

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**IEEE 802.15.4 STANDARDINA UYUMLU RF
HABERLEŞME UYGULAMASI**

Elk.-Elektr.Müh. Sönmez İSAK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Ünal KÜÇÜK (Y.T.Ü.)

İSTANBUL, 2007

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**IEEE 802.15.4 STANDARDINA UYUMLU RF
HABERLEŞME UYGULAMASI**

Elk.-Elektr.Müh. Sönmez İSAK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Ünal KÜÇÜK (Y.T.Ü.)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Telsiz Kişisel Alan Ağları (WPAN)	1
1.2 IEEE 802.15.4 ve ZigBee	2
1.3 ZigBee ve Bluetooth Karşılaştırılması	3
2. IEEE 802.15.4 LR-WPAN GENEL TANITIMI	4
2.1 IEEE 802.15.4 LR-WPAN Bileşenleri	4
2.2 Ağ Topolojileri	5
2.2.1 Yıldız Ağ Topolojisi	6
2.2.2 Noktadan Noktaya Ağ Topolojisi	6
2.3 LR-WPAN Mimarisi	8
2.4 Veri Aktarım Modeli	8
2.4.1 Koordinatöre Veri Aktarımı	9
2.4.2 Koordinatörden Veri Aktarımı	10
2.4.3 Noktadan Noktaya Veri Aktarımı	11
2.5 İlkel Kavramı	11
3. IEEE 802.15.4 FİZİKSEL KATMANI ÖZELLİKLERİ	13
3.1 Genel Gereksinimler ve Tanımlamalar	13
3.1.1 İşletim Frekansı	13
3.1.2 Kanal Atama ve Numaralandırma	14
3.2 PHY Hizmet Özellikleri	14
3.2.1 PHY Veri Hizmeti	15
3.2.2 PHY Yönetim Hizmeti	15
3.3 PHY Protokol Veri Birimi Yapısı	16
3.4 PHY Sabitleri ve PIB Özellikleri	18
3.4.1 PHY Sabitleri	18
3.4.2 PHY PIB Özellikleri	18
3.5 2450MHz PHY Tanımlamaları	19
3.5.1 Veri Hızı	19

3.5.2	Modülasyon ve Yayılma	19
3.5.2.1	Referans Modülatör Diyagramı	19
3.5.2.2	Bit – Sembol Eşlenmesi	19
3.5.2.3	Sembol – Chip Eşlemesi	19
3.5.2.4	O-QPSK Modülasyonu	20
3.5.2.5	Darbe Şekli	21
3.5.3	2450MHz Bandı Radyo Tanımlamaları	21
3.5.3.1	İzgesel Güç Yoğunluğu	21
3.5.3.2	Sembol Hızı	22
3.5.3.3	Alıcı Duyarlılığı	22
3.5.3.4	Alıcı Frekans Bozulma Direnci	22
3.5.4	Temiz Kanal Ataması	23
4.	IEEE 802.15.4 MAC ALT KATMANI ÖZELLİKLERİ	24
4.1	MAC Alt Katmanı Hizmet Özellikleri	24
4.1.1	MAC Veri Hizmeti	25
4.1.2	MAC Yönetim Hizmeti	26
4.2	MAC Çerçeve Yapıları	28
4.2.1	Genel MAC Çerçeve Yapısı	28
4.2.1.1	Çerçeve Kontrol Alanı	29
4.2.1.2	Dizi Numarası Alanı	31
4.2.1.3	Variş PAN Belirteci Alanı	32
4.2.1.4	Variş Adresi Alanı	32
4.2.1.5	Kaynak PAN Belirteci Alanı	32
4.2.1.6	Kaynak Adres Alanı	32
4.2.1.7	Çerçeve Veri Alanı	32
4.2.1.8	Çerçeve Kontrol Dizisi Alanı	33
4.2.2	Beacon Çerçevesi Yapısı	34
4.2.3	Veri Çerçevesi Yapısı	36
4.2.4	Onaylama Çerçevesi Yapısı	37
4.2.5	MAC Komut Çerçevesi Yapısı	38
4.3	MAC Komut Çerçeveleri	38
4.3.1	Bağlanma İsteği Komutu	39
4.3.2	Bağlanma Yanıtı Komutu	41
4.3.3	Ayrılma Bildirimi Komutu	42
4.3.4	Koordinatör Etkileşim Komutları	43
4.3.4.1	Veri İsteği Komutu	43
4.3.4.2	PAN Id Çelişki Bildirimi Komutu	44
4.3.4.3	Yetim Bildirimi Komutu	44
4.3.4.4	Beacon İsteği Komutu	45
4.3.4.5	Koordinatörün Yeniden Sıralaması Komutu	45
4.3.4.6	GTS İsteği Komutu	46
4.4	MAC Sabitleri ve PIB özellikleri	46
4.4.1	MAC sabitleri	46
4.4.2	MAC PIB Özellikleri	48
4.5	MAC İşlevsel Tanımı	50
4.5.1	Kanal Erişimi	51
4.5.1.1	Süper Çerçeve Yapısı	51
4.5.1.2	Çerçeveler Arası Bekleme Zamanı (IFS)	53
4.5.1.3	CSMA-CA Algoritması	54
4.5.2	PAN Başlatılması ve İşletilmesi	58

4.5.2.1	Kanalları Tarama	58
4.5.2.2	PAN Belirteci Çakışması	61
4.5.2.3	PAN Başlatılması	62
4.5.2.4	Beacon Üretimi	63
4.5.2.5	Cihaz Tarama	63
4.5.3	Ağa Bağlanmak ve Ağdan Ayrılmak	63
4.5.3.1	Ağa Bağlanmak	63
4.5.3.2	Ağdan Ayrılmak	66
4.5.4	Eş Zamanlama	67
4.5.4.1	Beacon ile Eş Zamanlama	67
4.5.4.2	Beacon Olmadan Eş Zamanlama	67
4.5.4.3	Yetim Cihaz Eş Zamanlaması	68
4.5.5	Cihazın Ağ İçindeki İşlemleri Değerlendirme Biçimi	68
4.5.6	İletme, Alma ve Onaylama	70
4.5.6.1	Çerçeve İletme	70
4.5.6.2	Çerçeve Alma ve Reddetme	71
4.5.6.3	Bekleyen Verinin Koordinatörden Çıkarılması	72
4.5.6.4	Onaylamaların Kullanılması	74
5.	CC2420 – 2.4GHz IEEE 802.15.4 RF ALICI-VERİCİ	76
5.1	Devre Tanımı	76
5.2	4-Tel Seri Konfigürasyon ve Veri Arabirimi	78
5.2.1	CC2420 Yazmaç Erişimi	78
5.2.2	Durum Baytı	80
5.2.3	CC2420 Komut Yazmaçları	80
5.2.4	RAM Erişimi	81
5.2.5	FIFO Erişimi	82
5.2.6	Çoklu SPI Erişimi	83
5.3	CC2420 – Mikro Denetleyici Arabirimi	83
5.3.1	CC2420 Alım Modu	84
5.3.2	RXFIFO Taşması	86
5.3.3	CC2420 İletim Modu	86
5.3.4	Genel Kontrol ve Durum Pinleri	87
5.4	De-Modülatör, Sembol Eşleyici ve Veri Kararı	87
5.5	Radyo Kontrolü Durum Makinesi	88
6.	IEEE 802.15.4 AĞI ÜZERİNDE UZAKTAN İZLEME VE KONTROL UYGULAMASI	91
6.1	Uygulamanın Amacı ve Temel Mimarisi	91
6.2	DCR – ECR İletişim Protokolü	92
6.2.1	Akım Çevrimi (CL) Arabirimi Gereksinimleri	92
6.2.2	Protokolün İletişim Yapısı	92
6.2.3	Protokol Katmanları	93
6.3	IEEE 802.15.4 İletişim Kartı Tanıtımı	93
6.3.1	EasyBee Modülü	94
6.3.1.1	OUI numarası / MAC adresi	95
6.3.1.2	Elektromanyetik Risk	95
6.3.1.3	RF Performansının Optimize Edilmesi	96
6.4	Mikro Denetleyici Programı ve Yığın Yapısı	97
6.5	İletişim Senaryosu	100

6.6	Akaryakıt Pompa Durumu İzleme Programı	101
6.7	CC2420DK Geliştirme Kiti	102
6.8	İletişim Kanalı Etkinliği	104
6.9	Veri İletim Mesafesi	106
6.10	Alınan Sinyal Gücü	107
7.	SONUÇ.....	109
KAYNAKLAR.....		111
EKLER		112
Ek 1 İletişim kartı baskı devre çizimi.....		112
Ek 2 İletişim kartı şematik devre çizimi.....		113
ÖZGEÇMİŞ.....		114

SİMGE LİSTESİ

<i>BE</i>	backoff exponent
<i>BI</i>	beacon interval
<i>BO</i>	beacon order
<i>CW</i>	contention window (length)
<i>NB</i>	number of backoff (periods)
<i>SD</i>	superframe duration
<i>SO</i>	superframe order

KISALTMA LİSTESİ

BPSK	binary phase-shift keying
BSN	beacon sequence number
CAP	contention access period
CCA	clear channel assessment
CFP	contention-free period
CID	cluster identifier
CL	Current Loop
CLH	cluster head
CRC	cyclic redundancy check
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
DCR	Distributed Communication Router
DSN	data sequence number
DSSS	direct sequence spread spectrum
ECR	Electronic Cash Register
ED	energy detection
FCS	frame check sequence
FFD	full-function device
GTS	guaranteed time slot
IFS	interframe space or spacing
ISM	industrial, scientific, and medical
I/Q Phase	in-phase / Quadrature-phase
LLC	logical link control
LQI	link quality indication
LR-WPAN	low-rate wireless personal area network
LSB	least significant bit
MAC	medium access control
MCPS	MAC common part sublayer
MCPS-SAP	MAC common part sublayer-service access point
MFR	MAC footer
MHR	MAC header
MLME	MAC sublayer management entity
MLME-SAP	MAC sublayer management entity-service access point
MSB	most significant bit

MPDU	MAC protocol data unit
MSDU	MAC service data unit
O-QPSK	offset quadrature phase-shift keying
OSI	open systems interconnection
PAN	personal area network
PD-SAP	PHY data service access point
PDU	protocol data unit
PER	packet error rate
PHR	PHY header
PHY	physical layer
PIB	PAN information base
PLME	physical layer management entity
PLME-SAP	physical layer management entity-service access point
POS	personal operating space
PPDU	PHY protocol data unit
PSDU	PHY service data unit
ppm	parts per million
RF	radio frequency
RFD	reduced-function device
RSSI	received signal strength indication
RX	receive or receiver
SAP	service access point
SDU	service data unit
SFD	start-of-frame delimiter
SHR	synchronization header
SPI	Serial Peripheral Interface
SSCS	service specific convergence sublayer
TRX	transceiver
TX	transmit or transmitter
OUI	Organizationally Unique Identifier
USART	addressable universal synchronous asynchronous receiver transmitter
WPAN	wireless personal area network

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yıldız ve noktadan noktaya ağ topoloji örnekleri	6
Şekil 2.2 Küme ağacı ağı.....	7
Şekil 2.3 LR-WPAN cihaz mimarisi	8
Şekil 2.4 Aktif-Beacon ağı içinde koordinatör ile iletişim.....	9
Şekil 2.5 Pasif-Beacon ağı içinde koordinatör ile iletişim	10
Şekil 2.6 Aktif-Beacon ağı içinde koordinatörün iletişimi.....	10
Şekil 2.7 Pasif-Beacon ağı içinde koordinatörün iletişimi	11
Şekil 2.8 Hizmet ilkeleri.....	12
Şekil 3.1 PHY referans modeli	14
Şekil 3.2 PPDU yapısı	16
Şekil 3.3 SFD alanı yapısı	17
Şekil 3.4 Modülasyon ve yayılma fonksiyonları	19
Şekil 3.5 O-QPSK chip kaymaları.....	21
Şekil 3.6 Darbe şekli ile temel band chip dizisi	21
Şekil 4.1 MAC alt katmanı referans modeli	24
Şekil 4.2 MAC veri hizmeti için mesaj sırası.....	25
Şekil 4.3 Genel MAC çerçeve yapısı	28
Şekil 4.4 Çerçeve kontrol alanının yapısı.....	29
Şekil 4.5 Tipik FCS uygulaması.....	34
Şekil 4.6 Beacon çerçeve yapısı	34
Şekil 4.7 GTS bilgi alanının yapısı.....	35
Şekil 4.8 Bekleyen adres bilgi alanının yapısı.....	35
Şekil 4.9 Süper çerçeve tanımları alanı yapısı.....	35
Şekil 4.10 Veri çerçevesi yapısı	36
Şekil 4.11 Onaylama çerçevesi yapısı	37
Şekil 4.12 MAC komut çerçevesi yapısı	38
Şekil 4.13 Bağlanma isteği komutu yapısı	39
Şekil 4.14 Yetenek bilgisi alanı yapısı	40
Şekil 4.15 Bağlanma yanıtı komutu yapısı.....	41
Şekil 4.16 Ayrılma bildirimi komutu yapısı.....	42
Şekil 4.17 Veri isteği komutu yapısı	44
Şekil 4.18 PAN Id çelişki bildirimi komutu yapısı	44

Şekil 4.19 Yetim bildirimi komutu yapısı	44
Şekil 4.20 Beacon isteği komutu yapısı.....	45
Şekil 4.21 Koordinatörün yeniden sıralaması komutu yapısı.....	46
Şekil 4.22 GTS isteği komutu yapısı.....	46
Şekil 4.23 Süper çerçeve yapısına bir örnek.....	52
Şekil 4.24 IFS şematik gösterimi.....	54
Şekil 4.25 CSMA – CA Algoritması	57
Şekil 4.26 Onaylama olmaksızın veri aktarımı	74
Şekil 4.27 Onaylama ile veri aktarımı	75
Şekil 5.1 CC2420 Basitleştirilmiş blok diyagram	77
Şekil 5.2. SNOP komutu için SPI pin durumları.....	80
Şekil 5.3 RAM erişimi için adres baytları	82
Şekil 5.4 Çoklu SPI erişimi örneği	83
Şekil 5.5 Mikro denetleyici arabirim örneği.....	84
Şekil 5.6 Çerçeve alımı sırasında pin aktivitesi.....	85
Şekil 5.7 RXFIFO’ nun okunması sırasında pin etkinliği	86
Şekil 5.8 İletim sırasında pin etkinliği.....	87
Şekil 5.9 De-modülatör basitleştirilmiş blok diyagramı.....	88
Şekil 6.1 Projenin işlevsel blok diyagramı	91
Şekil 6.2 İletişim kartı blok diyagramı	94
Şekil 6.3 EasyBee modülü işlevsel blok diyagramı	95
Şekil 6.4 Mikro denetleyici programı yapısı	97
Şekil 6.5 Koordinatör programının akış diyagramı	98
Şekil 6.6 Son nokta cihazı program akış diyagramı	99
Şekil 6.7 Pompa durumu veri bloğu	100
Şekil 6.8 Akaryakıt pompası izleme programı ekran görüntüsü	101
Şekil 6.9 CC2420EB geliştirme bordu	102
Şekil 6.10 IEEE 802.15.4 Packet Sniffer programı ekran görüntüsü	104
Şekil 6.11 Pompa durum bilgisini taşıyan veri çerçevesi.....	105
Şekil 6.12 Pompa durum bilgisinin hava ara yüzünde iletimi	106
Şekil 6.13 RSSI ölçümü test düzeneği	107

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 ZigBee ve Bluetooth.....	3
Çizelge 3.1 Frekans bantları ve veri hızları.....	13
Çizelge 3.2 PD-SAP ilkelleri.....	15
Çizelge 3.3 PLME-SAP ilkelleri	15
Çizelge 3.4 Çerçeve uzunluğu değerleri.....	17
Çizelge 3.5 PHY sabitleri	18
Çizelge 3.6 PHY PIB özellikleri	18
Çizelge 3.7 Sembol – Chip eşlemesi	20
Çizelge 3.8 İzgesel güç yoğunluğu sınırları	22
Çizelge 3.9 Alıcı duyarlılığı tanımları.....	22
Çizelge 3.10 2450 MHz PHY için minimum alıcı frekans bozulma direnci gereksinimleri....	23
Çizelge 4.1 MCPS-SAP ilkelleri	25
Çizelge 4.2 MLME-SAP üzerinden erişilebilen ilkeller	26
Çizelge 4.3 Çerçeve tipi alt alanının değerleri	29
Çizelge 4.4 Varış ve kaynak adresleme modu alt alanlarının değerleri	31
Çizelge 4.5 MAC komut çerçeveleri	39
Çizelge 4.6 Bağlanma durumu alanının geçerli değerleri	42
Çizelge 4.7 Geçerli ayrılma nedeni kodları.....	43
Çizelge 4.8 MAC alt katmanı sabitleri	46
Çizelge 4.9 MAC PIB özellikleri	48
Çizelge 4.10 Kısa adresin kullanımı.....	66
Çizelge 5.1 Adres aktarımı ve TXFIFO yazımı sırasında geri dönen durum baytı.....	79
Çizelge 5.2 CC2420 Komut yazmaçları.....	81
Çizelge 5.3 CC2420 sayısal arabirim	84
Çizelge 6.1 Tipik malzemelerin zayıflatma etkileri	96
Çizelge 6.2 CC2420 yongası çıkış gücü ve akım tüketimi.....	106
Çizelge 6.3 Farklı durumlarda ölçülen RSSI değerleri.....	108

ÖNSÖZ

Günümüzde endüstriyel kontrol ve ev otomasyonu uygulamalarında veri aktarımı için kullanılan bakır kablolar yerlerini hızlı bir şekilde radyo frekans sinyallerine bırakmaktadır. Uygulamaların çok noktadan veri gereksinimleri, maliyetlerin düşürülme çabaları ve taşınabilirlik problemi bu değişimi neredeyse zorunlu hale getirmiştir.

Telsiz izleme ve kontrol sistemlerinin makul veri hızında, düşük güç tüketimi ve düşük maliyetler ile gerçekleştirilmesi amacıyla IEEE 802.15.4 çalışma grubu 2003 yılında düşük hızlı telsiz kişisel alan ağı standardını yayınlamıştır. Halen 50'den fazla büyük yonga üretici firmanın üye olduğu ZigBee Alliance bu standardı temel alan telsiz uygulamaları geliştirme çabasıdadır. Gelecekte izleme ve kontrol amaçlı telsiz ağlarının yaygınlıkla kullanılacağı yapılan bu çalışmalardan anlaşılmaktadır.

Teknolojiyi yakından takip etme gayretinde olan bir mühendis olarak, yüksek lisans tez çalışmamda IEEE 802.15.4 LR-WPAN standardını detaylıca inceleyip, bir telsiz izleme ve kontrol sistemi uygulaması gerçekleştirerek, yurtiçinde üretilebilecek bir ZigBee terminal tasarımına ilişkin katma değer yaratmaya ve tasarım ipuçları vermeye çalıştım. Elde edilen sonucun bu alanda çalışma yapmak isteyenlere yararlı nitelikte olacağına inanıyorum.

Yüksek lisans tez çalışmamda bilgisi ve tecrübelerini benden esirgemeyen hocam Sn. Ünal KÜÇÜK' e, donanım malzemelerinin temininde yardımcı olan arkadaşım İlyas SARAL' a ve aldığım her kararda beni destekleyen aileme teşekkür ediyorum.

Aralık 2006

Sönmez İSAK

ÖZET

Yüksek Lisans tez çalışmasında IEEE 802.15.4 standardı kapsamlı biçimde incelenmiş ve standarda uygun yapıda haberleşen telsiz ağı kurulmuştur.

Konuya alt yapı oluşturması amacı ile birinci bölümde IEEE tarafından 802.15 WPAN çalışma grubunun kurulma amacı ve çalıştığı konular özet olarak sunulmuş, IEEE 802.15.4 standardı ile ZigBee teknolojisinin bağlantısı açıklanmış ve ZigBee ile Bluetooth teknolojileri karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde IEEE 802.15.4 LR-WPAN genel hatları ile belirtilmiştir. LR-WPAN cihaz mimarisi, veri aktarım modeli ve ilkel kavramı gibi konular sunulmuştur. Ayrıca standardın kapsamı dışında kalan ağ topolojileri konusunda bu bölümde incelenmiştir.

IEEE 802.15.4 standardı 2 katman tanımlar. Ağ içinde telsiz veri haberleşmesinin etkinleştirilmesi, frekans seçimi ve veri aktarımı gibi görevler, tanımlanan fiziksel katmanın (PHY) sorumluluğundadır. Fiziksel katmanın özellikleri, çerçeve yapısı ve gereksinimleri üçüncü bölümde anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde ortam erişim kontrolü (MAC) alt katmanı tanıtılmıştır. Bu bölümde beacon, veri, onay ve MAC komut çerçevelerinin yapısı detaylı biçimde anlatılmış ve her MAC komut çerçevesi tanıtılmıştır. MAC alt katmanın sorumluluğunda olan ağ kurulması, cihazın ağa bağlanması ve ayrılması gibi konular yine bu bölüm altında incelenmiştir.

Projede kullanılan RF alıcı-verici yongasının tanıtımı ve yapılandırılması beşinci bölüm altında incelenmiştir.

Uygulamada akaryakıt istasyonlarında pompa durumlarının uzaktan izlenmesi ve kontrolü amacıyla hava ara yüzünde taşınacak veri yükünü DCR-ECR iletişim protokolü tanımlar. Kurulan IEEE 802.15.4 ağı, ağ içindeki cihazların yapısı, DCR-ECR iletişim protokolü ve yapılan testler altıncı bölümde sunulmuş ve sonuç bölümü ile proje tamamlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Telsiz iletişim, IEEE 802.15.4 LR-WPAN, ZigBee, CC2420, 2.4GHz RF

ABSTRACT

In this study the IEEE 802.15.4 standard was comprehensively examined and a wireless network communicating in line with the standard was established.

As an infrastructure for the subject, the purpose for establishment of the 802.15 WPAN working group by IEEE and the working topics were summarized and the relation between the IEEE 802.15.4 standard and ZigBee technology was explained and ZigBee and Bluetooth technologies were compared in Chapter One.

In Chapter Two, IEEE 802.15.4 LR-WPAN was generally described. Topics such as LR-WPAN device architecture, data transfer model and the primitive concept were put forward. Also the network topologies that are not covered by the standard were also examined in this chapter.

The IEEE 802.15.4 standard defines 2 layers. Tasks such as the activation of intranet radio transfer, frequency selection and data transmission-reception are under the responsibility of the defined physical layer (PHY). Characteristics, frame structure and requirements of the physical layer are explained in Chapter Three.

In Chapter Four, the Medium Access Control (MAC) sub-layer was described. Structures of MAC command frames, beacon, data and confirmation were explained in detail and each MAC command frame was described. Tasks like establishment of a network, connection to and disconnection of device from the network that are under the responsibility of MAC sub-layer were also examined in this chapter.

Description and configuration of the RF transmitter-receiver chip used in the project were examined in Chapter Five.

In practice, for remote control and monitoring of the pump situations in fuel-oil stations, the data load to be carried on the air interface is defined by DCR-ECR communication protocol. The IEEE 802.15.4 network established, structure of the devices in the network, DCR-ECR communication protocol and the tests conducted are presented in Chapter Six and the project was completed in the Conclusion.

Keywords: Wireless Communication, IEEE 802.15.4 LR-WPAN, ZigBee, CC2420, 2.4GHz RF.

1. GİRİŞ

1.1 Telsiz Kişisel Alan Ağları (WPAN)

Telsiz Kişisel Alan Ağı (WPAN) teknolojileri kullanıcılara kişisel işletim alanı (POS) içinde kullanılacak (PDA, cep telefonu veya dizüstü bilgisayarları gibi) aygıtlar için özel, telsiz iletişim kurma olanağı tanır. WPAN teknolojilerinin geliştirilmesini standartlaştırmak amacıyla IEEE, WPAN' lar için 802.15 çalışma grubunu kurmuştur. Çalışma grubunun ana hedefleri daha az karmaşıklık, düşük güç tüketimi, birlikte çalışabilirlik ve 802.11 ağlarıyla birlikte bulunmadır.

IEEE 802.15 WPAN çalışma grubu 1 (TG1) ilk standardı 14 Haziran 2002' de "Bluetooth v1.1 tabanlı telsiz kişisel alan ağı standardı" ismiyle yayınladı. İlk standart neredeyse Bluetooth' un aynısıdır ve onunla tamamen uyumludur. Tek farkı üreticiler konsorsiyumu yerine IEEE tarafından destekleniyor olmasıdır.

IEEE 802.15 WPAN çalışma grubu 2 (TG2) 2003 yılında telsiz kişisel alan ağları içinde işleyen cihazlar ile diğer telsiz cihazlarının lisansız frekans bandında bir arada bulunmasını olanak tanıyan standardını yayınladı. Standart ile 802.15 – WPAN ile 802.11 – WLAN cihazlarının bir araya gelmesi mümkün olabilecektir.

IEEE 802.15 WPAN çalışma grubu 3 (TG3) 20Mbit/s ve daha hızlı işleyen WPAN' lar için standart yayınladı. Standart ile yüksek hızın yanında düşük güç tüketimi ve düşük maliyet, taşınabilir görüntü ve çoklu ortam cihazları için olanaklı hale geldi. 802.15.3 yüksek hızlı telsiz kişisel alan ağları (HR-WPAN) standardı 11, 22, 33, 44 ve 55Mbit/s veri hızlarını desteklemektedir. WiMedia ve UltraWideband (UWB) gibi teknolojiler bu standardın sürümleri üstüne kurulmuştur. UWB, görüntü aktarımı gibi yüksek hızlı veri uygulamaları ile birlikte adı geçen bir teknolojidir. 2.4 GHz frekans bandında 55Mbit/s veri aktarım hızına kadar ulaşabilir. Fakat Mevcut yasal düzenlemeler altında UWB' nin gücü oldukça kısıtlandığında menzili Bluetooth' a yakındır.

IEEE 802.15 WPAN çalışma grubu 4 (TG4) ve yeni standartların sonuncusu olan 802.15.4, düşük hızlı telsiz kişisel alan ağı (LR-WPAN) için ortam erişim kontrolü alt katmanı (MAC) ve fiziksel katman (PHY) özelliklerini tanımlar. Çoğu yönden önceki çalışmaların tam tersi özelliklere sahiptir. Daha düşük veri hızı (20Kbit/s ile 250Kbit/s arası hızlarda), düşük güç tüketimi ve daha düşük maliyet. Diğer bir yenilik de 48 bitlik adresler yerine 64 bitlik adreslerin kullanılmasıdır.

1.2 IEEE 802.15.4 ve ZigBee

Yakın gelecekte, konut ve ticari bina otomasyonları, endüstriyel izleme uygulamaları gibi kontrol ve izleme uygulamalarında kullanılacak telsiz ağlarının pazar payının hızla büyümesi bekleniyor.

Telsiz izleme ve kontrol sistemleri tipik olarak çok sayıda nokta veya algılayıcı gerektirir. Bu durum telsiz çözümleri için zorunluluktur. Bundan başka, pek çok algılayıcının pahalı olmayan bataryalar ile yıllarca çalışması ve son derece düşük güç tüketimlerine sahip olması gerekir. Algılayıcılardan gönderilen veri miktarı tipik uygulamalar için sınırlıdır, bu nedenle iletişim bağlantıları düşük hızlı olabilir. Gerek duyulan bağlantılar güvenilir, güvenli ve düşük maliyetli olmalıdır.

Günümüzde telsiz ve kontrol sistemleri için tescilli çözümler kullanılır. Sistem geliştiricileri için bunun önemli bir avantajı, uygulamalarını standart haline gelmiş ortam üzerine kurmalarıdır. IEEE 802.15.4 LR-WPAN telsiz izleme ve kontrol sistemleri için standarttır. ZigBee teknolojisi, IEEE 802.15.4 standardının ortam erişim kontrol katmanı (MAC) ve fiziksel katmanı (PHY) üzerinden ağ ve uygulama destek servislerinin işletilmesini sağlar. ZigBee, IEEE 802.15.4 standartları tarafından tanımlanan PHY ve MAC katmanları üzerine kurulmuştur. PHY ve MAC katmanlarının üzerinde, ZigBee ağ topolojileri ile veri güvenlik özelliklerini ve uygulama profillerinin birlikte çalışmalarını tanımlar.

Bluetooth ve WLAN gibi son derece duyulmuş standartlar düşük güçlü gömülü algılayıcı sistemleri için kullanışlı değildirler. Bu standartlar yüksek düğüm maliyetlerine, karmaşık yapıya ve fazla güç tüketen radyo frekans yongalarına sahiptir. IEEE 802.15.4 – ZigBee protokolünün kontrol ve izleme uygulamaları için avantajları şunlardır:

- Gerekli telsiz çözümü için çok miktarda nokta veya algılayıcı bulundurabilmesi,
- Çok düşük sistem maliyetleri,
- Düşük güç tüketen RF yongaları ve protokol sayesinde pahalı olmayan bataryalar ile yıllarca çalışabilmesi,
- Düğümler arasındaki bağlantıların güvenilir ve güvenli olması,
- Ağ kurulumunun basit olması,
- Algılayıcılardan gönderilecek verinin sınırlı olması nedeniyle iletişim bağlantılarının düşük hızlarda çalışması,
- Algılayıcıların düşük görev süreleri nedeniyle zamanın büyük bölümünde güç tasarruf modunda bekleyebilmeleri.

1.3 ZigBee ve Bluetooth Karşılaştırılması

ZigBee ve Bluetooth teknolojileri 2.4 GHz ISM bandında işlemleri ve ortak uygulama alanları bulunması nedeniyle birbirine alternatif olarak değerlendirilir. Her iki teknolojinin birbirine rakip olduğu uygulamaların yanında tamamlayıcı olduğu uygulamalarda mevcuttur. Bluetooth medya uygulamaları için kablo bağlantılarına alternatif olarak düşünülmüştür. ZigBee' ye göre nispeten yüksek hız gerektiren uygulamalarda Bluetooth uygun bir tercih olurken daha düşük hızlı uygulamalarda ZigBee' nin avantajları öne çıkmaktadır. ZigBee ağlarının asıl amacı düşük veri hızları gerektiren kontrol ve izleme uygulamalarıdır. Bu bakımdan her iki teknolojiyi rakip olmaktan çok ayrı alanlar için farklı çözümler olarak düşünmek gerekir. Çizelge 1.1'de her iki teknoloji değişik parametreler bakımından özetlenmiştir.

Çizelge 1.1 ZigBee ve Bluetooth

Ticari İsmi	Bluetooth	ZigBee
IEEE Standart	802.15.1	802.15.4
Sistem kaynağı gereksinimleri	250 KByte +	4 KByte – 32 KByte
Batarya ömrü (gün)	1 – 7	100 – 1000 +
Ağa katılabilen cihaz sayısı	7	~sınırsız (65536)
Band Genişliği (Kbit / s)	1000	20 - 250
Veri iletim mesafesi (metre)	~10	~100

2. IEEE 802.15.4 LR-WPAN GENEL TANITIMI

LR-WPAN basit ve düşük maliyetli iletişim ağıdır. Sınırlı güç ve esnek gereksinimler ile telsiz uygulamalarına olanak sağlar. LR-WPAN'ın ana amaçları; basit ve esnek protokolü koruyarak, kurulum kolaylığı, güvenilir veri aktarımı, kısa menzilli işlem, son derece düşük maliyet ve makul pil ömrü uzunluğunu sağlamaktır.

LR-WPAN'ın bazı özellikleri:

- 250kb/s, 40kb/s ve 20kb/s hızlarında veri aktarımı,
- Yıldız veya noktadan noktaya çalışma,
- Ayrılmış 16 bit kısa ve 64 bit genişletilmiş adres,
- Garantilenmiş zaman dilimleri (GTS),
- Taşıyıcıyı dinleyen çarpışmadan kaçınan çoklu erişim (CSMA-CA),
- Veri aktarım güvenilirliği için tamamen doğrulanabilir protokol,
- Düşük güç tüketimi,
- Enerji sezimi (ED),
- Bağlantı kalite bildirimi (LQI),
- 2450 Mhz bandında 16 kanal, 915 Mhz bandında 10 kanal ve 868 Mhz bandında 1 kanal.

LR-WPAN ağına 2 farklı tipte cihaz katılabilir: tam fonksiyonlu cihaz (FFD) ve indirgenmiş fonksiyonlu cihaz (RFD). Tam fonksiyonlu cihazlar kişisel alan ağı koordinatörü, koordinatör veya cihaz olarak 3 farklı şekilde hizmet verebilir. Tam fonksiyonlu cihazlar ağda bulunan tüm cihazlar ile iletişim kurabilirken indirgenmiş fonksiyonlu cihazlar sadece tam fonksiyonlu cihazlar ile iletişim kurabilir. İndirgenmiş fonksiyonlu cihazlar ışık anahtarı veya pasif kızıl ötesi algılayıcı gibi son derece basit uygulamalar için planlanır ve çok miktarda veri göndermeleri gerekmez. Bir RFD aynı zamanda yalnızca bir FFD ile iletişim kurabilir. Sonuç olarak, RFD çok az kaynak ve düşük hafıza kapasitesi ile gerçekleştirilebilen cihazlardır.

2.1 IEEE 802.15.4 LR-WPAN Bileşenleri

IEEE 802.15.4 standardına uygun sistemler birkaç bileşenden oluşur. Sistem içindeki cihazlar RFD veya FFD olabilir. İki veya daha fazla sayıda cihaz bir WPAN' da oluşturulmuş aynı fiziksel kanal üzerinde iletişim kurabilirler. Fakat kurulan ağda en azından bir tane kişisel alan ağı (PAN) koordinatörü gibi işleyen FFD bulunmalıdır. Bir IEEE 802.15.4 ağı WPAN standartları ailesinin bir parçası olmasına rağmen bir LR-WPAN'ın kapsamı kişisel işletim

alanının (POS) ötesine uzayabilir.

Telsiz ortam için iyi tanımlanmış kapsama alanı modeli mevcut değildir. Çünkü yayılım özellikleri değişkendir ve kesinlik göstermez. Durum ve doğrultudaki küçük değişiklik işaret gücünde ve iletişim kanal kalitesinde şiddetli farklılıklar ile sonuçlanabilir. Cihaz durağan veya hareketli bile olsa bu etkiler kaçınılmazdır. Kapsama alanı içinde bulunan hareketli nesneler istasyondan istasyona yayılımı etkiler.

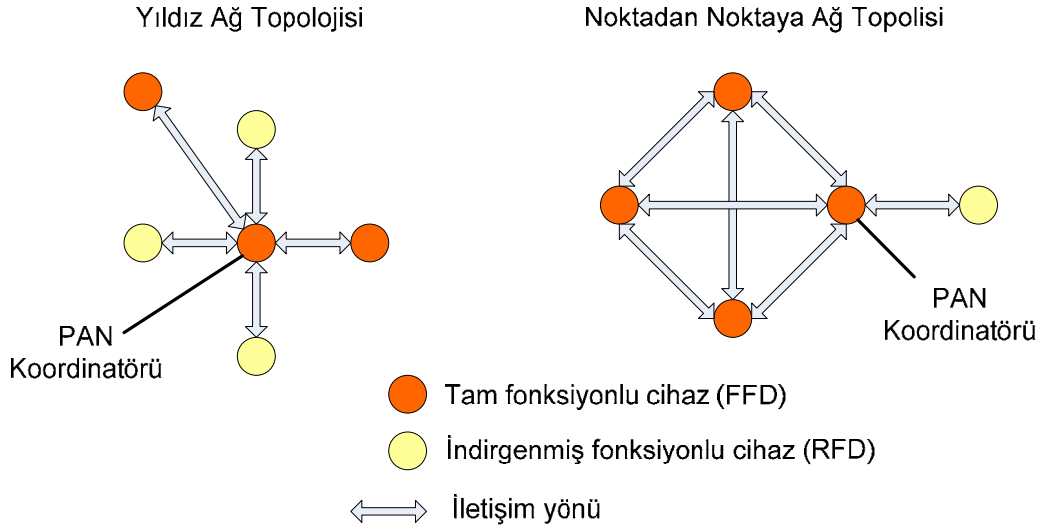
2.2 Ağ Topolojileri

Uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, LR-WPAN iki topolojiden birinde işletilebilir: Yıldız Topolojisi veya Noktadan Noktaya Topolojisi. Her ikisi de şekil 2.1’de gösterilmiştir. Yıldız topolojisinde iletişim cihazlar ile PAN koordinatörü olarak anılan tek bir merkezi kontrolcü arasında kurulur. Ağ içinde çalışan her cihaz tekil 64 bitlik genişletilmiş adrese sahip olmalıdır. Bu adresler PAN içinde doğrudan haberleşme için kullanılır veya PAN koordinatörünün izni ile 16 bitlik kısa adresler ile değiştirilir. Yıldız ağ topolojisi ev otomasyonu, kişisel bilgisayarların çevre birimleri, elektronik oyuncaklar ve kişisel sağlık cihazları uygulamalarında faydalı olabilir.

Noktadan noktaya ağ topolojisi de PAN koordinatörüne sahiptir. Fakat bu topoloji de yıldız topolojisinden farklı olarak, ağ içindeki cihazlar menzili içindeki diğer cihazlar ile iletişim kurabilir. Noktadan noktaya ağ topolojisi daha karmaşık ağ biçimlerine uygulanabilir (Örneğin çokgen bağlantılı ağlar). Endüstriyel kontrol ve izleme, telsiz algılayıcı ağları, stok ve envanter izleme, ziraat ve güvenlik uygulamalarında bu topoloji faydalı olabilir.

Her bağımsız PAN kendine tekil 16 bitlik bir belirteç seçer. PAN belirtecinin seçimi ile ağ içindeki cihazlar 16 bitlik kısa adresleri kullanarak iletişim kurabilir ve bağımsız ağlar içindeki cihazlar arasında iletişim olanağı sağlanır.

