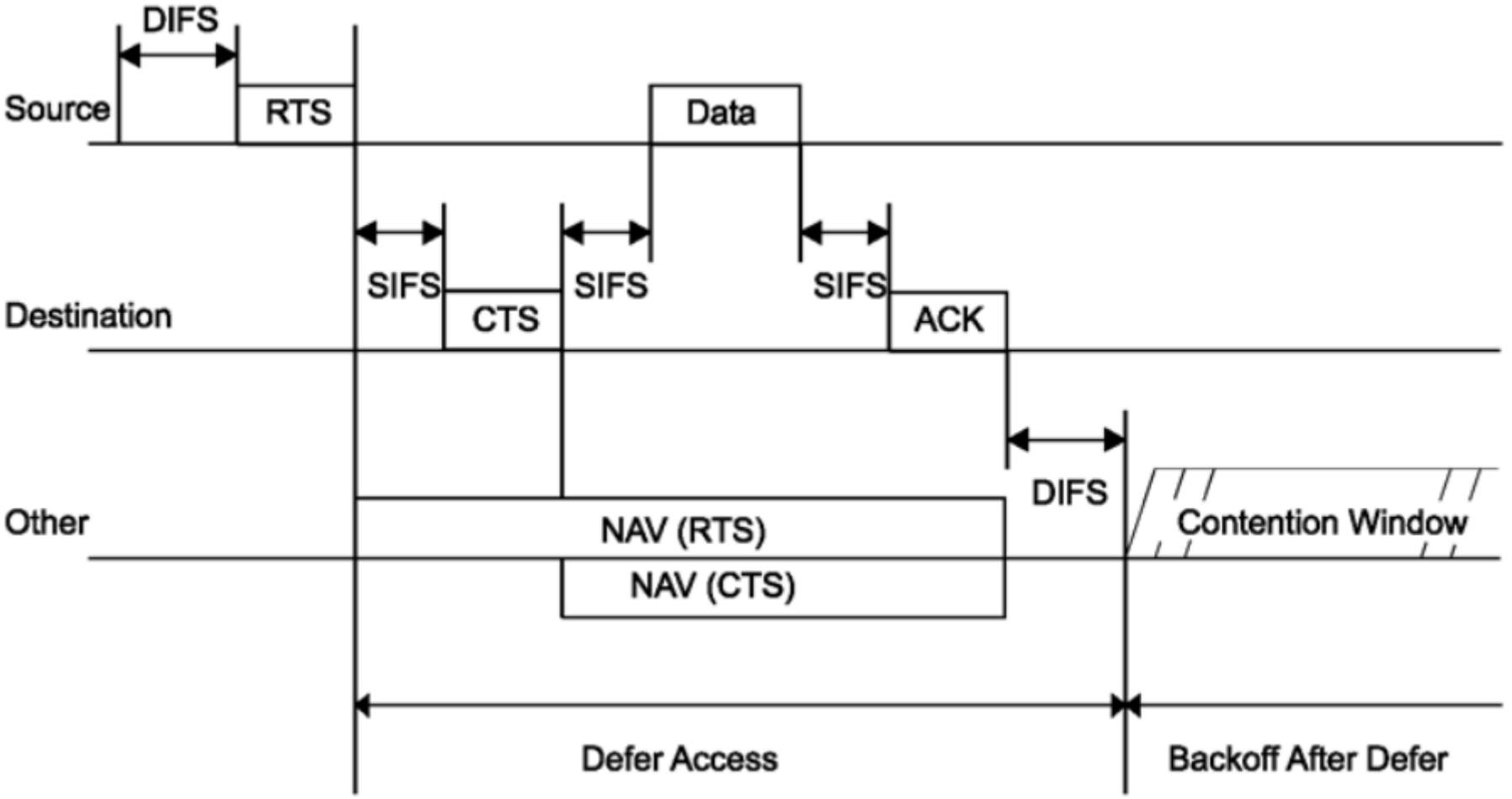
Capa MAC (10) – DCF (3/6)

- Antes de transmitir, se debe escuchar el canal (CSMA);
- Si está disponible, se espera un tiempo DIFS (CA);
- Una vez que DIFS se cumple, se transmite la PDU.
- Los vecinos actualizan sus respectivos NAVs al valor indicado en la PDU transmitida (CA);
  - $NAV_{duration} = PDU_{duration} + 1 \times SIFS + ACK_{duration}$
- El receptor computa el FCS;
- Si el FCS fue correcto, espera un tiempo SIFS y envía inmediatamente un mensaje CTS/ACK;
  - El mensaje CTS/ACK se debe transmitir siempre a la misma tasa utilizada por el transmisor.

