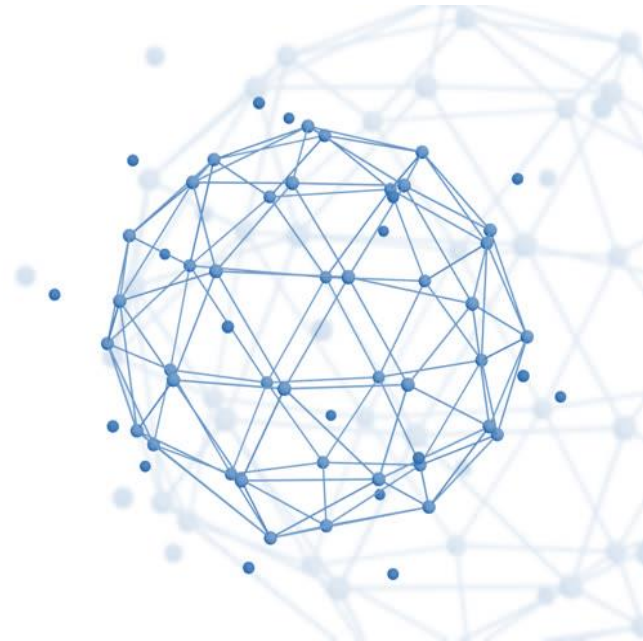


IEEE 802.15.4 Study

Yeon Hee Lee



Contents

- **Introduction**
 - IEEE 802.15.4
 - Device Type
 - Topology
- **IEEE 802.15.4 MAC**
- **CSMA-CA mechanism**
- **Markov chain model of IEEE 802.15.4**
- **Future Work**



Introduction

- **IEEE 802.15.4**

- a standard for the MAC and physical layer protocol of wireless networks 무선네트워크의 MAC과 물리 계층을 정의하는 표준
- for the low-rate wireless PAN(LR-WPAN) 저속 무선 개인 통신망을 위한
- for low power consumption and low cost communication network 저전력 소비, 저비용 통신
- 대표적으로 'ZigBee' 라 불림
- uses CSMA-CA medium access mechanism
- supports star topology and peer-to-peer topology
- 두가지 종류의 device types
 - FFD(full-function device)
 - RFD(reduced-function device)



Introduction

- **Device Type**

- 저전력 ,저소비 네트워크 구성을 위해 FFD, RFD 두가지로 나뉨

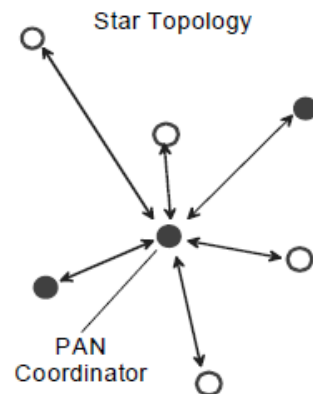
FFD (full-function device)	RFD (reduced-function device)
<ul style="list-style-type: none">• PAN coordinator, coordinator, device로써 역할 수행 가능• RFD, FFD 모두와 통신 가능 (Routing)	<ul style="list-style-type: none">• End device로써 역할 수행 가능• Coordinator, Router에 붙어있는 간단한 기능의 제한된 Protocol의 저전력 장치를 지칭• 오직 FFD와 통신 가능(RFD간 X)• 메모리가 적게 들고 전력소비가 적어 FFD보다 가격이 저렴

Introduction

- **Topology** (네트워크의 물리적 연결 형태)

- **Star topology**

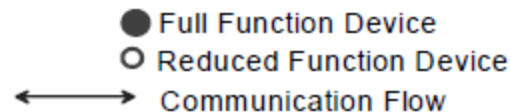
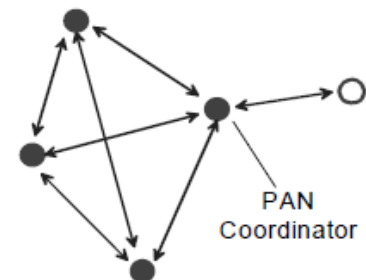
- ✓ Single central controller(PAN coordinator)와 devices 간 통신
 - ✓ FFD와 RFD의 접속을 제어
 - ✓ 한 개의 PAN coordinator 존재



- **Peer-to-peer topology**

- ✓ 범위 안의 어떤 devices 간에도 통신 가능
 - ✓ 다수의 coordinator 존재

Peer-to-Peer Topology

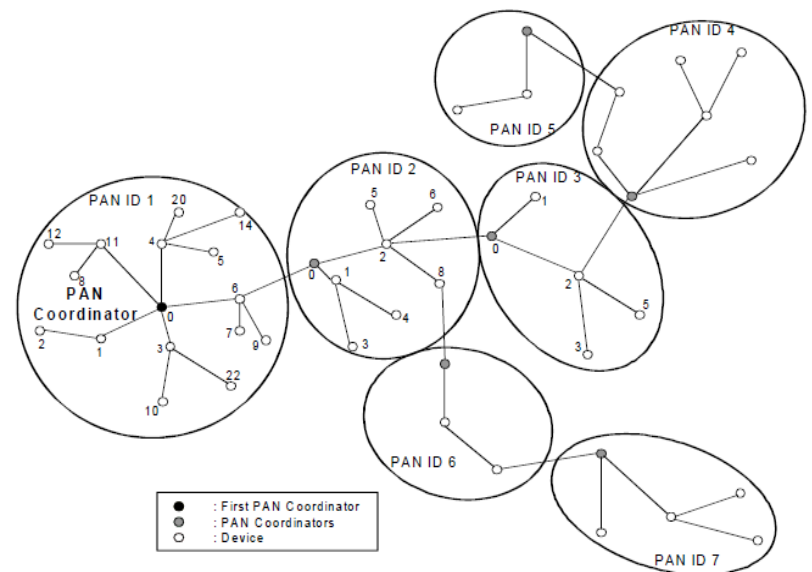


Introduction

- **Topology**

- **Cluster tree**

- ✓ Peer to peer network의 한 종류
 - ✓ 대부분의 Device가 Cluster tree network의 FFD
 - ✓ RFD는 leaf device로서 네트워크의 끝 단에서 접속하게 됨



Cluster tree network

IEEE 802.15.4 MAC

- **Superframe structure**

- 1) Active period
- 2) Inactive period (coordinator → Low-power mode)

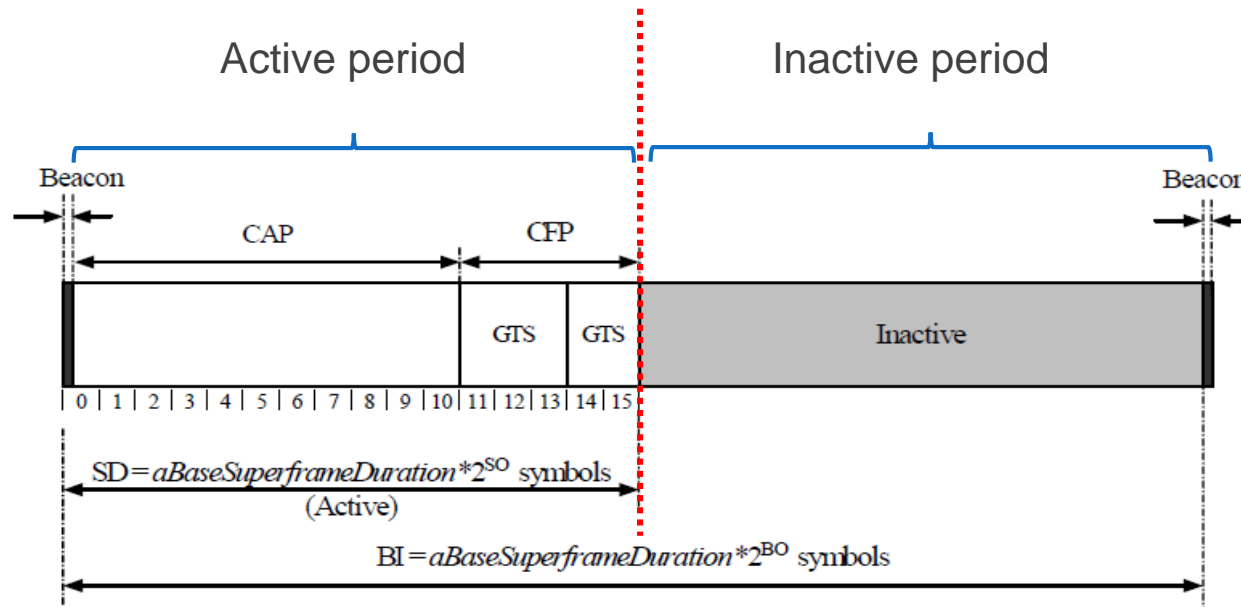


Figure 66—An example of the superframe structure

IEEE 802.15.4 MAC

- Superframe structure

1) Active period

- ✓ Active period는 같은 size의 16개 slot으로 나뉨
- ✓ Active period는 2가지 part로 나뉨
 - Contention Access period (CAP)
 - Contention Free period(CFP)