Ağın teşkil edilmesi ağ katmanı tarafından gerçekleştirilir ve bu katman standardın bir parçası değildir. Yinede topolojiler bu bölümde incelenecek ve desteklenen topolojilerin nasıl uygulanacağı konusunda bilgi verilecektir.



Şekil 2.1 Yıldız ve noktadan noktaya ağ topoloji örnekleri

2.2.1 Yıldız Ağ Topolojisi

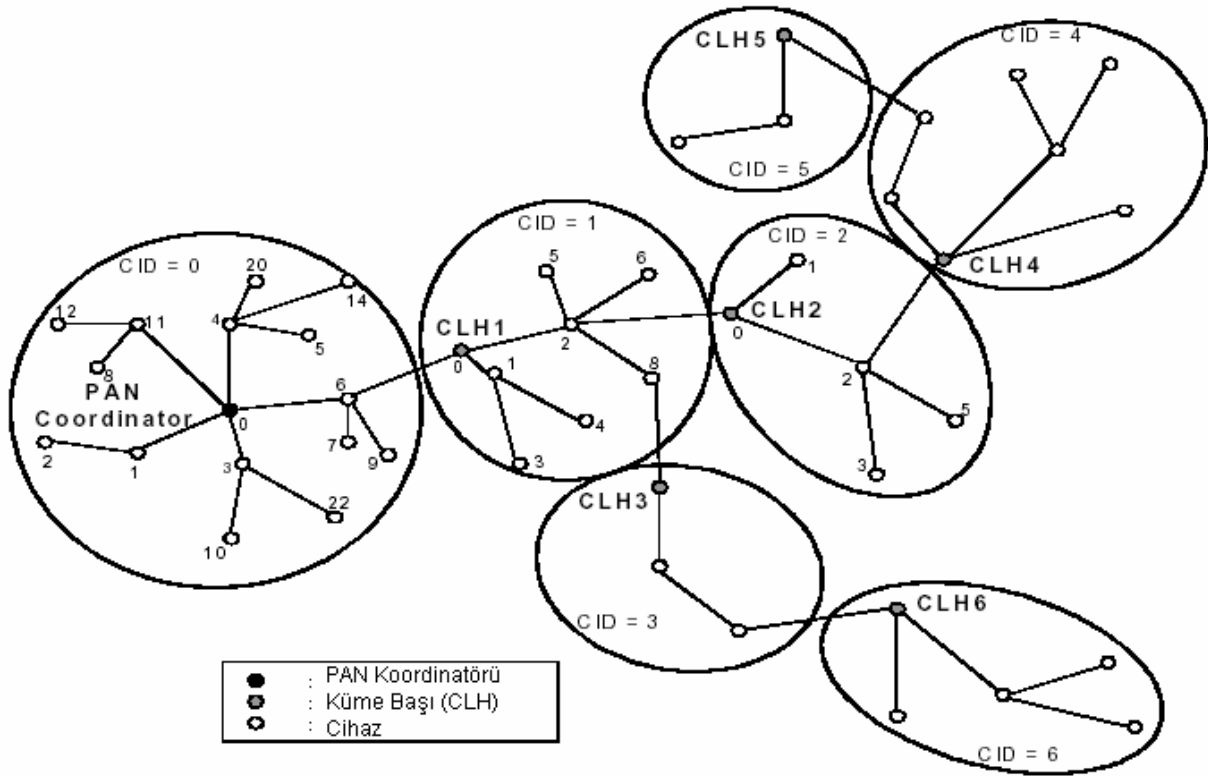
Yıldız ağının temel mimarisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu mimaride bir tam fonksiyonlu cihaz (FFD) etkinleştirildikten sonra ilk olarak kendi ağını kurar ve PAN koordinatörü olur. Tüm yıldız ağları etki alanları içinde aynı zamanda işleyen diğer tüm yıldız ağlarında bağımsız çalışır. Bu, etki alanı içinde bulunan diğer ağlar tarafından kullanılmayan PAN belirteci seçilerek sağlanır. Bir kez PAN belirteci seçilince, PAN koordinatörü diğer cihazların kendi ağına katılmalarına izin verir. FFD ve RFD’ ler tanımlanan ağı katılabilir. Ağı katılma işleminin detayları ileriki kısımlarda anlatılacaktır.

2.2.2 Noktadan Noktaya Ağ Topolojisi

Noktadan noktaya topolojisinde, her cihaz kendi radyo etki alanı içindeki herhangi başka bir cihazla iletişim yeteneğine sahiptir. Ağ içindeki bir cihaz PAN koordinatör olarak atanır. Örneğin kanalda haberleşmek için başlayan ilk cihaz PAN koordinatörü olabilir. Başka ağ mimarileri de noktadan noktaya topolojisinin dışında kurulabilir ve ağın teşkilinde bazı topolojik kısıtlamaları zorla yükleyebilir.

Noktadan noktaya iletişim topolojisinin kullanım örneklerinde biriside küme-ağacı ağıdır. Küme-ağacı ağı içinde çok sayıda FFD’ nin bulunduğu noktadan noktaya topolojisinin özel bir durumudur. Bir RFD dalın sonundaki düğümden küme ağacı ağına bağlanabilir, çünkü sadece bir FFD ile iletişim kurabilir. Herhangi bir FFD koordinatör görevi yürütür ve diğer cihazlar için veya koordinatörler için eş zamanlama hizmeti sağlar. Bu koordinatörlerden sadece bir tanesi tüm ağ için PAN koordinatörü olabilir. Ağ içindeki diğer cihazlardan daha

fazla işlem kabiliyetine sahip cihaz PAN koordinatörü olarak çalışır. PAN koordinatörü birinci kümeyi kendi kendine kurar ve küme kimliğini (CID) sıfır olarak atar, kullanılmayan PAN kimliği seçer ve beacon çerçevesini komşu cihazlara yayınlar. Beacon çerçevesini alan aday cihaz ağa küme başı olarak bağlanmak için istekte bulunabilir. Eğer PAN koordinatörü cihaza bağlanmak için izin verirse, onu kendi komşu listesine çocuk cihaz olarak ekler. Yeni eklenen cihaz kendisinin ana olduğu yeni bir küme oluşturur ve kendi listesini oluşturmak için periyodik olarak kendi beacon çerçevesini yayınlar. Diğer aday cihazlar bu cihazın ağına bağlanabilir. Eğer orijinal aday cihaz ağa küme başı olarak katılmak istemezse kendine başka ana cihazlar aramaya başlar. Bu işlemlerin detayları, PAN nasıl başlatılır ve cihazlar ağa nasıl katılır konuları ileriki bölümlerde anlatılacaktır. Küme ağacı ağının basit bir biçimi de tekli küme ağacıdır, fakat daha geniş ağlar çoklu komşu kümeleri uygulanarak kurulabilir. Şekil 2.2 cihazların ana-çocuk ilişkisini göstermektedir. Çoklu küme mimarisinin avantajı artan kapsama alanı iken, dezavantajı mesaj gecikmelerinin artmasıdır.

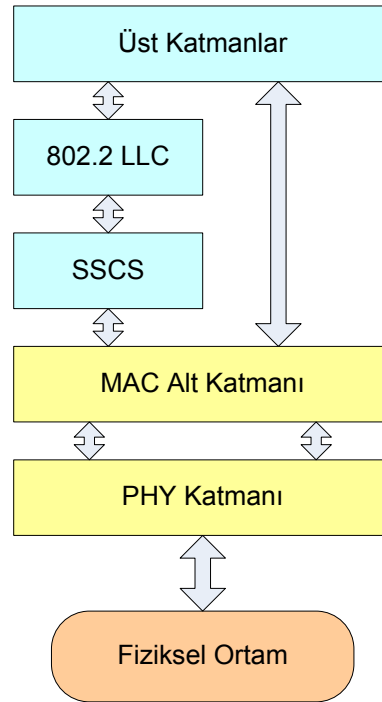


2.3 LR-WPAN Mimarisi

LR-WPAN mimarisi standardı basitleştirmek için bloklar halinde tanımlanmıştır. Tanımlanan bu bloklara katman denir. Her bir katman standardın bir parçasından ve üstündeki katmanlara hizmet etmekten sorumludur. Blokların yerleşimi 7 katmanlı açık sistemler bağlantısı (OSI) modelini temel alır.

Bir LR-WPAN cihazı, radyo frekans alıcı-vericisi ile birlikte onun düşük seviyeli kontrol mekanizmalarını ve veri aktarımının bütün tipleri için fiziksel kanala erişimi sağlayan MAC katmanını içerir. Şekil 2.3'te bölüm 3 ve bölüm 4 de detaylıca incelenecek blokların grafik gösterimi verilmiştir.

Şekil 2.3'te gösterilen üst katmanlar, ağ konfigürasyonunu, mesaj yönlendirmesini, cihazların planlanan fonksiyonlarını sağlayan uygulama katmanlarından oluşur. Tanıtılan bu üst katmanlar standardın dışındadır. LR-WPAN mimarisi gömülü cihazlara veya PC tarafından desteklenen cihazlara uygulanabilir.



Şekil 2.3 LR-WPAN cihaz mimarisi

2.4 Veri Aktarım Modeli

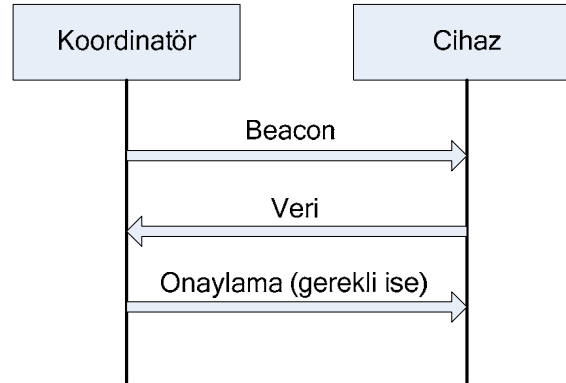
3 tip veri aktarım modeli vardır. Veri aktarımının birinci tipi, bir cihazdan koordinatöre gönderilen verilerdir. İkinci tipi bir koordinatörden bir cihaza gönderilen veriler ve üçüncü tipi

ise eş cihazlar arasında aktarılan verilerdir. Yıldız topolojisinde bu aktarım modellerinden ilk ikisini kullanılır, çünkü veriler sadece koordinatör ve cihazlar arasında aktarılabilir. Noktadan noktaya topolojide veri, ağ içindeki herhangi iki cihaz arasında aktarılır. Sonuç olarak tarif edilen üç veri aktarım modeli bu topoloji için kullanılabilir.

Her veri aktarım tipinin mekanizması, ağın beacon çerçevelerinin iletimini destekleyip-desteklemediğine bağlıdır. Bilgisayar çevre birimleri gibi düşük gecikme süresi ile veri aktarımını destekleyen cihazlar için aktif-beacon ağlar kullanılır. Eğer kurulacak ağ böyle cihazları desteklemeyecekse beacon çerçevesi normal veri aktarımları için elenebilir. Yinede, koordinatöre yeni bir cihazın bağlanma isteği geldiğinde beacon üretilmelidir. Veri aktarımında kullanılan çerçevelerin yapısı ileriki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

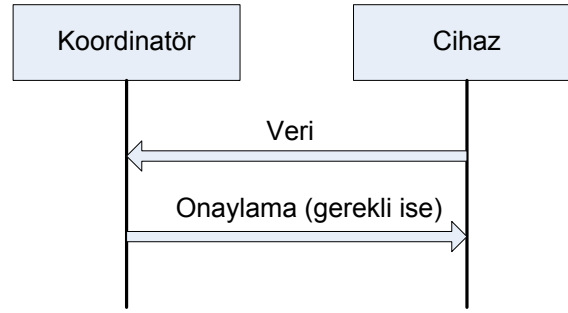
2.4.1 Koordinatöre Veri Aktarımı

Aktif-Beacon ağlarda bir cihaz, koordinatöre veri göndermek istediğinde, ilk önce ağın beacon çerçevesini yakalamaya çalışır. Bağlı olduğu ağın beacon çerçevesi bulunduğunda cihaz süper çerçeve yapısına eş zamanlı hale gelir. Bu aşamadan sonra cihaz uygun bir noktada kendi veri çerçevesini slotlu CSMA-CA kullanarak koordinatöre iletir. Koordinatör iletilen verinin başarı ile alındığını seçimli onay çerçevesini ileterek onaylar. İşlem bu noktada tamamlanmış olur. Yapılan veri aktarım işlemi Şekil 2.4'te özetlenmiştir.



Şekil 2.4 Aktif-Beacon ağı içinde koordinatör ile iletişim

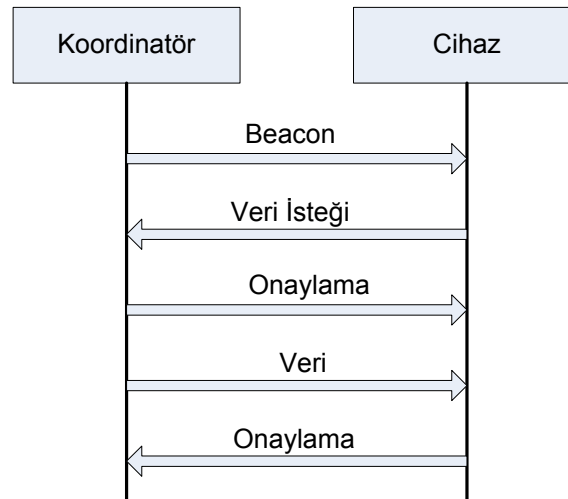
Pasif-Beacon ağlarda bir cihaz, koordinatöre veri göndermek istediğinde, basit olarak kendi veri çerçevesini slotsuz CSMA-CA kullanarak koordinatörüne gönderir. Koordinatör verinin başarı ile alındığını seçimli onay çerçevesi ileterek onaylar. İşlem bu noktada tamamlanmış olur. Bu aktarım işlemi şekil 2.5'te özetlenmiştir.



Şekil 2.5 Pasif-Beacon ağı içinde koordinatör ile iletişim

2.4.2 Koordinatörden Veri Aktarımı

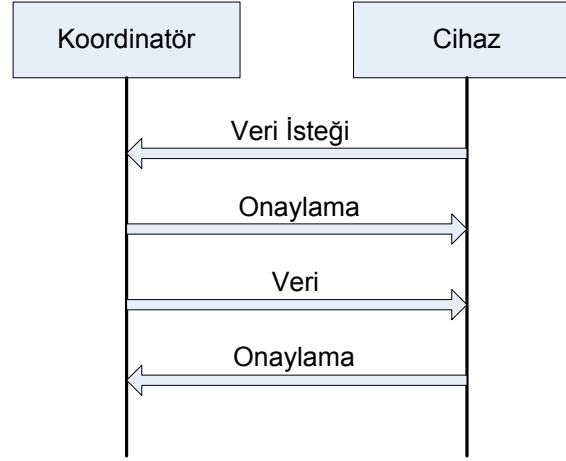
Aktif-Beacon ağda koordinatör bir cihaza veri göndermek isterse, ağın beacon çerçevesinde içinde veri mesajı beklediğini belirtir. Böyle ağlarda cihazlar periyodik olarak ağın beacon çerçevesini dinler. Eğer cihaz için bekleyen mesaj varsa, cihaz tarafından veri isteği komutu slotlu CSMA-CA mekanizması kullanılarak gönderilir. Koordinatör komutun alındığını onaylamak için seçimli onay çerçevesini iletir ve ardından slotlu CSMA-CA mekanizmasını kullanarak bekleyen veriyi gönderir. Cihaz, bekleyen veriyi aldığı zaman onay çerçevesi yollayarak alındıyı onaylar. İşlem bu noktada tamamlanmış olur. Onay çerçevesinin alınması üzerine mesaj, beacon içindeki bekleyen mesajlar listesinden silinir. Veri aktarım işlemi şekil 2.6’da özetlenmiştir.



Şekil 2.6 Aktif-Beacon ağı içinde koordinatörün iletişimi

Pasif-Beacon ağda koordinatör bir cihaza veri göndermek isterse, koordinatör gönderilecek veriyi, uygun cihaz koordinatör ile bağlantı kurana veya veri isteğinde bulunana kadar

depolar. Cihaz uygulamada belirtilmiş aralıklarda veri isteği komutunu slotsuz CSMA-CA ile koordinatörüne göndererek, koordinatörü ile bağlantı kurabilir. Koordinatör veri isteğini komutunun başarı ile alındığını onaylamak için onay çevresi yollar. Cihaz için bekleyen veri mevcutsa, koordinatör slotsuz CSMA-CA kullanarak bekleyen veriyi gönderir. Veri mevcut değilse, koordinatör sıfır uzunluklu veri yükü ile veri çerçevesini gönderir. Bu cihaza bekleyen verinin olmadığı belirtir. Cihaz verinin başarı ile alındığını onaylamak için onay çerçevesini gönderir. İşlem bu noktada tamamlanmış olur.



Şekil 2.7 Pasif-Beacon ağı içinde koordinatörün iletişimi

2.4.3 Noktadan Noktaya Veri Aktarımı

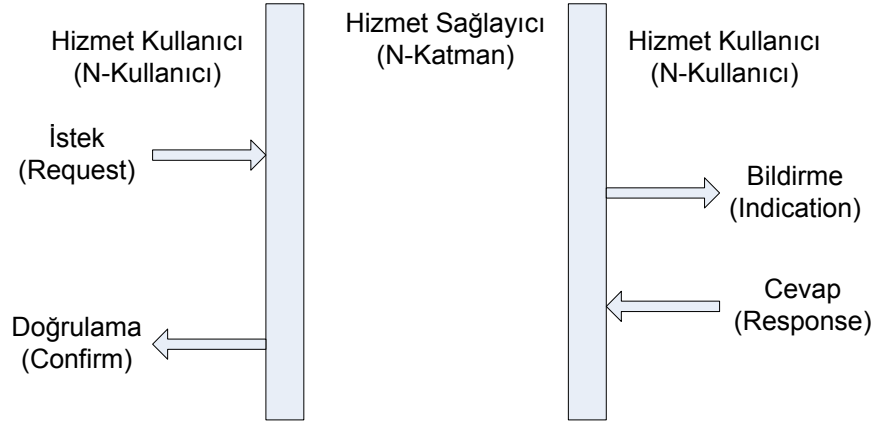
Noktadan noktaya topolojisi ile kurulmuş ağlarda her bir cihaz kendi iletişim alanı içindeki başka bir cihaz ile iletişim kurabilir. Bunun etkin olarak sağlanabilmesi için ya cihazlar diğer alıcı cihazlar ile sürekli iletişim içinde olurlar ya da birbirleri ile eş zamanlı çalışma ihtiyacı duyarlar. İlk bahsedilen metotta cihaz verisini basitçe slotsuz CSMA-CA ile gönderir. İkinci metotta söylenen eş zamanlamanın sağlanabilmesi için değişik ölçülere gereksinim duyulur. Bu ölçüler standardın kapsamının ötesindedir ve uygulamaya bağlı nitelik gösterir.

2.5 İlkel Kavramı

Katman hizmetleri, aşağı katmanın üzerine fonksiyonlarını kurarak, kullanıcıya üst katmanlara veya alt katmanlara hizmet verme yeteneği sunar. Karşılıklı N-kullanıcı ve onların eş protokol varlıkları ile ilişkili N-katmanı (veya alt katmanı) arasındaki hizmet hiyerarşisi ve ilişkisi şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Bu hizmetler, N-kullanıcı ve N-katman arasındaki bilgi akışını tanımlayarak belirlenmiştir.

Bu bilgi akışı hizmeti tanımlayan anlık olaylar için ayrı modelenmiştir. Her olay, N-kullanıcı ile ilişkili katman SAP' ı üzerinden bir katmandan diğerine hizmet ilkelerinin geçirilmesinden ibarettir. Hizmet ilkeleri hizmet için gerekli bilgiyi taşır. Bu hizmet ilkeleri soyutlamadır, çünkü onlar sağladığı yöntemden ziyade sadece sağladığı hizmeti belirtir. Bu tanım her hangi diğer arabirim uygulamasından bağımsızdır.



Şekil 2.8 Hizmet ilkeleri

Hizmetler, hizmet ilkeleri ve parametreleri tanımlanması ile belirlenir ve bu onları karakterize eder. Bir hizmet, hizmet ile ilişkili bir etkinlik oluşturacak şekilde bir veya daha fazla ilişkili ilkel içerebilir. Tüm hizmet ilkeleri hizmet sağlamak için gerekli bilgiyi taşıyan sıfır veya çok sayıda parametreye sahip olabilir. Bir ilkel belirtilen 4 gruptan birindedir.

- **İstek (Request)** : İstek ilkeli hizmetin başlatılması isteğini N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.
- **Bildirme (Indication)** : Bildirme ilkeli N-kullanıcısı için önemli içsel N-katman olayı belirtisini N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir. Bu olay uzaktaki istek hizmeti ile mantıksal olarak ilişkili olabildiği gibi N-katmanın içsel olayı sebebiyle de oluşabilir.
- **Cevap (Response)** : Cevap ilkeli bir bildirme ilkeli tarafından başlatılmış işlemin tamamlanmasını N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.
- **Doğrulama (Confirm)** : Doğrulama ilkeli bir veya daha fazla sayıda ilişkilendirilmiş hizmet isteklerinin sonuçlarının taşınmasını N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.

3. IEEE 802.15.4 FİZİKSEL KATMANI ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde IEEE 802.15.4 standardının fiziksel katmanı (PHY) tanımlanacaktır. Fiziksel katman aşağıda listelenen görevlerden sorumludur:

- Radyo alıcı-vericisinin etkinleştirilmesi
- Güncel kanal için enerji sezimi (ED)
- Alınan paketler için bağlantı kalite bildirimi(LQI)
- CSMA-CA için temiz kanal atanması (CCA)
- Kanal frekans seçimi
- Veri iletimi ve alımı

Fiziksel katman tarafından belirlenen sabitler ve özellikler bu bölümde italik yazılmıştır. Sabitler genel olarak “*a*” ön ekine sahiptir (örneğin, *aMaxPHYPacketSize*) ve çizelge 3.5’te listelenmiştir. Özellikler genel olarak “*phy*” ön ekine sahiptir (örneğin, *phyCurrentChannel*) ve çizelge 3.6’da listelenmiştir.

3.1 Genel Gereksinimler ve Tanımlamalar

Genel gereksinimler ve tanımlamalar IEEE 802.15.4 standardının tüm fiziksel katmanları için belirtilmiştir.

3.1.1 İşletim Frekansı

Uyumlu cihazlar bir veya birkaç frekans bandında çizelge 3.1’de özetlenen modülasyon ve yayılma biçimlerini kullanarak işletilmelidir.

Çizelge 3.1 Frekans bantları ve veri hızları

PHY (MHz)	Frekans Bandı (MHz)	Yayılım Parametreleri		Veri Parametreleri		
		Chip Oranı (kchip/s)	Modülasyon	Bit Oranı (kb/s)	Sembol Oranı (ksymbol/s)	Semboller
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	İkili
	902-928	600	BPSK	40	40	İkili
2450	2400- 2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16lı Dikgen

3.1.2 Kanal Atama ve Numaralandırma

Frekans bandında toplam 0'dan 26'ya kadar numaralandırılan 27 kanal mevcuttur. 2450 MHz bandında 16, 915 MHz bandında 10 kanal ve 868 MHz bandında 1 kanal mevcuttur. Bu kanalların merkez frekansları aşağıda tanımlanmıştır.

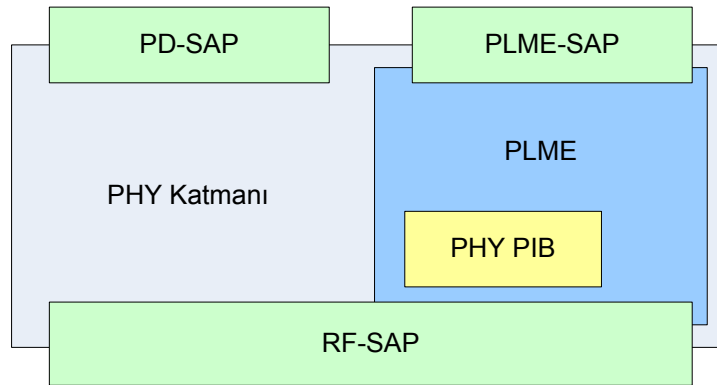
$$\begin{aligned} F_c &= 868,3 \text{ [MHz]} \rightarrow k = 0 \\ F_c &= 906 + 2(k - 1) \text{ [MHz]} \rightarrow k = 1, 2, \dots, 10 \\ F_c &= 2405 + 5(k - 11) \text{ [MHz]} \rightarrow k = 11, 12, \dots, 26 \end{aligned} \quad (3.1)$$

k : kanal numarası

Desteklenen her fiziksel katman için, uyumlu cihazlar işletildiği bölgede izin verilen tüm kanalları desteklemelidir.

3.2 PHY Hizmet Özellikleri

PHY, RF yazılımı ve RF donanımı üzerinden MAC alt katmanı ve fiziksel radyo kanalı arasındaki arabirimi sağlar. PHY, yönetim varlıkları olarak anılan PLME varlığını içerir. PLME katman yönetim fonksiyonlarını içerir. PLME aynı zamanda PHY ile ilgili nesnelerin veri tabanının (PIB) korunmasından sorumludur. Şekil 3.1 PHY' nin bileşenlerini ve arabirimleri gösterir.



Şekil 3.1 PHY referans modeli

PHY iki servis erişim noktasından erişilen 2 hizmeti sağlar.

- PD-SAP' tan erişilen PHY veri hizmeti
- PLME-SAP' tan erişilen PHY yönetim hizmeti

3.2.1 PHY Veri Hizmeti

PD-SAP, eş düzeyli 2 MAC alt katman varlığı arasındaki MPDU' nun aktarılmasını sağlar. Çizelge 3.2'de PD-SAP tarafından desteklenen temel ilkeller listelenmiştir.

Çizelge 3.2 PD-SAP ilkelleri

PD-SAP ilkeli	İstek(Request)	Doğrulama(Confirm)	Bildirme(Indication)
PD-DATA	■	■	■

PD-DATA.request ilkeli MAC alt katmanından yerel PHY varlığına bir MPDU' nun (PSDU) aktarımını gerektirir.

PD-DATA.confirm ilkeli yerel MAC alt katman varlığından eş düzeyli başka MAC alt katman varlığına gönderilen MPDU' nun (PSDU) aktarım sonucunu bildirir.

PD-DATA.indication ilkeli PHY' den yerel MAC alt katman varlığına MPDU' nun (PSDU) aktarımını belirtir.

3.2.2 PHY Yönetim Hizmeti

PLME-SAP yönetim amaçlı komutların MLME ve PLME arasındaki aktarımını sağlar. Çizelge 3.3'te listelenen ilkeller PLME-SAP tarafından destelenir.

Çizelge 3.3 PLME-SAP ilkelleri

PLME-SAP İlkelleri	İstek (Request)	Doğrulama (Confirm)
PLME-CCA	■	■
PLME-ED	■	■
PLME-GET	■	■
PLME-SET-TRX-STATE	■	■
PLME-SET	■	■

PLME-CCA.request ilkeli PLME' nin temiz kanal ataması (CCA) uygulamasını gerektirir.

PLME-CCA.indication ilkeli CCA sonucunu raporlar.

PLME-ED.request ilkeli PLME' nin enerji sezimi (ED) ölçümü uygulamasını gerektirir.

PLME-ED.indication ilkeli enerji sezimi ölçümünün sonucunu raporlar.

PLME-GET.request ilkeli belirtilen PHY PIB özelliği hakkında bilgi ister.

PLME-GET.indication ilkeli belirtilen PHY PIB özelliği hakkında istenen bilgiyi raporlar.

PLME-SET-TRX-STATE.request ilkeli PHY varlığının alıcı-verici ünitesinin durumunu değiştirmesini gerektirir. Alıcı-verici ünitesi 3 ana durumdan birinde olabilir; Alıcı-verici devre dışı, verici aktif veya alıcı aktif.

PLME-SET-TRX-STATE.confirm ilkeli alıcı-verici ünitenin çalışma durumunu değiştirme isteğinin sonucu raporlar.

PLME-SET.request ilkeli belirtilen PHY PIB özeliğine verilen değeri atamaya çalışır.

PLME-SET.indication ilkeli değiştirilmek istenen PHY PIB özelliğinin son durumunu raporlar.

3.3 PHY Protokol Veri Birimi Yapısı

Standarda uygunluk için, sunulan PHY protokol veri birimi (PPDU) paket yapısında en solda yazılan alan ilk gönderilmeli ve alınmalıdır. Bütün çoklu bayt alanlarında en düşük anlamlı bayt ve her bayt için en düşük anlamlı bit (LSB) önce gönderilmeli ve alınmalıdır. PHY ve MAC alt katmanları arasındaki veri aktarımı için de aynı şekilde iletim yapılmalıdır.

Her bir PPDU paketi aşağıda belirtilen temel bileşenleri içerir:

- SHR, alıcı cihazın eş zamanlamayı sağlamasını ve bit akımına kilitletmesini sağlar.
- PHR, çerçeve uzunluğu bilgisini içerir.
- Değişken uzunluktaki veri yükü, MAC alt katmanı çerçevesini taşır.

Bayt: 4	1	1		Değişken
Başlangıç	SFD	Çerçeve Uzunluğu (7 bit)	Ayrılmış (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY veri yükü

Şekil 3.2 PPDU yapısı

Başlangıç Alanı (Preamble Field)

Başlangıç alanı, alıcı-verici tarafından gelen mesajlarda chip ve sembol eşlemesini elde etmek için kullanılır. Alan 32 adet ikili sayıdan oluşur.

SFD Alanı (SFD Field)

SFD alanı 8 bit boyutundadır. Bu alan, başlangıç alanının sonunu ve paket verisinin başlangıcını gösterir. SFD alanı şekil 3.3'te gösterildiği gibi olmalıdır.

Bit: 0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

Şekil 3.3 SFD alanı yapısı

Çerçeve Uzunluğu Alanı (Frame Length Field)

Çerçeve Uzunluk Alanı 8 bit boyutundadır ve PHY hizmet veri biriminin (PSDU) içerdiği baytların toplam sayısını belirler. Değeri 0 ile en büyük PHY paket boyutu arasında olabilir. Çizelge 3.4'te veri yükünün tipine göre çerçeve uzunluk değeri özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Çerçeve uzunluğu değerleri

Çerçeve Uzunluk Değeri	Veri Yüğü
0 – 4	Ayrılmış
5	MPDU (Onaylama)
6 – 7	Ayrılmış
8 – En Büyük Paket Boyutu	MPDU

PSDU Alanı (PSDU Field)

PHY hizmet veri birimi (PSDU) alanı değişken uzunluğa sahiptir ve PHY paketinin verisini taşır. Tüm paket tipleri için çerçeve uzunluk değeri, 5 bayt veya 7 bayttan büyük olmalıdır. PSDU, MAC alt katmanı çerçevesini (MPDU) içerir.

3.4 PHY Sabitleri ve PIB Özellikleri

Bu alt bölümde PHY tarafından gereksinim duyulan sabitler ve özellikler tanımlanacaktır.

3.4.1 PHY Sabitleri

PHY katmanının özelliklerini belirleyen sabitler çizelge 3.5'te listelenmiştir. Bu sabitler donanıma bağlıdır ve işletim esnasında değiştirilemez.

Çizelge 3.5 PHY sabitleri

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aMaxPHYPacketSize</i>	PHY nin alabileceği en fazla PSDU boyutu [bayt]	127
<i>aTurnaroundTime</i>	TX-RX veya RX-TX dönüşüm zamanı	12 sembol periyodu

3.4.2 PHY PIB Özellikleri

PHY PIB, cihazın PHY yönetimi için gerekli özellikleri içerir.

Çizelge 3.6 PHY PIB özellikleri

Özellik	Belirteç	Tip	Aralık	Açıklama
<i>phyCurrentChannel</i>	0x00	Tam sayı	0-26	İletimler ve alımlar için kullanılan RF kanalı
<i>phyChannelsSupported</i>	0x01	Bit alanı		Yüksek anlamlı 5 bit ayrılmıştır ve 0 olmalıdır. Düşük anlamlı 27 bit, 27 geçerli kanalın durumunu gösterir. (1: uygun, 0: uygun değil)
<i>phyTransmitPower</i>	0x02	Bit alanı	0x00 0xBF	2 MSB iletilen gücün toleransını gösterir 00 = ±1dB 01 = ±3dB 10 = ±6dB 6 LSB işaretli tam sayı 2'ye tümlenmiş biçimde, cihazın desibel cinsinden iletilen gücünü gösterir.
<i>phyCCAMode</i>	0x03	Tam sayı	1-3	CCA modu (bakınız bölüm 3.5.4)

3.5 2450MHz PHY Tanımlamaları

3.5.1 Veri Hızı

IEEE 802.15.4 (2450 MHz) PHY' de 250Kb/s hızında veri aktarımı yapılır.

3.5.2 Modülasyon ve Yayılma

2450 MHz PHY 16'lı yarım - dikgen modülasyon tekniğini kullanır. Her veri sembol periyodu süresince, iletilecek 16 yaklaşık dikgen sözde-rasgele gürültü dizisinden birini seçmek için 4 bilgi biti kullanılır. Ardışık veri sembolleri için sözde-rasgele gürültü dizileri sıralanır ve toplam chip dizisi taşıyıcı üstüne kayma – dördün faz kaydırmalı anahtarlama kullanılarak (O-QPSK) modüle edilir.

3.5.2.1 Referans Modülatör Diyagramı

Şekil 3.4'te gösterilen fonksiyonel blok diyagramı 2450 MHz PHY modülasyon ve yayılma fonksiyonları için referans sağlar.



Şekil 3.4 Modülasyon ve yayılma fonksiyonları

3.5.2.2 Bit – Sembol Eşlenmesi

PPDU' nun tüm bitleri Şekil 3.4'te gösterilen modülasyon ve yayılma fonksiyonları kullanılarak kodlanır. Bu alt bölümde veri sembolleri içindeki ikili bilginin nasıl eşleştirildiği tanımlanır.

Her bir baytın 4 LSB' si (b0, b1, b2, b3) bir veri sembolü ve 4 MSB' si (b4, b5, b6, b7) bir sonraki veri sembolü ile eşlenir. PPDU' nun her bir baytı modülasyon ve yayılma fonksiyonları ile işleme tabi tutulur. İşlem, sıralı olarak başlangıç alanı ile başlar ve PSDU' nun son baytı ile biter. Bayt içindeki en düşük anlamlı sembol (b0, b2, b2, b3) önce işlenir.

3.5.2.3 Sembol – Chip Eşlemesi

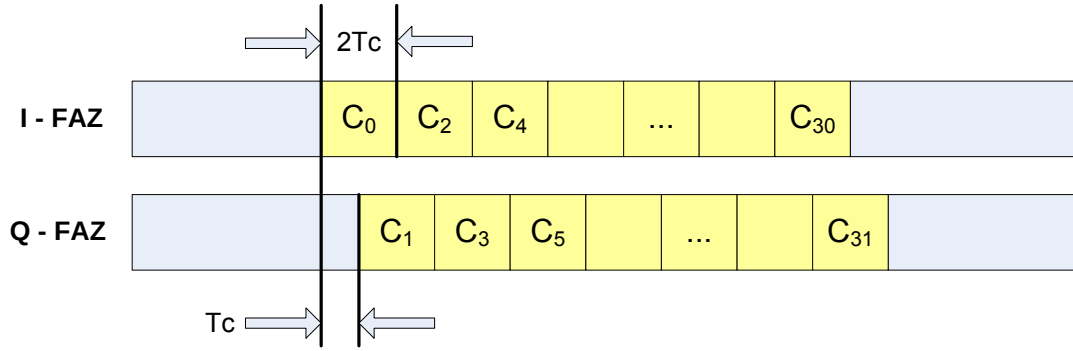
Her bir veri sembolü, Çizelge 3.7'de gösterilen 32 – chip sözde-rasgele gürültü dizisi ile eşlenir. Sözde-rasgele gürültü dizileri içindeki en düşük anlamlı chip (c₀) önce gönderilir.

Çizelge 3.7 Sembol – Chip eşlemesi

Sembol (Onlu)	Sembol (İkili) (b_0, b_1, b_2, b_3)	Chip Değerleri ($c_0, c_1, \dots, c_{30}, c_{31}$)
0	0 0 0 0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 0 0 0	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 1 0 0	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	1 1 0 0	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 0 1 0	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	1 0 1 0	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	0 1 1 0	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 1 1 0	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	0 0 0 1	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 0 1	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 0 1	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	1 1 0 1	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	1 0 1 1	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	0 1 1 1	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 1 1	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

3.5.2.4 O-QPSK Modülasyonu

Her veri sembolünü temsil eden chip dizileri, yarım dalga sinüs darbe şeklini içeren O-QPSK modülasyonu kullanılarak taşıyıcı üstüne modüle edilir. Çift-indeksli chipler I-faz taşıyıcısı üstüne ve tek-indeksli chipler Q-faz taşıyıcısı üstüne eklenir. Çünkü veri sembolleri 32 chip dizisi ile gösterilir, chip hızı (nominal 2,0Mchip/sn) sembol hızının 32 katıdır. I-faz ve Q-faz chip modülasyonu arasındaki kayma biçimi, Q-faz chipleri I-faz chiplerinden T_c kadar gecikmelidir, burada T_c chip hızının tersini gösterir.