Capa MAC (11) – DCF (4/6)

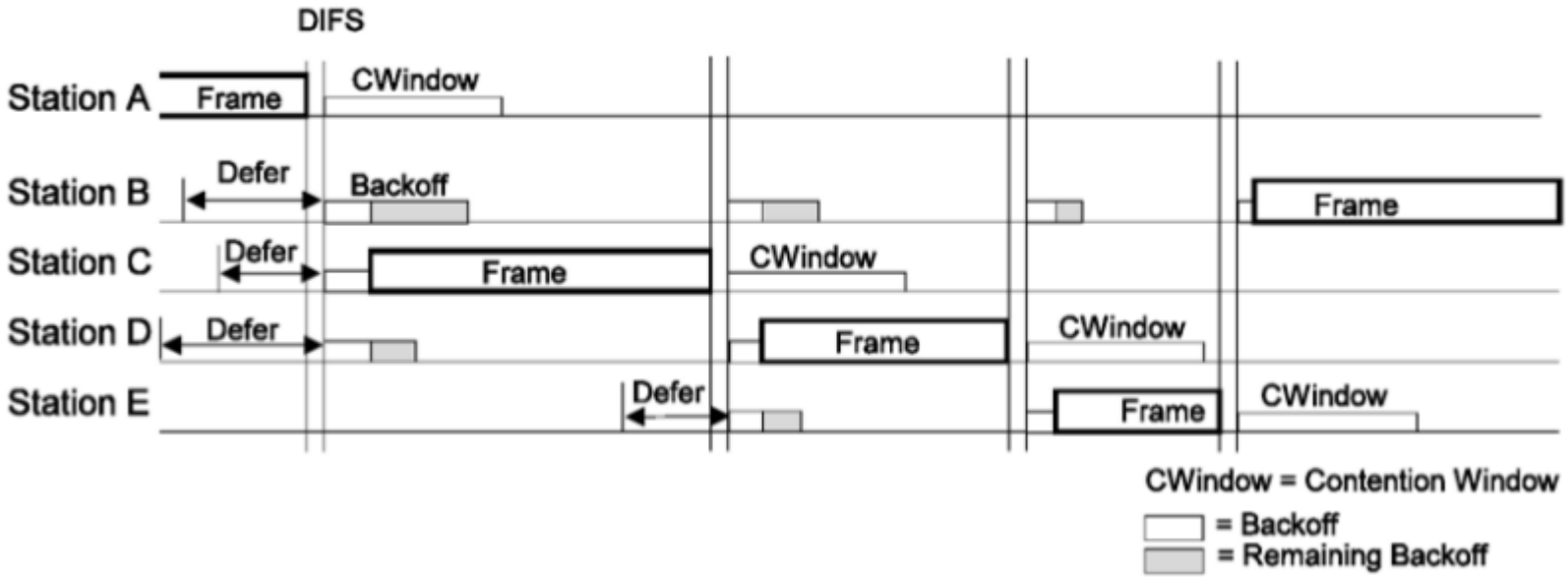
- Si la estación determina que el canal está ocupado, espera hasta que se libere;
- Una vez que se libera, espera una vez más un tiempo igual a DIFS;
  - Adicionalmente se computa el tiempo de BackOff (ya que el canal estuvo ocupado al querer transmitir);
  - Se establece el contador de BackOff a este valor calculado;
- Una vez que el contador de BackOff llegue a 0, puede empezar la transmisión.

Capa MAC (12) – DCF (5/6)



Capa MAC (13) – DCF (6/6)

- Si, durante el tiempo de backoff, se detecta que el medio está ocupado, **se debe congelar el decremento del contador** (fairness behavior);
  - Para continuar decrementando el contador de backoff, **hay que esperar un tiempo igual a DIFS.**
- Finalmente, luego de una transmisión exitosa, **siempre se debe esperar un tiempo igual al del backoff**, antes de continuar**.** Como la transmisión fue exitosa, entonces CW = Cw_{min} [8].