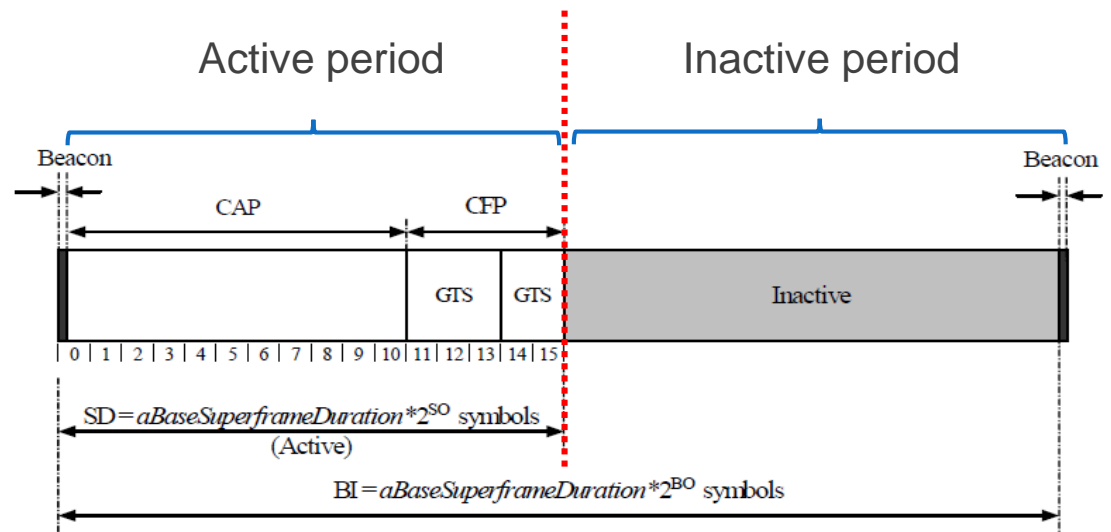


Figure 66—An example of the superframe structure

IEEE 802.15.4 MAC

- **Active period**

- **CAP(Contention Access Period)**

- ✓ Beacon 다음으로 시작하며 device가 통신을 원하는 구간 (device간의 경쟁구간)
 - ✓ slotted CSMA-CA mechanism으로 동작

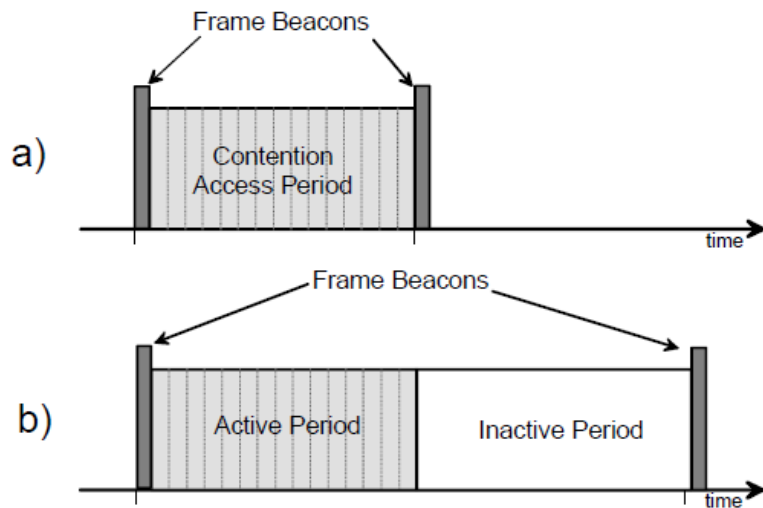


Figure 4—Superframe structure without GTSSs

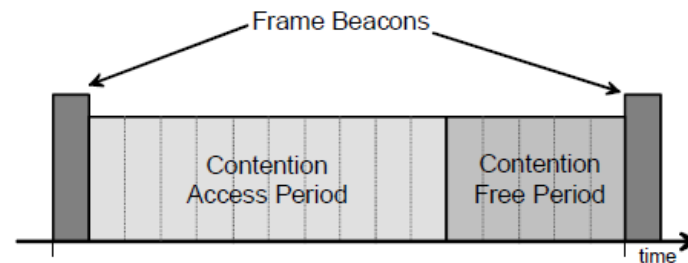


Figure 5—Superframe structure with GTSSs

IEEE 802.15.4 MAC

- **Active period**

- **CFP(Contention Free Period)**

- ✓ Optional 구간 (CAP의 상황에 따라 GTS 할당이 이루어지지 않을수도 있음=Option임)
 - ✓ Station에게 GTS(guaranteed time slot)를 할당하여 비경쟁적으로 동작
 - PAN coordinator가 GTS 구간동안 통신할 Devices를 정해줌 (중앙통제)
 - ✓ GTS는 최대 7개까지 할당이 가능하며, 한 개 이상의 slot을 가짐

- ❖ **GTS(Guaranteed time slots)**

- PAN coordinator가 최대 7개의 GTS 할당 가능
 - 2개 이상의 Slot period를 차지할 수 있음

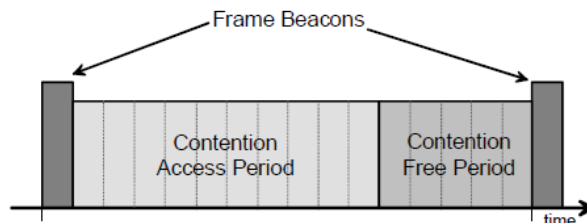


Figure 5—Superframe structure with GTSs

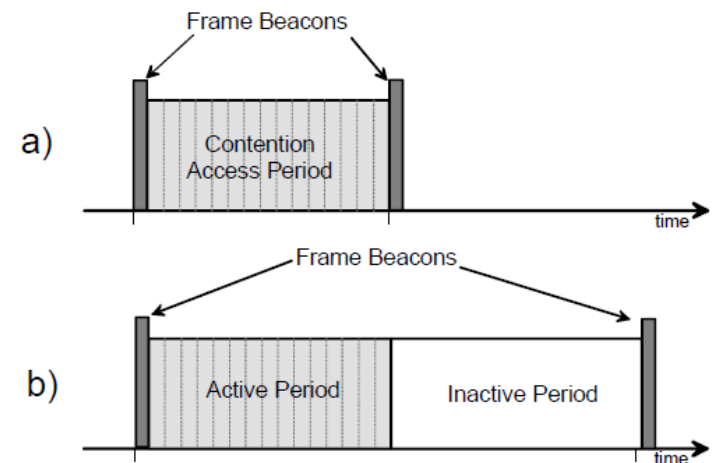


Figure 4—Superframe structure without GTSs

IEEE 802.15.4 MAC

- Superframe Structure

- Beacon

- ✓ 각 Superframe의 첫 번째 slot에서 전송됨 (Superframe을 시작할 때 사용)
- ✓ 네트워크 안의 다른 device와 동기화를 위해 사용
- ✓ PAN coordinator가 전송
- ✓ 네트워크 정보 포함, 프레임 구조 및 보류중인 노드 메시지 알림