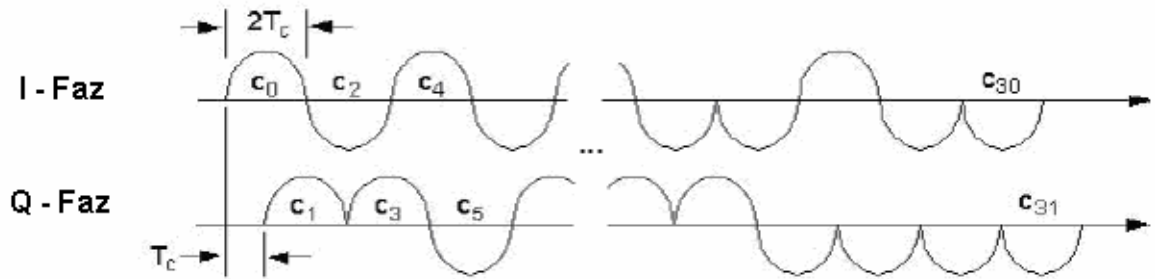
Şekil 3.5 O-QPSK chip kaymaları

3.5.2.5 Darbe Şekli

Temel band chip işaretini temsil eden yarım-sinüs darbe şekli verilen eşitlik ile tanımlanır.

$$p(t) = \begin{cases} \sin(\pi \frac{t}{2T_c}), 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, \text{diğer} \end{cases} \quad 3.2$$

Şekil 3.6 örnek bir temel band chip dizisini yarım-sinüs darbe şekli ile gösterir.



Şekil 3.6 Darbe şekli ile temel band chip dizisi

3.5.3 2450MHz Bandı Radyo Tanımlamaları

Bölgesel düzenlemelere ilaveten, 2450MHz bandında işletilen cihazlar alt bölümlerde belirtilenleri de karşılamalıdır.

3.5.3.1 İzgesel Güç Yoğunluğu

İletilen izgesel bileşenler, çizelge 3.8’de belirtilen sınır değerlerden daha az olmalıdır. Bağlı

ve kesin limitler, ortalama izgesel güç 100kHz çözünürlüklü band genişliği kullanılarak ölçülmelidir. Bağlı limit için, taşıyıcı frekansın ± 1 MHz içinde en yüksek ortalama izgesel güç göz önünde bulundurularak referans düzeyi belirlenmelidir.

Çizelge 3.8 İzgesel güç yoğunluğu sınırları

Frekans	Bağılı Limit	Kesin Limit
$ f - f_c > 3.5 \text{ MHz}$	-20 dB	-30 dBm

3.5.3.2 Sembol Hızı

2450 Mhz PHY de sembol hızı 62,5 ksymbols/s $\pm$ 40ppm olmalıdır.

3.5.3.3 Alıcı Duyarlılığı

Çizelge 3.9’da belirtilen durumlara uyumlu cihazların -85dBm veya daha iyi duyarlılığı sağlayabilme yeteneği olmalıdır.

Çizelge 3.9 Alıcı duyarlılığı tanımları

Terim	Terimin tanım	Durumlar
Paket hata oranı (PER)	Paketlerin doğru şekilde tespit edilemeyen bölüm ortalaması	- Ortalama ölçümler rasgele PSDU verisi üzerinden yapılır
Alıcı duyarlılığı	Giriş işaret gücü eşiği	- PSDU uzunluğu = 20 bayt - PER < %1 - Güç ölçümü antende - Karışma mevcut değil

3.5.3.4 Alıcı Frekans Bozulma Direnci

Minimum frekans bozulma direnci düzeyi çizelgede verilmiştir. Bitişik kanal, kullanılmak istenen kanalların her iki yanında ki kanala denir ve kullanılmak istenen frekansa en yakın frekansları kullanır. Alternatif kanallar ise bitişik kanalın diğer yanlarında ki kanallardır. Örneğin 13 kanal kullanılmak isteniyorsa, 12 ve 14. kanallar bitişik kanallar ve 11 ile 15. kanallar alternatif kanallardır.

Çizelge 3.10 2450 MHz PHY için minimum alıcı frekans bozulma direnci gereksinimleri

Bitişik kanal ayrımı	Alternatif kanal ayrımı
0 dB	30 dB

Bitişik kanal ayrımı ölçümü şu şekilde yapılır: İstenen sözde-rasgele veri sinyali 2450 MHz IEEE 802.15.4 sinyali ile uyumlu olmalıdır. Alıcı girişindeki sinyal, alıcı duyarlılığının izin verdiği azami seviyeden 3 dB üzerinde olmalıdır.

Bitişik ve alternatif kanallarda, IEEE 802.15.4 uyumlu giriş sinyali bağlı düzeyi çizelge 3.10’da belirtilmiştir. Test sadece bir karıştırıcı sinyal mevcutken uygulanmalıdır. Çizelge 3.9’da belirtilen durumlar oluştuğunda alıcı hata oranı kriteri ile karşılaşır.

3.5.4 Temiz Kanal Ataması

IEEE 802.15.4 PHY katmanı aşağıda listelenen 3 metottan en az birine göre temiz kanal ataması (CCA) uygulayabilme yeteneğine sahiptir.

- CCA Mod 1: Eşik değeri üstünde enerji. Belirlenen eşik enerjisi üstünde enerji tespiti yapıldığı müddetçe kanal meşgul olarak değerlendirilir.
- CCA Mod 2: Sadece taşıyıcı sezimi. IEEE 802.15.4 standardına uygun sinyal tespit edildiği müddetçe kanal meşgul olarak değerlendirilir. Bu sinyal eşik enerji değerinin üstünde veya altında olabilir.
- CCA Mod 3: Taşıyıcı sezimi ile eşik değeri üstünde enerji: IEEE 802.15.4 standardına uygun sinyal tespit edildiğinde ve enerji eşik değerin üstünde ise kanal meşgul olarak değerlendirilir.

CCA tespit zamanı 8 sembol periyoduna eşit olmalıdır.

Her hangi CCA modu için, PPDU alımı sırasında PHY tarafından “PLME-CCA.request” ilkeli alınır, kanal meşgul olarak değerlendirilir. PPDU alımı sırasında SFD’ nin tespitini takiben PHR’ de belirtilmiş sayıda baytın alınacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

4. IEEE 802.15.4 MAC ALT KATMANI ÖZELLİKLERİ

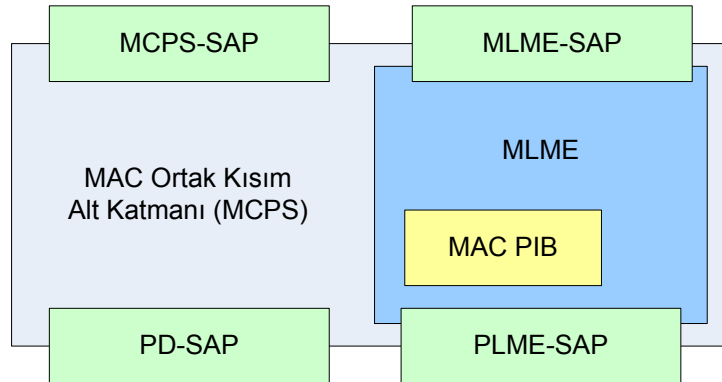
Bu bölümde IEEE 802.15.4 standardının MAC alt katmanı tanımlanacaktır. MAC alt katmanı fiziksel radyo kanalına erişimden ve aşağıda listelenen görevlerden sorumludur:

- Ağın beacon çerçevesini üretmek (cihaz koordinatör ise)
- Beacon çerçevelerinin senkronize etmek
- PAN' na bağlanma ve ayrılmayı desteklemek
- Cihaz güvenliği desteklemek
- Kanal erişimi için CSMA-CA mekanizmasını işletmek
- GTS mekanizmasının işletilmesi ve korunması
- 2 MAC varlığı arasındaki güvenilir bağlantıyı sağlamak

MAC alt katmanı tarafından belirlenen ve korunan sabitler ve özellikler bu bölümde italik yazılmıştır. Sabitler genel olarak “*a*” ön ekine sahiptir, (örneğin *aBaseSlotDuration*). Özellikler genel olarak “*mac*” ön ekine sahiptir (örneğin, *macAckWaitDuration*).

4.1 MAC Alt Katmanı Hizmet Özellikleri

MAC alt katmanı SSCS ve PHY arasındaki ara yüzü sağlar. MAC alt katmanı kavramsal olarak MLME adı ile anılan yönetim varlığını içerir. Bu varlık, gerekli duyulan katman yönetim fonksiyonlarını sağlar. MLME aynı zamanda MAC alt katmanı ile ilgili yönetilen nesnelerin veri tabanının korunmasından da sorumludur. Bahsedilen veri tabanı MAC alt katmanı PIB değerleridir. Şekil 4.1’de MAC alt katmanının bileşenleri ve ara yüzleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1 MAC alt katmanı referans modeli

MAC alt katmanı 2 SAP üzerinden erişilen 2 hizmeti sağlar:

- MAC veri hizmeti, MCPS – SAP üzerinden erişilir.
- MAC yönetim hizmeti, MLME – SAP üzerinden erişilir.

MAC alt katmanın 2 hizmeti, PD-SAP ve PLME-SAP üzerinden SSCS ve PHY arasındaki ara yüzü sağlar. Bu dışsal ara yüzeylere ek olarak katman içinde MLME ve MCPS arasında da ara yüzey mevcuttur. Bu ara yüzey MLME' nin MAC veri hizmetini kullanmasına izin verir.

4.1.1 MAC Veri Hizmeti

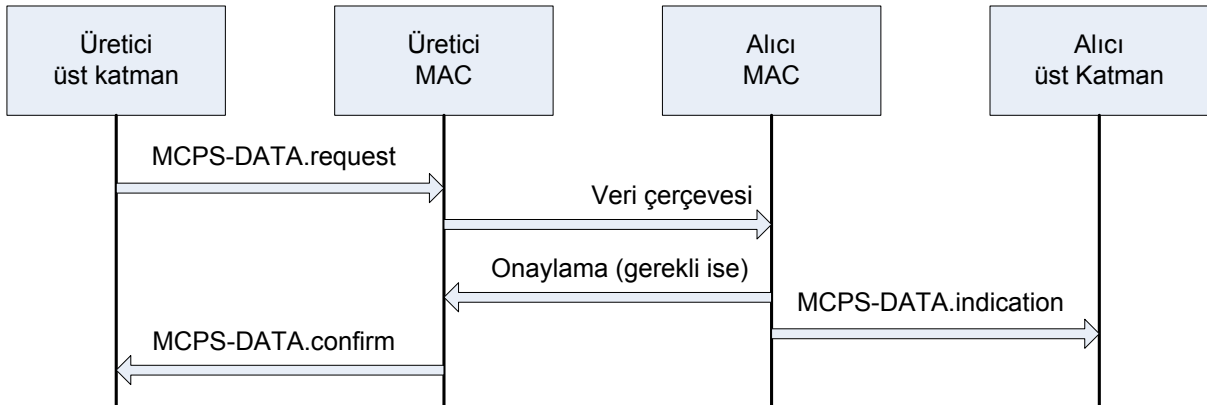
MCPS-SAP, eş düzey SSCS varlıkları arasında SSCS protokol veri birimlerinin (SPDU) aktarımını sağlar. Çizelge 4.1'de MCPS-SAP tarafından desteklenen ilkeler (■) ile işaretlenmiştir. İlkelerden kare (◆) ile belirtilenler RFD' ler için zorunlu değildir.

Çizelge 4.1 MCPS-SAP ilkeleri

MCPS-SAP ilke	İstek (Request)	Doğrulama(Confirm)	Bildirme(Indication)
MCPS – DATA	■	■	■
MCPS – PURGE	■ ◆	■ ◆	---

Tüm cihazlar MCPS-SAP ilkeleri için ara yüzeyi sağlayabilmelidir.

Şekil 4.2'de başarılı veri aktarımı için gerekli mesajlaşma sırası gösterilmiştir.



Şekil 4.2 MAC veri hizmeti için mesaj sırası

4.1.2 MAC Yönetim Hizmeti

MLME-SAP, üst katmanlar ile MLME arasındaki yönetim komutlarının taşınmasını sağlar. Çizelge 4.2’de MLME-SAP ara yüzeyi üzerinden MLME tarafından desteklenen ilkeller özetlenmiştir. Mevcut ilkeller (■) ile belirtilmiştir. Belirtilen ilkellerden (◆) ile işaretlenenler RFD’ ler için zorunlu değildir.

Çizelge 4.2 MLME-SAP üzerinden erişilebilen ilkeller

MLME-SAP ilkeli	İstek (Request)	Bildirme (Indication)	Cevap (Response)	Doğrulama (Confirm)
MLME-ASSOCIATE	■	■ ◆	■ ◆	■
MLME-DISASSOCIATE	■	■		
MLME-BEACON-NOTIFY		■		
MLME-GET	■			■
MLME-GTS	■ ◆	■ ◆		■ ◆
MLME-ORPHAN		■ ◆	■ ◆	
MLME-RESET	■			■
MLME-RX-ENABLE	■			■
MLME-SCAN	■			■
MLME-COMM-STATUS		■		
MLME-SET	■			■
MLME-START	■ ◆			■ ◆
MLME-SYNC	■			
MLME-SYNC-LOSS		■		
MLME-POLL	■			■

Bağlanma ilkelleri (MLME-ASSOCIATE) bir cihazın PAN’ a nasıl bağlanacağını tanımlar. Tüm cihazlar istek ve doğrulama bağlanma ilkelleri için arabirim sunmalıdır. Bildirme ve cevap bağlanma ilkelleri ise RFD’ ler için zorunlu değildir.

Ayrılma ilkelleri (MLME-DISASSOCIATE) bir cihazın PAN’ dan nasıl ayrılacağını tanımlar. Tüm cihazlar belirtilen ilkeller için arabirim sunmalıdır.

Beacon bildirme ilkel (MLME-BEACON-NOTIFY) normal çalışma esnasından beacon çerçevesi alındığında kullanılır. Tüm cihazlar bu ilkel için arabirim sunmalıdır.

PIB özelliklerinin okunması ilkelleri (MLME-GET) PIB değerlerinin her hangi bir anda okunabilmesini sağlar. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

GTS yönetim ilkelleri (MLME-GTS) GTS' lerin nasıl talep edileceğini ve nasıl korunacağını tanımlar. Bu ilkelleri ve GTS' leri kullanmak isteyen cihazlar, genel olarak kendi PAN koordinatörünün gönderdiği beacon çerçevelerini önceden izlemeye başlamış olması gerekir. Bu ilkeller RFD' ler için zorunlu değildir.

Yetim bildirimi ilkeleri (MLME-ORPHAN) koordinatöre yetim cihazların bildirimi için kullanılır. RFD' ler için bu ilkeller zorunlu değildir.

MAC alt katmanını yeniden başlatma ilkelleri (MLME-RESET) MAC alt katmanını varsayılan değerlere döndürmek için tanımlanmıştır. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

Alıcı aktifleşme zamanı tanımlayan ilkeller (MLME-RX-ENABLE) verilen zamanda alıcının açılmasını veya kapatılmasını sağlar. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

Kanal tarama ilkelleri (MLME-SCAN) PAN iletişim kanalında ki enerjiyi belirlemek için kullanılır. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

İletişim durumu ilkel (MLME-COMM-STATUS) iletim durumu hakkında MLME ile üst katmanların nasıl haberleşeceğini tanımlar, iletim her hangi bir istek ilkel ile başlatılmamışsa ve gelen paketlerde güvenlik hataları varsa. Tüm cihazlar bu ilkel için arabirim sunmalıdır.

PIB özelliklerinin yazılması ilkelleri (MLME-SET) PIB değerlerinin değiştirilebilmesini sağlar. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

Süper çerçeve yapılandırılmasının güncelleyen ilkeller (MLME-START) bir FFD' nin PAN' ı başlatabilmek için yeni süper çerçeve yapısı oluşturmasını, var olan PAN' da beacon iletimini başlatılmasını, cihaz aramanın kolaylaştırılmasını veya beacon iletiminin durdurulmasını tanımlar. RFD' ler için bu ilkeller zorunlu değildir.

Koordinatör ile eşzamanlı çalışma ilkelleri (MLME-SYNC, MLME-SYNC-LOSS) koordinatör ile eşzamanlı çalışmanın nasıl başarılabileceğini ve üst katmanlar için eşzamanlı iletişiminin nasıl kaybedileceğini tanımlar. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

Koordinatörden veri isteği ilkelleri (MLME-POLL) koordinatörde bekleyen verinin bulunup-bulunmadığının nasıl sorgulanacağını tanımlar. Tüm cihazlar bu ilkeller için arabirim sunmalıdır.

4.2 MAC Çerçeve Yapıları

Bu bölümde MAC çerçevesinin (MPDU) biçimi anlatılacaktır. Beacon, veri, onay, MAC komut çerçeveleri olmak üzere tanımlanmış 4 çerçeve yapısı mevcuttur. Her bir MAC çerçevesi aşağıda belirtilen temel bileşenleri içerir.

- MHR alanı; çerçeve kontrol, dizi numarası ve adres bilgilerini içerir.
- MAC verisi alanı; çerçeve tipine özgü değişken uzunluktaki bilgileri içerir. Onay çerçeveleri veri içermez
- MFR alanı; FCS alanını içerir.

MAC alt katmanında çerçeveler, özel bir sırada bulunan alanların dizisi olarak tanımlanır. Bu alt bölümde bulunan tüm çerçeve biçimleri, PHY tarafından iletiildiği sıra ile gösterilmiştir. Soldan sağa, en soldaki bit önce gönderilir. Her bir alan içindeki bitler 0' dan (en sol ve en düşük anlamlı) $k-1$ e (en sağ ve en yüksek anlamlı) kadar numaralandırılır ve alanın uzunluğu k bit olur. Tek bayttan daha uzun alanlar, baytın içerdiği en düşük numaralı bitten en yüksek numaralı bite doğru sırayla PHY' ye gönderilir.

4.2.1 Genel MAC Çerçeve Yapısı

MAC çerçevesi MHR, MAC veri yükü ve MFR alanlarından oluşur. MHR kısmı tüm çerçeveler için sabit gibi gözükse de adres alanı tüm çerçevelerde bulunmayabilir. Genel MAC çerçeve yapısı şekil 4.3'te gösterilmiştir.

bayt: 2	1	0 / 2	0 / 2 / 8	0 / 2	0 / 2 / 8	Değişken	2
Çerçeve Kontrol Alanı	Dizi numarası	Varış PAN Belirteci	Varış Adresi	Kaynak PAN Belirteci	Kaynak Adresi	Çerçeve Yükü	Çerçeve Kontrol Dizisi
		Adres Alanları					
MHR						MAC Yükü	MFR

Şekil 4.3 Genel MAC çerçeve yapısı

4.2.1.1 Çerçeve Kontrol Alanı

Çerçeve kontrol alanı (frame control field) 16 bit uzunluğundadır. Bu alan, çerçeve tipi, adresleme alanları ve diğer kontrol bayrakları gibi tanımlanmış bilgileri içerir. Çerçeve kontrol alanı şekil 4.4'te gösterilmiştir.

bit : 0-2	3	4	5	6	7 - 9	10 - 11	12 - 13	14 - 15
Çerçeve tipi	Güvenlik aktif	Bekleyen çerçeve	ACK isteği	İç - PAN	Ayrılmış	Varış Adresleme modu	Ayrılmış	Kaynak adresleme modu

Şekil 4.4 Çerçeve kontrol alanının yapısı

Çerçeve tipi alt alanı (Frame type subfield) : Çerçeve tipi alt alanı 3 bit uzunluğundadır ve çizelge 4.3'te gösterilen değerlerden birini almalıdır.

Çizelge 4.3 Çerçeve tipi alt alanının değerleri

Çerçeve tipi değeri $b_2 b_1 b_0$	Açıklama
000	Beacon
001	Veri
010	Onaylama
011	MAC komutu
100 – 111	Ayrılmış

Güvenlik aktif alt alanı (Security enabled subfield) : Güvenlik aktif alt alanı 1 bit boyutundadır ve eğer çerçeve MAC alt katmanı tarafından şifreleme korunması ile korunmayacaksa sıfır olarak kurulmalıdır. Eğer güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulursa, çerçeve kayıt edilmiş anahtar ile şifrlenerek korunur.

Bekleyen çerçeve alt alanı (Frame pending subfield) : Bekleyen çerçeve alt alanı 1 bit boyutundadır ve eğer çerçeve gönderen cihaz güncel aktarıma ilaveten veri gönderecekse bu bit 1 olarak kurulmalıdır. Eğer bekleyen veri varsa alıcı cihaz onları başka veri istek komutları göndererek istemelidir. Eğer çerçeve gönderen cihazın güncel aktarım için gönderecek daha fazla verisi yoksa bu alan 0 olarak kurulmalıdır.

Bekleyen çerçeve alt alanı şu senaryolar altında kullanılmalıdır; cihaz aktif-beacon PAN içinde çalışıyorsa CAP periyodunda gönderilen çerçeveler için veya cihaz pasif-beacon PAN içinde çalışıyorsa gerekli olan her çerçeve için. Diğer tüm durumlarda bu alt alan sıfır olarak kurulmalıdır ve alınması ihmal edilmelidir.

Onaylama isteği alt alanı (Acknowledgement request subfield) : Onay isteği alt alanı 1 bit boyutundadır. Bu alt alan veri veya MAC komut çerçevesini alan cihazdan onayın istenip istenmediğini belirtir. Eğer bu alt alan 1 olarak kurulmuşsa, alıcı cihaz çerçevenin geçerli olduğuna karar verdikten sonra onay çerçevesi göndermelidir. Eğer bu alan 0 olarak kurulmuşsa, alıcı cihaz alınan çerçevenin geçerli olduğuna karar verdikten sonra onay çerçevesi göndermez.

İç-PAN alt alanı (Intra-PAN subfield) : İç-PAN alt alanı 1 bit boyutundadır ve gönderilen MAC çerçevesinin aynı PAN veya farklı PAN' dan geldiğini tanımlar. Eğer bu alt alan 1 ise ve kaynak-Variş adresleri mevcut ise çerçeve kaynak PAN belirteci alanı içermez. Eğer bu alan 0 olarak kurulmuş ve kaynak-variş adresleri mevcutsa, çerçeve kaynak ve varış PAN belirteci alanlarını içermelidir

Varış adresleme modu alt alanı (Destination addressing mode subfield) : Varış adresleme modu alt alanı 2 bit boyutundadır ve çizelge 4.4'te listelenen değerlerden birini içermelidir.

Eğer bu alt alan sıfıra eşit ve çerçeve tipi alt alanı onaylama çerçevesinden başka bir çerçeveyi işaret ediyorsa, kaynak adresleme modu alt alanı sıfırdan farklı olacaktır. Bu durum çerçevenin doğrudan kaynak PAN belirteci ile belirlenmiş PAN belirtecine sahip koordinatöre gönderildiğini ifade eder.

Kaynak adresleme modu alt alanı (Source addressing mode subfield) : Kaynak adresleme modu alt alanı 2 bit boyutundadır ve çizelge 4.4'te listelenen değerlerden birini içermelidir.

Eğer bu alt alan sıfıra eşit ve çerçeve tipi alt alanı onaylama çerçevesinden başka bir çerçeveyi işaret ediyorsa, varış adresleme modu alt alanı sıfırdan farklı olacaktır. Bu durum çerçevenin varış PAN belirteci ile belirlenmiş PAN belirtecine sahip koordinatör tarafından üretildiğini ifade eder.

Çizelge 4.4 Varış ve kaynak adresleme modu alt alanlarının değerleri

Adresleme modu değeri $b_1 b_0$	Açıklama
00	PAN belirteci ve adres alanı sunulmaz
01	Ayrılmış
10	Adres alanı 16 bit kısa adres içerir
11	Adres alanı 64 bit genişletilmiş adres içerir

4.2.1.2 Dizi Numarası Alanı

Dizi numarası alanı (sequence number fields) 8 bit boyutundadır ve çerçeve için tekil dizi kimliğini belirler.

Beacon çerçevesi için bu alan beacon dizi numarasını (BSN) belirtir. Her koordinatör güncel BSN değerini MAC PIB içinde *macBSN* özelliğinde depolar ve rasgele değer ile başlatır. Rasgele sayının oluşturulması standardın kapsamı dışındadır. Koordinatör *macBSN* özelliği içindeki değerini beacon çerçevesi üretildiği zaman çerçeve içindeki dizi numarası alınan kopyalamalı ve *macBSN* değerini bir arttırmalıdır.

Veri, onay ve MAC komut çerçeveleri için bu alan veri dizi numarasını (DSN) belirler. Bu alt alan, veri veya MAC komut çerçevelerinin onay çerçeveleri ile eşleştirilmesi için kullanılır. Haberleşmek isteyen her cihaz DSN' yi sağlamalıdır. Her bir cihaz DNS değerini MAC PIB içinde *macDSN* özelliğinde depolar ve onu rasgele sayı ile başlatır. Rasgele sayının oluşturulması standardın kapsamı dışındadır. Cihaz, her bir veri veya MAC komut çerçevesi ürettiğinde *macDSN* değerini dizi numarası alanına kopyalamalıdır ve değerini bir arttırmalıdır.

Eğer onay istenmişse, alıcı cihaz alınan veri veya MAC komut çerçevesindeki DSN' yi uygun onay çerçevesi içindeki DSN alanına kopyalamalıdır. Eğer onay *macAckWaitDuration* sembol süresi sonuna kadar alınmamışsa, gönderici cihaz çerçeveyi aynı DSN numarası ile birlikte tekrar yollamalıdır.

4.2.1.3 Varış PAN Belirteci Alanı

Varış PAN belirteci alanı (destination PAN identifier field), 16 bit uzunluğundadır ve çerçeve alıcının tekil PAN kimliğini belirler. Bu alanın (0xffff) değerinde olması kanalı dinleyen tüm cihazlar için geçerli kabul edilir ve yayımlanan çerçeve kanalı dinleyen tüm cihazlar tarafından kabul edilir.

Bu alan sadece çerçeve kontrol alanı içindeki adres modu alt alanı sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

4.2.1.4 Varış Adresi Alanı

Varış adresi alanı (destination address field), çerçeve kontrol alanının varış adresleme modu alt alanı içindeki değere göre 16 bit veya 64 bit boyutundadır ve çerçeveyi alması istenen cihazın adresini belirtir. Bu alanın (0xffff) değerinde olması genel kısa adresin yayımını gösterir ve kanalı dinleyen her cihaz için geçerli bir kısa adres değeri olarak kabul edilir.

Bu alan sadece çerçeve kontrol alanı içindeki adres modu alanı sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

4.2.1.5 Kaynak PAN Belirteci Alanı

Kaynak PAN belirteci alanı (source PAN identifier field), 16 bit uzunluğundadır ve çerçeve vericisinin tekil PAN kimliğini belirler. Bu alan sadece kaynak adres modu alt alanı sıfır dışı bir değere ve İç-Pan alt alanı sıfır değerine sahip ise MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

4.2.1.6 Kaynak Adres Alanı

Kaynak adres alanı (source address field), çerçeve kontrol alanındaki kaynak adresleme modu alt alanı içindeki değere göre 16 bit veya 64 bit boyutundadır ve çerçeveyi gönderen cihazın adresini belirtir. Bu alan sadece çerçeve kontrol alanının kaynak adres modu alt alanı içindeki değer sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

4.2.1.7 Çerçeve Veri Alanı

Çerçeve veri alanı (frame payload field), değişken uzunluktadır ve değişik çerçeve tiplerine göre özel bilgiler içerir. Eğer çerçeve kontrol alanının güvenlik seçimi alt alanı 1 olarak kurulmuşsa, çerçeve yükü seçilen güvenlik ilkelerine göre korunmuş durumdadır.

4.2.1.8 Çerçeve Kontrol Dizisi Alanı

Çerçeve kontrol dizisi (FCS) alanı 16 bit uzunluğundadır ve 16 bit ITU-T periyodik artıklık testini (CRC) içerir. FCS, çerçevenin MHR ve MAC verisi parçaları üzerinden hesaplanır.

FCS, aşağıda verilen standart 16. dereceden üretici polinom kullanarak hesaplanır.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (4.1)$$

FCS değeri iletim için aşağıdaki algoritma kullanılarak hesaplanabilir.

- Periyodik artıklık testi yapılacak bitler için verilen polinom oluşturulur.

$$M(x) = b_0x^{k-1} + b_1x^{k-2} + \dots + b_{k-2}x + b_{k-1} \quad (4.2)$$

- $M(x)$ ile x^{16} çarpılarak $x^{16} \cdot M(x)$ polinomu elde edilir

- $x^{16} \cdot M(x)$ polinomu üretici polinom, $G_{16}(x)$, tarafından bölünür ve aşağıdaki polinom elde edilir.

$$R(x) = r_0x^{15} + r_1x^{14} + \dots + r_{14}x + r_{15} \quad (4.3)$$

- $R(x)$ polinomunun katsayıları FCS alanını verir.

Örnek olarak, 3 bayt MHR alanı ve verisi olmayan onay çerçevesini ele alalım:

0100 0000 0000 0000 0101 0110

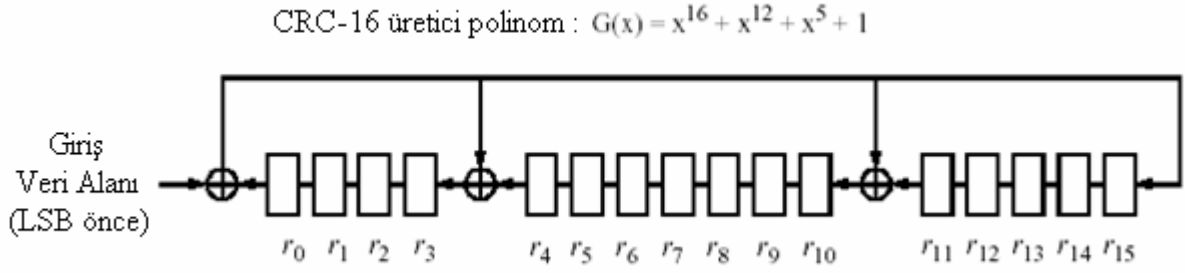
$b_0 \dots b_{23}$ [en soldaki bit (b_0) önce gönderilir]

Bu şartlar altında FCS yukarıda verilen yöntemle göre hesaplanırsa aşağıdaki gibi olur,

0100 0111 1001 1110

$r_0 \dots r_{15}$ [en soldaki bit (r_0) önce gönderilir]

Tipik uygulama şekil 4.5’te gösterilmiştir.



1. Yazmaçları ($r_0 \dots r_{15}$) sıfır değer ile başlatılır.
2. MHR ve veri, bölücüye iletim sırası ile sokulur. (önce LSB)
3. Veri alanının son biti bölücüye girdikten sonra kalan yazmaçları FCS’ yi içerir.
4. FCS veri alanını sonuna eklenir böylece r_0 önce gönderilir.

Şekil 4.5 Tipik FCS uygulaması

4.2.2 Beacon Çerçevesi Yapısı

Beacon çerçevesi şekil 4.6’da gösterildiği biçimde olmalıdır.

Bayt: 2	1	4 / 10	2	Değişken	Değişken	Değişken	2
Çerçeve kontrol alanı	Dizi numarası	Adres alanları	Süper çerçeve tanımları	GTS alanları (şekil 4.7)	Bekleyen adres alanları (şekil 4.8)	Beacon yükü	FCS
MHR			MAC yükü				MFR

Şekil 4.6 Beacon çerçeve yapısı

GTS alanları şekil 4.7’de ve bekleyen adres alanları şekil 4.8’de gösterildiği biçimde olmalıdır.

Beacon çerçevesinin alanlarının sırası şekil 4.3’te gösterilen genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

Bayt: 1	0 / 1	Değişken
GTS Tanımı	GTS Talimatları	GTS Listesi

Şekil 4.7 GTS bilgi alanının yapısı

Bayt: 1	değişken
Bekleyen Adres Tanımı	Adres Listesi

Şekil 4.8 Bekleyen adres bilgi alanının yapısı

Beacon Çerçevesi MHR Alanları

Beacon çerçevesi için MHR, çerçeve kontrol alanını, dizi numarası alanını, kaynak PAN belirteci alanını ve kaynak adresi alanlarını içermelidir.

Çerçeve kontrol alanı içinde çerçeve tipi alt alanı beacon çerçevesini belirtecek değerde seçilmelidir. Kaynak adres modu alt alanı, gönderilecek beacon çerçevesindeki koordinatör adresine uygun değerde kurulmalıdır. Beacon çerçevesi için güvenlik ilkesi uygulanacaksa güvenlik aktif alt alanı 1 yapılmalıdır. Bunların dışındaki tüm alanlar 0 yapılmalı ve çerçeve alımı sırasında ihmal edilmelidir.

Dizi numarası alanı güncel *macBSN* değerinde olmalıdır.

Adres alanı sadece kaynak adres alanını içermelidir. Kaynak PAN belirteci ve kaynak adres alanı beaconu iletecek cihazın PAN belirteci ve adresi değerlerinde olmalıdır.

Süper Çerçeve Tanımları Alanı

Süper çerçeve tanımları alanı 16 bit boyutundadır ve şekil 4.9’da gösterildiği biçimde olmalıdır.

bit : 0 –3	4 - 7	8 - 11	12	13	14	15
Beacon Derecesi	Süper Çerçeve derecesi	Nihai CAP Slotları	Pil Ömrü Uzantısı	Ayrılmış	PAN Koordinatör	Bağlanma İzni

Şekil 4.9 Süper çerçeve tanımları alanı yapısı

Beacon derecesi alt alanı 4 bit uzunluğundadır ve beacon çerçevesinin iletim aralığını belirler. Beacon derecesi değeri (BO) ise beacon aralığı (BI) şu şekilde hesaplanabilir,

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ [sembol] , } 0 \leq BO \leq 14 \quad (4.4)$$

Eğer $BO = 15$ ise koordinatör gerekmediği müddetçe beacon göndermez.

Süper çerçeve derecesi alt alanı 4 bit uzunluğundadır ve süper çerçevenin aktif olduğu zaman uzunluğunu belirtir. Koordinatör kendi PAN' ı ile sadece aktif süper çerçeve müddetince etkileşir. Süper çerçeve derecesi (SO) ise süper çerçeve süresi (SD) şu şekilde hesaplanabilir,

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ [sembol] , } 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (4.5)$$

Eğer $SO = 15$ ise, beacon iletimi sonrasında süper çerçeve aktif değildir.

Nihai CAP slotları 4 bit uzunluğundadır ve CAP tarafından kullanılan nihai süper çerçeve slotlarını tanımlar. CAP' ın süresi bu alan tarafından uygulanır ve $aMinCAPLength$ de belirtilen değere eşit veya büyük olur.

PAN koordinatör alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve beaconu gönderen cihaz PAN koordinatörü ise 1 olarak ayarlanmalıdır. Aksi durumda bu alan 0 olmalıdır.

Bağlanma izni alanı 1 bit uzunluğundadır ve $macAssociationPermit$ değeri 1 ise bu alanda 1 olmalıdır. Alan 0 ise, koordinatör kendi ağı içindeki bağlanma isteklerini kabul etmeyecektir.

4.2.3 Veri Çerçevesi Yapısı

Veri çerçevesi yapısı şekil 4.10'da gösterildiği gibi olmalıdır.

Bayt : 2	1	4 - 20	Değişken	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	Adres alanları	Veri Yüğü	FCS
MHR			MAC yüğü	MFR

Şekil 4.10 Veri çerçevesi yapısı

Veri çerçevesinin alanlarının sırası şekil 4.3'te gösterilen genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

Veri Çerçevesi MHR alanları

Veri çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanı, varış ve kaynak PAN belirteçleri ile adresleri alanlarını içerir.

Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı veri çerçevesini belirtecek şekilde seçilmelidir. Diğer tüm alanlar kullanılacak veri çerçevesine uygun değerlerde ayarlanmalıdır.

Dizi numarası alanı *macDSN*'nin güncel değerini içermelidir.

Varış adresi alanı ve / veya kaynak adres alanını içeren adres alanları çerçeve kontrol alanı içindeki değerlere göre oluşturulmalıdır.

4.2.4 Onaylama Çerçevesi Yapısı

Onaylama çerçevesi yapısı şekil 4.11'de gösterildiği gibi olmalıdır.

Bayt: 2	1	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	FCS
MHR		MFR

Şekil 4.11 Onaylama çerçevesi yapısı

Onaylama çerçevesinin alanlarının sırası şekil 4.3'te gösterilen genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

Onaylama Çerçevesi MHR alanları

Onaylama çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanlarını içerir.

Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı onaylama çerçevesini belirtecek şekilde seçilmelidir. Bekleyen çerçeve alt alanı onaylama çerçevesini alıcı cihaz için bekletilen daha fazla sayıda veri mevcutsa 1 olarak ayarlanmalıdır, aksi durumda 0 yapılmalıdır. Diğer tüm alanlar 0 yapılmalı ve alım sırasında ihmal edilmelidir.

Dizi numarası alanı, alındı onayı verilecek veri veya MAC komut çerçevesinin içerdiği dizi numarasını içermelidir.

4.2.5 MAC Komut Çerçevesi Yapısı

MAC komut çerçevesi yapısı şekil 4.12’de gösterildiği gibi olmalıdır.

Bayt: 2	1	4 - 20	1	Değişken	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	Adres alanları	Komut çerçeve belirteci	Komut veri yükü	FCS
MHR			MAC yükü		MFR

Şekil 4.12 MAC komut çerçevesi yapısı

MAC komut çerçevesinin alanlarının sırası şekil 4.3’te gösterilen genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

MAC Komut Çerçevesi MHR alanları

MAC Komut çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanı, varış ve kaynak PAN belirteçleri ile adresleri alanlarını içerir.

Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı MAC komut çerçevesini belirtecek şekilde seçilmelidir. Diğer tüm alanlar kullanılacak MAC komut çerçevesine uygun değerlerde ayarlanmalıdır.

Dizi numarası alanı *macDSN*’nin güncel değerini içermelidir.

Varış adresi alanı ve kaynak adresi alanını içeren adres alanları çerçeve kontrol alanı içindeki değerlere göre oluşturulmalıdır.

Komut Çerçeve Belirteci Alanı

Komut çerçeve belirteci alanı kullanılacak MAC komutunu tanımlar. Bu alan çizelge 4.5’te listelenmiş ayrılmış olmayan değerlerin biri ile kurulmalıdır.