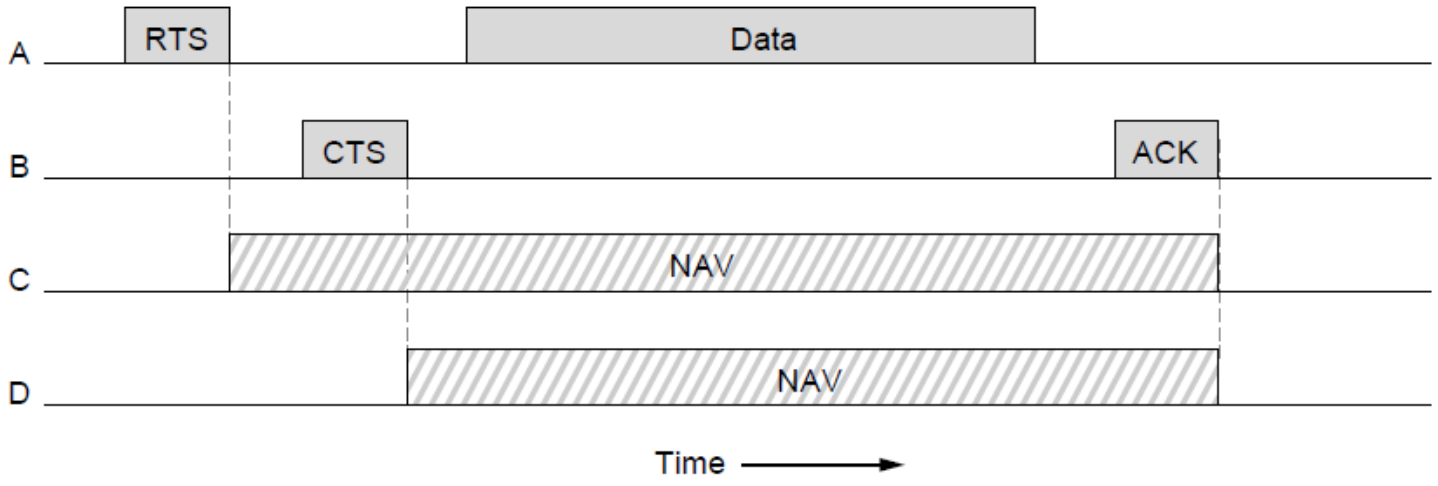


Capa MAC (14) – DCF Hand Shake (1/2)

- El DCF hand shake es un método que ayuda a mitigar el problema de las estaciones ocultas (y expuestas);
  - Las estaciones ocultas son aquellas que reciben CTS pero no el RTS o viceversa (es decir, que sólo reciben uno de los dos mensajes por estar fuera de rango);
  - De cualquier manera, al solucionar el problema de estación oculta, surge el problema de estación expuesta [11]: Las estaciones expuestas se asumen como tal cuando envían un RTS pero no reciben el CTS asociado dentro de un cierto tiempo porque comunicaciones aledañas hacen creer que hay posibilidad de colisión. En ese caso resetean el NAV propio y reinician el proceso para acceder al medio [5][10];
- Se sirve también del campo duración, lo que permite a las estaciones ocultas y expuestas estimar la duración de ocupación del canal;
- Este método es particularmente eficaz cuando se han de transmitir tramas grandes;
- Útil también cuando hay un gran número de estaciones compitiendo por el acceso al medio;
- El procedimiento incluye el envío de tramas de corta duración para pedir permiso (RTS – Request to Send) y sólo se puede comenzar la transmisión al recibir la confirmación (CTS – Clear to Send)
  - La tasa a la que se envían estos mensajes es la básica;
  - El tiempo entre un RTS y CTS es igual a SIFS;