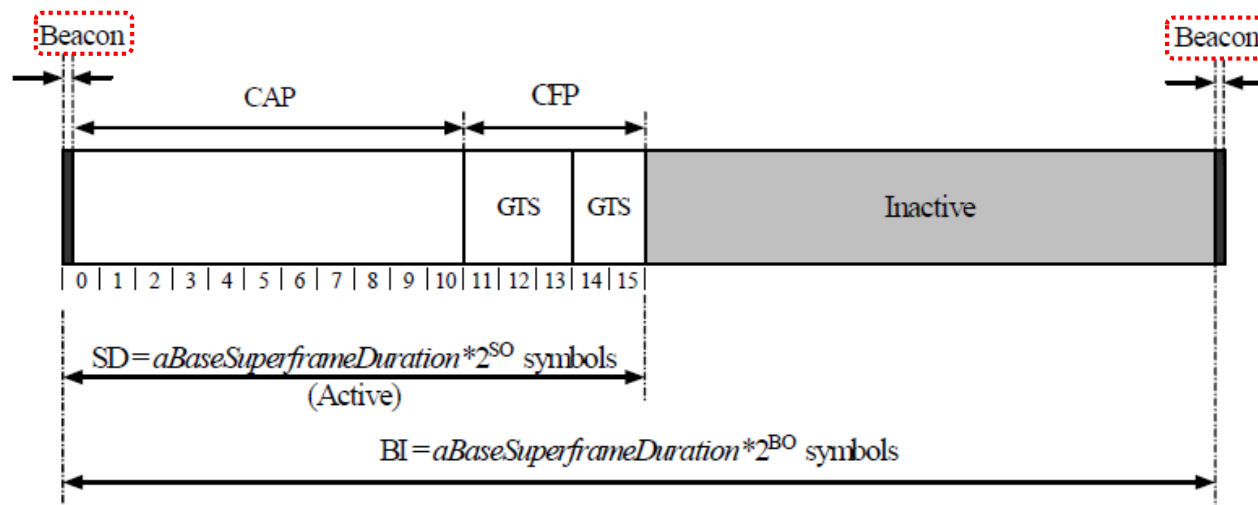
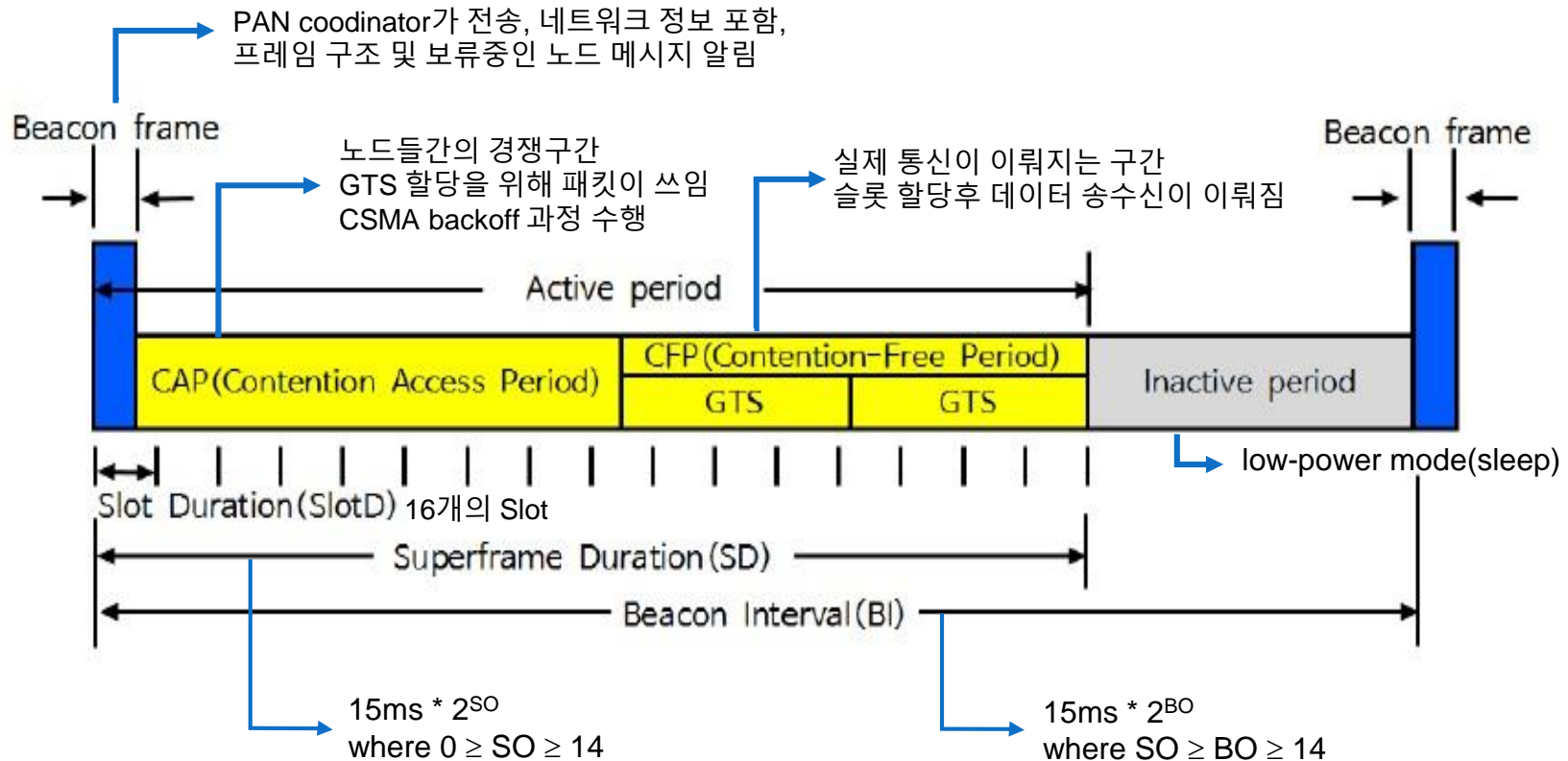


Figure 66—An example of the superframe structure

IEEE 802.15.4 MAC

- Superframe Structure



IEEE 802.15.4 MAC

- **Superframe**

- **SD (Superframe Duration)** : Superframe의 Active portion의 길이

- ✓ $SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}$ symbols

- **BI (Beacon Interval)** : Beacon frame간 간격

- ✓ $BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}$ symbols

- **BO (Beacon Order)** : Superframe의 길이 결정

- ✓ $0 \leq BO \leq 14$

- **SO (Superframe Order)** : Superframe에서 Active 구간의 길이 결정

- ✓ $0 \leq SO \leq BO \leq 14$

- 만약, BO가 15이면 Superframe에서 1개의 unit slot 길이가 SD의 길이와 같아지므로 Beacon을 보내지 않고,
네트워크가 Non-beacon-enabled mode로 동작함

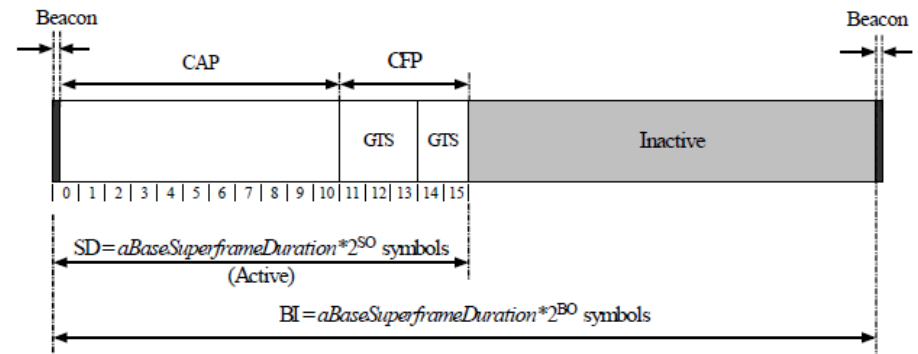


Figure 66—An example of the superframe structure

IEEE 802.15.4 MAC

- **Superframe**

- **Symbol**

- ✓ PHY계층에 따라 달라지는 Bit의 mapping 단위
 - ✓ Ex) PHY 2450MHz - Bit rate/Symbol rate = 4