4.3 MAC Komut Çerçeveleri

MAC alt katmanı tarafından tanımlanmış komut çerçeveleri çizelge 4.5’te listelenmiştir. FFD’ler tüm komut çerçevelerini iletilip-alma yeteneğine sahip olmalıyken, RFD’ler için gerekli olanlar tabloda (♦) ile belirtilmiştir. MAC komutları aktif-beacon PAN içinde sadece CAP müddetince gönderilmelidir. Pasif-beacon PAN içinde ise her hangi bir zamanda gönderilebilir.

Çizelge 4.5 MAC komut çerçeveleri

Komut Çerçevesi Belirteci	Komut İsmi	RFD	
		Tx	Rx
0 x 01	Bağlanma İsteği (Association request)	◆	
0 x 02	Bağlanma Yanıtı (Association response)		◆
0 x 03	Ayrılma Bildirimi (Disassociation notification)	◆	◆
0 x 04	Veri İsteği (Data request)	◆	
0 x 05	PAN ID Çakışma Bildirimi (PAN ID conflict notification)	◆	
0 x 06	Yetim Bildirimi (Orphan notification)	◆	
0 x 07	Beacon İsteği (Beacon request)		
0 x 08	Koordinatörün Yeniden Sıralaması (Coordinator realignment)		◆
0 x 09	GTS isteği (GTS request)		
0 x 0a – 0 x ff	Ayrılmış		

4.3.1 Bağlanma İsteği Komutu

Bağlanma isteği komutu cihazın bir koordinatöre bağlanmasına olanak sağlar. Bu komut sadece PAN ile bağlantı kurmak isteyen cihaz tarafından gönderilmelidir. Cihazlar sadece bağlanmaya izin veren PAN' lara bağlantı kurabilirler. Bunun kararı tarama işleminde verilir. Tüm cihazların bu komutu gönderme kapasitesine sahip olmasına rağmen RFD' lerin bu komutu almalarına gerek yoktur. Komutunun yapısı şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Bayt: 17 / 23	1	1
MHR Alanı	Komut Çerçevesi Belirteci (Çizelge 4.5)	Yetenek bilgisi

Şekil 4.13 Bağlanma isteği komutu yapısı

MHR Alanları

Çerçeve kontrol alanı içindeki kaynak adres modu alt alanı 3 (64 bit genişletilmiş adres)

olarak kurulmalıdır. Hedef adresleme modu alanı bağlanma isteği komutunun gönderileceği koordinatörden gelen beacon çerçevesi ile aynı olmalıdır.

Bağlanma isteği komutu için güvenlik ilkesi kullanılacaksa, güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulmalı ve gönderilecek çerçeve, varış adresindeki cihaz tarafından tanımlanmış güvenlik metotları ile işlenmelidir. Diğer durumlarda bu alt alan 0 olarak seçilmelidir.

Çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanı 0 yapılmalı ve alım sırasında bu alan ihmal edilmelidir. Onay isteği alt alanı 1 yapılmalıdır.

Varış PAN belirteci alanı, bağlantı kurulması istenilen PAN' ın belirtecini içermelidir. Hedef adres alanı, koordinatör tarafından gönderilen beacon çerçevesindeki adres değerini içermelidir. Kaynak PAN belirteci alanı genel PAN belirteci (0xffff) değerinde olmalıdır. Kaynak adresi alanı genişletilmiş adresin değerini içermelidir.

Yetenek Bilgisi Alanı

Yardımcı PAN koordinatörü alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve cihaz PAN koordinatörü olma yeteneğine sahipse 1 olarak ayarlanmalıdır. Aksi durumda bu alt alan 0 olmalıdır. Cihaz tipi alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve cihaz FFD ise alan 1 olmalıdır. Aksi durumda cihazın RFD olduğunu göstermek için alan 0 yapılmalıdır. Güç kaynağı alt alanı cihazın gücünü aldığı kaynağı gösterir. Cihaz alternatif akım kaynaklarından beslenirse, bu alt alan 1 yapılmalıdır. Cihaz bekleme müddetince güç kaynağını korumak için alıcısını kapatıyorsa, beklemede alım açık alt alanı 0 olmalıdır. Cihaz tanımlanmış güvenlik ilkelerini uygulayabilecek yeteneğe sahip ise, güvenlik yeteneği alt alanı 1 olmalıdır. Adres tahsisi alt alanı 1 bit uzunluğundadır. Adres tahsisi alt alanının 1 yapılması ile bağlanmak istenilen koordinatörden kısa adres talep edilir. Adres tahsisi alt alan 0 değerinde ise bağlanma yanıtı komutunda koordinatör kısa adres olarak (0xfffe) değerini gönderecektir. Kısa adres olarak (0xfffe) değerini alan cihaz bu aşamadan sonra ağ içinde sadece genişletilmiş adresi ile iletişim kurabilir.

Bit : 0	1	2	3	4 – 5	6	7
Yardımcı PAN Koord.	Cihaz Tipi	Güç Kaynağı	Beklemede Alım Açık	Ayrılmış	Güvenlik Yeteneği	Adres Tahsisi

Şekil 4.14 Yetenek bilgisi alanı yapısı

4.3.2 Bağlanma Yanıtı Komutu

Bağlanma yanıtı komutu, bağlanma isteğinde bulunan cihaz ile koordinatörün iletişimine olanak sağlar. Komut sadece koordinatör tarafından bağlanmayı deneyen cihaza gönderilir. Tüm cihazlar bu komutu alma yeteneğine sahipken, RFD' lerin komutu iletim yeteneğinin olması gerekmez. Bağlanma Yanıtı Komutunun yapısı şekil 4.15'teki gibidir.

Bayt: 23	1	2	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirteci (çizelge 4.5)	Kısa Adres	Bağlanma Durumu

şekil 4.15 Bağlanma yanıtı komutu yapısı

MHR alanları

Çerçeve kontrol alanı içindeki varış adresleme modu ve kaynak adresleme modu alt alanları 3 (64 bit genişletilmiş adres) olarak ayarlanmalıdır.

Bağlanma yanıtı komutu için güvenlik ilkesi kullanılacaksa, güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulmalı ve gönderilecek çerçeve, varış adresindeki cihaz tarafından tanımlanmış güvenlik metotları ile işlenmelidir. Diğer durumlarda bu alt alan 0 yapılmalıdır.

Çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanı 0 yapılmalı ve alım sırasında bu alt alan ihmal edilmelidir. Onay isteği alt alanı 1 yapılmalıdır.

Varış ve kaynak PAN belirteci alanları *macPANId* değerini içermelidir. Varış adresi alanı bağlantı isteğinde bulunan cihazın genişletilmiş adresini içermelidir. Kaynak adres alanı *aExtendedAddress* değerinde olmalıdır.

Kısa Adres Alanı

Kısa adres alanı 16 bit uzunluğundadır.

Eğer koordinatör cihazı kendi PAN' nına bağlayamıyorsa, bu alana (0xffff) değerini yazar ve bağlantı durumu alanında başarısızlığın nedenini belirtir. Eğer koordinatör cihazı kendi PAN ına bağlarsa, bu alan cihaza koordinatör tarafından tahsis edilen kısa adresin değerini içerir ve cihaz PAN bağlı bulunduğu sürece bu adres ile iletişim kurar.

Kısa adres alanın (0xfffe) değerine eşit olması, PAN ile bağlantının başarılı şekilde gerçekteştiğini gösterir, fakat cihaza kısa adres tahsis edilmemiştir. Bu durumda, cihaz ağ

içinde sadece 64 bit genişletilmiş adresi ile iletişim kurabilir.

Bağlanma durumu alanı

Bağlanma durumu alanı 8 bit uzunluğundadır ve çizelge 4.6’da listelenen ayrılmamış değerlerden birini içermelidir.

Çizelge 4.6 Bağlanma durumu alanının geçerli değerleri

Bağlanma Durumu	Açıklama
0 x 00	Bağlanma başarılı
0 x 01	PAN tamamen dolu
0 x 02	PAN erişimi inkar edildi
0 x 03 – 0 x 7f	Ayrılmış
0 x 80 – 0 x ff	MAC ilkeleri numaralandırma değerleri için ayrılmış

4.3.3 Ayrılma Bildirimi Komutu

Hem Koordinatör hem de ağa bağlanmış cihazlar ayrılma bildirimi komutunu gönderebilmelidir. Tüm cihazlara bu komut uygulanmalıdır. Komutun yapısı şekil 4.16’da gösterilmiştir.

Bayt: 17	1	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirteci (çizelge 4.5)	Ayrılma Sebebi

Şekil 4.16 Ayrılma bildirimi komutu yapısı

MHR Alanları

Çerçeve kontrol alanı içindeki varış adresleme modu ve kaynak adresleme modu alt alanları 3 (64 bit genişletilmiş adres) olarak ayarlanmalıdır.

Bağlanma yanıtı komutu için güvenlik ilkesi kullanılacaksa, güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulmalı ve gönderilecek çerçeve, varış adresindeki cihaz tarafından tanımlanmış güvenlik

metotları ile işlenmelidir. Diğer durumlarda bu alt alan 0 olarak seçilmelidir.

Çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanı 0 yapılmalı ve alım sırasında bu alt alan ihmal edilmelidir. Onay isteği alt alanı 1 yapılmalıdır.

Varış ve kaynak PAN belirteci alanları *macPANId* değerini içermelidir. Eğer koordinatör bağlı cihazı PAN' dan ayırmak isterse, varış adres alanı PAN' dan silinecek cihazın genişletilmiş adresini içermelidir. Eğer bağlı cihaz PAN' dan ayrılmak isterse, varış adres alanı *macCoordExtendedAddress* değerini ve kaynak adres alanı *aExtendedAddress* değerini içermelidir.

Ayrılma Sebebi Alanı

Ayrılma sebebi alanı 8 bit uzunluğundadır ve çizelge 4.7'de listelenen ayrılmamış değerlerden birini içermelidir.

Çizelge 4.7 Geçerli ayrılma nedeni kodları

Bağlanma Durumu	Açıklama
0 x 00	Ayrılmış
0 x 01	Koordinatör cihazı PAN' dan ayırmak istiyor
0 x 02	Cihaz PAN' dan ayrılmak istiyor
0 x 03 – 0 x 7f	Ayrılmış
0 x 80 – 0 x ff	MAC ilkeleri numaralandırma değerleri için ayrılmış

4.3.4 Koordinatör Etkileşim Komutları

Koordinatör etkileşim komutları kümesi cihazın koordinatör ile etkileşmesine izin verir.

4.3.4.1 Veri İsteği Komutu

Veri İsteği komutu, koordinatörden veri almak için cihaz tarafından üretilir.

Komutun yapısı şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Bayt: 7 / 11 / 13 / 17	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirtecisi (çizelge 4.5)

Şekil 4.17 Veri isteği komutu yapısı

4.3.4.2 PAN Id Çelişki Bildirimi Komutu

PAN Id Çelişki Bildirimi komutu, PAN belirtecinde çelişki tespit edildiği zaman cihaz tarafından PAN koordinatörüne gönderilir. Tüm cihazlar bu komutu iletme yeteneğine sahipken, RFD'lerin bu komutu alma yeteneğinin olması gerekmez. PAN Id çelişki bildirimi komutunun yapısı şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Bayt: 23	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirtecisi (çizelge 4.5)

Şekil 4.18 PAN Id çelişki bildirimi komutu yapısı

4.3.4.3 Yetim Bildirimi Komutu

Yetim bildirimi komutu, cihazın kendi koordinatörü ile eş zamanlılığı kaybettiği zaman cihaz tarafından üretilir. Tüm cihazlar bu komutu iletme yeteneğine sahipken, RFD'lerin bu komutu alma yeteneğinin olması gerekmez. Yetim Bildirim Komutunun yapısı şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Bayt: 17	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirtecisi (çizelge 4.5)

Şekil 4.19 Yetim bildirimi komutu yapısı

MHR Alanları

Çerçeve kontrol alanının kaynak adresleme modu alt alanı 3 (64 bit genişletilmiş adres) olarak kurulmalıdır. Varış adres modu alt alanı 2 (16 bit kısa adres) yapılmalıdır. Komut için güvenlik ilkesi uygulanacaksa ilgili alt alan kurulmalıdır. Onay isteği alt alanı ve bekleyen çerçeve alt alanı 0 yapılmalı ve alım sırasında ihmal edilmelidir. Varış PAN belirtecisi ve

kaynak PAN belirteci alanı genel PAN belirteci (0xffff) değerinde olmalıdır. Varış adresi alanı genel kısa adres (0xffff) değerini içermelidir. Kaynak adresi alanı genişletilmiş adresin değerinde olmalıdır.

4.3.4.4 Beacon İsteği Komutu

Beacon İsteği Komutu, aktif tarama sırasında kendi POS' u içindeki tüm koordinatörleri tespit etmek için cihaz tarafından kullanılır. Bu komut RFD' ler için zorunlu değildir. Beacon isteği komutunun yapısı şekil 4.20'deki gibidir.

Bayt: 7	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirteci (çizelge 4.5)

Şekil 4.20 Beacon isteği komutu yapısı

MHR Alanları

Çerçeve kontrol alanının varış adres modu alt alanı 2 (16 bit kısa adres) ve kaynak adres modu alanı 0 (kaynak adresi bilgisi yok) olarak kurulmalıdır. Bekleyen çerçeve alt alanı 0 yapılmalı ve alım sırasında ihmal edilmelidir. Onay isteği alt alanı 0 olmalıdır. Varış PAN belirteci genel PAN belirteci (0xffff) değerini ve varış adresi genel kısa adres (0xffff) değerini içermelidir.

4.3.4.5 Koordinatörün Yeniden Sıralaması Komutu

Koordinatörün Yeniden Sıralaması komutu, PAN içinde tanınan bir cihazdan yetim bildirimi komutu alındığında veya herhangi bir sebeple PAN yapılandırılması değiştiğinde koordinatör tarafından gönderilir.

Eğer komut ağ içindeki cihazdan gelen yetim bildirimi komutu sonrasında gönderilecekse, doğrudan yetim cihaza gönderilir. Eğer PAN yapılandırılmasındaki değişiklik nedeni ile gönderilecekse (ör, PAN belirteci veya fiziksel kanal değişimi) komut PAN içindeki tüm cihazlara yayınlanmalıdır. Tüm cihazlar bu komutu alma yeteneğine sahipken, RFD' lerin bu komutu iletim yeteneğinin olması gerekmez. Koordinatörün Yeniden Sıralaması Komutunun yapısı şekil 4.21'deki gibidir.

Bayt: 17/23	1	2	2	1	2
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirteci (çizelge 4.5)	PAN Belirteci	Koordinatör Kısa Adresi	Fiziksel Kanal	Kısa Adres

Şekil 4.21 Koordinatörün yeniden sıralaması komutu yapısı

4.3.4.6 GTS İsteği Komutu

GTS isteği komutu PAN' a bağlı bir cihaz tarafından, koordinatörden yeni GTS isteğinde bulunmak veya var olan GTS tahsisini kaldırmak için kullanılır. Sadece geçerli bir kısa adresi olan cihazlar bu komutu gönderebilir (kısa adresi 0xffff veya 0xffff değerinde olan cihazlar gönderemez). Komutun yapısı şekil 4.22'de gösterildiği gibidir.

Bayt: 7	1	1
MHR Alanları	Komut Çerçevesi Belirteci (çizelge 4.5)	GTS Özellikleri

Şekil 4.22 GTS isteği komutu yapısı

4.4 MAC Sabitleri ve PIB özellikleri

Bu alt bölümde MAC alt katmanı tarafından gereksinim duyulan sabitler ve özellikler tanımlanacaktır.

4.4.1 MAC sabitleri

MAC alt katmanının özelliklerini belirleyen sabitler çizelge 4.8'de listelenmiştir.

Çizelge 4.8 MAC alt katmanı sabitleri

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aBaseSlotDuration</i>	Süper çerçeve derecesi sıfıra eşit olduğu zaman süper çerçeve slotunu oluşturan sembollerin sayısı	60
<i>aBaseSuperframeDuration</i>	Süper çerçeve derecesi sıfıra eşit olduğu zaman süper çerçeveyi oluşturan sembollerin sayısı	<i>aBaseSlotDuration</i> * <i>aNumSuperframeSlots</i>

Çizelge 4.8 MAC alt katmanı sabitleri (devamı)

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aExtendedAddress</i>	Cihaza atanan 64 bit IEEE adresi	Cihaz tanımlar
<i>aMaxBE</i>	CSMA-CA algoritmasında gecikme periyotlarının azami üstel değeri	5
<i>aMaxBeaconOverHead</i>	Beacon çerçevesi veri yüküne MAC alt katmanı tarafında eklenecek baytların azami sayısı	75
<i>aMaxBeaconPayloadLength</i>	Beacon çerçevesinin azami veri yükü, [bayt]	$aMaxPHYPacketSize - aMaxBeaconOverHead$
<i>aGTSDescPersistenceTime</i>	GTS açıklayıcıların bulunduğu süper çerçevelerin sayısı	4
<i>aMaxFrameOverhead</i>	Güvenlik ilkesi uygulanmaksızın MAC alt katmanı tarafında eklenecek baytların azami sayısı.	25
<i>aMaxFrameResponseTime</i>	Veri istek çerçevelerine cevap verebilmek için geçen azami sembol süresi	1220
<i>aMaxFrameRetries</i>	İletişimin başarısızlıkla sonuçlanmasından önce yapılan tekrar sayısı	3
<i>aMaxLostBeacon</i>	Alıcı cihazın eş zamanlılık kaybı bildirimi yapmadan önce yakalayamadığı ardışık beacon çerçeveleri sayısı	4
<i>aMaxMACFrameSize</i>	MAC çerçevesi veri alanı içinde iletilebilecek baytların azami sayısı	$aMaxPHYPacketSize - aMaxFrameOverhead$
<i>aMaxSIFSFrameSize</i>	Kısa çerçeve aralığı (SIFS) ile takip edilecek MPDU' nun azami boyutu	18
<i>aMinCAPLength</i>	CAP' ı oluşturan sembollerin en az sayısı	440
<i>aMinLIFSPeriod</i>	Uzun çerçeve aralığını (LIFS) oluşturan en az sembol sayısı	40
<i>aMinSIFSPeriod</i>	Kısa çerçeve aralığını (SIFS) oluşturan en az sembol sayısı	12
<i>aNumSuperframeSlots</i>	Her hangi bir süper çerçevenin içerdiği slotların sayısı	16
<i>aReponseWaitTime</i>	İstek komutlarına takiben alınan cevap komutlarını azami bekleme süresi [sembol]	$32 * aBaseSuperframeDuration$

<i>aUnitBackoffPeriod</i>	CSMA-CA algoritması tarafından kullanılan temel zaman periyotlarını oluşturan sembollerin sayısı	20
---------------------------	--	----

4.4.2 MAC PIB Özellikleri

Cihazın MAC alt katmanını yönetimi için gerekli özellikler. Tüm bu özelliklere “MLME-GET.request” ve “MLME-SET.request” ilkelleri ile okuma ve yazma yapılabilir. MAC PIB içerdiği özellikler çizelge 4.9’da listelenmiştir. Özelliklerden (♦) ile işaretlenenler RFD’ ler için zorunlu değildir.

Çizelge 4.9 MAC PIB özellikleri

Özellik	Belirteç	Tip	Aralık	Açıklama	Varsayılan
<i>macAckWaitDuration</i>	0x40	Tam sayı	54 - 120	İletilen veri çerçevesini takiben onay çerçevelerinin beklendiği azami sembol süresi	54
♦ <i>macAssociationPermit</i>	0x41	Bool	Doğru Yanlış	Koordinatörün ağa bağlanmaya izin verip vermediğini belirtir	Yanlış
<i>macAutoRequest</i>	0x42	Bool	Doğru Yanlış	Beacon çerçevesi içinde kendi adresi varsa veri isteği komutunun otomatik gönderileceğini belirtir.	Doğru
<i>macBattLifeExt</i>	0x43	Bool	Doğru Yanlış	Pil ömrü uzantısını belirtir	Yanlış
<i>macBattLifeExtPeriods</i>	0x44			Alıcının açık kalacağı gecikme periyotları sayısı	6
♦ <i>macBeaconPayload</i>	0x45	Bayt kümesi	-	Beacon çerçevesi veri yükü içeriği	Boş
♦ <i>macBeaconPayloadLength</i>	0x46	Tam sayı		Beacon çerçevesi veri yükünün bayt cinsinden uzunluğu	0
♦ <i>macBeaconOrder</i>	0x47	Tam sayı	0 - 15	Koordinatörün beacon gönderme aralığını tanımlar	15
♦ <i>macBeaconTxTime</i>	0x48	Tam sayı	0x000000 0xffff	En son gönderilen beacon dan sonra geçen zaman [sembol]	0x000000

Çizelge 4.9 MAC PIB özellikleri (devamı)

Özellik	Belirteç	Tip	Aralık	Açıklama	Varsayılan
◆ <i>macBSN</i>	0x49	Tam sayı	0x00 0xff	Beacon çerçevelerine eklenen dizi numarası	Rasgele değer
<i>macCoordExtended-Address</i>	0x4a	IEEE adresi	64 bit IEEE adresi	Koordinatörün 64 bitlik genişletilmiş adresi	-
<i>macCoordShort-Address</i>	0x4b	Tam sayı	0x0000 0xffff	Bağlı bulunan koordinatörün 16 bit kısa adresi	0xffff
<i>macDSN</i>	0x4c	Tam sayı	0x00 0xff	Veri ve MAC komut çerçevelerine eklenen dizi numarası	Rasgele değer
◆ <i>macGTSPermit</i>	0x4d	Bool	Doğru Yanlış	Koordinatörün GTS isteklerini kabul edip etmediğini belirtir.	Doğru
<i>macMaxCSMABackoffs</i>	0x4e	Tam sayı	0 - 5	CSMA-CA algoritmasının kanal erişimi başarısız olarak bildirmeden önceki gecikme periyotlarının azami sayısı	4
<i>macMinBE</i>	0x4f	Tam sayı	0 - 3	CSMA-CA algoritmasında ki gecikme periyotlarının en az üstel sayısı	3
<i>macPANId</i>	0x50	Tam sayı	0x0000 0xffff	Cihazın çalıştığı PAN' ın 16 bitlik PAN belirteci	0xffff
◆ <i>macPromiscuosMode</i>	0x51	Bool	Doğru Yanlış	MAC alt katmanının karışık modda çalışıp çalışmadığını gösterir.	Yanlış
<i>macRxOnWhenIdle</i>	0x52	Bool	Doğru Yanlış	Bekleme müddetince alıcının açık kalıp kalmayacağını belirtir.	Yanlış
<i>macShortAddress</i>	0x53	Tam sayı	0x0000 0xffff	Cihazın PAN içinde iletişim kurarken kullandığı kısa adres	0xffff
◆ <i>macSuperframeOrder</i>	0x54	Tam sayı	0-15	Süper çerçevenin aktif kısmının uzunluğunu tanımlar	15
<i>macTransaction-PersistenceTime</i>	0x55	Tam sayı	0x0000 0xffff	Koordinatör tarafında işlem in kayıtlı tutulduğu azami zaman	0x01fd

4.5 MAC İşlevsel Tanımı

Bu alt bölüm MAC işlevselliğinin detaylı açıklamasını sağlar. Alt bölüm 4.5.1’de kanal erişimi için 2 mekanizma tanımlanır: yarışma temelli ve yarışma serbest. Yarışma-temelli erişim mekanizması cihazlara CSMA-CA gecikme algoritmasını kullanarak kanal erişimini sağlar. Yarışma-serbest erişim mekanizması GTS’ lerin kullanımına göre tamamen PAN koordinatörü tarafından kontrol edilir.

PAN’ ın başlatılması ve işletilmesi için kullanılan mekanizmalar 4.5.2’de tanımlanmıştır. Kanal taraması cihaz tarafından kanalın güncel durumunu değerlendirebilmek, kendi POS’ u içinde bütün beacon çerçevelerini yerleştirebilmek veya eş zamanlılığını kaybettiğinden dolayı özel bir beaconu yakalayabilmek için kullanılır. Yeni bir PAN başlatılmasından önce kanal taramasının sonuçları uygun fiziksel kanalın tespiti ve POS içindeki diğer PAN’ lar tarafından kullanılmayan PAN belirtecinin seçimi için kullanılabilir. İki PAN aynı PAN belirteci ile POS içinde örtüşmesi mümkündür, bu durumun tespiti ve çözümünü için bir yöntem mevcuttur. Kanal taraması ve uygun PAN belirtecinin seçimini takiben bir FFD, PAN koordinatörü gibi çalışmaya başlayabilir. Bu alt bölümde aynı zamanda normal işlemler müddetince diğer cihazların keşfi için FFD’ nin yaptığı beacon gönderme metotları da tanımlanmıştır.

Cihazların PAN katılması ve ayrılması mekanizmaları 4.5.3’te tanımlanmıştır. Bağlanma işlemi, cihazın PAN’ a katılması ve koordinatörün gerekli şartlarını sağlandığında cihaza katılmaya izin vermesi durumları için tanımlanmıştır. Aynı zamanda cihaz veya onun koordinatörü tarafından başlatılan ayrılma işlemini de tarif edilmiştir.

Cihazların koordinatörleri ile eş zamanlılığı yakalaması ve koruması mekanizmaları 4.5.4’te belirtilmiştir. Aktif-beacon PAN üzerinde eş zamanlılık, koordinatörün beacon çerçevesini nasıl ürettiğinin açıklanmasından sonra tanımlanmıştır. Bu açıklamaları takiben, pasif-beacon PAN içinde eş zamanlılık tarif edilmiştir. Cihaz ile onun koordinatörü arasında kurulmuş iletişimin, cihaz eş zamanlılığı kaybetmesi halinde, tekrar kurulması mümkündür.

IEEE 802.15.4-2003 standardına uyumlu uygulamalarda veri aktarımı, koordinatörden ziyade PAN üzerindeki cihazlar tarafından kontrol edilebilir şekilde dizayn edilmiştir. Bu gereksinim korunarak koordinatörün çoklu işlemleri ele alma metotları 4.5.5’te anlatılmıştır.

Çerçeveler için iletim, alım ve onaylama mekanizmaları, dolaylı iletimi de kapsayacak şekilde 4.5.6’da belirtilmiştir. Ek olarak, çerçeveler için tekrar gönderme metotları anlatılmıştır.

4.5.1 Kanal Erişimi

Bu alt bölümde, süper çerçeve yapısı ve fiziksel radyo kanalına erişim için gerekli mekanizmaları tanımlanmıştır.

4.5.1.1 Süper Çerçeve Yapısı

LR-WPAN standardı süper çerçeve yapısının isteğe bağlı kullanılmasına izin verir. Kullanılacak süper çerçevenin şekli koordinatör tarafından belirlenir. Süper çerçeve, ağın koordinatörü tarafından gönderilen beacon çerçevesi ile her iki taraftan sınırlıdır ve 16 eşit slota bölünmüştür (şekil 4.23). Her süper çerçevenin ilk slotunda Beacon çerçevesi gönderilir. Eğer koordinatör süper çerçeve yapısını kullanmak istemezse, Beacon iletimlerini durdurabilir. Beacon çerçeveleri bağlı cihazların eş zamanlılığını sağlamak, PAN ve süper çerçeve yapısını tanımlamak için kullanılır.

PAN koordinatörü süper çerçeve yapısını kullanarak kanala erişim zamanını kısıtlayabilir. Yapılandırmaya bağlı olarak süper çerçeveler aktif ve pasif kısımlara ayrılabilir. Koordinatör kendi PAN' ı ile sadece süper çerçevenin aktif kısmı müddetince etkileşir.

Süper çerçevenin yapısı *macBeaconOrder* ve *macSuperframeOrder* değerleri ile tanımlanır. MAC PIB özelliği *macBeaconOrder* (*BO*), koordinatörün kendi beacon çerçevelerini ilettiği aralığı tanımlar. *BO* ile beacon iletim aralığı (*BI*) bir birine şu şekilde bağlıdır:

$$0 \leq BO \leq 14, BI = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{BO} \text{ [sembol]} \quad (4.6)$$

Eğer $BO = 15$ ise *macSuperframeOrder* değeri ihmal edilir.

MAC PIB özelliği *macSuperframeOrder* (*SO*), süper çerçevenin aktif kısmının uzunluğunu tanımlar. *SO* ile süper çerçeve süresi (*SD*) bir birine şu şekilde bağlıdır:

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14, SD = aBaseSuperframeDuration \cdot 2^{SO} \text{ [sembol]} \quad (4.7)$$

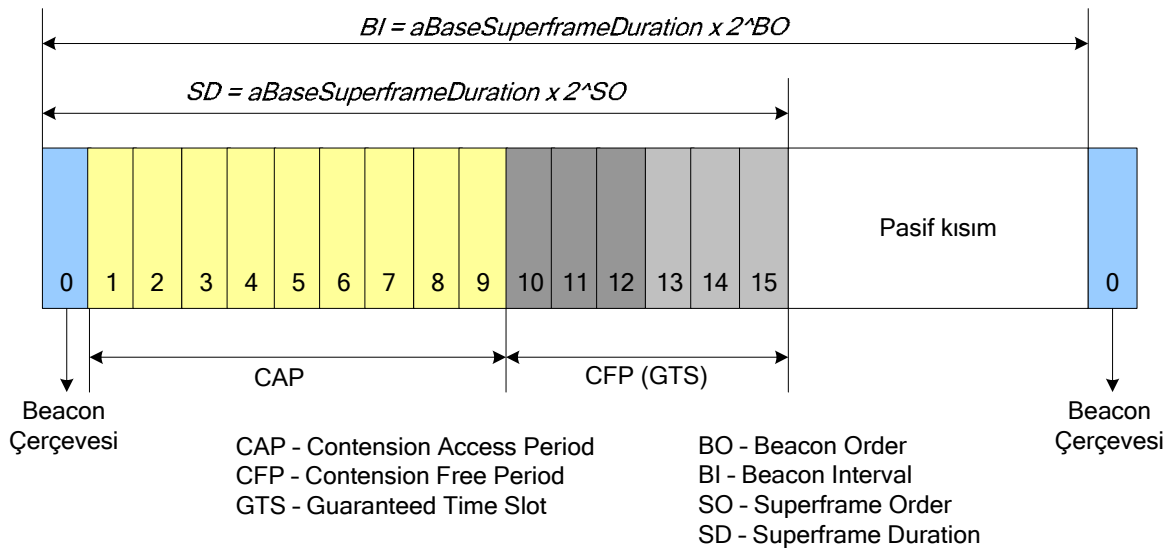
Eğer $SO = 15$ ise süper çerçeve beacondan sonra aktif kalmayacak. Eğer $BO = 15$ ise süper çerçeve var olmayacaktır.

Her süper çerçevenin aktif kısmı ($aBaseSlotDuration \cdot 2^{SO}$) süresinde eşit alanlı 16 slota ayrılır ve üç parçadan oluşur: Beacon, CAP ve CFP. Beacon çerçevesi slot 0 başlangıcında CSMA mekanizması kullanmaksızın gönderilir. CAP hemen beacon çerçevesinden sonra başlar. CFP mevcutsa, CAP' dan sonra başlar ve süper çerçevenin aktif kısmının sonuna kadar uzar. Her hangi tahsis edilmiş GTS varsa, CFP içinde yerleştirilir.

Süper çerçeve yapısını kullanmak isteyen PAN, 0 ile 14 arasında bir değeri *macBeaconOrder* değerine ve 0 ile *macBeaconOrder* arasında bir değeri de *macSuperframeOrder* değerine atmalıdır.

Süper çerçeve yapısını kullanmak istemeyen PAN, pasif-beacon PAN olarak isimlendirilir ve her iki değeri de 15 yapmalıdır. Bu durumda, koordinatör gerekli olmadıkça beacon göndermeyecek ve tüm iletimler (bölüm 4.5.6.3'te belirtilen bazı durumlar hariç) slotsuz CSMA-CA mekanizması kullanılarak yapılacaktır. Ek olarak GTS tahsis yapılmayacaktır.

Şekil 4.23'te süper çerçeve yapısının bir örneği gösterilmiştir. Bu örnekte, süper çerçeve aktif ve pasif kısımlar içerir ve CFP alanı içinde 2 adet GTS tahsis edilmiştir.



Şekil 4.23 Süper çerçeve yapısına bir örnek

CAP

CAP alanı, beacon çerçevesini tabiken hemen başlar ve süper çerçevedeki CFP slot sınırının başlamasından önce tamamlanır. Eğer CFP sıfır uzunluğunda ise, CAP süper çerçevenin aktif kısmının sonunda tamamlanır. CAP uzunluğu GTS'lerin bakımını sağlayabilmek için ek olarak geçici yerleştirme alanı gerekmediği müddetçe en azından *aMinCAPLength* sembol kadar olmalıdır. CFP alanının uzunluğu dinamik olarak ayarlanır.

CAP içinde iletilen tüm çerçeveler (onay çerçeveleri ve veri isteği komutunu takiben gönderilen onay çerçevelerinden hemen sonra gönderilen veri çerçevesi hariç) kanala erişmek için slotlu CSMA-CA mekanizmasını kullanır. CAP içinde iletim yapan bir cihaz, yapılan işlemin CAP bitiminden önce bir IFS periyodunda tamamlandığından emin olmalıdır. Eğer bu

mümkün değilse, cihaz iletimi bir sonraki süper çerçevenin CAP bölümüne kadar ertelemelidir.

MAC komut çerçeveleri daima CAP içinde iletilmelidir.

CFP

CFP alanı, CAP alanının bittiği slot sınırını takiben başlar ve bir sonraki beacon çerçevesinin başlamasından önce tamamlanır.

Düşük gecikme gerektiren veya özel veri hızları gerektiren uygulamalarda PAN koordinatörü aktif süper çerçevenin bir kısmını bu uygulama için atayabilir. Atanan bu kısma garantilenmiş zaman slotları (GTS) denir. PAN koordinatörü tarafından GTS tahsis edilmişse, tahsis edilen GTS' ler CFP alanı içinde yerleşir ve bitişik slotları işgal eder. PAN koordinatörü 7'ye kadar slotu GTS' ler için atayabilir ve GTS' ler birden fazla slot periyodunu işgal edebilir. Bu nedenle CFP büyümesi veya küçülmesi birleştirilmiş GTS' lerin tamamının toplam uzunluğuna bağlıdır.

Ağ içinde tüm yarışma tabanlı işlemler CFP başlamadan önce tamamlanır. CFP içinde iletim yapan cihaz kendine tahsis edilmiş GTS alanı bitiminden önce bir IFS periyodunda iletimin tamamlanacağından emin olmalıdır.

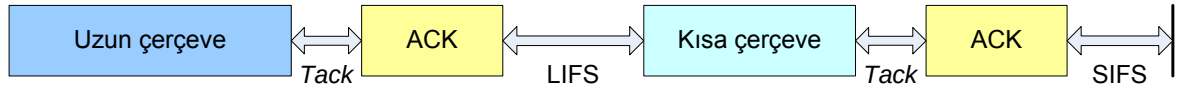
4.5.1.2 Çerçeveler Arası Bekleme Zamanı (IFS)

MAC alt katmanı PHY tarafından alınan veriyi işleyebilmek için belli bir miktarda zamana gereksinim duyar. Bunu sağlayabilmek için, iletilen çerçeveler arasına bekleme zamanı (IFS) eklenmelidir. Eğer iletim onaylama gerektiriyorsa, IFS periyodu onaylama çerçevesini takiben bırakılır. IFS periyodunun uzunluğu aktarılan çerçevenin boyutuna bağlıdır. MAC alt katmanı tarafından *aMaxSIFSFrameSize* (18 sembol) sabit değerinden daha küçük boyutlu çerçeveler kısa çerçeve ve daha büyük boyutlu çerçeveler uzun çerçeve olarak kabul edilir. Buna göre, kısa çerçeveleri en azından *aMinSIFSPeriod* sembol süresi uzunluğunda kısa-IFS (SIFS) periyodu takip eder. Uzun çerçeveleri ise en azından *aMinLIFSPeriod* sembol süresi uzunluğunda uzun-IFS (LIFS) periyodu takip etmelidir. Bu kavram şekil 4.24'te gösterilmiştir.

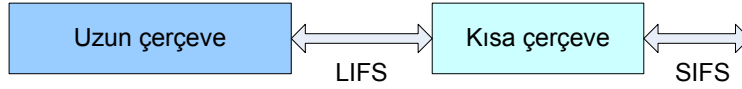
$$\text{SIFS} \geq a\text{MinSIFSPeriod} \text{ (12 sembol)}$$

$$\text{LIFS} \geq a\text{MinLIFSPeriod} \text{ (40 sembol)}$$

Onaylamalı iletim



Onaylamasız iletim



Şekil 4.24 IFS şematik gösterimi

4.5.1.3 CSMA-CA Algoritması

CSMA-CA algoritması CAP içinde iletilen veri veya MAC komut çerçevelerinin iletiminden önce kullanılır. Veri isteği komutunun onaylanmasını takiben iletilen veri çerçeveleri bu kapsama girmez. Beacon çerçeveleri, onaylama çerçeveleri ve CFP içinde iletilen veri çerçeveleri iletimi için CSMA-CA algoritması kullanılmaz.

Eğer beacon çerçeveleri PAN içinde kullanılıyorsa, MAC alt katmanı süper çerçevenin CAP periyodu içinde iletim için CSMA-CA algoritmasının slotlu sürümünü kullanacaktır. Diğer taraftan, Eğer PAN içinde beacon çerçeveleri kullanılmıyorsa veya aktif-beacon PAN içinde beacon yerleştirilemiyorsa, MAC alt katmanı iletimi slotsuz CSMA-CA algoritmasını kullanarak yapacaktır. Her iki durum içinde algoritma, gecikme periyotları ismi ile anılan zaman birimleri kullanılarak uygulanır, algoritmada bir gecikme periyodu *aUnitBackoffPeriod* sembol süresine eşit olmalıdır.