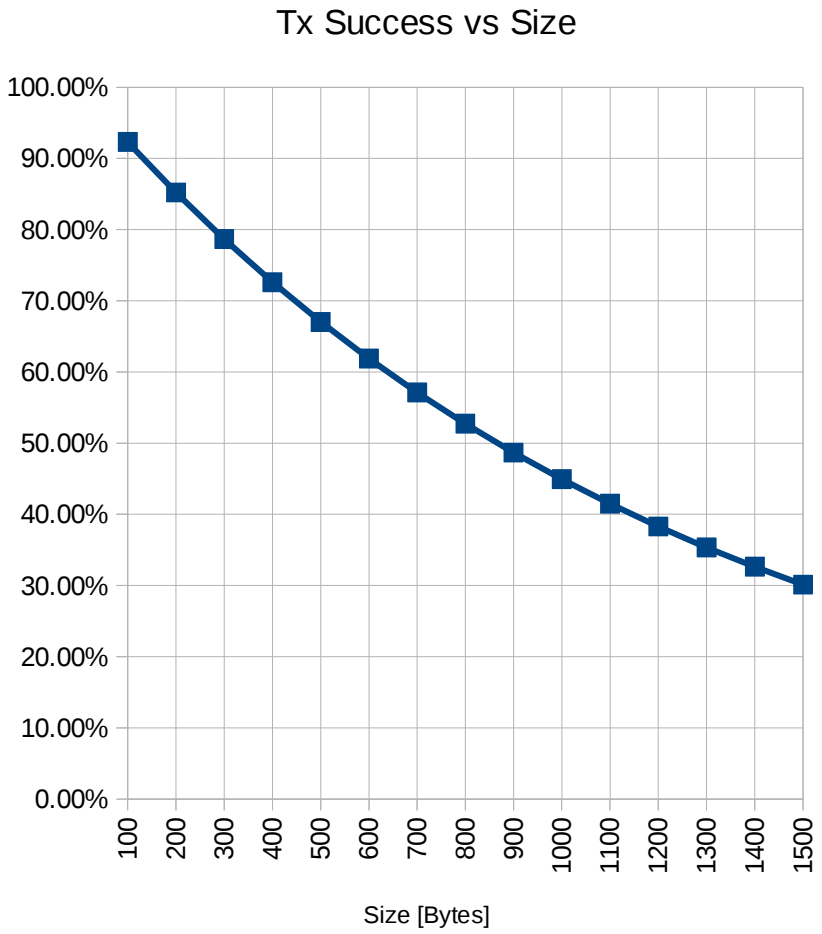
Capa MAC (15) – DCF Hand Shake (2/2)

- En el ejemplo, 'A' envía un RTS a 'B'. 'C', por estar en radio de alcance, detecta el mensaje enviado por 'A' y actualiza su vector NAV;
- 'D' no escucha el RTS, pero sí escucha el CTS enviado por 'B' ('D' es estación oculta). Notar que 'D' actualiza apropiadamente su vector.
  - El valor de la duración se actualiza en la respuesta CTS que envía 'B'. Debe ser la recibida en el RTS menos el valor de 1 x SIFS y el valor de microsegundos que requiere la transmisión del CTS correspondiente [9];
  - Cuando comience la transmisión de los datos, el NAV = $PDU_{duration}$ + 1 x SIFS + $ACK_{duration}$



Capa MAC (16) – DCF Fragmentación (1/1)

- Si BER = 10^{-4}, con una longitud de trama de 1500 bytes (12000 bits), entonces $P_{éxito} = (1\text{-BER})^n = 30\%$;
- Para reducir la probabilidad de error, 802.11 permite fragmentar los datos en piezas más pequeñas;
- Los fragmentos se enumeran en forma individual y la correcta recepción se informa en base a un protocolo de parada y espera ARQ (stop and wait);
- Una vez que el canal es adquirido por parte de la estación origen, se envían todas las subtramas a modo ráfaga.