Table 1—Frequency bands and data rates

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal



IEEE 802.15.4 MAC

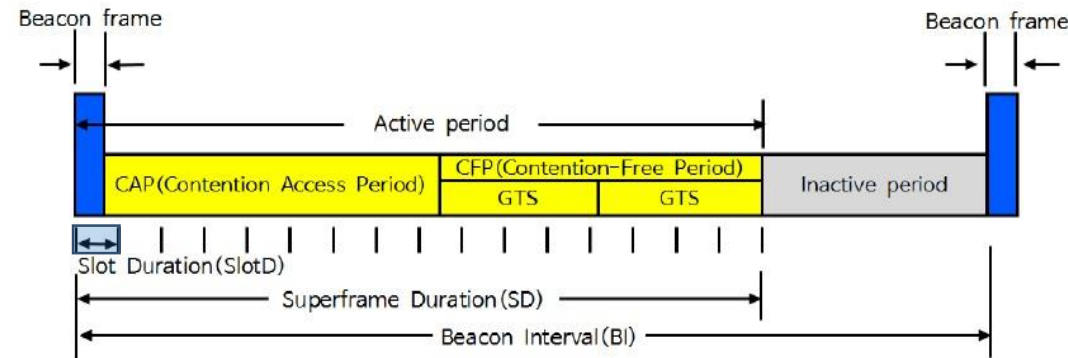
- **Superframe – SlotD 길이 계산**

- 1 symbol = 4bit / bit rate = 250 kbps = 250000 bit
- $aBaseSlotDuration(A) = 60$ symbols
- $aNumSuperframe(B) = 16$

- 식 :
$$SlotD = aBaseSlotDuration \times 2^{SO} [symbols]$$
$$= 60 \times 2^{SO} [symbols] = 0.96 \times 2^{SO} [ms]$$

- **Why?**

$$\begin{aligned} SlotD &= aBaseSlotDuration * 2^{SO} \text{ symbols} \\ &= 60 \text{ sym} * 2^{SO} \text{ symbols} \\ &= 60 \text{ sym} * 4 \text{ bit} / 250 \text{ kbps} = 0.96 \text{ ms} \end{aligned}$$



Q. $60 * 2^{SO} \text{ sym} = X \text{ ms}$?

→ $240 * 2^{SO} \text{ bits} = X \text{ ms}$

→ $240 * 2^{SO} / 250 * 10^3 = X \text{ ms}$

→ $250 * 10^3 : 1 = 240 * 2^{SO} : X$

→ $X = 0.96$

→ 0.96 ms

IEEE 802.15.4 MAC

- **Superframe – SD 길이 계산**

- 1 symbol = 4bit / bit rate = 250 kbps = 250000 bit
- $aBaseSlotDuration(A) = 60$ symbols
- $aNumSuperframe(B) = 16$

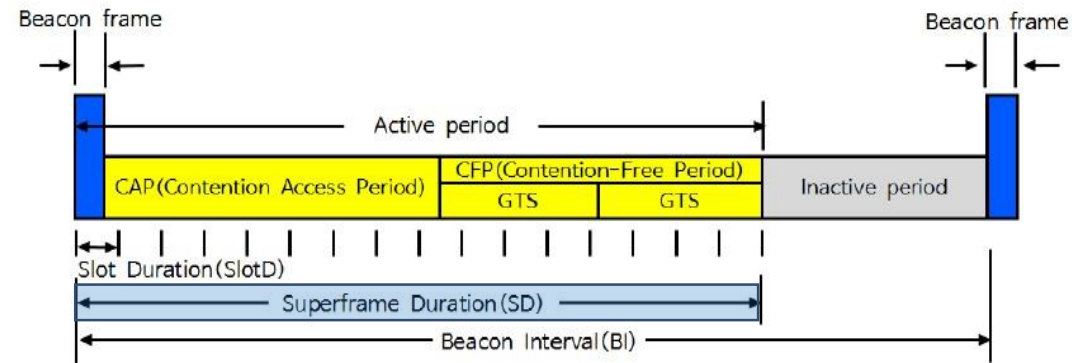
- 식 :
$$\begin{aligned}
 SD &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols] \\
 &= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms]
 \end{aligned}$$

- **Why?**

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ symbols}$$

$$= aBaseSuperframeDuration = A * B \Rightarrow 960 \text{ symbols} = 3840 \text{ bits}$$

$$\rightarrow 960 \text{ sym} * 4 \text{ bit} / 250 \text{ kbps} = 15.36 \text{ ms}$$



IEEE 802.15.4 MAC

- **Superframe – BI 길이 계산**

- 1 symbol = 4bit / bit rate = 250 kbps = 250000 bit
- $aBaseSlotDuration(A) = 60$ symbols
- $aNumSuperframe(B) = 16$

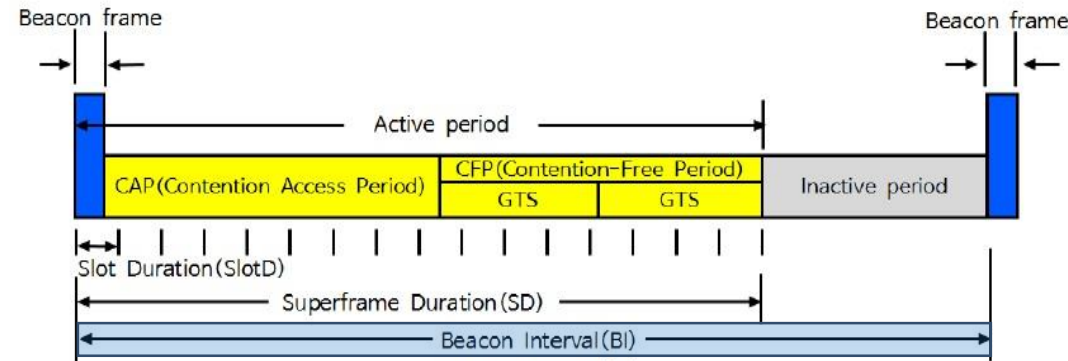
- 식 :
$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols]$$
$$= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms]$$

- **Why?**

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{B0} symbols$$

$$= aBaseSuperframeDuration = A*B \rightarrow 960 \text{ symbols} = 3840 \text{ bits}$$

$$\rightarrow 960 \text{ sym} * 4 \text{ bit} / 250 \text{ kbps} = 15.36 \text{ ms}$$



IEEE 802.15.4 MAC

- Superframe

- Duty Cycle

✓ 전체 구간에서의 Active 구간의 비율을 말함

✓ $2^{-(BO-SO)} = \frac{SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ symbols}}{BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ symbols}}$

BO-SO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥ 10
Duty cycle (%)	100	50	25	12	6.25	3.125	1.56	0.78	0.39	0.195	< 0.1