Slotlu CSMA-CA algoritmasında, PAN koordinatörünün süper çerçeve slot sınırları ile PAN içindeki her cihazın gecikme periyot sınırları sıraya dizilir. Şöyle ki, beacon iletimin başlaması ile her bir cihazın ilk gecikme periyodunun başlangıcı hizalanır. Slotlu CSMA-CA da, MAC alt katmanı, PHY katmanının tüm iletimleri gecikme periyodunun sınırında başladığından emin olmalıdır. Slotsuz CSMA-CA da, bir cihazın gecikme periyotları PAN içindeki diğer cihazların gecikme periyotları ile zaman içinde ilişkili değildir.

Tüm cihazlar her bir iletim işlemi için 3 değişken korurlar: *NB*, *CW* ve *BE*. *NB*, güncel iletim denenirken CSMA-CA algoritmasının gerek duyduğu gecikme periyotları sayısıdır. Bu değer her yeni iletim işleminden önce 0 değeri ile başlatılır. *CW*, yarışma penceresi uzunluğu, iletimin başlayabilmesinden önce gerek duyulan temiz kanal etkinliği için gecikme

periyotlarının sayısını tanımlar. Bu değer her bir iletim işleminden önce 2 değeri ile başlatılır ve kanal meşgul olarak değerlendirilirse her defasında tekrar 2' ye kurulur. CW değişkeni sadece slotlu CSMA-CA için kullanılır. BE , gecikme periyodu üstel değeri, cihazın kanal değerlendirmesi yapmadan önce ne kadar gecikme periyodu bekleyeceği ile ilişkilidir. Slotlu veya slotsuz sistemlerde $macBattLifeExt$ özelliği 0 ise BE değişkeni $macMinBE$ değeri ile başlatılacaktır. Slotlu sistemde $macBattLifeExt$ özelliği 1 olarak ayarlanmış ise bu değişken 2' den küçük değer ile başlatılacaktır. İlaveten, $macMinBE$ değeri 0 olarak ayarlanmış ise bu algoritmanın birinci iterasyonu müddetince çarpışmadan kaçınma geçersiz olacaktır.

Bu algoritmanın kanal değerlendirme kısmı süresince cihazın alıcısı aktif olduğu halde, cihaz bu zaman diliminde alınan tüm çerçeveleri imha edecektir.

Şekil 4.25'te CSMA-CA algoritmasının adımları gösterilmiştir. Slotlu CSMA-CA algoritması kullanıldığı zaman, MAC alt katmanı önce NB , CW ve BE değişkenlerini uygun değerler ile başlatır ve bir sonraki gecikme periyodunun sınırını yerleştirir [adım (1)]. Slotsuz CSMA-CA için MAC alt katmanı NB ve BE değişkenlerini başlatır ve doğruca 2. adımı işletir.

MAC alt katmanı 0 ile $2^{BE}-1$ aralığında rasgele sayıda gecikme periyodu bekler [adım 2] ve sonra PHY katmanından CCA uygulaması ister [adım 3]. Slotlu CSMA-CA sisteminde CCA gecikme periyodu sınırında başlarken slotsuz CSMA-CA sisteminde ise CCA hemen başlar.

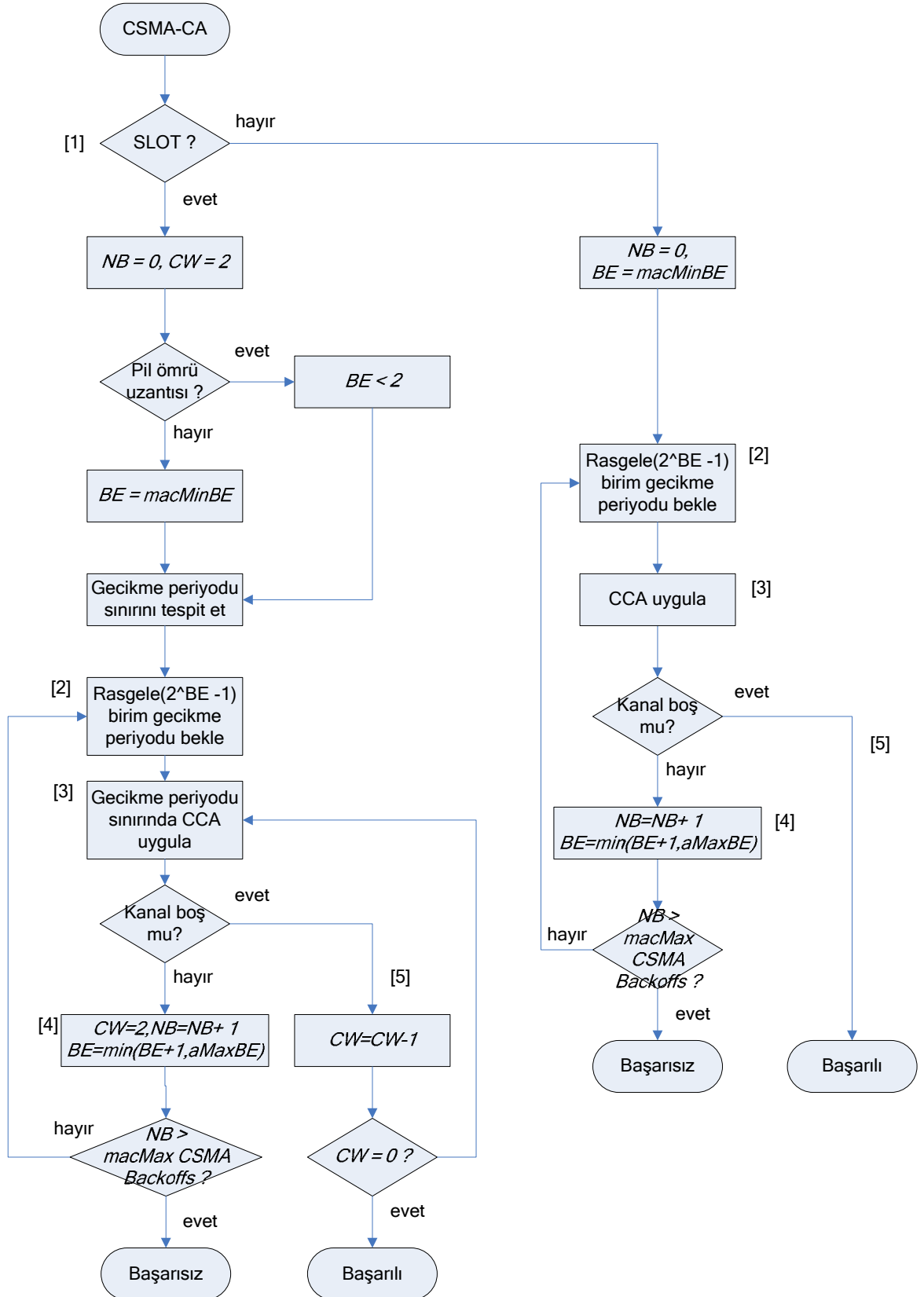
Pil ömrü uzantısı alt alanı 0 olarak ayarlanmış slotlu CSMA-CA sisteminde, MAC alt katmanı rasgele gecikmeden sonra, geriye kalan CSMA-CA işlemlerinin ve tüm iletim işlemin CAP' ın bitiminden önce tamamlanacağından emin olmalıdır. Eğer rasgele gecikme periyotlarının sayısı CAP içinde geriye kalan gecikme periyotlarının sayısından daha büyükse, MAC alt katmanı CAP' ın sonunda gecikme geri sayımını durdurmalı ve bir sonraki süper çerçevenin CAP kısmında kaldığı yerden devam etmelidir. Eğer rasgele gecikme periyotlarının sayısı CAP içinde geriye kalan gecikme periyotlarının sayısına eşit veya daha küçükse, MAC alt katmanı gecikme beklemesini uygulamalı ve sonra işlemin ilerleyip ilerlemeyeceğini değerlendirmelidir. Eğer geriye kalan CSMA-CA algoritma adımları (örneğin 2. CCA analizi), çerçeve iletimi ve her hangi onaylama CAP' ın bitiminden önce tamamlanabiliyorsa MAC alt katmanı ilerleyecektir. Eğer MAC alt katmanı ilerleyebiliyorsa, PHY' nin güncel süper çerçeve için CCA uygulayabildiğinden emin olmalıdır. Eğer MAC alt katmanı ilerleyemiyorsa, bir sonraki süper çerçevenin CAP kısmının başlangıcına kadar beklemeli ve değerlendirmeyi tekrar yapmalıdır.

Pil ömrü uzantısı alt alanı 1 olarak ayarlanmış slotlu CSMA-CA sisteminde, MAC alt katmanı

rasgele gecikmeden sonra, geriye kalan CSMA-CA işlemlerinin ve tüm iletim işlemin CAP' ın bitiminden önce tamamlanacağından emin olmalıdır. Rasgele gecikme periyodu geri sayımı sadece beaconun IFS periyodunun sonunu takiben birinci 6 dolu gecikme periyodu süresince yapılır. MAC alt katmanı geriye kalan CSMA-CA algoritma adımları (örneğin 2 CCA analizi), çerçeve iletimi ve her hangi onaylama işleminin CAP' ın bitiminden önce tamamlanabileceğinden eminse çerçeve iletimi beaconun IFS periyodundan sonra birinci 6 tam dolu gecikme periyodunun birinde başlayacaktır. Eğer MAC alt katmanı ilerleyebiliyorsa, PHY katmanının güncel süper çerçeve için CCA uygulayabildiğinden emin olmalıdır. Eğer MAC alt katmanı ilerleyemiyorsa, bir sonraki süper çerçevenin CAP kısmının başlangıcına kadar beklemeli ve değerlendirmeyi tekrar yapmalıdır.

Eğer kanal meşgul ise [adım 4], MAC alt katmanı NB ve BE değişkenlerini bir arttıracaktır, burada BE ' nin $aMaxBE$ değerinden büyük olmadığından emin olmalıdır. Aynı zamanda slotlu CSMA-CA sistemini içindeki MAC alt katmanı CW değişkenine 2 değerini verecektir. Eğer NB değişkeni değeri $macMaxCSMABackoffs$ değerine eşit veya daha küçükse, CSMA-CA algoritmada 2. Adıma geri dönecektir. NB daha büyükse, CSMA-CA algoritması kanal erişimi başarısız durumu ile sonlandırılacaktır.

Eğer kanal boş ise [adım 5], slotlu CSMA-CA sistemi içindeki MAC alt katmanı başlayan iletimden önce yarışma penceresinin sona erdiğinden emin olmalıdır. Şöyle yapılır, MAC alt katmanı önce CW değerini bir azaltır ve sonra sıfıra eşit olup olmadığına karar verir. Eğer sıfıra eşit değilse, CSMA-CA algoritması 3.adıma geri döner. Eğer sıfıra eşitse, MAC alt katmanı bir sonraki gecikme periyodunun sınırında çerçevenin iletimine başlar. Eğer kanal slotsuz CSMA-CA sisteminde boş olarak değerlendirilirse, MAC alt katmanı çerçevenin iletimine hemen başlar.



Şekil 4.25 CSMA – CA Algoritması

4.5.2 PAN Başlatılması ve İşletilmesi

Bu alt bölümlerde kanalların taranması, PAN belirteci çakışmasının tanımlanması ve PAN başlatılması işlemleri belirtilecektir.

4.5.2.1 Kanalları Tarama

Bütün cihazlar belirlenmiş bir kanal listesinde yetim ve pasif tarama yapabilirler. Buna ek olarak, bir FFD enerji sezimi (ED) ve aktif tarama yapabilir. Kanal tarama işleminde üst katmanlar taranması istenilen kanalların listesini göndermelidir.

Bir cihaz “MLME-SCAN.request” ilkeli ile kanalı tarayabilir. Eğer uygulanabiliyorsa, bu tarama müddetince, cihaz beacon iletimini askıya almalı ve taramanın sonucu üzerine beacon iletimini yeniden başlatmalıdır. Tarama işlemi ile elde edilen sonuçları “MLME-SCAN.confirm” ilkeli ile üst katmanlara bildirilecektir.

ED Kanal Tarama

FFD cihazı ED taraması ile istenilen her bir kanalın tepe enerji değerini elde edebilir. Bu değer olası PAN koordinatörü tarafından kanal seçimi için kullanabilir. Bir ED taraması yapılırken, MAC alt katmanı PHY veri hizmeti tarafından alınan çerçeveleri önemsemez.

Belirlenen kanalların ED taraması yapmak için, “MLME-SCAN.request” ilkelinin kullandığı tarama tipi parametresini ED taramasını gösteren parametre ile ayarlamak gerekir. Her bir kanal için, cihaz *phyCurrentChannel* da belirtilen kanala geçer ve ED ölçümlerini $[aBaseSuperframeDuration \cdot (2^n + 1)]$ sembol süresi için uygular. Buradaki “n” “MLME-SCAN.request” ilkelinde tarama süresinin değerini gösterir. ED ölçümü, kesin bir değer geri döndüren “PLME-ED.request” ilkeli yayınlanarak uygulanır. ED ölçümünün en büyük değeri kanal listesinde ki diğer kanala geçerken elde edilir. Taramayı uygulayan cihaz uygulamada belirtilmiş azami sayıda ED ölçüm sonuçlarını depolayabilmelidir.

ED kanal taraması, depolanan ED ölçümlerinin sayısı uygulamada belirtilmiş azami sayıya eşit olduğunda veya tanımlanan tüm kanalların enerjisi ölçüldüğü zaman durdurulur.

Aktif Kanal Tarama

FFD tarafından yapılan aktif kanal taraması, kanalda bulunan koordinatörlerin kendi radyo frekans alanına (POS) beacon çerçevesi göndermesine neden olur. Bu işlem yeni PAN kuracak olan muhtemel koordinatör tarafından PAN belirtecini seçmek için veya cihazın

başka bir ağa bağlantısı için kullanılabilir. Aktif tarama yapılırken MAC alt katmanı PHY veri hizmetinden alınan beacon çerçevesi olmayan çerçeveleri önemsemez.

Bir aktif tarama başlamadan önce MAC alt katmanı *macPANId* değerini saklamalıdır ve tarama müddetince bu değeri (0xffff) olarak ayarlamalıdır. Bu sadece kendi PAN'ındaki beacon çerçevelerinden ziyade bütün alınan beacon çerçevelerin kabul edilmesini sağlar. Tarama tamamlandığında, MAC alt katmanı tarama başlamadan önceki depolanan *macPANId* değerini geri yükleyecektir.

Belirlenen kanallarda aktif kanal taraması yapabilmek için, "MLME-SCAN.request" ilkelinin kullandığı tarama tipi parametresini aktif taramayı gösteren parametre ile ayarlamak gerekir. Her bir kanal için, cihaz *phyCurrentChannel* da belirtilen kanala geçer ve beacon isteği komutunu yollar. Cihaz bundan sonra $[aBaseSuperframeDuration \cdot (2^n + 1)]$ sembol süre için kendi alıcısını aktif etmelidir. Burada " n " 0 ile 14 arasında bir değerdir. Bu süre zarfında cihaz bütün beacon olmayan çerçeveleri önemsemez ve bütün tekil beacon çerçevelerinin içerdiği bilgiyi kayıt eder. Eğer bir beacon çerçevesi taranan kanalda daha önce görülmemiş bir PAN belirteci ve kaynak adresi içerisi içeriyorsa bu tekil beacon çerçevesi olarak kabul edilir.

Eğer alınan beacon çerçevesi içinde güvenlik aktif alt alanı 1 olarak ayarlanmış ise cihaz alınan çerçeveyi bilinen güvenlik ilkeleri ile işleme sokar. Bu işlem sırasında her hangi bir hata oluşursa bu beacon çerçevesi ihmal edilir ve beacon bilgisi PAN-açıklayıcısına güvenlik alanları uygun değerde düzenlenerek kayıt edilir.

Aktif-Beacon PAN koordinatörü beacon istek komutu alırsa, bunu ihmal eder ve beacon çerçevelerini olağan şekilde göndermeye devam eder. Eğer aynı komutu bir pasif-beacon PAN koordinatörü alırsa, slotsuz CSMA-CA mekanizmasını kullanarak tekbir beacon çerçevesini iletir.

Özel bir kanalda, bulunan beacon çerçevelerinin sayısı uygulamada belirlenen limit sayıya eşit olduğunda veya kanal sürekli taranıyorsa, aktif tarama sonlandırılmalıdır. Eğer son durum tatmin edici ise, kanal taranmış olarak kabul edilir. Mümkün olan durumlarda tarama işlemi her bir kanalda tekrarlanmalıdır. Tüm tarama, kayıt edilen PAN-açıklayıcıları sayısı uygulamada belirtilen azami sayıya ulaştığı zaman veya mümkün olan tüm kanallar tarandığında durdurulur.

Pasif Kanal Tarama

Pasif kanal tarama, aktif kanal tarama gibidir. Pasif kanal taraması yapan cihaz kendi alanı içinde bulunan koordinatörlerin beacon çerçevesini iletmesine neden olur. Pasif kanal taramada beacon istek komutu, her nasıl oluyorsa, iletilmez. Bu tarama tipi cihazın ağa bağlantısı için kullanılır. Pasif tarama yapılırken MAC alt katmanı PHY veri hizmetinden alınan beacon olmayan tüm çerçeveleri ihmal eder.

Pasif tarama başlamadan önce MAC alt katmanı *macPANId* değerini saklamalıdır ve tarama müddetince bu değeri (0xffff) olarak ayarlamalıdır. Bu kendi PAN' ı içinde üretilen beacon çerçevelerinden ziyade alınan bütün beacon çerçevelerin kabul edilmesini sağlar. Tarama tamamlandığında, MAC alt katmanı tarama başlamadan önceki depolanan *macPANId* değerini geri yükleyecektir.

Belirlenen kanallarda pasif kanal taraması yapabilmek için, "MLME-SCAN.request" ilkelinin kullandığı tarama tipi parametresini pasif kanal taramayı gösteren parametre ile ayarlamak gerekir. Her bir kanal için, cihaz *phyCurrentChannel* da belirtilen kanala geçmelidir. Cihaz bundan sonra [*aBaseSuperframeDuration* · ($2^n + 1$)] sembol süresi kadar kendi alıcısını aktif etmelidir. Burada "*n*" 0 ile 14 arasında bir değerdir. Bu süre zarfında cihaz beacon olmayan bütün çerçeveleri ihmal eder ve bütün tekil beacon çerçevelerinin içerdiği bilgiyi PAN-açıklayıcı yapısına kayıt eder. Cihaz uygulamada belirtilen azami sayıdaki PAN-açıklayıcısını depolayabilir. Bir beacon çerçevesi eğer taranan kanalda daha önce görülmemiş bir PAN belirteci ve kaynak adresi içerisi içeriyorsa bu tekil bir beacon çerçevesi olarak farz edilir.

Eğer alınan beacon çerçevesi içinde güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulmuş ise cihaz alınan çerçeveyi bilinen güvenlik ilkeleri ile işleme sokar. Bu işlem sırasında her hangi bir hata oluşmuş ise bu beacon çerçevesi ihmal edilir ve beacon bilgisi PAN-açıklayıcı yapısında güvenlik alanları uygun değerde düzenlenerek kayıt edilir.

Özel bir kanalda, bulunan beacon çerçeveleri sayısı uygulamada belirlenen limit sayıya eşit olduğunda veya kanal sürekli taranıyorsa pasif tarama sonlandırılmalıdır. Eğer son durum memnum edici ise, kanal taranmış olarak kabul edilir. Mümkün olan durumlarda ise tarama her bir kanalda tekrarlanır. Tüm tarama, kayıt edilen PAN-açıklayıcıları sayısı uygulamada belirtilen azami sayıya ulaştığı zaman veya mümkün olan tüm kanallar tarandığında durdurulur.

Yetim Kanal Tarama

Yetim kanal taraması, koordinatörü ile eş zamanlılığını kaybetmiş cihazları yeniden konumlandırmak için yapılır. Yetim kanal taraması yapılırken MAC alt katmanı PHY veri hizmetinde gelen koordinatörün yeniden düzenlemesi MAC komutu çerçeveleri hariç diğer bütün çerçeveleri ihmal eder.

Belirlenen kanallarda yetim kanal taraması yapmak için; “MLME-SCAN.request” ilkelinin kullandığı tarama tipi parametresini yetim kanal Taramayı gösteren parametre ile ayarlamak gerekir. Cihaz her bir kanal için *phyCurrentChannel* değerinde belirtilen kanala geçer ve bir yetim bildirimi komutu yollar. Bundan sonra cihaz alıcısını *aResponseWaitTime* müddetince açık bırakır. Eğer bu süre içinde cihaz başarılı bir şekilde koordinatör yeniden düzenleme komutunu alırsa alıcısını kapatır.

Eğer koordinatör yetim bildirme komutu alırsa, cihaza komut yollamak için kendi cihaz listesini araştırır. Koordinatör cihazı kayıtlarında bulursa yetim cihazına koordinatör yeniden düzenleme komutunu yollayacaktır. Koordinatörün cihazı listesinde arama işlemi ve koordinatör yeniden düzenleme komutu yollanması *aResponseWaitTime* içinde gerçekleşir. Koordinatör yeniden düzenleme komutu onun güncel PAN belirtecini, güncel kanalı ve yetim cihazının kısa adresini içermelidir. Eğer koordinatör cihazın kayıtlarda bulamamışsa komutu ihmal edecek ve koordinatör yeniden düzenleme komutu yollamayacaktır. Cihaz yetim kanal taramasını, bir koordinatör yeniden düzenleme komutu aldığı anda veya belirli bir kanalı taradığında sonlandırır.

4.5.2.2 PAN Belirteci Çakışması

Bazı örneklerde, Aynı PAN belirticine sahip iki PAN aynı kişisel işletim alanında (POS) var olabilir. Eğer böyle bir çakışma oluşursa, koordinatör ve onun cihazları PAN belirteci çakışma işlemini uygulayacaktır. RFD için bu işlem isteğe bağlı gerçekleştirilir.

Belirleme

Aşağıda belirtilen durumlarda PAN belirteci çakışması meydana gelir, bu durumda PAN koordinatör çakışma kararı verecektir.

- PAN koordinatörü, PAN Koordinatör alt alanı 1 olan ve PAN belirteci *macPANId* ye eşit olan bir Beacon çerçevesi aldığı anda.

- PAN koordinatörü kendi PAN' ın da ki bir cihazdan PAN ID çakışma bildirim komutu aldığıında.

Aşağıdaki durumlarda PAN belirteci çakışması oluşur, bu durumlarda cihaz çakışma kararı verecektir

- PAN Koordinatör alt alanı 1 olan, PAN belirteci *macPANId* eşit olan ve hem *macCoordShortAddress* hem de *macCoordExtendedAddress* değerine eşit olmayan bir adres içeren Beacon çerçevesi aldığıında

Çözüm

PAN belirteci çakışması belirlendiğinde; koordinatör ilk olarak aktif tarama yapar sonra taramadaki bilgileri kullanır ve yeni bir PAN belirteci seçer. (Uygun PAN belirtecinin seçiminde kullanılan algoritma bu standardın kapsamı dışındadır.) Yeni PAN belirtecinin seçiminden sonra koordinatör, PAN belirteci alanı *macPANId* ye eşit olan ve yeni PAN belirtecini içeren Koordinatör yeniden düzenleme komutunu yayınlar. Komutun yayınlamasından sonra, Koordinatör *macPANId* değerini yeni değer ile değiştirir.

PAN belirteci çakışması bir cihaz tarafından belirlendiğinde, PAN belirteci çakışma bildirim komutunu üretir ve bunu kendi PAN koordinatörüne gönderir. Eğer PAN koordinatörü komutu doğru şekilde alırsa, cihaza onay çerçevesini yollar. Böylece komut çerçevesinin alındığı doğrulanır. Daha sonra PAN koordinatör çakışmayı bu bölümde anlatıldığı gibi çözümler.

4.5.2.3 PAN Başlatılması

Bir PAN, bir FFD tarafından aktif kanal taraması yapılması ve uygun PAN belirteci seçilmesinden sonra başlatılır. Aktif kanal taramasından sonra listelenen PAN belirteçleri arasından uygun PAN belirtecini seçen algoritma bu standardın kapsamı dışındadır. Ek olarak, PAN başlatacak FFD' nin *macShortAddress* değeri (0xffff) değerinden daha küçük olmalıdır.

FFD "MLME-START.request" ilkelini iletimi ile PAN işletmeye başlar, ilkelin PAN koordinatör parametresi 1 ve koordinatör yeniden düzenleme parametresi 0 olarak ayarlanmalıdır. Bu ilkel alındığında, MAC alt katmanı *macPANId* ve *phyCurrentChannel* değerlerini ayarlar. Yapılandırma tamamlandıktan sonra, MAC alt katmanı "MLME-START.confirm" ilkelisi ile cevap verir ve PAN koordinatörü gibi çalışmaya başlar.

4.5.2.4 Beacon Üretimi

Cihazın *macShortAddress* değeri (0xffff) değerine eşit olmadığında beacon çerçevelerinin iletimine izin verecektir.

FFD beacon çerçevelerinin iletimini “MLME-START.request” ilkelini kullanarak başlatır. FFD beacon iletimine yeni bir PAN’ ın PAN koordinatörüymüş gibi veya önceden kurulmuş PAN içinde bir cihazmış gibi, PAN koordinatör parametresine bağlı olarak başlatabilir. Bu ilkel alındığın da MAC alt katmanı *macPANId* içindeki PAN belirtecini ayarlar ve bu değeri beacon çerçevesinde kaynak PAN belirteci alanında kullanır. Beacon çerçevesindeki kaynak adres alanında kullanılan adres; eğer *macShortAddress* (0xfffe) değerine eşitse *aExtendedAddress* değerini içermelidir aksi durumda *macShortAddress* değerinde olmalıdır.

Bütün beacon çerçeveleri her bir süper çerçevenin başlangıcında iletilir. Beacon iletim aralığı [*aBaseSuperframeDuration* · 2ⁿ] semboldür, burada "n" değeri *macBeaconOrder* değerine eşittir.

Beacon iletimine diğer iletim ve alım işlemlerine göre öncelik verilir.

4.5.2.5 Cihaz Tarama

FFD beacon çerçevelerini ileterek bulunduğu PAN içinde diğer cihazları bilgilendirebilir. Bu işlem diğer cihazlara, cihaz taramayı uygulatır.

PAN Koordinatörü olmayan FFD başarı ile PAN a bağlandığında ağın beacon çerçevelerini iletme başlayacaktır. Cihaz PAN koordinatör parametresi 0 olarak ayarlanmış “MLME-START.request” ilkelini kullanarak beacon çerçevesi iletimini başlatır. Bu ilkel alındığında, MLME cihazın bağlı olduğu PAN’ ın belirteci ve kendi kısa adresi ile beacon iletimine başlar. Bir Beacon çerçevesi gönderimi [*aBaseSuperframeDuration* · 2ⁿ] sembol oranındadır, burada "n" değeri *macBeaconOrder* Değerine eşittir.

4.5.3 Ağa Bağlanmak ve Ağdan Ayrılmak

Bu alt bölüm ağa bağlanma ve ağdan ayrılma işlemlerini tanımlar.

4.5.3.1 Ağa Bağlanmak

Ağa bağlanma isteğinde bulunan bir cihaz, önce “MLME-RESET.request” ilkelini uygulayarak MAC katmanını ilk duruma getirir. Daha sonra aktif kanal tarama veya pasif

kanal tarama yöntemlerinde birini tamamlar. Kanal taramasının sonuçlarına göre cihaz uygun bir PAN seçebilir. Kanal tarama işlemiyle elde edilen PAN-açıklayıcı listesinden bağlantı kurulacak uygun PAN' ı seçen algoritma standardın kapsamı dışındadır.

Ağın Koordinatörü ağa bağlanmak isteyen cihazlara sadece *macAssociationPermit* özelliği bir olarak ayarlanmış ise izin verecektir. Benzer şekilde, cihazlarda sadece kanal taramasının sonucunda bağlantı kurulmasına izin verilen ağlara bağlantı kurmak için çaba harcayacaktır. Eğer koordinatörün *macAssociationPermit* özelliği 0 olarak ayarlanmış ise cihaz tarafından alınmış bağlantı istek komutu ihmal edilecektir.

Bağlantı kurulacak PAN seçiminden sonra, aşağıda belirtilen PHY ve MAC PIB değerleri güncellenmelidir.

- *phyCurrentChannel* bağlantı için uygun kanala ayarlanmalıdır.
- *macPANId* bağlantı kurulacak PAN belirtecine ayarlanmalıdır.
- *macCoordExtendedAddress* veya *macCoordShortAddress* bağlantı kurmak istenilen ağın koordinatöründen gelen beacon çerçevesinde belirtilen değerlere göre ayarlanmalıdır.

Aktif-beacon PAN içinde ağa bağlanma işlemini uygulayabilmek için, cihaz koordinatörün beacon çerçevesini izlemeye başlamalıdır. Bu işlem beacon izleme parametresi 1 olarak ayarlanmış "MLME-SYNC.request" ilkelinin yayımlanması ile yapılabilir.

Bir PAN ile bağlantı kurmak isteyen cihaz, "MLME-ASSOCIATE.request" ilkelisi ile, sadece var olan bir PAN' a bağlanmayı deneyecektir ve kendi PAN' ının başlatmak için uğraşmayacaktır.

Hiçbir PAN ile bağlantı kurmamış cihaz, var olan PAN' ın koordinatörüne "bağlanma isteği" komutunu göndererek bağlanma işlemini başlatacaktır. Eğer "bağlama isteği" komutu doğru bir şekilde alınmış ise koordinatör bir onay çerçevesi gönderir, böylece komutun alındığı onaylanır.

"Bağlanma isteği" komutuna gönderilen onay çerçevesi cihazın ağa bağlandığı anlamına gelmez. Komutun koordinatör tarafında alınmasından sonra, var olan güncel kaynakların PAN' a yeni cihazın bağlanmasına yeterli olacağına karar vermesi için koordinatöre zaman gerekmektedir. Koordinatör *aResponseWaitTime* sembol süresi içinde bu kararı vermelidir. Eğer Koordinatör bu cihazın kendi PAN' ına daha önce bağlanmış olduğunu bulmuşsa, evvelce bilinen cihazla ilgili bilgileri silmelidir. Eğer yeterli kaynak varsa, koordinatör cihaz

için kısa adres tahsis eder. Cihaz için atanan yeni adresi içeren ve başarılı bağlantını durumunu gösteren "bağlama yanıtı" komutunu üretir. Eğer yeterli kaynak yok ise koordinatör başarısızlık durumunu belirten "bağlanma yanıtı" komutunu üretir. Bağlanma yanıtı komutu dolaylı iletim kullanılarak cihaza gönderilecektir.

Eğer "bağlanma isteği" komutunun adres tahsisi alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, koordinatör tarafından desteklenen adres modlarına bağlı olarak, çizelge 4.10'da belirtilen değerler aralığında 16bit kısa adres tahsis edilecektir. Eğer "bağlanma isteği" komutunun adres tahsisi alt alanı 0 olarak kurulmuş ise, koordinatör tarafından tahsis edilen kısa adres (0xffff) değerine eşit olacaktır. (0xffff) değerine eşit olan kısa adres cihazın ağa bağlandığını fakat kısa adres tahsis edilmediğini gösteren özel bir durumdur. Bu durumda cihaz ağ içinde sadece 64 bitlik genişletilmiş adresini kullanabilir.

"bağlanma isteği" komutu için onay çerçevesi alan cihaz, koordinatörün karar verebilmesi için *aResponseWaitTime* sembol kadar bekleyecektir. Eğer cihaz beacon takip ediyorsa, bağlantı yanıtı komutunun ne zaman geleceğini beacon çerçevesinden tespit eder. Eğer cihaz beacon takip etmiyorsa, cihaz *aResponseWaitTime* sembol süresi içinde koordinatöründen yanıt komutunu almaya çalışır. Eğer cihaz *aResponseWaitTime* sembol süresi sonunda koordinatörden bağlantı yanıtını alamazsa, veri yok durumunu gösteren parametre ile "MLME-ASSOCIATE.confirm" ilkelini yayınlar ve bağlanma isteğini başarısız sayar. Bu durumda üst katmanlar herhangi beacon izlemesini durdurur.

"Bağlanma yanıtı" komutunun alınmasından sonra cihaz onay çerçevesi göndererek alındıyı doğrulayacaktır. Eğer alınan komutta ki bağlanma durumu alt alanı başarılı bağlantıyı gösteriyorsa, cihaz bağlantı kurulan koordinatörün adresini kayıt eder. Bağlantı sonrası koordinatörün kısa adresi tarama sonucunda elde edilen beacon çerçevesinden edinilir ve *macCoordShortAddress* özelliğinde saklanır. Koordinatörün genişletilmiş adresi de bağlantı yanıtı komut çerçevesinin MHR alanında bulunur ve *macCoordExtendedAddress* özelliğinde saklanır. Cihaz aynı zaman da kısa adres alanındaki adresi de *macShortAddress* özelliğinde saklar. Çizelge 4.10'da belirtilen aralıkta olmasına bağlı olarak PAN içindeki iletişim kısa adresleri kullanarak yapılır.

Eğer komutun bağlantı durumu alanı bağlantının başarısız olduğunu gösteriyorsa, cihaz *macPANId* değerini varsayılan değer olan (0xffff) olarak ayarlamalıdır.

Çizelge 4.10 Kısa adresin kullanımı

<i>macShortAddress</i> değerleri	Açıklama
0 x 0000 – 0 x fffd	Kısa adresleme modunda kullanılabilen adresler.
0 x fffe	Cihaz 64bitlik genişletilmiş adresleme modunu kullanır (<i>aExtendedAddress</i>)
0 x ffff	Cihaz ağa bağlı değildir ve PAN içinde iletişim kuramaz

4.5.3.2 Ağdan Ayrılmak

Ağdan ayrılma işlemi “MLME-DISASSOCIATE.request” ilkeli yayımlanarak başlatılır.

Bir koordinatör kendine bağlı cihazlardan birini PAN’ dan ayırmak istediği zaman, cihaza “ayrılma bildirim” komutunu dolaylı iletim ile gönderir. Eğer cihaz komutu doğru bir şekilde alırsa onay çerçevesi göndererek alındıyı onaylar. Koordinatör tarafından onay çerçevesi alınmasa dahi cihazın ağdan ayrıldığı kabul edilir.

Eğer PAN’ a bağlı bir cihaz ağdan ayrılmak isterse “ayrılma bildirim” komutunu kendi koordinatörüne gönderir. Komutu doğru şekilde alan koordinatör durumu onay çerçevesi göndererek onaylar. Gönderilen onay çerçevesi cihaz tarafından alınmasa dahi cihaz kendine kendine ağdan ayrıldığını kabul eder.

Eğer komutun kaynak adres kısmı *macCoordExtendedAddress* değerine eşitse, alıcı kendisinin artık bağlı olduğu ağ olmadığını göz önünde bulunduracaktır. Eğer komut bir koordinatör tarafından alınır ve kaynak *macCoordExtendedAddress* değerine eşit değilse, gelen kaynak adresi kendi cihazları listesinden doğrular. Eğer adres listede mevcutsa koordinatör cihazı ağdan ayrılmış gibi düşünür, mevcut değilse komutu ihmal eder.

PAN’ a bağlı bir cihazın ayrılması PAN için gerekli tüm referans bilgilerinin silinmesiyle, koordinatörün cihazı ayırması ise kayıtlı bulunan cihazın tüm referans bilgilerinin silinmesi ile gerçekleşir.

Ayrılma işleminin sonucu üst katmanlara “MLME-DISASSOCIATE.confirm” ilkeli yayımlanarak bildirilir.

4.5.4 Eş Zamanlama

Bu alt bölüm, koordinatörler için beacon çerçevesi üretilmesini ve cihazlar için koordinatör ile eş zamanlama işlemini tanımlar. Beacon desteklenen PAN içinde eş zamanlama, beacon çerçevelerinin alınması ve çözümlenmesi ile uygulanır. Beacon desteklenmeyen PAN içinde ise, veri için koordinatörün taranması yolu ile uygulanır.

4.5.4.1 Beacon ile Eş Zamanlama

Bütün cihazların Aktif-beacon PAN içinde ($macBeaconOrder < 15$) işletilmesi durumunda bekleyen mesajların tespiti veya beacon izleme için beacon eş zamanlamasını sağlamak gerekir. Cihazlar alınan beacon çerçevesi içinde ki PAN belirtecini sadece tanımlanan $macPANId$ değerine eşit olduğu durumlarda beacon eş zamanlamasını yapmalıdır. Eğer $macPANId$ değeri genel PAN belirteci (0xffff) değerini içeriyorsa, beacon eş zamanlamasını yakalayabilmek için hiçbir çalışma yapılmamalıdır.

Cihazlar beacon eş zamanlamasını yakalayabilmek için “MLME-SYNC.request” ilkelini kullanır. Beacon eş zamanlamasının korunabilmesi için cihazlar düzenli olarak ve zamanında alıcılarını aktif yapmalıdır. Alıcılar $[aBaseSuperframeDuration \cdot (2^n + 1)]$ sembol süresi kadar açık tutulmalıdır, burada “n” $macBeaconOrder$ değeridir. Güncel PAN belirteci değerini içeren beacon çerçeveleri cihaz tarafından alınmamışsa, MLME aramayı tekrarlatır. Kayıp beacon çerçeveleri sayısı $aMaxLostBeacon$ değerine ulaştığında, MLME üst katmanlara eş zamanlamanın kaybolduğunu “MLME-SYNC-LOSS.indication” ilkelini yayımlayarak bildirir.

Cihaz bağlı bulunduğu koordinatörden beacon çerçevesi aldığı anda alınan çerçeveyi doğrulaması gerekir. Beacon çerçevesindeki kaynak adresi ve kaynak PAN belirteci alanı cihazda kayıtlı olan koordinatör adresi ve PAN belirteci değerine eşit değilse MLME varlığı beacon çerçevesini imha etmelidir.