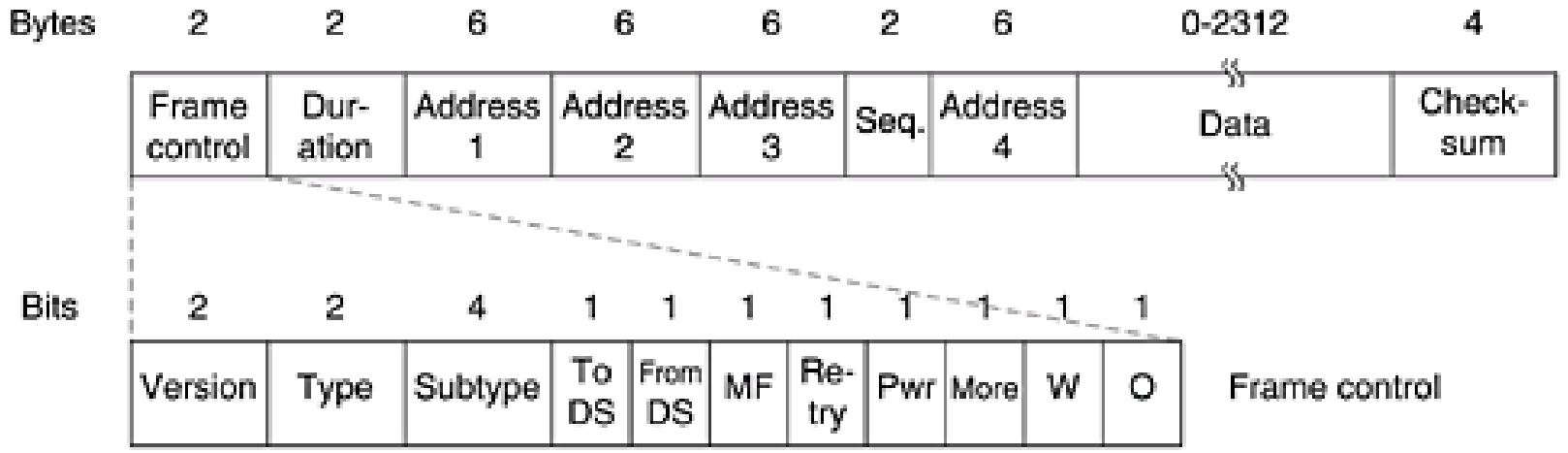


Capa MAC (17) – PCF (1/1)

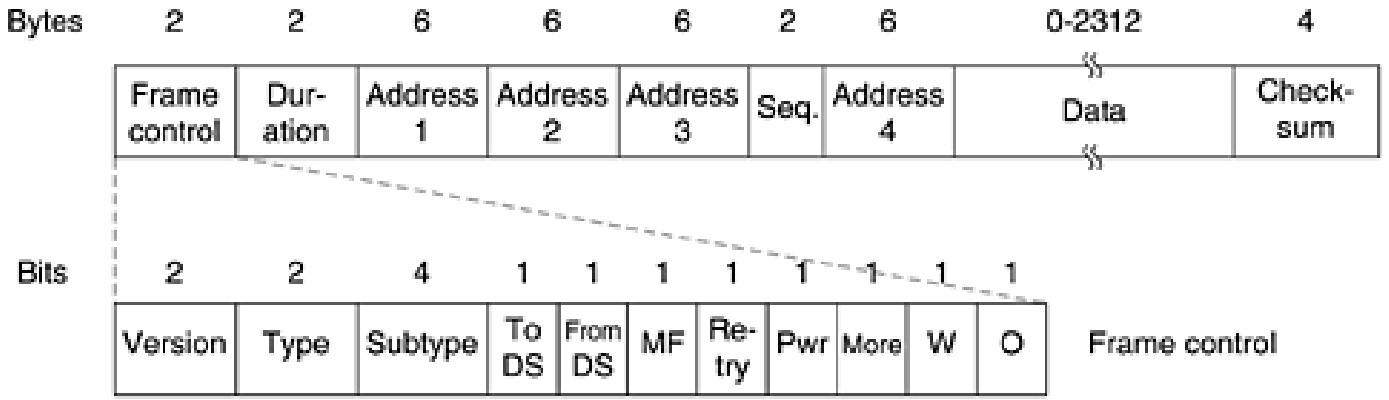
- **PCF: Point Coordination Function**
- A diferencia de DCF, donde todos los nodos compiten por el acceso al medio en base a contienda, en PCF el AP controla toda la actividad;
- No hay contienda;
- El AP decide quién transmite y cuándo;
  - Realiza un sondeo transmitiendo periódicamente beacons de datos indicando quién tiene acceso al canal;
  - Sólo es posible en redes de tipo infraestructura;
  - El AP tiene una lista (estática) de nodos que quieren participar en el entorno CF (Contention-Free);
- Igualmente no es un método muy utilizado ya que no se puede evitar que nodos circundantes transmitan tráfico conflictivo;