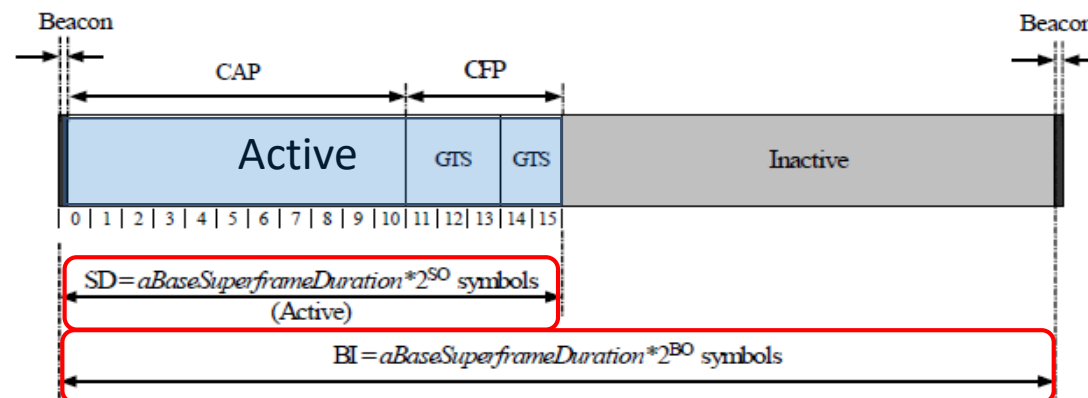


Figure 66—An example of the superframe structure

CSMA-CA mechanism

- **CSMA-CA in IEEE 802.15.4**
 - **CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
 - ✓ 반송파 감지 다중 접속 충돌 회피
 - ✓ 무선 LAN에서는 충돌 감지가 거의 불가능, 전송 전에 캐리어 감지를 해보고 일정 시간을 기다린 후에 가능한 충돌을 회피하는 방식

CSMA-CA mechanism

- **CSMA-CA in IEEE 802.15.4**

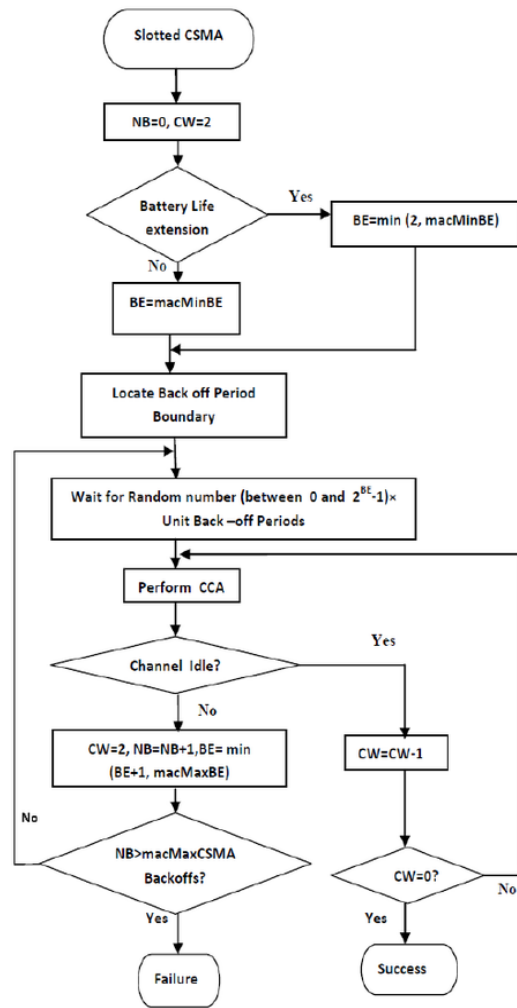
- **Slotted CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)

- ✓ Beacon mode
 - ✓ device가 CAP 구간동안 data frames을 원할 때마다 랜덤 수의 backoff slots을 대기함
 - ✓ ACK, beacon frames은 CSMA-CA을 사용하지않고 전송됨
 - ✓ Backoff Boundary 설정

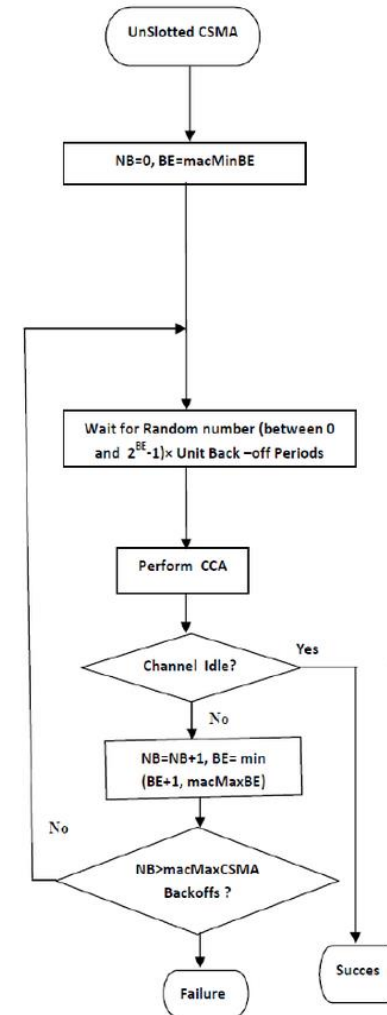
- **Unslotted CSMA-CA**

- ✓ Non-beacon mode
 - ✓ 다른 Device와 동기화되지 않음

CSMA-CA mechanism



Slotted CSMA-CA mechanism



Unslotted CSMA-CA mechanism

CSMA-CA mechanism

• Slotted CSMA-CA

— Parameter

✓ NB

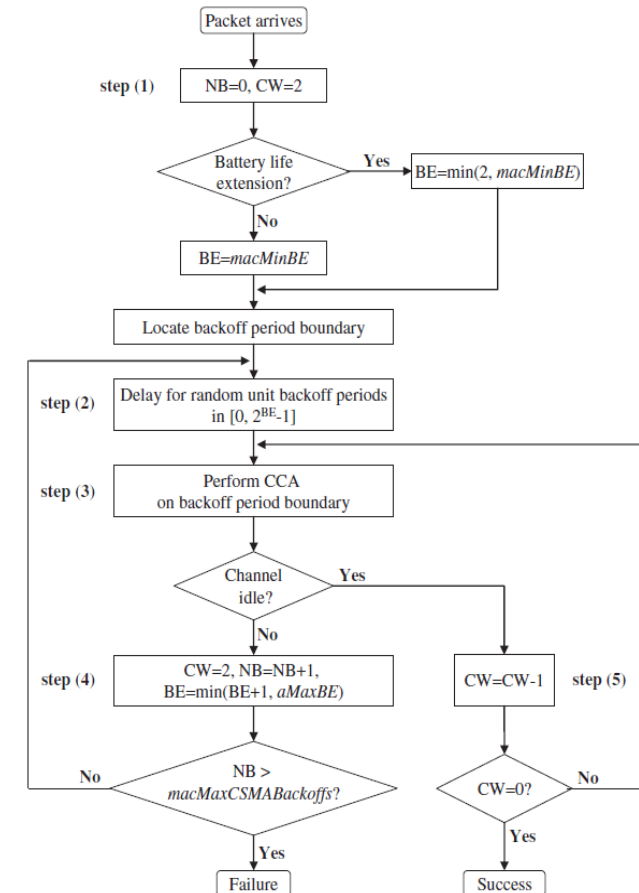
- backoff 시도 횟수
- 새로운 전송마다 0으로 초기화

✓ CW(Contension Window) 전송 시작전 활동이 없어야하는 슬롯 기간의 수를 정의

- backoff period 횟수 (CCA 횟수)
- 각 전송 시도전 2로 초기화
- CCA(Clear Channel Assessment)를 할 때마다 하나씩 줄여지고, 값이 0이 되었을 때 CCA를 하여 채널이 idle상태이면 전송 시작