Geçerli beacon çerçevesi veri yükü taşıyorsa, MLME adres alanlarının doğrulanmasından sonra, koordinatörde bekleyen veriyi çıkarmak için ilgili işlemi uygulamaya koyacaktır. (bakınız bölüm 4.5.6.3)

4.5.4.2 Beacon Olmadan Eş Zamanlama

Bütün cihazların Pasif-beacon PAN içinde ($macBeaconOrder = 15$) işletilmesi durumunda üst katmanların belirlediği zamanlarda koordinatör veri için taranmalıdır.

“MLME-POLL.request” ilkeli alındığı zaman MLME varlığı koordinatörde bekleyen veriyi çıkarmak için bölüm 4.5.6.3 de tanımlanan işlemi uygulayacaktır.

4.5.4.3 Yetim Cihaz Eş Zamanlaması

Eğer üst katmanlar veri gönderme isteğinden sonra tekrarlı olarak iletişim hatası alıyorsa, cihazın yetim olduğu sonucuna varabilirler. Cihazın koordinatöre ulaşma işlemi hata verdiği zaman tek iletişim başarısızlığı meydana gelmiştir. Örnek olarak veri gönderildikten sonra geçerli süre içinde onay çerçevesinin alınmaması gibi, bu durumda yine cihaz yetim olduğu sonucuna varabilir. Durum tespit edildikten sonra MLME varlığı ya yetim cihazların eş zamanlama işlemini ya da MAC alt katmanı PIB değerlerine varsayılan değerleri atayarak yeniden ağa başlama işlemini uygulayabilir.

Eğer üst katmanlardan tarafından yetim cihaz eş zamanlama işlemi uygulanma kararı verilmiş ise, tarama tipi parametresi “yetim tarama” ve taranacak kanalların listesi ile “MLME-SCAN.request” ilkelini yayımlanır. Bu ilkenin alınması ile MAC alt katmanı yetim taramayı başlatır.

Eğer tarama başarı ile sonuçlanmışsa, cihaz MAC PIB parametrelerini PAN bilgisini içeren koordinatörün yeniden sıralaması komutuna göre günceller. Tarama başarısızlık ile sonuçlanmışsa, üst katmanlar taramanın yeniden başlatılması veya ağa yeniden bağlanma işlemlerin hangisinin uygulanacağına karar verecektir.

4.5.5 Cihazın Ağ İçindeki İşlemleri Değerlendirme Biçimi

IEEE 802.15.4 – 2003 standardı düşük maliyetli cihazları destekler. Genellikle, cihazlar pille çalışır ve cihazlar birbirlerinden ziyade koordinatörleri ile iletişim kurar. Diğer bir deyişle, cihaz için bekleyen bir mesaj bulunduğunda koordinatör bunu kendi beacon çerçevesinde belirtir veya cihazlar kendilerini bekleyen mesaj olup olmadığına karar verebilmek için koordinatörünü veri için tararlar. Bu haberleşme şekline dolaylı iletim adı verilir.

Koordinatör dolaylı iletim isteğinin alınması ile işleme başlayacaktır. Örneğin, “MCPS-DATA.request” ilkeli veya üst katmanlardan gönderilen bir ilkel ile MAC komutunun iletilmesi. İşlemin tamamlanması ile MAC alt katmanı üst katmanlara durum değeri gönderir. Eğer istek (request) ilkeli dolaylı iletimi teşvik ediyorsa, uygun doğrulama(confirm) ilkeli uygun durum değerlerini taşımak için kullanılacaktır. Tersine, yanıt (response) ilkeli dolaylı iletimi teşvik ediyorsa, “MLME-COMM-STATUS.indication” ilkeli uygun durum

değerini taşımak için kullanılır.

Dolaylı iletimin istek formları bilgi içerir ve koordinatörlerin bu formlardan en az birini depolayabilme yeteneğine sahip olması gerekir. Bir dolaylı iletim isteği alındığında, eğer yeni iş için depolama kapasitesi yoksa, MAC alt katmanı “MLME-COMM-STATUS.indication” ilkeli içinde “işlem taşması” durumunu üst katmanlara bildirecektir.

Eğer koordinatör birden fazla işlemi depolayabilme yeteneğine sahipse, MAC alt katmanına ulaşan tüm işlemlerin aynı cihaza gönderileceğinden emin olması gerekir. Her bir işlem gönderilirken, aynı cihaz için gönderilecek başka işlem varsa, MAC alt katmanı çerçevede “bekleyen çerçeve” alt alanını 1 olarak ayarlamalıdır. Bu alıcıya ek olarak verinin beklediğini belirtir.

Koordinatör her bir işlemi *macTransactionPersistenceTime* kadar sürdürür. Eğer bu süre içinde uygun cihaz tarafından işlem çıkarılamamışsa, işlem bilgisi imha edilir ve MAC alt katmanı “MLME-COMM-STATUS.indication” ilkeli içinde “işlem sona erdi” durumunu üst katmanlara bildirilir.

Eğer koordinatör beacon çerçevesi gönderiyorsa, her bir işlemin hangi cihaza gönderileceğini listeleyecek ve beaconun bekleyen adresler alt alanı içinde adreslerin numaralarını belirtecektir. Eğer koordinatör yediden fazla işlemi depolayabilme yeteneğine sahipse, onları kendi beacon çerçevesinde belirtir, ilk gelen ilk hizmet alır prensibi ile çalışır. İşlem için GTS gerekiyorsa, PAN koordinatör beacon çerçevesi içinde bekleyen adreslerin listesine alıcıların adreslerini eklemeyecektir. Onun yerine cihazlar için işlemleri GTS’ de yer verilen kısımlarda gönderecektir.

Aktif-beacon PAN içinde, beacon alan cihaz bekleyen adresler listesinde kendi adresini görürse koordinatörden veri çıkarmak için işleme başlayacaktır. Pasif-Beacon PAN içinde, cihaz “MLME-POLL.request” ilkelinin alımı ile koordinatöründen veri çıkarmak için çalışacaktır. Koordinatörden bekleyen verinin çıkarılması işlemi bölüm 4.5.6.3 de tanımlanmıştır.

İşlem tamamlandığı zaman, onun verisi imha edilir ve veri aktarım sonucunun verisi üst katmanlara bildirilir. Eğer işlem onay gerektiriyorsa ve onay alınamamışsa, MAC alt katmanı bu durumu üst katmalara bildirir.

4.5.6 İletme, Alma ve Onaylama

Bu alt bölümde, çerçeve iletme, alma ve onaylama için temel işlemler tanımlanacaktır.

4.5.6.1 Çerçeve İletme

Her hangi bir zamanda veri veya MAC komut çerçevesi üretilebilir. MAC alt katmanı gönderilecek her çerçeve için dizi numarası alanına *macDSN* değerini kopyalar ve değerini bir arttırır. Benzer şekilde her bir beacon çerçevesi üretildiğinde *macBSN* benzer işleme tabi tutulur.

Kaynak adres alanı, eğer sunulursa, çerçeveyi gönderecek cihazın adresini içerir. Cihaz ağı bağlı olduğu zaman ve ona kısa adres tahsis edilmişse (*macShortAddress* 0xffff veya 0xffff değerine eşit değilse) , cihaz tercihen 64 bitlik genişletilmiş adresi yerine kısa adresi kullanabilir. Cihaz henüz bir ağı bağlı değilse veya *macShortAddress* değeri genel kısa adres (0xffff) değerine eşitse tüm iletişim sırasında kaynak adresi alanında 64 bitlik genişletilmiş adresini kullanmalıdır. Eğer kaynak adres alanı sunulmuyorsa, çerçeveyi oluşturanın koordinatör olduğu farz edilir ve varış adresi alanı alıcının adresini içerir.

Eğer varış ve kaynak adres bilgileri sunulursa, MAC alt katmanı varış ve kaynak PAN belirteçlerini karşılaştırır. Eğer PAN belirteçleri aynı ise ve çerçeve kontrol alanı içindeki iç-PAN alt alanı 1 ise iletilecek çerçevede kaynak PAN belirteci çıkarılır. Her iki PAN belirteçleri farklı ise ve iç-PAN alt alanı 0 ise her iki PAN belirteci gönderilecek çerçeveye eklenir.

Eğer çerçeve aktif-beacon PAN içinde gönderilecekse, iletici cihaz iletimden önce beacon çerçevesini bulmalıdır. Eğer beacon izlenmiyorsa ve böylece cihaz beaconun ne zaman görüneceğini bilmiyorsa, beaconu bulabilmek için kendi alıcısını aktif etmeli ve belli bir süre arama yapmalıdır. Eğer bu süre sonunda beacon bulunamamışsa, cihaz gönderilecek çerçevesini CSMA-CA algoritmasının slotsuz sürümü ile gönderir. Arama sonunda bir kez beacon bulunmuş veya beacon zaten izleniyorsa, çerçeve süper çerçevenin uygun kısmında iletilir. CAP içindeki iletim CSMA-CA algoritmasının slotlu sürümünün başarılı uygulamasını izler ve GTS içindeki iletim CSMA-CA algoritmasını kullanmaz.

Eğer çerçeve, pasif-beacon PAN içinde iletilecekse, çerçeve iletimi CSMA-CA algoritmasının slotsuz sürümünün başarılı uygulamasını izleyerek iletilir.

4.5.6.2 Çerçeve Alma ve Reddetme

Bütün cihazlar bekleme periyodu müddetince kendi alıcılarını aktif olup olmayacağını seçebilirler. Bu bekleme periyotları esnasında, MAC alt katmanı üst katmanlar tarafından alıcı-verici görev isteklerine hizmet etmeye devam etmelidir. Bir alıcı-verici görevi; onay alımı ile iletim isteği (eğer onay gerekli ise) veya iletim isteği gibi tanımlanabilir. Her bir alıcı-verici görevinin tamamlanmasında sonra, alıcısının aktif veya pasif olmasını *macRxOnWhenIdle* değerine 1 veya 0 olmasına bağlıdır. Eğer *macBeaconOrder* değeri 15 değerinden küçükse, *macRxOnWhenIdle* değeri sadece CAP göz önünde bulundurulacaktır.

Radyo iletişiminin yapısından dolayı, bir cihaz ve onun alıcısı alım sırasında aktif edilir ve IEEE 802.15.4 standardına uyumlu aynı kanalda çalışan diğer tüm cihazlardan gelen iletimlerin anlamını çözmeye çalışır, diğer kaynakların girişimi ile birlikte. Böylece, MAC alt katmanı sadece üst katmanların ilgilendiği çerçeveleri sunmak için gelen çerçeveleri süzmelidir.

Çerçeve süzme işlemi için ilk seviye, MAC alt katmanının FCS alanının içinde algoritmalarla göre doğru değeri içermeyen tüm çerçeveleri imha etmesidir. Süzme işleminin bir sonraki seviyesi MAC alt katmanın karışık modda işleyip işlemediğine bağlıdır. Karışık modda, MAC alt katmanı birinci seviye süzme işleminden geçen tüm çerçeveleri daha fazla süzmeden doğrudan üst katmanlara geçirir. MAC alt katmanı *macPromiscuousMode* değeri 1 ise bu modda çalışır.

Eğer MAC alt katmanı karışık modda çalışmıyorsa ise, sadece aşağıda listelenen durumlar sağlandığı zaman çerçeveleri kabul edilir:

- Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı geçersiz bir çerçeve tipi değeri içeriyorsa çerçeve imha edilir.
- Eğer çerçeve tipi bu çerçevenin beacon çerçevesi olduğunu belirtiyorsa, kaynak PAN belirteci *macPANId* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.(Eğer *macPANId* değeri 0xffff değerine eşitse bu beacon çerçevesi kaynak PAN belirtecine bakılmaksızın kabul edilir)
- Eğer çerçeve içinde varış PAN belirteci mevcutsa, bu değer *macPANId* değerine eşitse veya değeri genel PAN belirteci (0xffff) değerinde ise çerçeve kabul edilir.
- Eğer çerçeve içinde varış kısa adresi mevcutsa, bu değer *macShortAddress* veya genel kısa adres (0xffff) değerine eşitse veya çerçevede bulunan varış genişletilmiş adresi *macExtendedAddress* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.

- Eğer veri veya MAC komut çerçeveleri sadece kaynak adres alanını mevcutsa, alıcı cihaz PAN koordinatörü ve PAN belirteci *macPANId* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.

Yukarıda listelenen gereksinimlerinden biri sağlanmazsa, MAC alt katmanı gelen çerçeveyi imha edecektir. Tüm koşullar sağlandığında çerçeve geçerli kabul edilir ve işlem uygulanır. Geçerli çerçeveler için, eğer çerçeve tipi alt alanı veri veya MAC komut çerçevesi olduğunu belirtiyorsa ve onay isteği alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, MAC alt katmanı bir onay çerçevesi gönderecektir. Onay çerçevesinin iletimden önce, veri veya MAC komut çerçevesinin içerdiği dizi numarası değeri onay çerçevesinde bulunan dizi numarası alanına kopya edilir. Bu adım, işlemi yapan kaynak cihaza uygun onay çerçevesi aldığını bilmesini sağlar.

Eğer “güvenlik aktif” alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, MAC alt katmanı güvenlik ilkesi ile alınan çerçeveyi işleyecektir. Aktif veya pasif tarama müddetince sağlanan beacon çerçeveleri için, güvenlik işlemi başarısızlığa uğramışsa dahi güvenlik alanları uygun değer ile ayarlanarak PAN açıklayıcıları içine kayıt edilir.

Eğer çerçeve kontrol alanı içindeki İç-PAN alt alanı 1 olarak kurulmuş ve çerçeve hem varış hem de kaynak adres bilgilerini içeriyorsa, MAC alt katmanı varış PAN belirteci alanına benzer olan kaynak PAN belirteci alanının ihmal edildiğini varsayacaktır.

Eğer çerçeve başarı ile kabul edilmiş ise, MAC alt katmanı çerçeveyi üst katmanlara geçirir. Bu çerçeve bilgisini kapsayan “MCPS-DATA.indication” ilkelinin yayınlanması ile gerçekleştirilir.

4.5.6.3 Bekleyen Verinin Koordinatörden Çıkarılması

Aktif-Beacon PAN içinde işleyen bir cihaz, bekleyen her hangi bir çerçevenin olup olmadığını alınan beacon çerçevesinin içeriğini işleyerek karar verebilir. Eğer beacon çerçevesi içindeki adres listesi alanı cihazın adresini içeriyorsa, cihazın MLME varlığı, CAP müddetince, onay isteği alt alanı 1 olan veri isteği komutunu kendi koordinatörüne gönderecektir. MLME varlığının koordinatörüne veri isteği komutunu göndermesi için iki ayrı durum daha vardır. Birinci durum, MLME varlığı “MLME-POLL.request” ilkeli aldığı zaman. İkinci durum, cihaz bir istek komutu onayından *aResponseWaitTime* sembol sonra veri isteği komutu gönderebilir, ağa bağlanma işleminde olduğu gibi. Veri isteği komutu PAN koordinatörüne gönderilmek üzere hazırlanmamışsa varış adresi bilgisini içermelidir.

Veri isteği komutunun başarılı alımında koordinatör onay çerçevesi gönderecektir. Koordinatörün cihaza gönderilecek verinin bulunduğu kararını verebilmek için yeterli zamanı

olmasa da *macAckWaitDuration* sembol zamanı içinde onay çerçevesini yollayabilmelidir. Koordinatör onay çerçevesinin çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanını cihaz için gerçekten bekleyen çerçeve olup olmadığını gösterecek biçimde ayarlamalıdır. Eğer bu mümkün olmuyorsa, koordinatör onay çerçevesinin bekleyen çerçeve alt alanını 1 olarak kurmalıdır.

Bekleyen çerçeve alt alanı 0 olarak ayarlanmış onay çerçevesinin alımında cihaz, koordinatörde bekleyen verinin olmadığı sonucuna varır.

Bekleyen çerçeve alt alanı 1 olarak ayarlanmış onay çerçevesinin alımında cihaz, Aktif-Beacon PAN içinde çalışıyorsa kendi alıcısını *aMaxFrameResponseTime* CAP sembolleri kadar aktif yapar, Pasif-Beacon PAN içinde ise koordinatörden uygun veri çerçevesini almak için gerekli sembol süresi kadar aktif yapacaktır. İstekte bulunan cihaz için koordinatörde gerçekte bekleyen veri çerçevesi var ise, koordinatör bekleyen çerçeveyi bu bölümde anlatılan mekanizmaların birini kullanarak gönderir. Eğer istekte bulunan cihaz için gerçekte bekleyen veri çerçevesi yoksa koordinatör onay çerçevesi istemeksizin sıfır veri yükü içeren veri çerçevesini bu bölümde anlatılan mekanizmalar ile gönderecektir, bu durum cihaz için verinin bulunmadığını gösterir.

Veri isteği komutunun onaylanmasını takiben veri çerçeveleri aşağıdaki mekanizmaların biri kullanılarak iletilir:

- CSMA-CA kullanmaksızın, Eğer MAC alt katmanı veri çerçeveleri için iletimi gecikme slot sınırında *aTurnaroundTime* ile (*aTurnaroundTime* + *aUnitBackoffPeriod*) sembol süresi arasında başlarsa, mesaj, uygun IFS periyodu ve onaylama için CAP içinde yeterli zaman kalır. Eğer veri çerçevesini takiben istenen onay çerçevesi alınamamışsa bunu izleyen tüm iletimler CSMA-CA kullanılarak yapılır. *aTurnaroundTime* sabiti çizelge 3.5' te tanımlanmıştır.
- CSMA-CA kullanarak, yukarda ki koşulun aksi durumunda.

Eğer veri isteğinde bulunan cihaz koordinatörden belirlenen sembol zamanında veri çerçevesini almamış veya sıfır veri yüklü bir veri çerçevesi almış ise koordinatörde bekleyen verinin bulunmadığı sonucuna varacaktır. Eğer istekte bulunan cihaz koordinatöründen veri çerçevesi almışsa kendisi de bir onay çerçevesi gönderir ve (eğer gerekli ise) böylece alındının onaylaması yapılmış olur.

Eğer koordinatörden alınan veri çerçevesinin çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanı 1 olarak ayarlanmış ise, cihaz için hala daha koordinatörde bekleyen çerçeve mevcuttur.

Bu durumda cihaz yukarıda tanımlanan işlemleri tekrarlayarak koordinatörüne yeni bir veri isteği komutu göndererek veriyi çıkartabilir.

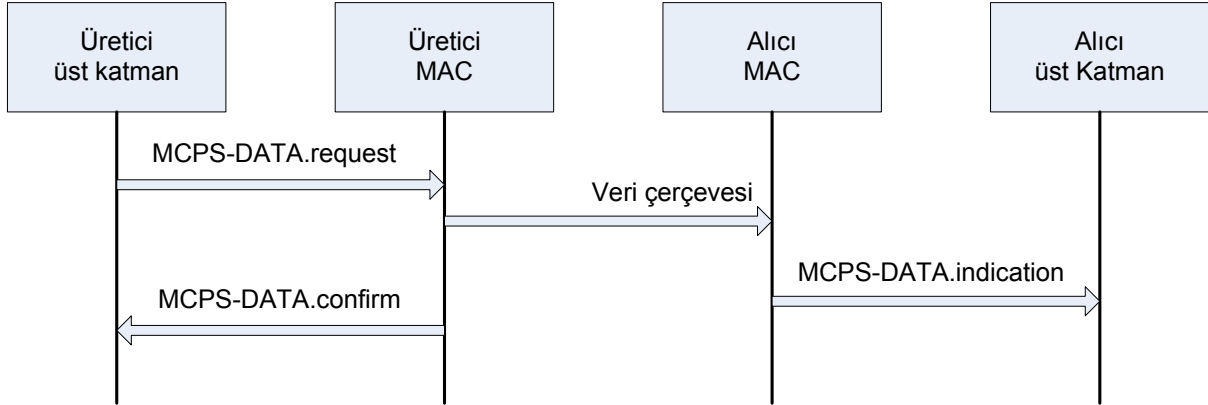
4.5.6.4 Onaylamaların Kullanılması

Veri ve MAC komut çerçeveleri onaylama isteği alt alanı çerçeve için uygun değer ayarlanarak gönderilir. Beacon ve onay çerçevelerinde onaylama isteği alt alanı daima 0 olarak ayarlanmalıdır. Benzer şekilde, genel yayınlanan çerçevelerde de onaylama isteği alt alanı 0 olmalıdır.

Onaylamama

Onaylama isteği alt alanı 0 olarak ayarlanıp iletilen bir çerçeve istenilen alıcı tarafından alınması ile onaylanmayacaktır ve çerçeveyi ileten cihaz iletimin başarı olduğunu kabul edecektir.

Şekil 4.26’da gösterilen mesaj sıralaması, tek bir mesaj çerçevesinin onaylama olmaksızın iletiminin senaryosudur. Bu durumda gönderici cihaz onaylama isteği alt alanı 0 olan veri çerçeveleri gönderir.



Şekil 4.26 Onaylama olmaksızın veri aktarımı

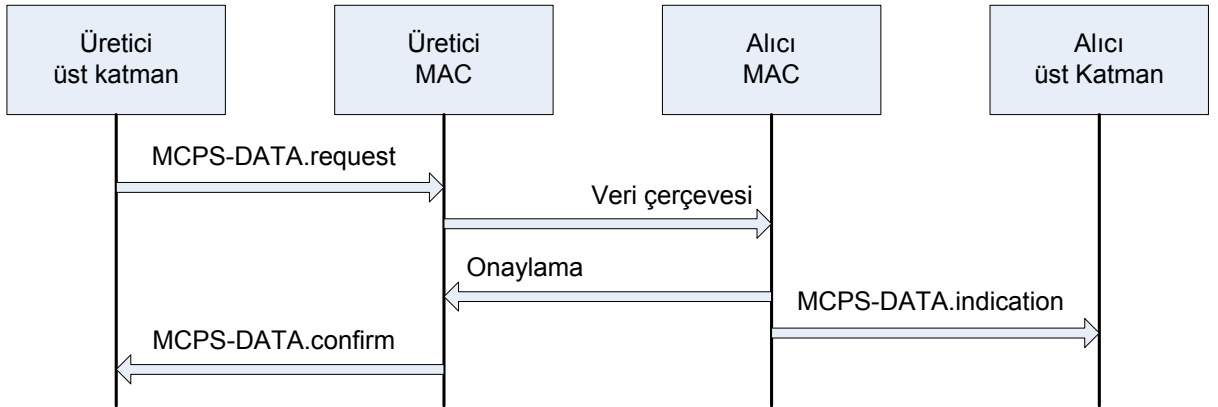
Onaylama

Onaylama isteği alt alanı 1 olarak ayarlanıp iletilen bir çerçeve istenilen alıcı tarafından alınması ile onaylanacaktır. Eğer istenilen alıcı çerçeveyi doğru şekilde almışsa, onaylanacak veri veya MAC komut çerçevesi ile aynı DSN numarasını içeren onay çerçevesini üretecek ve gönderecektir.

Pasif-Beacon PAN içinde veya CFP alanı içinde onaylama çerçeveleri iletimi MAC komut

veya veri çerçevelerinin son sembolünden alımından $aTurnaroundTime$ sembol sonra başlar. CAP alanı içinde ise onaylama çerçevelerinin iletimi gecikme slot sınırında başlar. Bu durumda, onaylama çerçevelerinin iletimi veri veya MAC komut çerçevesinin son sembolünün alımında sonra $aTurnaroundTime$ ile $(aTurnaroundTime + aUnitBackoffPeriod)$ sembol arasında bir sürede başlar. $aTurnaroundTime$ sabiti çizelge 3.5'te tanımlanmıştır.

Şekil 4.27'de gösterilen mesaj sıralaması, tek bir mesaj çerçevesinin onaylama isteği ile iletiminin senaryosudur. Bu durumda gönderici cihaz onaylama isteği alt alanı 1 olan veri çerçeveleri gönderir.



Şekil 4.27 Onaylama ile veri aktarımı

5. CC2420 – 2.4GHz IEEE 802.15.4 RF ALICI-VERİCİ

CC2420, telsiz uygulamalar için tasarlanmış düşük güçlü ve düşük voltajlı 2.4 GHz IEEE 802.15.4 uyumlu RF alıcı-verici yongasıdır. Bu yonga ile 2.4 GHz lisansız ISM bandında sağlam telsiz iletişim çözümleri düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilir.

Yonga dünya çapındaki düzenlemelere uyum sağlar: ETSI EN 300 328 ve 300 440 sınıf 2 (Avrupa), FCC CFR47 bölüm 15 (US), ARIB STD – T66 (Japonya)

CC2420 yongası, veri tamponlama, patlamalı iletimler, veri şifreleme, veri doğrulama, temiz kanal ataması, bağlantı kalite bildirimi ve paket zamanlama bilgisi gibi konularda geniş donanım desteği sunmaktadır. Donanım olarak desteklenen bu özellikler mikro denetleyici üzerindeki yükü azalttığı için düşük maliyetli mikro denetleyici ile çalışma olanağı mevcuttur.

CC2420 yongasının yapılandırma arabirimi ve iletim/alım FIFO 'larına SPI arabirimi üzerinden erişilebilir. CC2420 yongasının tipik uygulamaları bir mikro denetleyici ve çok az sayıda pasif devre elemanları ile gerçekleştirilebilir.

CC2420 yongası 0,18µm CMOS teknolojisinde Chipcon firmasının SmartRF-03 teknolojisini temel alarak üretilmiştir.

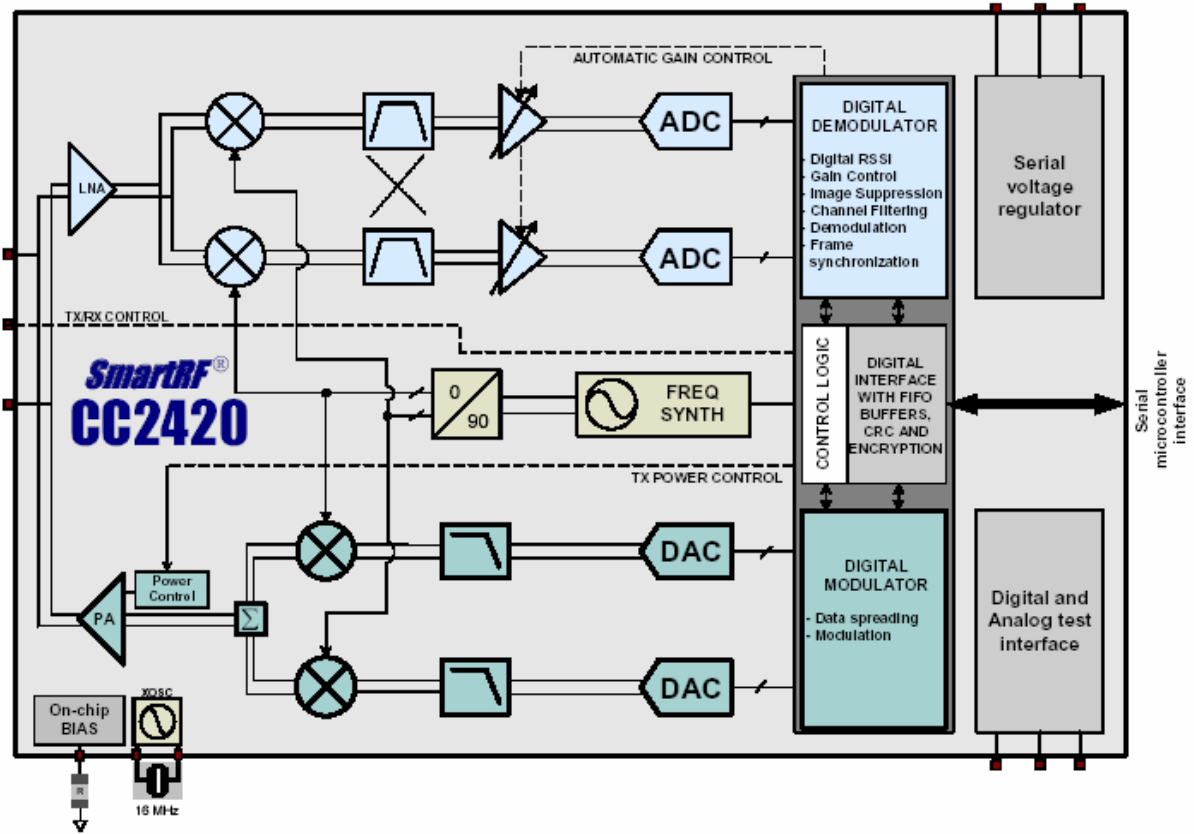
Örnek uygulama alanları,

- 2.4 GHz IEEE 802.15.4 sistemleri
- ZigBee sistemleri
- Ev / bina otomasyonu
- Endüstriyel kontrol uygulamaları
- Telsiz algılayıcı ağları
- Bilgisayar çevre birimleri
- Tüketici elektroniği

5.1 Devre Tanımı

CC2420 yongasının basitleştirilmiş blok diyagramı şekil 5.1'de gösterilmiştir.

CC2420 yongasının düşük-IF alıcısının özellikleri: alınan RF sinyali düşük gürültülü kuvvetlendirici (LNA) tarafından kuvvetlendirilir ve çeyrek evre farkı (I ve Q) 2 MHz ara frekansa (IF) çevrilir. Bu aşamadan sonra karmaşık I/Q sinyalleri filtrelenir, güçlendirilir ve sonrasında ADC tarafından sayısallaştırılır. Yongada otomatik kazanç kontrolü, son kanal filtreleme, sembol ilgileşimi ve bayt eşleme sayısal olarak uygulanır.



Şekil 5.1 CC2420 Basitleştirilmiş blok diyagram

Yongada SFD pininin yüksek olması çerçeve sınırlayıcı başlangıcının (SFD) tespit edildiğini belirtir. CC2420 yongası alınan veriyi 128 baytlık alım FIFO' su içinde depolar. Kullanıcı FIFO' yu SPI arabirimi üzerinden okuyabilir. Alınan veride CRC kontrolü donanım tarafından otomatik olarak yapılır. RSSI ve ilgileşim değeri alınan veriye yonga tarafından eklenir. Alım modunda CCA durumu CCA pini üzerinde görülebilir. Yongada, test amaçlı seri (tamponsuz) veri modları da mevcuttur.

CC2420 vericisi doğrudan yukarı-dönüşüm üzerine kurulmuştur. Gönderilecek veri 128 baytlık iletim FIFO' su içinde depolanır (alım FIFO' sundan ayrıdır). İletim sırasında başlangıç dizisi ve çerçeve sınırlayıcı başlangıcı (SFD) donanım tarafından üretilir. Veride ki her sembol (4 bit) IEEE 802.15.4 yayılma dizisi kullanılarak 32 chip'e yayılır ve çıkış, sayısal analog çeviricilere gönderilir (DAC). Çeyrek evre farkı yukarı dönüştürücü karıştırıcıları için sinyal analog alçak geçiren filtreden geçirilir. Elde edilen RF sinyali güç yükselticisine (PA) gönderilir ve güçlendirilmiş sinyal anteni besler.

Frekans sentezleyici tamamıyla yonganın üstünde, LC VCO ve 90 derece faz dallandırıcı içerir. Bu sentezleyici, alım modunda aşağı-çevrim karıştırıcıları ve iletim modunda yukarı-

çevrim karıştırıcıları için I/Q lokal osilatör (LO) sinyallerini üretir. VCO frekansı 4800MHz ile 4966MHz aralığında çalıştırılır ve frekans I/Q için iki ile bölünür.

Kristal osilatör “XOSC16_Q1” ve “XOSC16_Q2” pinlerine bağlanır ve sentezleyici için referans frekansını sağlar. Dijital kilit sinyali PLL ile elde edilir.

Dijital temel band incelenen çerçeve için adres tanıma, veri tamponlama ve MAC güvenlik desteğini içerir.

4-telli SPI seri arabirimi yapılandırma ve veri tamponlama için kullanılır.

Yonga üzerindeki voltaj düzenleyici, düzenli 1.8v besleme voltajını sağlar. Yonga üzerindeki VREG_en pini üzerinden voltaj düzenleyici etkinleştirilebilir veya kapatılabilir. Seçimli olarak düzensiz güç kaynaklarını izlemek için pil monitörü kullanılabilir. Pil monitörü SPI arabirimi üzerinden yapılandırılabilir.

5.2 4-Tel Seri Konfigürasyon ve Veri Arabirimi

CC2420 yongası SPI arabirimi sayesinde yapılandırılabilir. Bu arabirim aynı zamanda tamponlanmış veriyi okumak ve yazmak içinde kullanılır. Tüm adresler ve veri aktarımında yüksek anlamlı bit önce gönderilir. Uygulanan SPI modunda CC2420 köle cihaz, bağlı bulunduğu mikro denetleyici sahip cihaz olarak yapılandırılmalıdır.

Yonga üzerindeki dijital girişler SCLK, SI, CSn yüksek empedans girişleridir ve eğer sürülmeyecekse harici yukarı-çekme dirençleri bağlanmalıdır. CSn pini yüksek olduğu zaman SO pini yüksek empedans modundadır. Mikro denetleyici veri girişine zayıf akımları önlemek için SO pinine de harici yukarı-çekme direnci bağlanmalıdır.

5.2.1 CC2420 Yazmaç Erişimi

Yongada 33 adet 16 bitlik yapılandırma ve Durum yazmaçları, 15 adet Komut yazmacı ve ayrı FIFO' lara erişebilmek için ayrı 2 adet 8 bit FIFO yazmacı mevcuttur. Toplam 50 yazmacın her biri 6 bit adres ile adreslenmiştir. Yazmaç erişimi için; RAM/Yazmaç biti sıfır yapılmalı, okuma/yazma biti işlem için uygun değere kurulmalı ve adres baytının düşük anlamlı 6 biti işlem yapılacak yazmacın adresini içermelidir.

Her yazmaç okuma/yazma işleminde 24 bit SI hattına gönderilir. CSn pini aktarım müddetince düşük değerde olmalıdır. İşlem için önce RAM/Yazmaç biti (yazmaç erişimi için 0 yapılmalı), ardından R/W biti (okuma için 1, yazma için 0 yapılmalı) gönderilir. Bu bitleri

takiben 6 bit adres (A5:0) gönderilir. A5 biti adresin yüksek anlamlı bitidir ve önce gönderilir. Adres baytının gönderilmesinden sonra yazmacın yeni değerini içeren 16 bit (D15:0) gönderilir. Yüksek anlamlı bit önce gönderilmelidir. SI üzerindeki veri SCLK' nın pozitif kenarı ile CC2420' ye alınır. Gönderilen 16 bit veri alımı tamamlandığında, veri sözcüğü dâhili yapılandırma yazmacına yüklenir.

Yapılandırma yazmaçları mikro denetleyici tarafından aynı arabirim ile okunabilir. Yazmaç okuma işlemi için adres baytında R/W biti 1 yapılmalıdır. Yazmaç adresini takip eden 16 saykılada adreslenmiş yazmaçtan veri döner. SO pini veri çıkış pini olarak kullanılır ve mikro denetleyici tarafında giriş olarak programlanmalıdır.

Yazmaç içerikleri düşük güç modunda saklanır fakat güç kaynağı kapatıldığı zaman silinir. (örneğin VREG_EN pini ile voltaj düzenleyicinin kapatılması)

Çizelge 5.1 Adres aktarımı ve TXFIFO yazımı sırasında geri dönen durum baytı

Bit	İsim	Açıklama
7	-	Rezerve, değeri ihmal edilir.
6	XOSC16M_STABLE	16Mhz lik kristal osilatörün çalışıp çalışmadığını belirtir. 0 : 16MHz kristal osilatör çalışmıyor. 1 : 16MHz kristal osilatör çalışıyor.
5	TX_UNDERFLOW	İletim müddetinde TX FIFO ya çerçeve uzunluğundan az sayıda bayt yazılıp yazılmadığını belirtir. Oluşması durumdan SFLUSHTX komutu ile manüel olarak temizlenmelidir. 0: TX FIFO ya belirtilen sayıda bayt yazılmış 1: TX FIFO ya belirtilenden az sayıda bayt yazılmış
4	ENC_BUSY	Şifreleme modülünün meşgul olup-olmadığını belirtir. 0: şifreleme modülü meşgul değil 1: şifreleme modülü meşgul
3	TX_ACTIVE	RF iletimin aktif olup-olmadığını belirtir. 0: RF iletimi aktif değil 1: RF iletimi aktif
2	LOCK	Frekans sentezleyici PLL nin kilitli olup-olmadığını belirtir. 0: PLL kilitli değil 1: PLL kilitli
1	RSSI_VALID	RSSI değerinin geçerli olup-olmadığını belirtir. 0: RSSI değeri geçerli değil 1: RSSI değeri geçerli
0	-	Rezerve, değeri ihmal edilir.

5.2.2 Durum Baytı

Yazmaç erişimi, komutlar, RAM adresinin birinci baytı ve TXFIFO' ya veri aktarımı yapıldığı müddetçe CC2420 yongasının durum baytı SO pini üzerinden geri döner. Durum Baytı çizelge 5.1'de açıklanan 6 durum bitini içerir. Her hangi bir anda sadece durum baytını okuyabilmek amaçlı SNOP komutu gönderilebilir.