Formato de trama 802.11 (1/4)

- Existen tres tipos de trama: control, datos y gestión;
  - Se definen en el subcampo Type, del campo FrameControl.
- En la figura sólo analizamos la estructura de la **trama de datos** (y sólo los campos más relevantes);

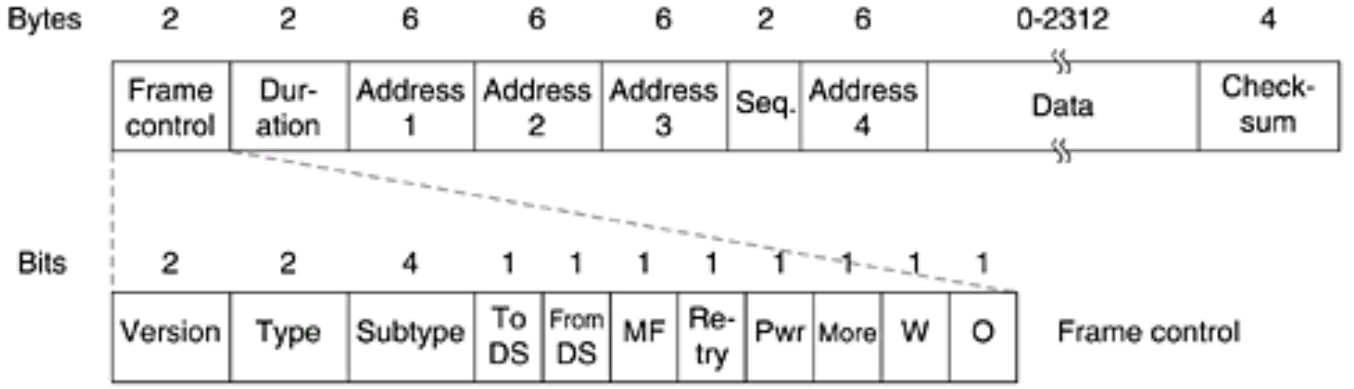


Formato de trama 802.11 – (2/4)



- Sub campos del campo Frame Control (más relevantes)
  - Type = datos, control o gestión;
  - Subtype = si el Type es de control, entonces se puede indicar que lleva un RTS, CTS o ACK[12];
  - More Frag = indica si quedan fragmentos por transmitir;
- Campo duration: cuánto tiempo se ocupará el canal;
- Direcciones (**ToDS = '0' ; FromDS = '0'**)[13]:
  - Addr1: Nodo destino
  - Addr2: Nodo origen
  - Addr3: Access Point
  - Addr4: sólo en un sistema de distribución (DS)
- Secuencia: útil para identificar fragmentos en caso de que se realice fragmentación;
- FCS: CRC de 32 bits. Si se fragmenta la trama, cada fragmento tiene su propio CRC.

Formato de trama 802.11 – (3/4)

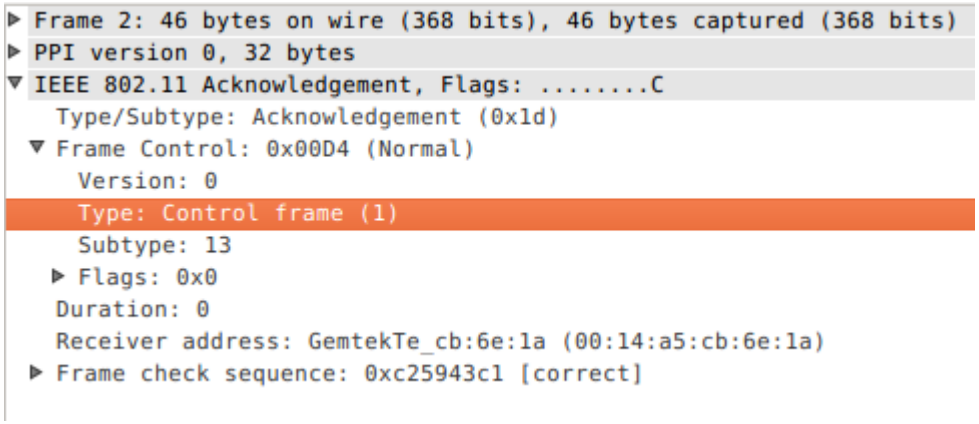


Function	ToDS	FromDS	Address 1 (receiver)	Address 2 (transmitter)	Address 3	Address 4
IBSS	0	0	DA	SA	BSSID	Not used
To AP (infra.)	1	0	BSSID	SA	DA	Not used
From AP (infra.)	0	1	DA	BSSID	SA	Not used
WDS (bridge)	1	1	RA	TA	DA	SA