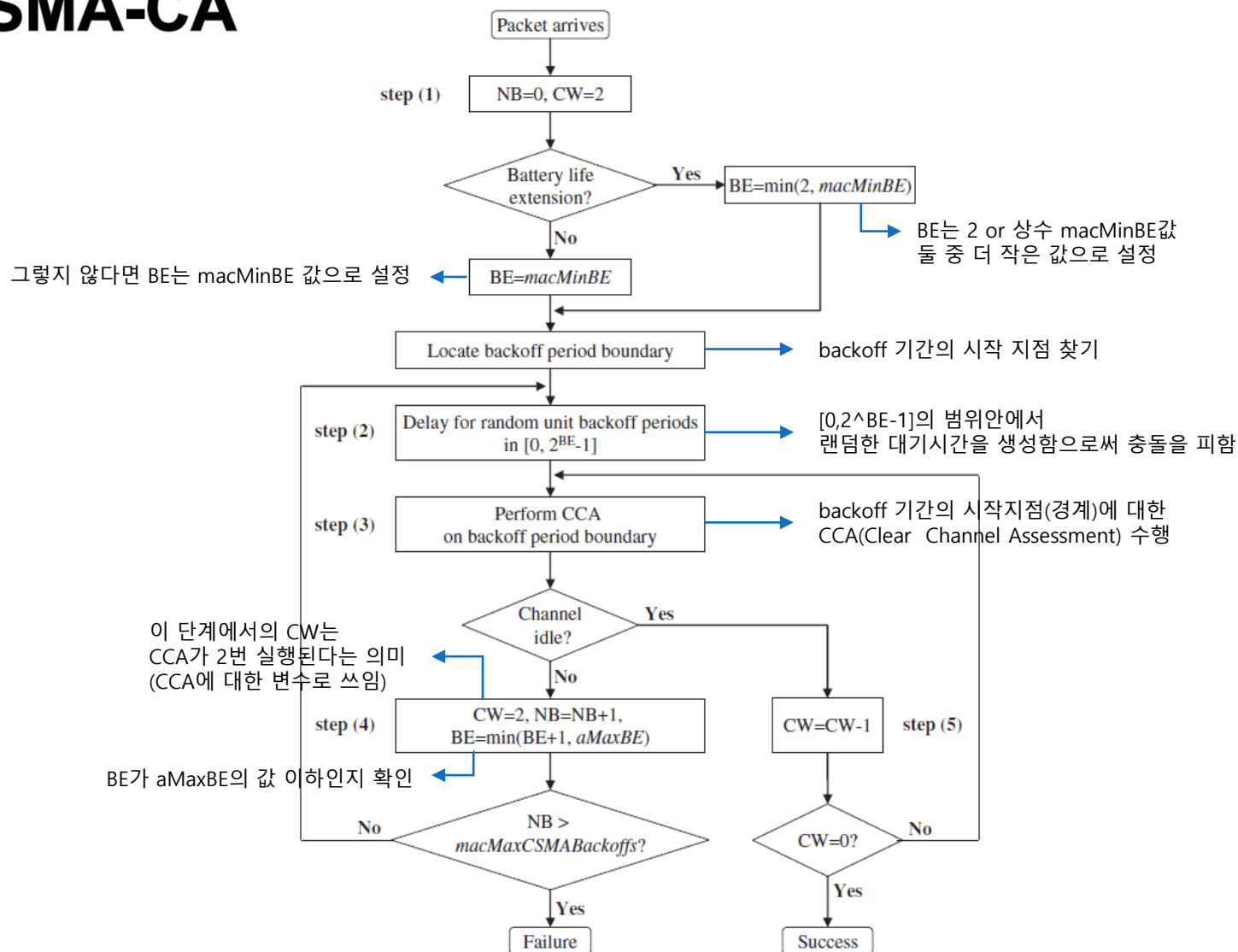
✓ BE(Backoff Exponent)

- macMinBE로 초기화
- 채널평가를 시도하기전, 기기가 대기해야하는 슬롯기간의 수와 관련된 백오프지수를 결정하기 위한 파라미터 값



CSMA-CA mechanism

- Slotted CSMA-CA



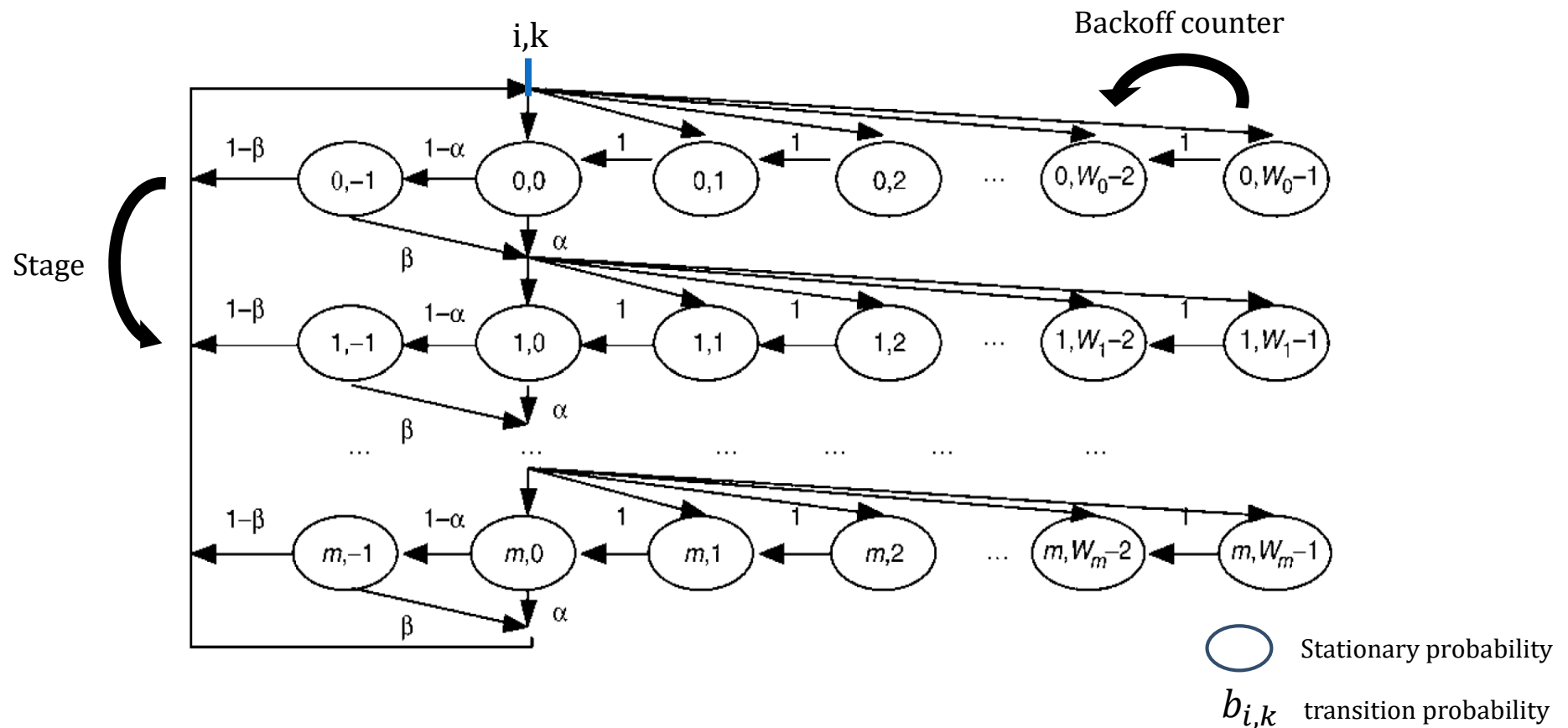
CSMA-CA mechanism

- In IEEE 802.15.4

- CW = 0 일 때, CCA 수행(매 slot time마다 수행하지 않음)
- CCA를 2번 수행 후, data 전송, 다른 device는 계속 count 진행
- CCA 수행 시, busy할 경우 $[0, 2^{BE}-1]$ 중 임의의 값을 선택해 backoff 다시 수행

Markov chain model of IEEE 802.15.4

- Sofie Pollin, et al. "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer"(2008)
 - Markov Model for IEEE 802.15.4.



Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:

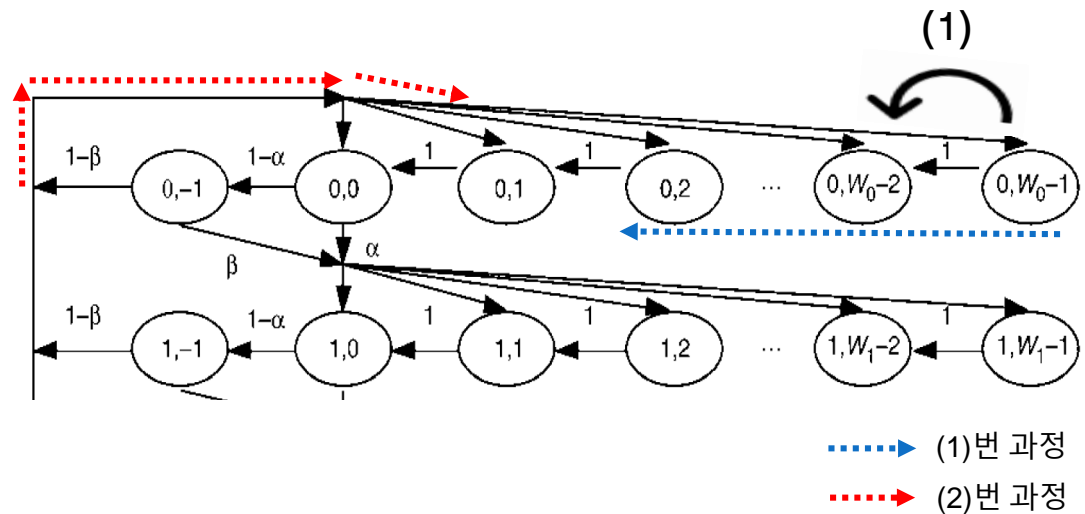
$$P\{i, k|i, k+1\} = 1, k \geq 0 \quad (1)$$

$$P\{0, k|i, 0\} = (1 - \alpha)(1 - \beta)/W_0, \quad i < m \quad (2)$$

$$P\{i, k|i-1, 0\} = (\alpha + (1-\alpha)\beta)/W_i, \\ i \leq m, k \leq W_i - 1 \quad (3)$$

$$P\{0, k | m, 0\} = (1 - \alpha)(1 - \beta)/W_0 \quad (4)$$

* $P\{a, b|a, b + 1\} \rightarrow \{a, b + 1\}$ 이 $\{a, b\}$ 가 될 확률



(1) Backoff counter 과정 : $b_{i,k}$

\rightarrow Backoff counter
 \rightarrow Stage 횟수

(2) $(1 - \alpha)(1 - \beta) \times \frac{1}{W_o}$ → Stage 횟수
 → “Backoff counter의 횟수(W_o)중에 하나의 Stationary probability”를 의미

Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:

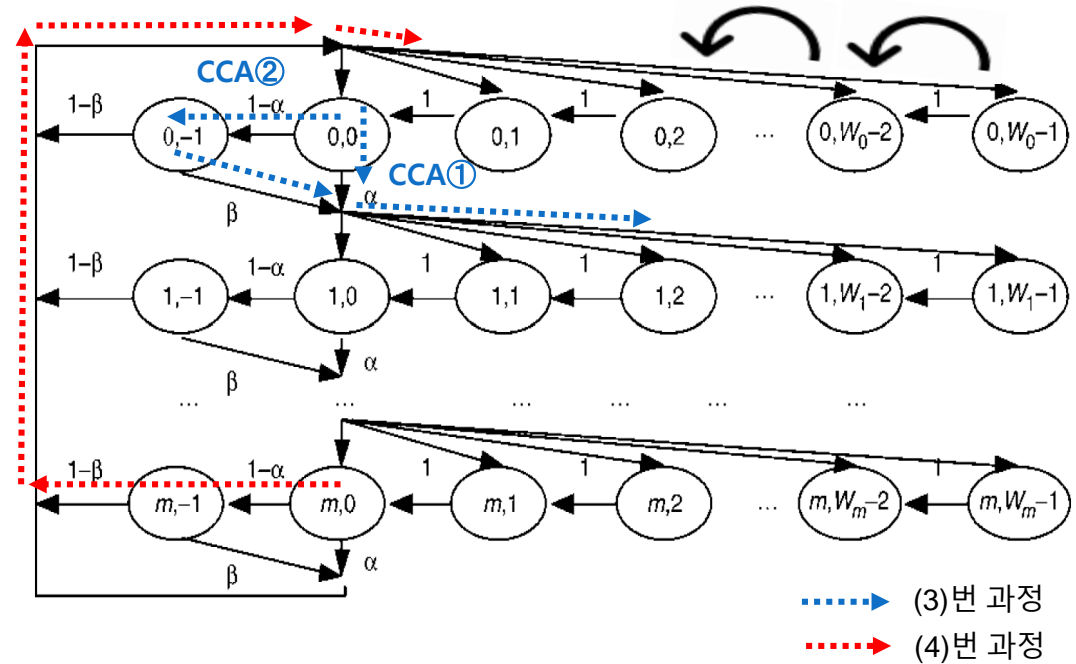
$$P\{i, k|i, k+1\} = 1, k \geq 0 \quad (1)$$

$$P\{0, k|i, 0\} = (1-\alpha)(1-\beta)/W_0, i < m \quad (2)$$

$$P\{i, k|i-1, 0\} = (\alpha + (1-\alpha)\beta)/W_i, \\ i \leq m, k \leq W_i - 1 \quad (3)$$

$$P\{0, k|m, 0\} = (1-\alpha)(1-\beta)/W_0 \quad (4)$$

* $P\{a, b|a, b+1\} \rightarrow \{a, b+1\}$ 이 $\{a, b\}$ 가 될 확률



$$(3) (\alpha + (1-\alpha)\beta) \times \frac{1}{W_i}$$

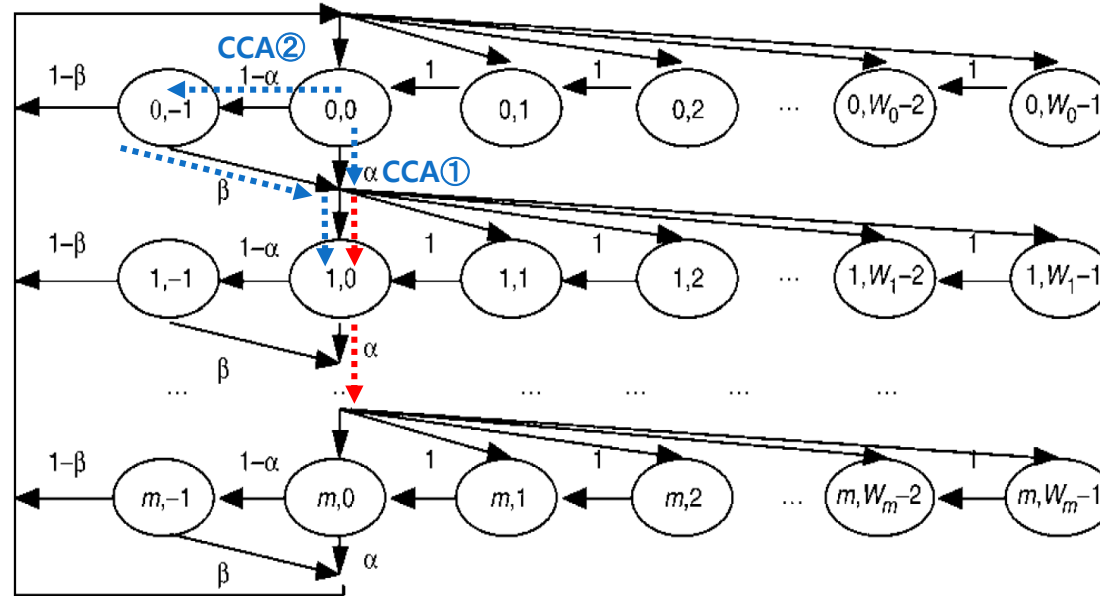
→ α : 1번째 CCA에서 실패할 확률
 $(1-\alpha)\beta$: 2번째 CCA에서 실패할 확률

$$(4) P\{0, k|m, 0\} = (1-\alpha)(1-\beta) \times \frac{1}{W_0}$$

→ $\{m, 0\}$ 에서 전송 성공후 다시 backoff counter를 통해 $\frac{1}{W_0}$ 가 선택될 확률

Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:



$$(5) \quad b_{i,0} = b_{i-1,0} (\alpha + (1-\alpha)\beta) \quad 0 < i \leq m$$

CCA 실패 2번

$b_{i-1,0}$ 에서 CCA 2번 실패후 다음 stage의 $i,0$ 으로 가는 것을 의미

$$(6) \quad b_{i,0} = b_{0,0} [(\alpha + (1-\alpha)\beta)]^i \quad 0 < i \leq m$$