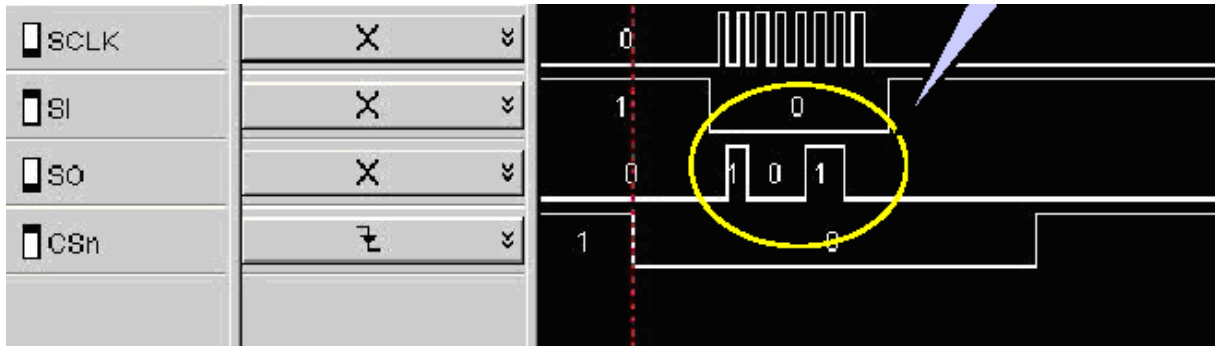
5.2.3 CC2420 Komut Yazmaçları

CC2420 komutları tek bayttır. Komut Yazmaçları adresi gönderildikten sonra gerekli işlemler başlatılır. Bu komutlar ile kristal osilatör aktifleştirme, alım moduna geçme, şifreleme modülünün başlatılması gibi işlemler gerçekleştirilir. Mevcut 15 komut çizelge 5.2'de listelenmiştir.

Kristal osilatör kapatıldığında sadece SXOSCON komutu işletilir. Gönderilen diğer komutlar ihmal edilir ve hiçbir etkisi yoktur. Diğer komutların kabul edilmesi için önce kristal osilatör aktif yapılmalı ve sabitleştirilmiş olması beklenmelidir.

Komut yazmaçlarına erişim, yazmaç yazma işlemi ile aynı yapılı fakat adres baytını takiben veri gönderilmez. İşlem RAM/Yazmaç biti 0, R/W biti 0 ve 6 adres bitinin (0x00 – 0x0E) yazılması ile gerçekleşir. Komut yazımı CSn pinin yukarı çekilmeksizin yapılan her hangi bir SPI erişimini takip edebilir. Adres baytının yazımında SCLK' nın en son düşen kenarı ile komut işletilmeye başlar.

Şekil 5.2'de SNOP komutu işletildiği zaman SPI hatlarının durumu gösterilmiştir. Komut yazmacına erişim veri içermez, CC2420 komut adresini SI hattından alınca SO hattına durum baytını gönderir.



Şekil 5.2. SNOP komutu için SPI pin durumları

Çizelge 5.2 CC2420 Komut yazmaçları

Adres	Yazmaç ismi - komut	Açıklama
0x00	SNOP	İşlemi yok (durum baytını okumak için kullanılabilir)
0x01	SXOSCON	Kristal osilataörü çalıştırır.
0x02	STXCAL	İletim için frekans sentezleyici aktif yapar ve kalibre eder.
0x03	SRXON	Alımı aktif yapar.
0x04	STXON	Kalibrasyondan sonra iletimi aktif yapar. Eğer güvenlik kullanılacaksa iletim için şifrelemeyi başlatır.
0x05	STXONCCA	Eğer CCA kanalı temiz olduğunu belirtirse, ölçümleme yapar ve ilettime başlar. Kanal temiz değilse hiçbir etkisi yoktur.
0x06	SRFOFF	RX/TX ve frekans sentezleyiciyi kapatır.
0x07	SXOSCOFF	Kristal osilatörü ve RF i kapatır.
0x08	SFLUSHRX	RXFIFO yu temizler ve de-modülatörü yeniden başlatır. Daima komutun gönderilmesinde önce RXFIFO dan bir bayt okunmalıdır.
0x09	SFLUSHTX	TXFIFO yu temizler.
0x0A	SACK	Bekleyen çerçeve alt alanını 0 yaparak onay çerçevesi yollar.
0x0B	SACKPEND	Bekleyen çerçeve alt alanını 1 yaparak onay çerçevesi yollar.
0x0C	SRXDEC	RXFIFO kod çözme ve doğrulamayı başlatır.
0x0D	STXENC	RXFIFO şifreleme ve doğrulamayı başlatır, iletim yapılmaksızın
0x0E	SAES	AES şifreleme komutu. Şifreleme modülü boş olmalı, yoksa komut ihmal edilir.

5.2.4 RAM Erişimi

Dâhili 368 baytlık RAM bölgesine SPI arabirimi üzerinden erişilebilir. Adres kısmı (2 bayt) bir kez yazılarak birden fazla sayıda bayt okunabilir veya yazılabilir. Okunan veya yazılan her yeni baytta adresler CC2420 tarafından otomatik olarak artırılır. Aynı zamanda bir bayt veri okunur veya yazılır.

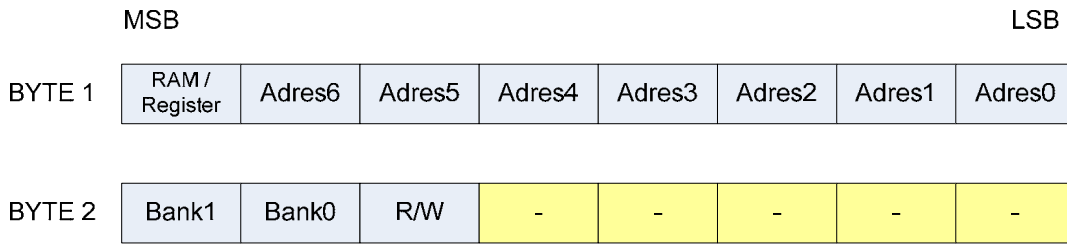
RAM erişimi sırasında kristal osilatör çalışmalıdır.

RAM/Yazmaç biti RAM erişimi için 1 yapılmalıdır. 9 bitlik RAM adresi 2 kısımdan oluşur. B1:0 (MSB) 3 hafıza bankından birini ve A6:0 (LSB) seçilen hafıza bankında adresi belirtir. CC2420 ram bölgesi 3 hafıza bankına ayrılmıştır: TXFIFO (bank0), RXFIFO (bank1) ve güvenlik bankı (bank2). FIFO bankları 128 bayt iken ve güvenlik bankı 112 bayttır.

RAM erişimi için RAM/Yazmaç bitinin ardından adres bitleri (A6:0) bitleri gönderilir. Fakat veri aktarımının başlaması için adresin 2. baytının gönderilmesi gerekir. 2. bayt B1:0 bitlerini ve R/W bitini (okuma 0, yazma 1) içerir. Kalan 5 bit önemsizdir.

RAM yazımı için, adresin 2. baytının takiben veri SI hattına gönderilir. RAM verisi eş zamanlı olarak SO pininden okunabilir, fakat kullanıcı sadece RAM yazımı ile ilgileniyorsa bu bilgiyi ihmal edebilir.

RAM okuma için, adresin ikinci baytının gönderilmesinin ardından istenilen adresteki veri doğrudan SO pininden okunabilir.



Şekil 5.3 RAM erişimi için adres baytları

5.2.5 FIFO Erişimi

RAM üzerindeki FIFO banklarına, TXFIFO ve RXFIFO yazmaçları üzerinden erişilebilir.

TXFIFO yazmacı sadece yazılabilir fakat RAM erişim metodu ile geri okuma yapılabilir. RXFIFO yazmacı okunabilir ve yazılabilir yapıdadır. RXFIFO yazmacının hata düzeltme ve güvenlik amacıyla yazılması gerekebilir. Aynı zamandan bir bayt veri okunur veya yazılabilir.

Kristal osilatör FIFO erişimi sırasında çalışmalıdır.

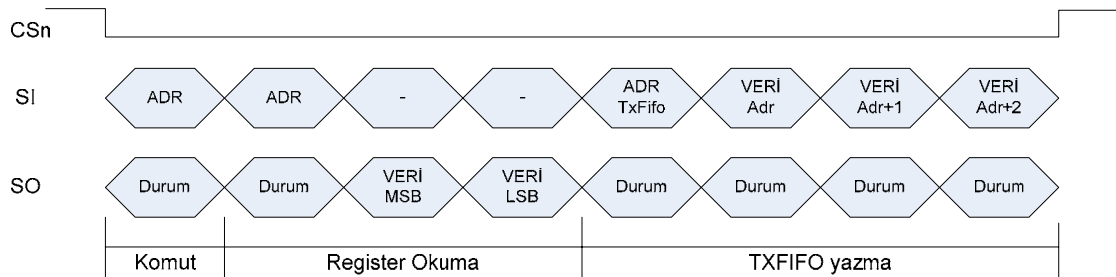
TXFIFO ya her yazılan baytta yonga durum baytını SO hattına gönderir. Durum baytı, TXFIFO yazımı sırasında hata olup-olmadığının tespiti için kullanılabilir.

RAM erişiminde olduğu gibi, çoklu FIFO erişimi de yapılabilir. İşlem bir kez başladıktan sonra FIFO erişimi sadece CSn yüksek yapılarak durdurulabilir.

FIFO ve FIFOp pinleri, alım FIFO su içindeki veriler hakkında ekstra bilgiler sağlar. Bu pinler sadece RXFIFO ile ilgilidir. TXFIFO hakkında bilgi almak için durum baytına bakmak gerekir.

5.2.6 Çoklu SPI Erişimi

Yazmaç erişimi, RAM erişimi, FIFO erişimi ve komutlar CSn yüksek yapılmaksızın biri biri ardı sıra yapılabilir. Örneğin kullanıcı aynı SPI erişiminde, bir komutun ardından bir yazmaç yazabilir ve sonrasında TXFIFO' ya 3 bayt gönderebilir. FIFO ve RAM erişimi başladıktan sonra yalnızca CSn yüksek yapılarak durdurulabilir.



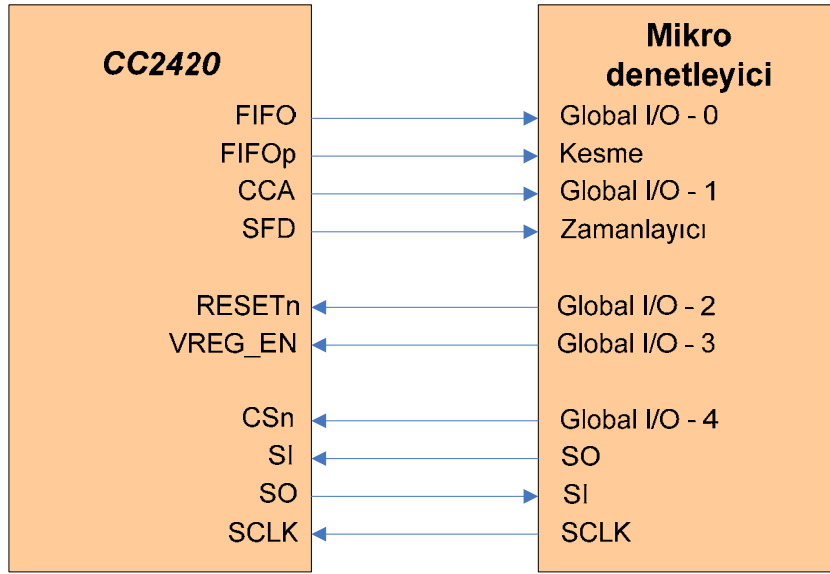
Şekil 5.4 Çoklu SPI erişimi örneği

5.3 CC2420 – Mikro Denetleyici Arabirimi

Tipik sistemlerde kullanılan mikro denetleyiciler aşağıda listelenen maddeleri sağlaması gerekir.

- SPI arabirimi üzerinden, değişik modlar için CC2420 yi programlayabilmeli, depolanmış veriyi okuyup yazabilmeli ve CC2420 durum bilgisini geri okuma yapabilmelidir.
- İletim ve alım FIFO' ları arabirimi için FIFO ve FIFOp durum pinleri bulunmalıdır.
- Temiz kanal ataması arabirimi için CCA pini bulunmalıdır.
- Paket zamanlama bilgisini elde edebilmek için SFD pini bulunmalıdır. (özellikle aktif-beacon ağlar için)

Aşağıdaki şekilde mikro denetleyici ile CC2420 arasında örnek bağlantı gösterilmiştir. Örnekte mikro denetleyicinin 4 I/O pinini SPI yapılandırılması için kullanılmıştır (SI, SO, SCLK, CSn). Uygulamanın başarısı için kullanılacak mikro denetleyicinin donanım olarak SPI modülü sunması tercih edilmelidir.



Şekil 5.5 Mikro denetleyici arabirim örneği

Mikro denetleyicinin SI, SO ve SCLK pinleri başka SPI arabirimini kullanan cihazlar ile paylaşılabilir. CC2420 de CSn aktif olmadığı sürece SO çıkışı yüksek empedans modundadır. Voltaj düzenleyici kapalı olduğu durumda akım girişlerini engellemek için CSn pinine yukarı-çekme direnci bağlanması önerilir. Dijital arabirim için pinler ve açıklamaları çizelge 5.3'te verilmiştir.

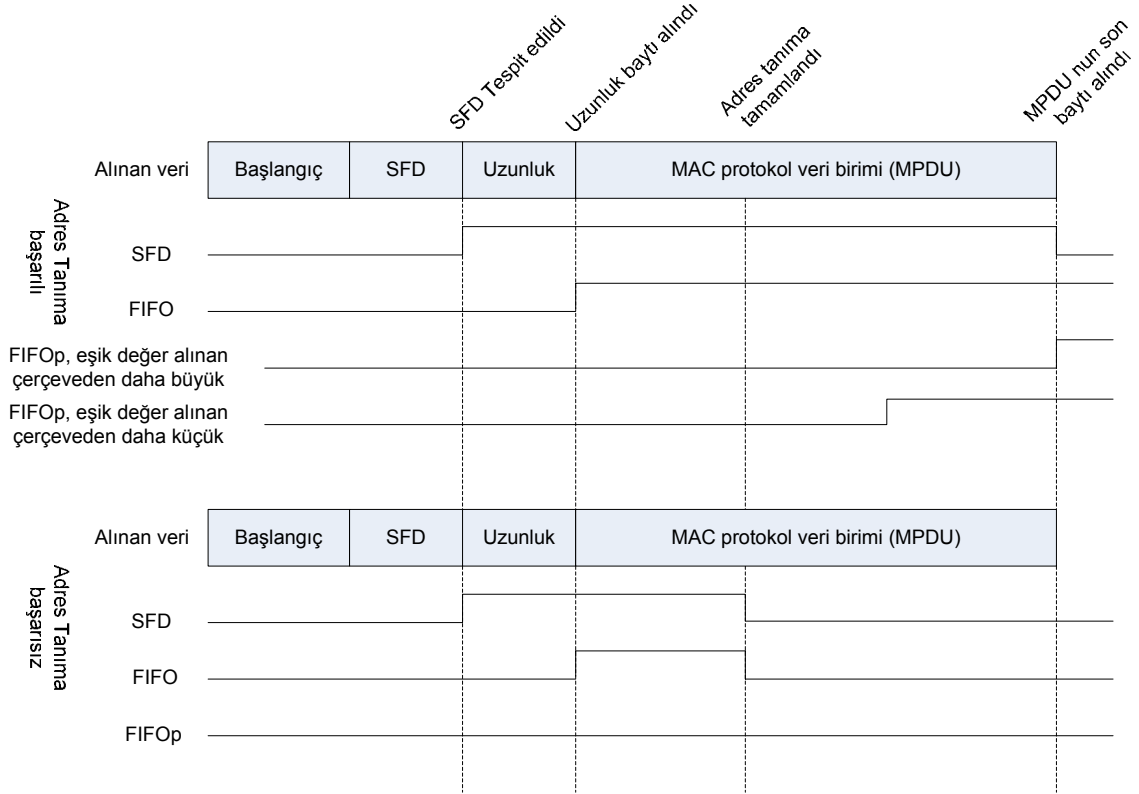
Çizelge 5.3 CC2420 sayısal arabirim

İsim	Pin no	Tipi	Açıklama
RESETn	21	Giriş	CC2420 yongasını yeniden başlatır. (aktif düşük)
SFD	27	Çıkış	Çerçeveye Sınırlayıcı Başlangıcı tespitinde kullanılır.
CCA	28	Çıkış	Temiz Kanal Atama tespitinde kullanılır.
FIFOp	29	Çıkış	RXFIFO' da çerçeveye olup-olmadığı tespitinde kullanılır.
FIFO	30	Çıkış	RXFIFO' da veri olup-olmadığı tespitinde kullanılır.
CSn	31	Giriş	SPI yonga seçimi. (aktif düşük)
SCLK	32	Giriş	SPI saat darbesi girişi. (en fazla 10MHz)
SI	33	Giriş	SPI veri girişi.
SO	34	Çıkış	SPI veri çıkışı.
VREG_EN	41	Giriş	Voltaj düzenleyiciyi çalıştırır. (aktif yüksek)

5.3.1 CC2420 Alım Modu

Alım modunda çerçeve sınırlayıcının başlangıcı (SFD) tamamıyla alındıktan sonra SFD pini yüksek konuma geçer. Eğer adres tanıma devre dışı veya başarılı ise alınan MPDU' nun son

baytına kadar SFD pini yüksek konumda kalır. MPDU' nun alımı tamamlanınca düşük konuma geri döner. Eğer alınan çerçevede adres tanıma etkin ve başarısız olursa SFD doğrudan düşük konuma geri döner. Bu durum şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Çerçeve alımı sırasında pin aktivitesi

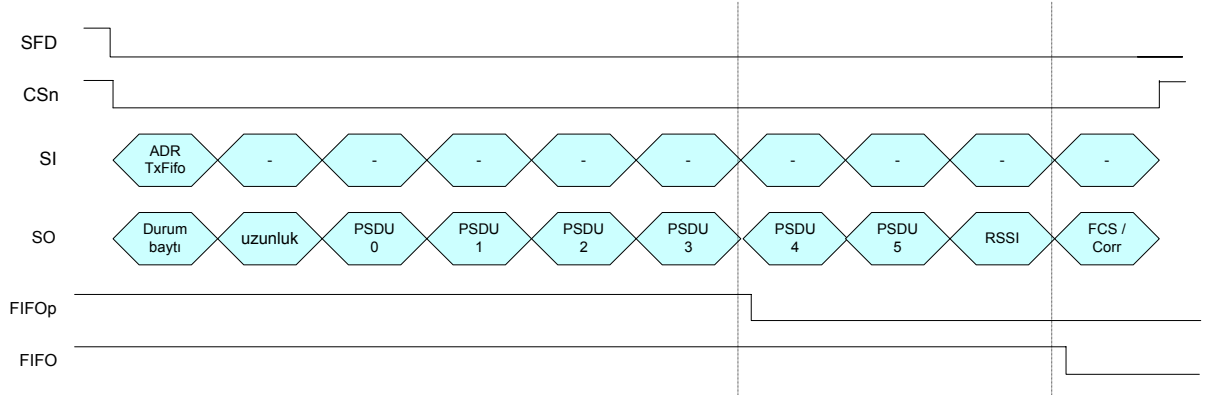
Bir veya daha fazla sayıda veri baytı RXFIFO' ya alındığında FIFO pini yüksek konuma geçer. RXFIFO' nun birinci baytında alınan çerçevenin uzunluk bilgisi tutulur. FIFO pini alınan çerçevenin uzunluk bilgisi RXFIFO' ya yazılınca yüksek konuma geçer ve RXFIFO tamamıyla okununcaya kadar durumunu korur.

FIFOp pini IOCFG0.FIFOP_THR yazmacında yazan eşik değerden fazla sayıda bayt RXFIFO' ya alındığında yüksek konuma geçer. Aynı zamanda eşik değeri aşılmassa bile yeni alınan çerçevenin son baytının alınmasıyla da FIFOp pini yüksek konuma geçer. RXFIFO' dan bir bayt okunması ile FIFOp pini eski durumuna geri döner.

Adres tanıma geçerli kılındığı zaman gelen çerçevenin adres kısmı tamamen alınmadan RXFIFO' dan veri okunmamalıdır. Eğer adres tanıma başarısız olursa CC2420 gelen çerçeveyi otomatik olarak silecektir. Bu durum FIFOp pini yardımı ile takip edilebilir. Adres

tanıma başarısız olduğu müddetçe FIFOp pini yüksek konuma geçmeyecektir.

Şekil 5.7’de RXFIFO’ dan çerçeve okunması sırasında pin etkinliği gösterilmiştir. Örnekte, çerçeve boyutu 8 bayt, IOCFG0.FIFOP_THR = 3 ve MODEMCTRL0.AUTOCRC kurulmuştur. Uzunluk 8 bayt olarak alınır, RSSI çerçeve alımı sırasında ortalama RSSI değerini içerir. FSC/corr ilgileşim değerini ve CRC kontrolü sonucunu bilgisini taşır. Son 2 bayt donanımsal hesaplanarak çerçeveye eklenir.



Şekil 5.7 RXFIFO’ nun okunması sırasında pin etkinliği

5.3.2 RXFIFO Taşması

RXFIFO’ da her hangi bir zamanda en fazla 128 bayt bulunabilir. Bu alan içinde toplam 128 bayttan küçük birden fazla sayıda çerçeve bulunabilir. FIFO kapasitesi dolduğu zaman taşma meydana gelir. Yonganın FIFO pini düşük konumda iken FIFOp pini yüksek konumda olursa mikro denetleyici FIFO taşması oluştuğunun farkına varır. FIFO taşması oluştuğunda önceden alınmış çerçeveler bu durumdan etkilenmez, var olan çerçeve normal şekilde okunabilir.

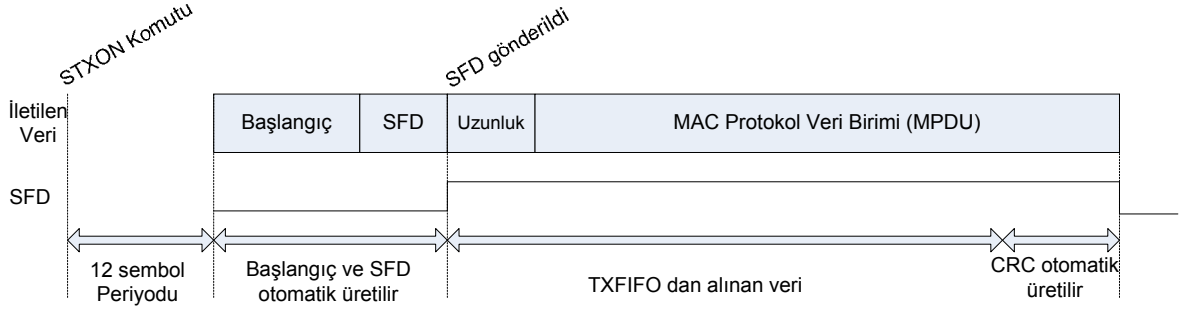
FIFO taşması meydana geldiğinde yeni çerçevelerin alınabilmesi için SFLUSHRX komutu gereklidir.

5.3.3 CC2420 İletim Modu

İletim müddetince FIFO ve FIFOp pinleri yine RXFIFO ile ilişkilidir. Yine de SFD pini veri çerçevesi iletim sırasında aktiftir, şekil 5.8’de gösterildiği gibi. SFD pini, SFD alanı tamamıyla iletilince yüksek konuma geçer ve MPDU iletimi tamamlanınca tekrar düşük konuma geri döner.

SFD pini veri çerçeveleri iletimi ve alımı sırasında benzer davranış gösterir. SFD pinin konum

değiştirmesi band genişliği sınırlaması nedeniyle 2 μ Sn kadar gecikmelidir.



Şekil 5.8 İletim sırasında pin etkinliği

5.3.4 Genel Kontrol ve Durum Pinleri

Yonga alım modunda iken, çerçeve alındığında veya RXFIFO eşiği aşıldığı zaman FIFO pini yüksek konuma geçer. Bu pin mikro denetleyicide kesme oluşturmakta kullanılabilir. Böylece veri çerçevesi alındığında mikro denetleyici uyku modundan çıkıp işlem yapmaya başlayabilir. FIFO pini ile RXFIFO içinde veri baytı olup olmadığının kararı verilebilir. SFD pini ile alınan veya gönderilen paketler hakkında zamanlama bilgisi elde edilebilir. Bu nedenle SFD pininin mikro denetleyicide zamanlama modülüne bağlanması gerekebilir.

Hata ayıklama amacıyla SFD ve CCA pinleri değişik durum sinyallerini izlemek için kullanılabilir. Sinyallerin seçimi IOCFG1 yazmacı ile yapılır.

FIFO, FIFO p, SFD ve CCA pinlerinin polaritesi tasarlanan sistem için değiştirilebilir. Bu amaç için IOCFG0 yazmacı kullanılır.

5.4 De-Modülatör, Sembol Eşleyici ve Veri Kararı

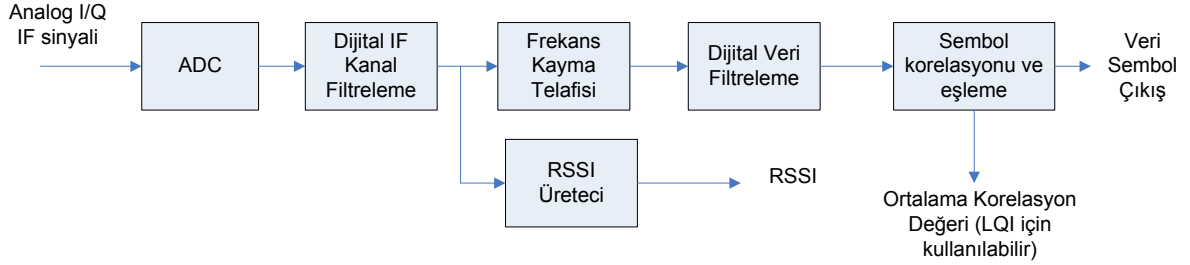
CC2420 de-modülatör için blok diyagram şekil 5.9'da gösterilmiştir. Kanal filtreleme ve frekans kayma telafisi dijital olarak uygulanır. Kanaldaki enerji seviyesi ölçümü ile RSSI değeri üretilir. Bu aşamadan sonra performans artışı sağlayabilmek için veri filtreleme uygulanır.

IEEE 802.15.4 uyumlu alıcılarda sürekli olarak çerçeve sınırlayıcı başlangıcı (SFD) taraması yapabilmek için ± 40 ppm ile frekans doğruluğu gereklidir.

SFD tespit edildiğinde veri TXFIFO' ya yazılmaya başlar ve mikro denetleyici hemen okuma işlemine başlayabilir. Çerçeve tamamıyla alınmadan okuma işlemine başlanırsa, okuma işlemi

sırasında alıcı tarafında üretilen 250kbps hızından daha yüksek hızda okuma yapılmamalıdır.

IEEE 802.15.4 çerçeve sınırlayıcı başlangıçlarını tespit edebilmek için eşik değeri MDMCTRL1.CORR_THR yazmacı ile tayin edilir. IEEE 802.15.4 uyumluluğu için yazmaç içindeki kontrol bitlerine 20 değeri atanmalıdır.



Şekil 5.9 De-modülatör basitleştirilmiş blok diyagramı

5.5 Radyo Kontrolü Durum Makinesi

CC2420 farklı çalışma durumları arasında geçiş yapabilen durum mekanizmalarına sahiptir. Bu çalışma durumlarının değişimi komutların kullanımı ile yapıldığı gibi alıcı modunda SFD tespitinin yapılması gibi içsel olaylarla da gerçekleşebilir.

Radyo kontrol durum mekanizmalarının durumları şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilde ki köşeli parantez içindeki numaralar durum numaralarını işaret eder ve yonga üzerindeki FSMSTATE durum yazmacından okunabilir. FSMSTATE durum yazmacının okunması esasen test / hata ayıklama amacı ile yapılır.

Yonga alıcı veya verici modunda kullanılmadan önce, voltaj düzenleyici ve kristal osilatör çalıştırılmalı ve kararlı olması beklenmelidir. Voltaj düzenleyicinin ve kristal osilatörün çalıştırılmasından sonra kararlı hale gelmesi için gereken zaman yonganın kullanma kılavuzunda elektriksel özellikler kısmında belirtilmiştir.

Kristal osilatör SXOSCON / SXOSCOFF komutları ile kontrol edilir. Adres aktarımı sırasında geri dönen durum baytının XOSC16M_STABLE biti osilatörün durumu hakkında bilgi verir. Durum baytı kristal osilatörün başlaması ve kararlı hale gelmesi beklenirken çekilebilir.

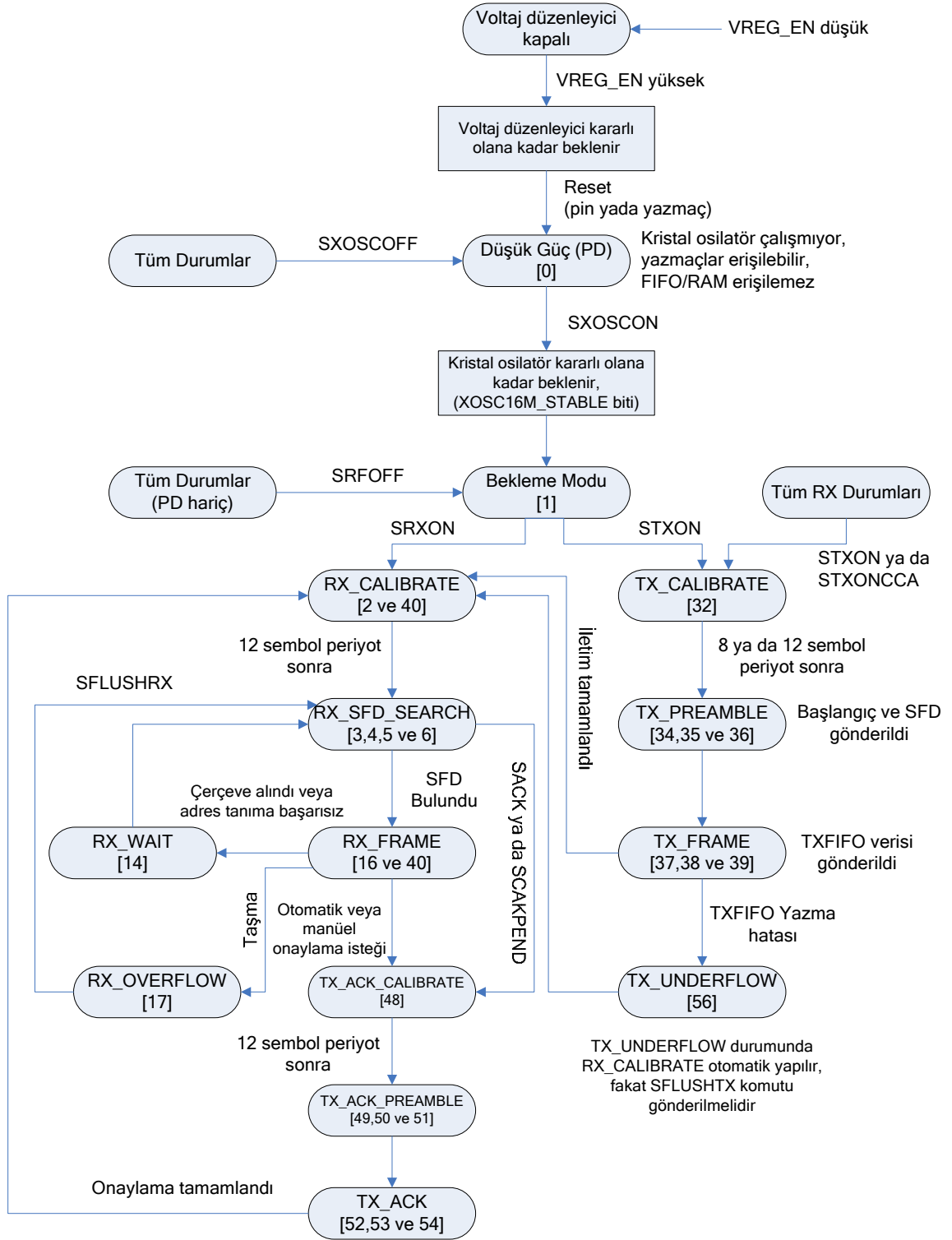
Test amacıyla, frekans sentezleyici (FS) STXCAL komutu ile manüel olarak kalibre edilebilir ve başlatılabilir (bu durum şekil 5.10'da gösterilmemiştir). Bu komut ile iletim başlatılmaz.

İletimin başlatılabilmesi için STXON veya STXONCCA komutları gereklidir.

Radyo iletişiminin durdurulması SRFOFF veya SXOSCOFF komutlarının gönderilmesi ile gerçekleştirilebilir.

Yeniden başlatılma işleminden sonra CC2420 düşük güç tüketim modunda çalışmaya başlar. Bu modda tüm yapılandırma yazmaçları yonganın doğru frekansta ve modda çalışması için programlanabilir. Programlama çok hızlı gerçekleşir ve CC2420 iletişim başlayana kadar düşük güç harcama modunda bekler.

FIFO ve RAM bölgesine erişebilmek için kristal osilatör çalışmalıdır. Yonganın bu durumuna bekleme modu denir ve yine alıcı-verici modlarına göre düşük güç tüketimi sağlanır.



Şekil 5.10 Radyo Kontrol Durumları

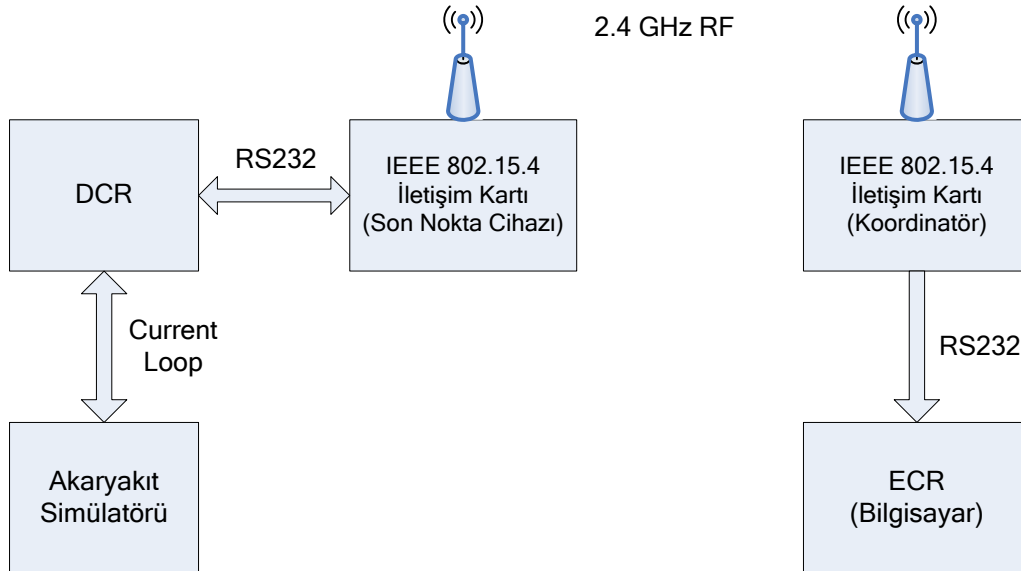
6. IEEE 802.15.4 AĞI ÜZERİNDE UZAKTAN İZLEME VE KONTROL UYGULAMASI

Bu alt bölümde IEEE 802.15.4 ağı üzerinde gerçekleştirilen uzaktan izleme ve kontrol uygulaması tanıtılacaktır. Uygulama akaryakıt istasyonlarında sıkça kullanılan otomasyon sistemlerinin telsiz uygulaması niteliğindedir.

6.1 Uygulamanın Amacı ve Temel Mimarisi

Uygulamanın amacı IEEE 802.15.4 WPAN ağının tanıtılması, standarda uyumlu cihazların işletilmesi, ağ kurulumu, ağa bağlanma ve ayrılma gibi temel ağ fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi ve normal işleme sırasında akaryakıt istasyonlarında kullanılan otomasyon sisteminde elde edilen verinin radyo frekans sinyalleri ile taşınmasıdır. Projede kullanılan akaryakıt istasyonu otomasyon sistemi DCR-ECR iletişim protokolüne uygun işletilmektedir.

Uygulamanın temel mimarisi şekil 6.1’de verilmiştir. Uygulamanın gerçekleştirilmesi için 2 adet IEEE 802.15.4 iletişim kartı hazırlanmış ve veri izleme amaçlı bilgisayar programı yazılmıştır. Elde edilen donanım ile DCR-ECR iletişim protokolüne göre oluşturulmuş verilerin IEEE 802.15.4 standardına uygun paket yapısında taşınması ve uzak noktadan alınan verilerin bilgisayar programı ile izlenebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.1 Projenin işlevsel blok diyagramı

6.2 DCR – ECR İletişim Protokolü

Standart veri bağlantısı sahip/köle ilişkisi üzerine kurulmuştur, sahip cihaz köle olarak ayarlanmış cihazları veri için tarar. Eğer sahip cihaz bir köle cihaza veri göndermek isterse, tarama yerine bir blok ile veri gönderir. Eğer köle cihaz veri göndermek isterse taramaya veri ile cevap verir. Protokolde yarı çift yönlü iletişim mevcuttur. Protokolde kodlar açık ve byte tabanlıdır. Protokolün uygulanabilmesi için DCR' ın değişken uzunluktaki mesajları desteklemesi gerekir.

6.2.1 Akım Çevrimi (CL) Arabirimi Gereksinimleri

Kablo karakteristikleri: Akım çevrimi kabloları aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır.

- Yalıtım: 500Vdc (en az)
- Çevrim uzunluğu: 400 metre (en fazla)
- Çevrim direnci: 10 ohm (en fazla)
- Giriş endüktansı: 100 μ H (her hangi bir terminalde en fazla)
- Giriş kapasitansı: 10 nF (her hangi bir terminalde en fazla)

Ayrı dolanmış çift kablo ideal kablolama çözümü iken, kontrol kabloları ile pompa/dağıtıcı güç kablolarının aynı kablo borusunda bulunması da kabul edilebilir bir performans sağlar.

Gerilim ve Akım Düzeyleri:

- Çevrim akımı 45mA +/- 5%
- Açık devre gerilimi 32Vdc +/-5%

Çevrim akımının 45mA olduğunda, çevrim alıcı vericileri arasındaki izin verilebilen azami gerilim düşümü 2 voltur. Donanım ve personel güvenlik tehlikelerini azaltabilmek için ortak modda gerilim düzeyi 50Vdc nin altında tutulmalıdır.