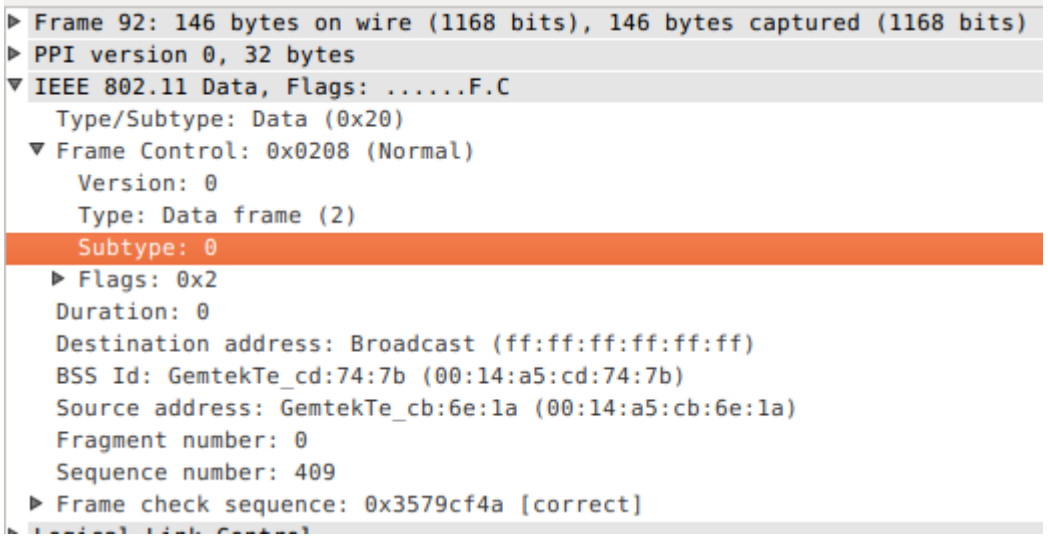
- Los campos ToDS y FromDS indican el flujo de tráfico desde/hacia un BasicServiceSet (BSS)[13].
- Si el tráfico circula dentro del BSS, los campos van en ‘0’.

Formato de trama 802.11 – (4/4)

- Ejemplo trama de control
  - Type = 1;
  - Subtype = 13 (ACK)



- Ejemplo trama de datos
  - Type = 2;
  - Subtype = 0 (DATA)



Referencias

[1] – Redes de computadoras, Tanenbaum, 5ta ed, secc. 4.2.5

[2] – Introducción a los sistemas de comunicaciones, 3era ed, Ferrel Strembler, secc. 10.5

[3] – Introducción a los sistemas de comunicaciones, 3era ed, Ferrel Strembler, secc. 10.2

[4] – Introducción a los sistemas de comunicaciones, 3era ed, Ferrel Strembler, secc. 10.9

[5] – Redes de computadoras, Tanenbaum, 5ta ed, secc. 4.4.3

[6] – IEEE Std 802.11-2012, secc. 9.3.3

[7] – IEEE Std 802.11-2012, secc. 9.3.4.2

[8] – IEEE Std 802.11-2012, secc. 9.3.4.3

[9] – IEEE Std 802.11-2012, secc. 9.3.2.6

[10] – MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio, Phil Karn, KA9Q, secc. 3

[11] – Hidden vs. Exposed Terminal Problem in Ad hoc Networks, Aruna Jayasuriya, Sylvie Perreau, Arek Dadej, Steven Gordon, Secc 2.1

[12] - https://supportforums.cisco.com/t5/wireless-mobility-documents/802-11-frames-a-starter-guide-to-learn-wireless-sniffer-traces/ta-p/3110019

[13] - https://dalewifisec.wordpress.com/2014/05/17/the-to-ds-and-from-ds-fields/