(5) 식에

$$1 \text{ 대입} \rightarrow b_{1,0} = b_{0,0} (\alpha + (1-\alpha)\beta)$$

$$2 \text{ 대입} \rightarrow b_{2,0} = b_{1,0} (\alpha + (1-\alpha)\beta)$$

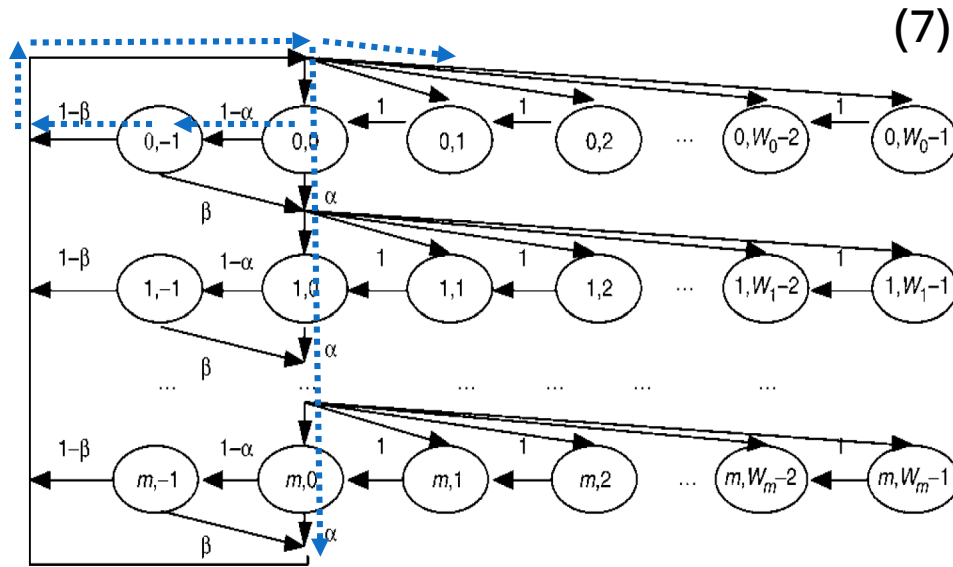
$$= b_{0,0} (\alpha + (1-\alpha)\beta) (\alpha + (1-\alpha)\beta)$$

$$= b_{0,0} (\alpha + (1-\alpha)\beta)^2$$

$$\Rightarrow b_{i,0} = b_{0,0} [(\alpha + (1-\alpha)\beta)]^i$$

Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:

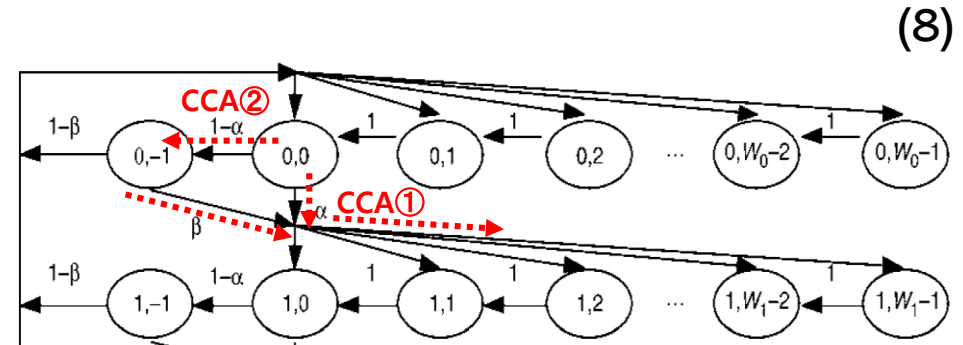


$$(7) b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \left\{ (1 - \alpha)(1 - \beta) \sum_{j=0}^m b_{j,0} \right\} \quad i = 0$$

W_i 번째 stage에서 -k번째 Stationary probability가 선택될 확률

$$(8) b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad 0 < i$$

(5) $b_{i,0} = b_{i-1,0}(\alpha + (1 - \alpha)\beta)$ 로 정의



CCA 2번 모두 성공후

다시 backoff counter를 통해 (m,0)까지 가는 것을 의미

$$(1 - \alpha)(1 - \beta)(b_{0,0} + b_{1,0} + b_{2,0} + \dots + b_{m,0})$$


$$\rightarrow b_{0,0} (1 - \alpha)(1 - \beta) + b_{0,0} (1 - \alpha)(1 - \beta) + \dots + b_{m,0} (1 - \alpha)(1 - \beta)$$

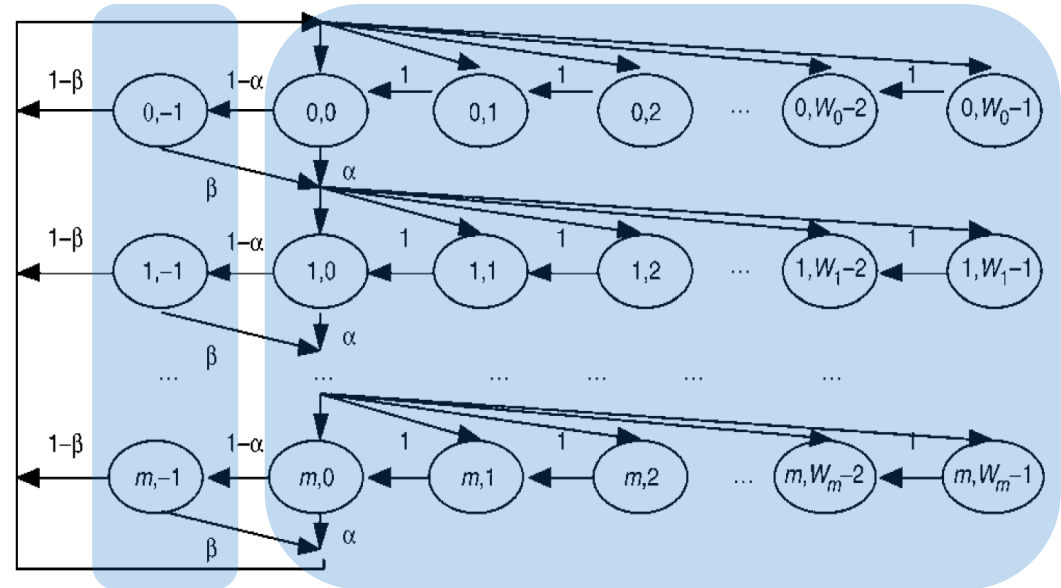
CCA 2번 실패후

W_i 번째 stage에서 -k번째 Stationary probability가 선택될 확률

Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:

(9)  모든 경우



Markov chain model of IEEE 802.15.4

- transition probabilities:

- τ : 임의의 노드가 임의의 시간에서 전송할 확률
- $(1 - \tau)^{n-1}$: 모든 n개의 device가 backoff states에 있을때, 주어진 device가 2번의 CCA 수행후 패킷을 성공적으로 전송하는 확률
 - n-1개의 device가 전송하지 않는것

$$= b_{0,0} (1 - \alpha)(1 - \beta) + b_{1,0}(1 - \alpha)(1 - \beta) + b_{2,0}(1 - \alpha)(1 - \beta) + \dots + b_{m,0}(1 - \alpha)(1 - \beta)$$