6.2.2 Protokolün İletişim Yapısı

DCR seri protokolü baud hızına bağlı değildir. Kabloların tipine ve mesafeye göre baud hızı 19600bps veya 9600bps olabilir. İletişim yarı-çift yönlü gerçekleşir ve veri iletimi 8 bitlik çerçeveler halinde eşlik kullanılmadan başla-dur biçiminde asenkron yapılıdır.

8 bit veri için kod açıklığı DLE karakteri (Data Link Escape) eklenmesi ile başarılıdır. Herhangi bir veri veya CRC değeri SF karakteri (Stop Flag) değerine sahip olduğu zaman

DLE eklenir. Gönderici cihaz veri alanı içinde gönderilen SF' den önce DLE gönderir. Alıcı cihaz SF aldığı zaman bir önceki karakteri bakar, eğer bir önceki karakter DLE ise alınan SF karakteri DLE karakteri üzerine yazılır. Eklenen DLE karakterleri CRC hesaplanmasına dahil edilmez.

DCR seri protokolü güvenilir veri aktarımı desteklemektedir. Hata kontrolü CRC-16 uygulanması ile yapılır. CRC hesaplanmasında CRC-16 değeri 0x0000 ile başlatılmalıdır. Gönderilen veri bloğunda CRC-16 hatası oluşmuş ise köle cihaz alınan veriyi ihmal eder ve hiçbir cevap vermez.

Her terminal karakterler arasında gecikme olmaksızın 19600 / 9600bps hızlarında iletişim yapabilme kapasitesinde olmalıdır. Sahip cihaz iletişimi kontrol eder. Köle cihaz taramaya veya alınan veriye 25mSn içinde cevap vermekle sorumludur.

6.2.3 Protokol Katmanları

Protokol 3 katmana ayrılmıştır.

Katman 1 - Elektronik düzey

Katman 2 - Hat protokol düzeyi

Katman 3 - Uygulama Düzeyi

2.katman, cihaz taramayı ve 3. katman tarafından üretilmiş çerçevelerin aktarımını ele alır. Çerçevelerin doğru gönderilmesi 2. katmanın görevidir. Veri kontrol işleminde bir hata oluşmuşsa, tekrar iletim kararı yine 2. katman tarafından verilir.

3.katman çerçeveleri DCR ile ECR arasında aktarılır.

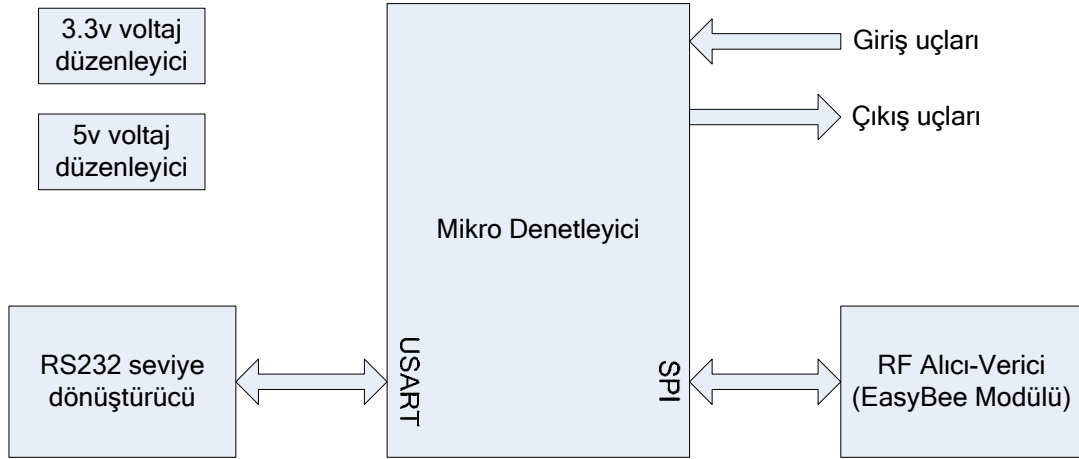
6.3 IEEE 802.15.4 İletişim Kartı Tanıtımı

Uygulamada ağın oluşturulması ve telsiz veri taşınması amacıyla 2 adet iletişim kartı tasarlanmıştır. Kartlar mikro denetleyici tabanlıdır. Kullanılan mikro denetleyici MicroChip firmasının orta düzeyli mikro denetleyici kategorisinde bulunan 16F877 yongasıdır. 16F877 yongasının birçok çevresel arabirimi donanımsal olarak sunması mikro denetleyici seçiminde etkili olmuştur. Yonganın SPI modülü üzerinden RF alıcı-verici ile ve USART modülü üzerinde diğer USART uyumlu cihazlarla iletişim kurabilir. Ayrıca yonga üzerinde 4 adet pin giriş ve 4 adet pin çıkış olarak açık bırakılmıştır. Yonganın program ve RAM belleği projede uygulanması düşünülen işlemler için yeterli düzeydedir. Fakat standardın tam kapsamıyla uygulanabilmesi için yeterli değildir. Bu amaçla kart üzerinde değişiklik yapılmadan, 16F877

yongası ile pin uyumlu yapıya sahip daha yüksek kapasite sunan yongalar kullanılabilir.

Kart üzerinde RF çerçeveleri iletimi ve alımı için CC2420 yongasını ve yonga için gerekli pasif elemanları içeren EasyBee modülü kullanılmıştır.

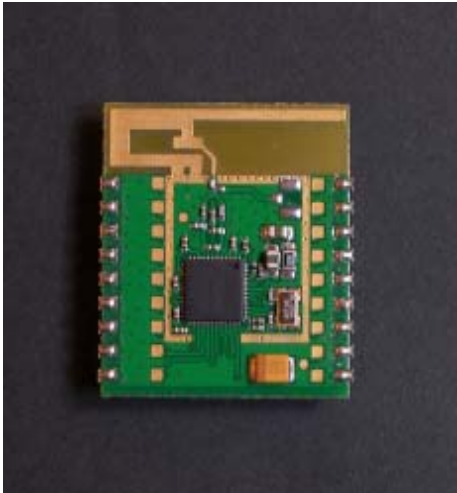
Tasarlanan kartın blok şeması şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 İletişim kartı blok diyagramı

Tasarlanan kartın devre şeması ve baskı devre çizimi eklerde verilmiştir.

6.3.1 EasyBee Modülü

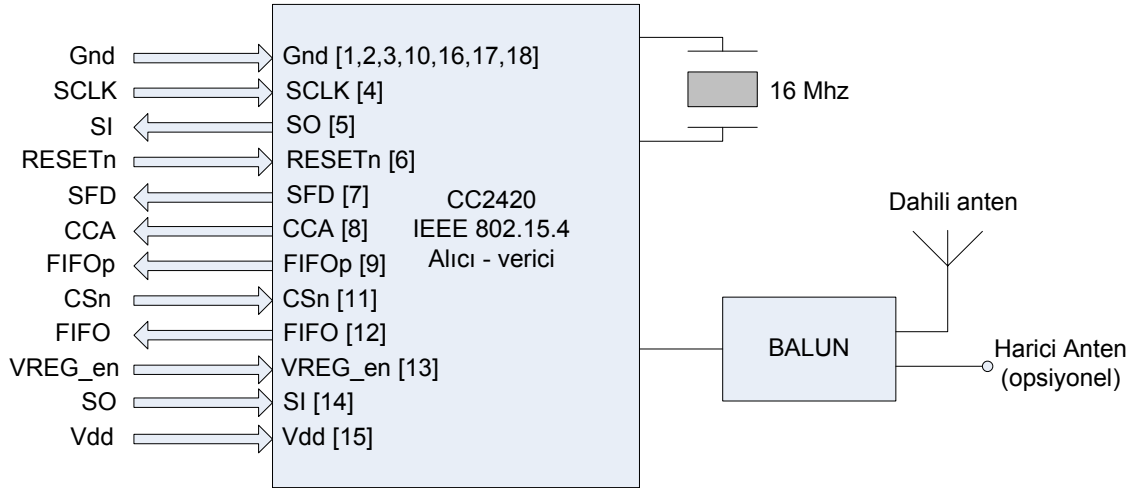


EasyBee modülü IEEE 802.15.4 uyumlu RF alıcı-vericisidir. Ürün IEEE 802.15.4 / ZigBee uygulamaları geliştirebilmek için tasarlanmıştır. Kullanıcının RF veya anten tasarlama uzmanlığına gereksinimi yoktur.

Modül Chipcon firmasının CC2420 alıcı-veri yongasını taşır ve gerekli harici devre elemanlarını bulundurmaz. Ayrıca kart üzerinde PCB anten mevcuttur. Harici anten bağlayabilmek için de modül üstünde bağlantı noktaları bırakılmıştır. Modülün ebatları 26mm x 20 mm dir.

Şekil 6.3’te gösterilen blok diyagram EasyBee modülü işlevsel olarak özetler. Devrenin tasarımı, ChipCon A.Ş. tarafından belirtilen ayırık balun ile tek sonlandırılmış referans tasarıma çok yakındır. Uygulamada kullanılan malzemeler farklılık gösterebilir.

Modül, aynı zamanda Microchip A.Ş. tarafından sağlanan PICDEM Z modülü ile benzer elektriksel özelliklere sahiptir. Aralarındaki temel fark daha küçük ebatlara sahip olmasıdır. Pin numaraları ve isimleri verilen şekilde mevcuttur. Yonga hakkında daha detaylı bilgi için önceki bölüme bakılabilir.



Şekil 6.3 EasyBee modülü işlevsel blok diyagramı

6.3.1.1 OUI numarası / MAC adresi

Tüm IEEE 802.15.4 cihazları 8 baytlık tekil MAC adresi taşımak zorundadır. Adresin ilk 3 baytı (OUI numarası) üretici firmaya yıllık ücret karşılığında IEEE tarafından verilir. Lisans alındıktan sonra geriye kalan 5 bayt tekil olmak kaydıyla özgürce tahsis edilebilir.

FlexiPanel LTD kendi alıcı-verici ürünlerinde kendi lisansı altında MAC adresi tahsis eder. Böylece ürünler için OUI numarası almak gerekmez.

FlexiPanel Ltd' nin OUI numarası: 00-15-C8 [3].

6.3.1.2 Elektromanyetik Risk

Bazen, halk sağlığı ve emniyeti meseleleri, kişisel mikrodalga aletlerin kullanımına bakılarak tartışmaya açılır. En fazla gücü 1mW olan EasyBee için böyle tartışmalar temelsizdir ve bilinen hiçbir risk yoktur. Bu tartışmalarda çıkış gücü IEEE 802.15.4 uyumlu cihazların neredeyse 1000 katına kadar çıkabilen mobil telefonları ayrı tutmak gerekir.

6.3.1.3 RF Performansının Optimize Edilmesi

EasyBee de bulunan entegral anten, bir dipol antenle karşılaştırıldığında yaklaşık verimliliği %70 olan bir çeyrek dalga F antenidir. Bu kısım iletişim ortamında ki elektromanyetik alanları üreten ve tespit eden malzeme olarak anten tasarımında hayati öneme sahiptir.

EasyBee'nin bakır alanları bu kadar sıkıştırılmış bir alanda yüksek performans sunar. Yeterli boşluk bulunabilirse ve anten olarak kullanılacak bakırlı alan modülün her iki tarafından 50mm daha uzatılabilirse, marjinal olarak daha üst performanslar elde edilebilir. PCB antenlerin sınırlı boyutları ile makulce çok yönlü anten desenleri elde edilebilir.

Modülün kutu içinde çalıştırılması anten performansını etkileyebilir. Özellikle metal kutuların kullanımından kaçınmak gerekir. Gri ve siyah plastik kutu kullanımında da dikkatli olunmalıdır. Bu kutular çoğunlukla, performansı oldukça düşüren karbon içerirler. Kutu içinde karbon varlığı test edilmek istenirse, kutu bir dakika boyunca mikrodalga fırında ısıtılmalıdır. Eğer kutu eriyorsa muhtemelen karbon içeriyordur.

Modülü konumlandırmak için özellikle yüksek yerler tavsiye edilir. Özellikle iletişim ortamında bulunan nesnelerin, kişilerin ve onların mobil telefonlarının karıştırıcı etkilerden korunabilmek için. İletişim ortamında bulunan mikro dalga fırınlar kısa periyotlar için özel olarak problemlidir. Eğer mümkünse haberleşecek tüm cihazların antenleri aynı yöne çevirmelidir ki polarizasyonları benzer olsun. Bir ağ şebekesi içinde bulunan zemin gibi yüksek derecede zayıflatma etkisi bulunan bariyerler iletişim için sorun oluşturursa, bariyerin her iki tarafında birbirine yakın yerleştirilmiş 2 adet yönlendirici ile sorun çözülebilir.

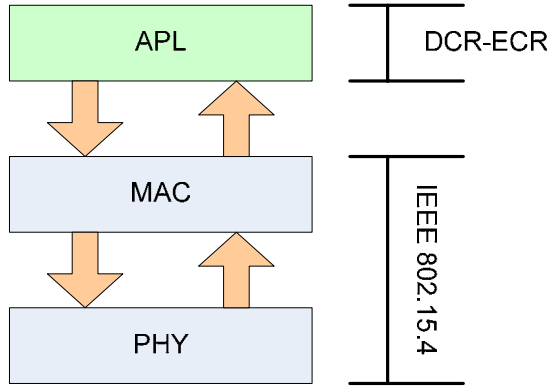
Çizelge 6.1 Tipik malzemelerin zayıflatma etkileri

Malzeme	Menzil azaltma faktörü
Betonarme engel	30
Tuğla duvar ve pencere	1.25
Ofis duvarları	2
Metal dolap	3
Bitkiler	1.25 [metrede]
Sıkı malzemelerin (mesela insanlar) karmaşık etkileri vardır. Genellikle fark edilir derecede zayıflatma, antene en yakın olduklarında görülür.	

6.4 Mikro Denetleyici Programı ve Yığın Yapısı

İletişim kartlarıyla ağ kurulması, işletilmesi ve uygulama da gerekli diğer işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için mikro denetleyicilere gömülü program yazılmıştır. Kullanılan RF yığını tamamen IEEE 802.15.4 standardına uygun hazırlanmıştır. Fakat standardın tamamını kapsayacak nitelikte olmaktan ziyade ancak belli fonksiyonları yerine getiren küçük bir parçası niteliğindedir.

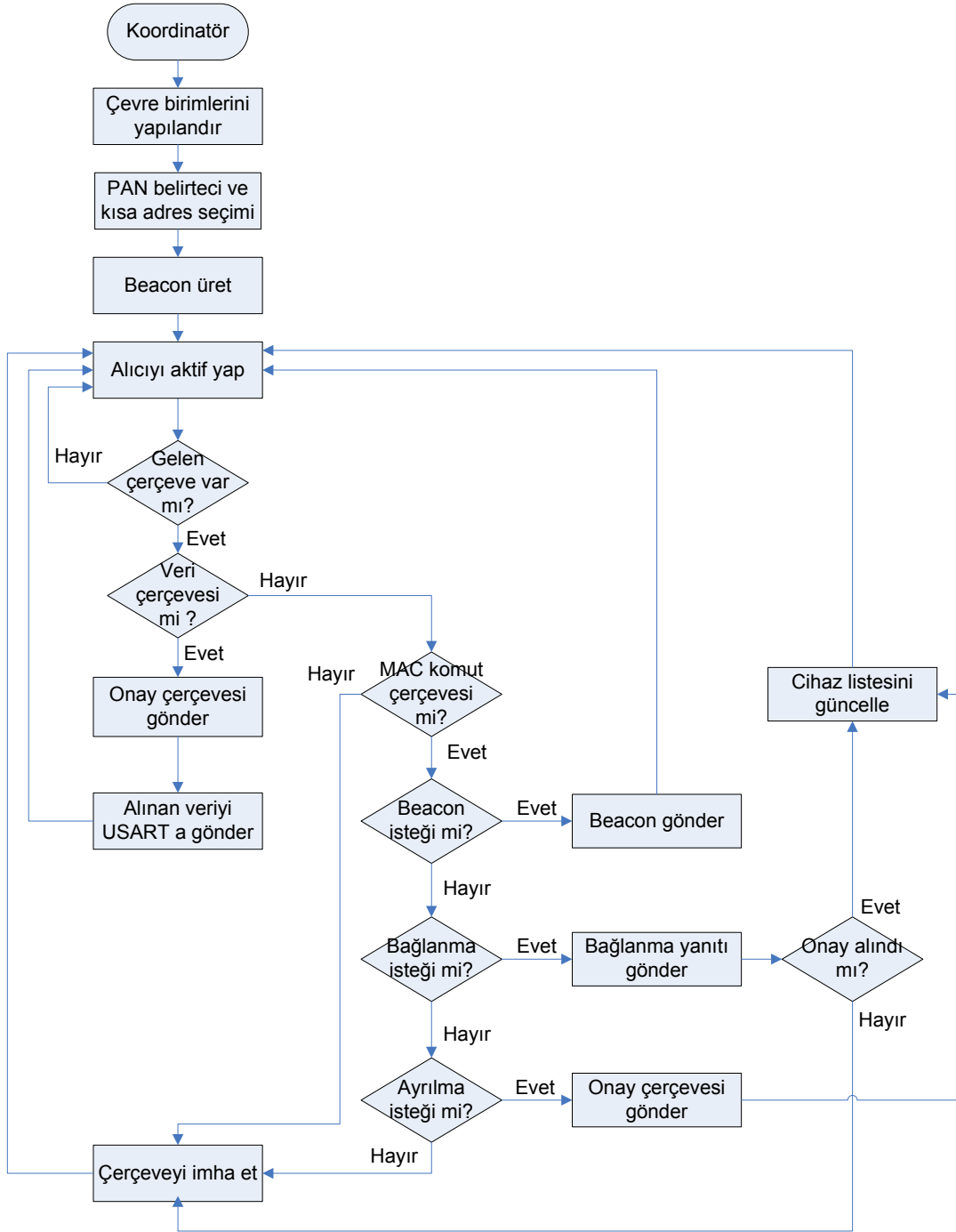
Mikro denetleyicilerde işletilen program mimarisi şekil 6.4'te gösterildiği gibi 3 katmanlı yapıdadır. PHY ve MAC katmanları IEEE 802.15.4 standardı tarafından belirlenmiş olup ağın kurulması, işletilmesi ve hava ara yüzünde aktarılan veriler ile ilgilidir. Üst katman olan uygulama katmanı ise DCR ve ECR arasındaki veri aktarım sağlar.



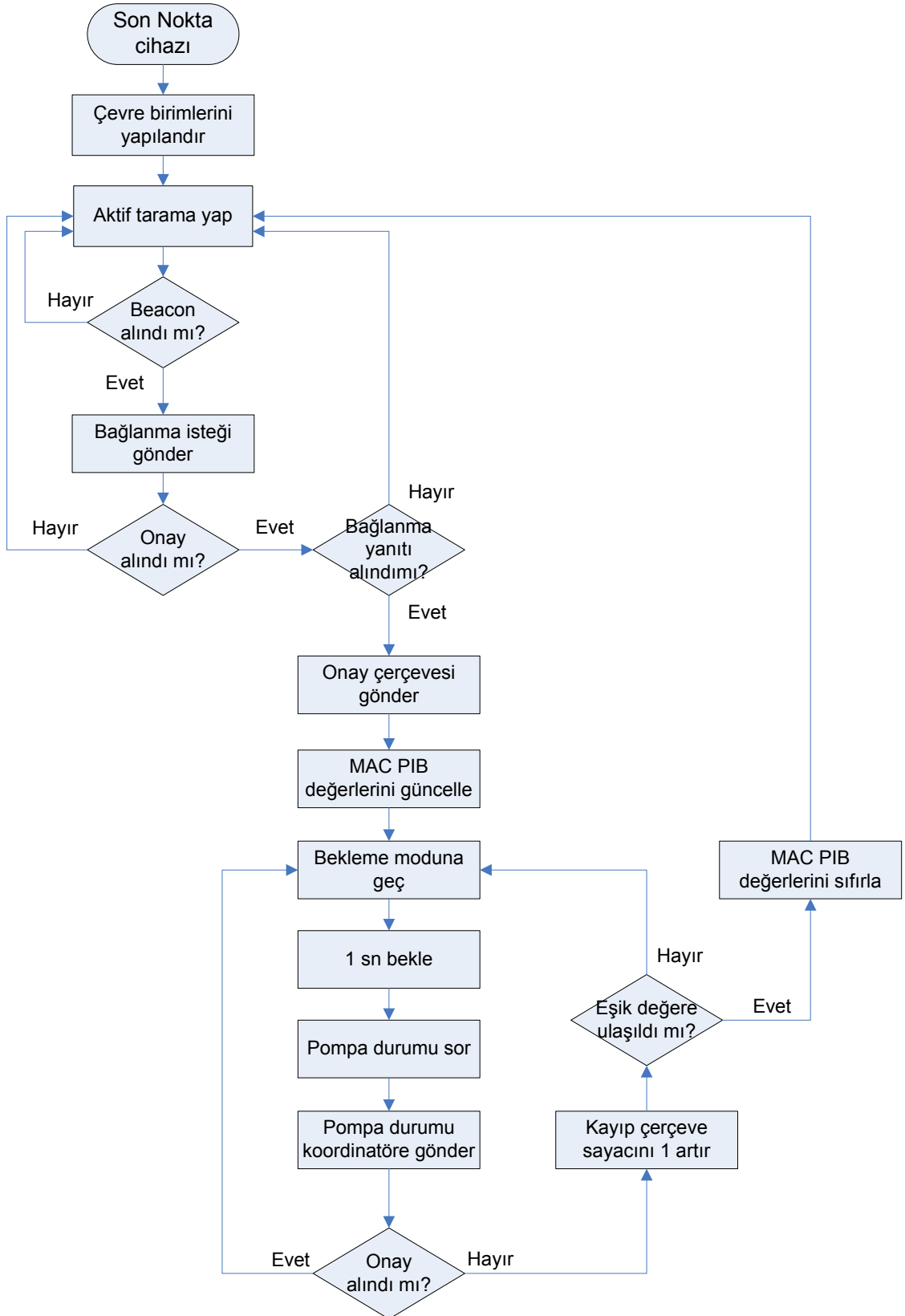
Şekil 6.4 Mikro denetleyici programı yapısı

Koordinatör ve son nokta cihazı için iki ayrı program yazılmıştır. Koordinatör cihazın uygulama katmanı bilgisayar programına veri gönderme işlemini sağlarken son nokta cihazının uygulama katmanı DCR cihazı ile veri aktarım işlemlerini gerçekleştirir. Programların uygulama katmanları farklıyken PHY ve MAC katmanları ortaktır. Bölüm 2.5 anlatılan ilkel kavramı ile oluşturulan PHY ve MAC katmanları koordinatör ve son nokta cihazlarında cihaza uygun işlem görür. Şekil 6.5'te koordinatör cihazın program akış diyagramı ve şekil 6.6'da son nokta cihazının işaret akış diyagramı verilmiştir. Cihazlar pasif-Beacon PAN içinde çalışır. Beacon çerçevesi üretimi ve iletimini sadece koordinatör yapar. PAN' da süper çerçeve yapısı kullanılmaz ($BO = 15$ ve $SO = 15$) ve beacon çerçevesi sadece ağı başlatırken ve ağı yeni cihaz bağlanacağı zaman üretilir.

Programlar Pic 16 serisi mikro denetleyicileri için C derleyicisinde yazılmış ve derlenmiştir.



Şekil 6.5 Koordinatör programının akış diyagramı



Şekil 6.6 Son nokta cihazı program akış diyagramı

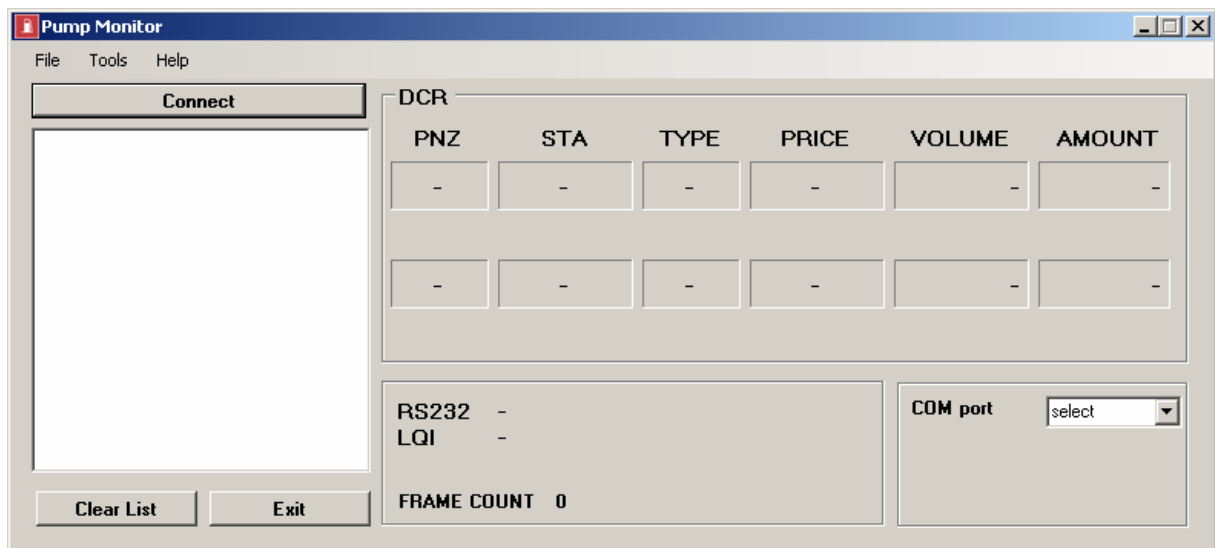
bir artırır. Sayaç değeri uygulamada belirtilen azami sayıya ulaştığında cihaz koordinatörünü kaybettiğini düşünerek veri aktarımını durdurur. Bu aşamadan sonra cihaz yeni bir ağ bağlantısı yapabilmek için tarama işlemine yeniden başlar. Uygun beacon çerçevesi yakalanana kadar tarama işlemi devam eder.

Sonuç olarak ağ kurulduktan sonra ki veri aktarım işleminde pompalara ait güncel durum bilgisi izleme amaçlı bilgisayar programından takip edilebilir.

6.6 Akaryakıt Pompa Durumu İzleme Programı

PAN içinde koordinatöre aktarılan veriler ve PAN ile ilgili olaylar izleme programında takip edilir. Programın koordinatör ile bağlantısı bilgisayarın seri iletişim noktası üzerinden sağlanır. Veriler 9600bps’ de tek dur biti ve eşlik kullanılmadan gönderilir.

Program 3 ana bölümden oluşur. Programın sol tarafındaki bölümden ağda gelişen olaylar izlenebilir. Yeni cihazın bağlanması, cihaza atanan kısa adres, cihazın PAN’ dan ayrılması gibi olaylar bu bölümde gösterilir. Sağ tarafta DCR isimli grup altında pompalardan sağlanan veriler gösterilir. Aktif akaryakıt maşa numarası (PNZ), maşanın durumu (STA), akaryakıtın tipi (TYPE), birim fiyatı (PRICE), aktarılan miktarı (VOLUME) ve ücreti (AMOUNT) pompa hakkında sağlanan verilerdir. Sağ taraftaki alt grup ise test amaçlı çeşitli bilgileri sunar. Seri iletişim noktasından alınan verinin durumu (RS232), son nokta cihazı ile kurulan bağlantının kalitesi (LQI) ve alınan çerçeve sayısı (FRAME COUNT) bu bölümden takip edilebilir.

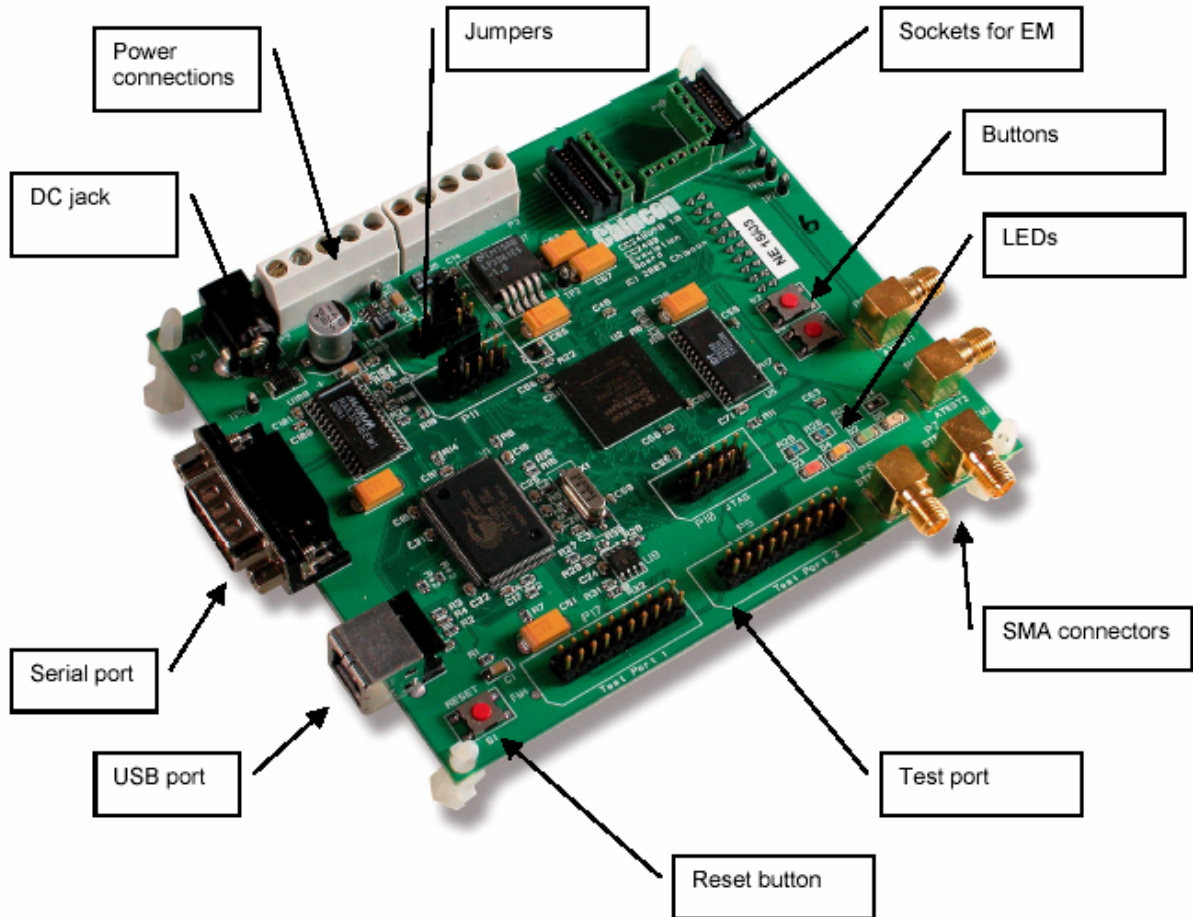


Şekil 6.8 Akaryakıt pompası izleme programı ekran görüntüsü

İzleme programı C# dilinde yazılmış ve Microsoft Visual C# 2005 Express Edition derleyiciden derlenmiştir. Programın çalışabilmesi için bilgisayarda FrameWork2.0 kurulu olmak zorundadır.

6.7 CC2420DK Geliştirme Kiti

Tezin uygulanması aşamasında Chipcon firmasının CC2420DK geliştirme kitinden yararlanılmıştır. Kit içerdiği 2 adet geliştirme bordu (CC2420EB) ve geliştirme modülü (CC2420EM) ile IEEE 802.15.4 LR-WPAN' nın çalışma mantığı etkileşimli olarak incelebilmektedir. Kit sayesinde CC2420 yongasının çeşitli çalışma durumlarında içyapısı izlenebilmekte ve hava ara yüzünde aktarılan veriler görülebilmektedir. CC2420EB geliştirme bordu yapısı şekil 6.9'da verilmiştir. Kitlerin verimli kullanılabilmesi için "SmartRF Studio" ve "IEEE 802.15.4 Packet Sniffer" programları kullanılmalıdır.



Şekil 6.9 CC2420EB geliştirme bordu

CC2420EB tasarımı Cypress USB mikro denetleyici ve Xilinx Spartan II 200E FPGA üzerine kurulmuştur. Kartın bilgisayara bağlantısı USB arabirimi ile sağlanır. Uygun yapılandırma ile kit enerjisini USB ara biriminde alabildiği gibi harici besleme girişi de kit üzerinde mevcuttur. Kitlerin USB arabirimi 500mA akım taşımayan bilgisayarlar ile çalıştırılmasında enerjisinin harici bağlanması tavsiye edilir.

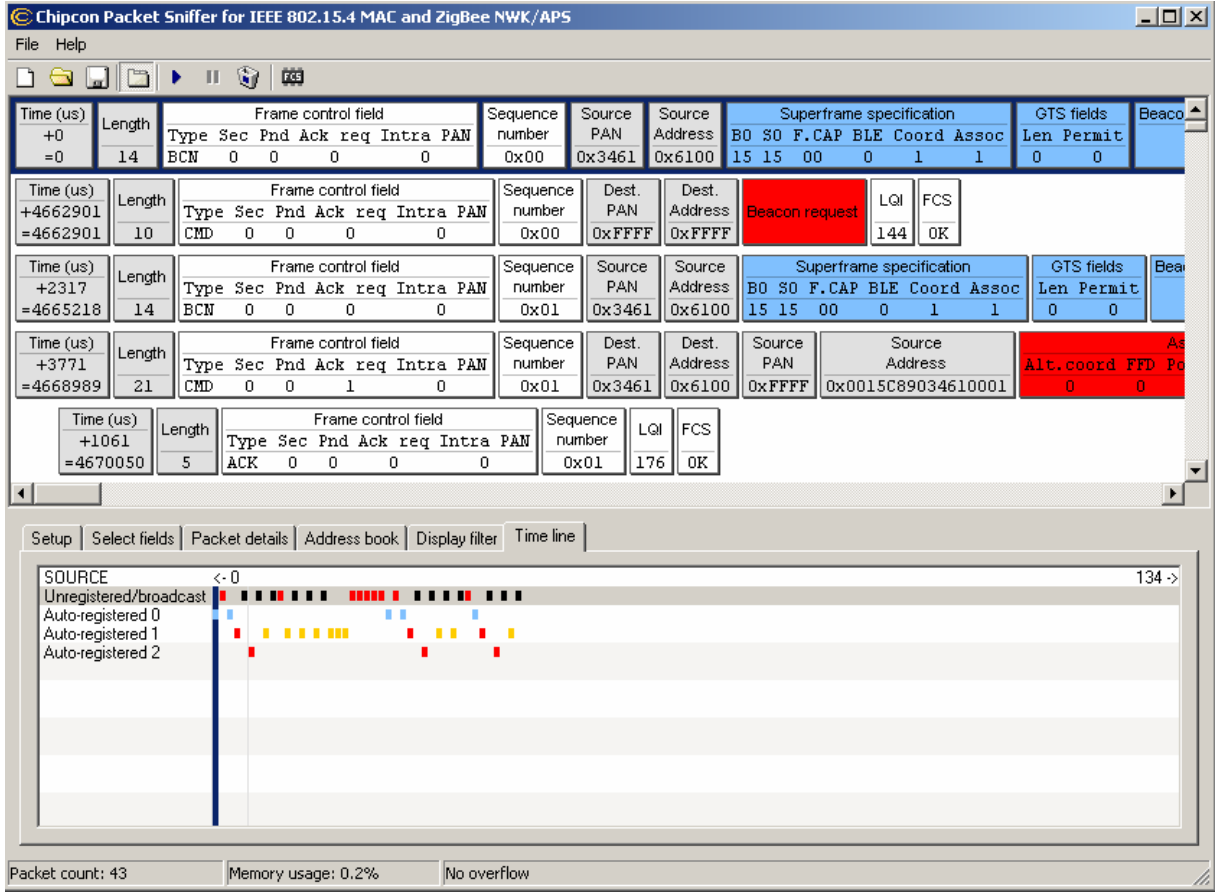
Bilgisayar bağlantısı sağlandıktan sonra CC2420EB için gerekli sürücüler yüklenir. Hem mikro denetleyici hem de FPGA RAM tabanlı cihazlar olduğundan yapılandırılması için USB bağlantısı düzgün şekilde yapılmalıdır.

Kit üzerinde ki 2 tuş ve 4 adet led kullanıcıya arabirim sunmak amacındadır. Ledler FPGA tarafından sürülürken tuşlar hem mikro denetleyiciye hem de FPGA' ya bağlıdır.

FPGA yapılandırılması SmartRF Studio programının başlatılması sırasından yüklenir. Program ile CC2420' nin yazmaçları yapılandırılabilir, FIFO' lar üzerinde işlem yapılabilir, RAM bölgesine erişilebilir ve mevcut tüm komutlar çalıştırılabilir. Ayrıca yonganın durum pinleri gerçek zamanlı olarak takip edilebilir.

Programı başlatma aşamasında yüklenecek “fpga_cc2420_uc_prototyping_1_0.bin” yapılandırılması ile CC2420EB Test Port1 üzerinden başka mikro denetleyici içeren kitlere bağlantısı sağlanabilir. Bu yapılandırma ile FPGA, CC2420'nin erişilebilen tüm dijital pinlerini Test Port1 bağlantı noktasına taşır.

Yığın yapısının geliştirilme aşamasında “IEEE 802.15.4 Packet Sniffer” programı ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Program çalıştırıldığında bağlı bulunan kit, PAN içinde dinleyici konuma geçer ve aktarılan verileri yakalayarak ekranda görülebilmesini sağlar. IEEE 802.15.4 uyumlu çerçeveleri, çerçeve yapısına uygun bölümlere ayırarak renklendirmesi sayesinde aktarılan veriler rahatlık ile izlenebilir. Yakalanan çerçeveler için zaman çizelgesi oluşturulması ağ etkinliğinin izlenmesinde programın yararlı bir özelliğidir. Programın ekran görüntüsü şekil 6.10'da verildiği gibidir.

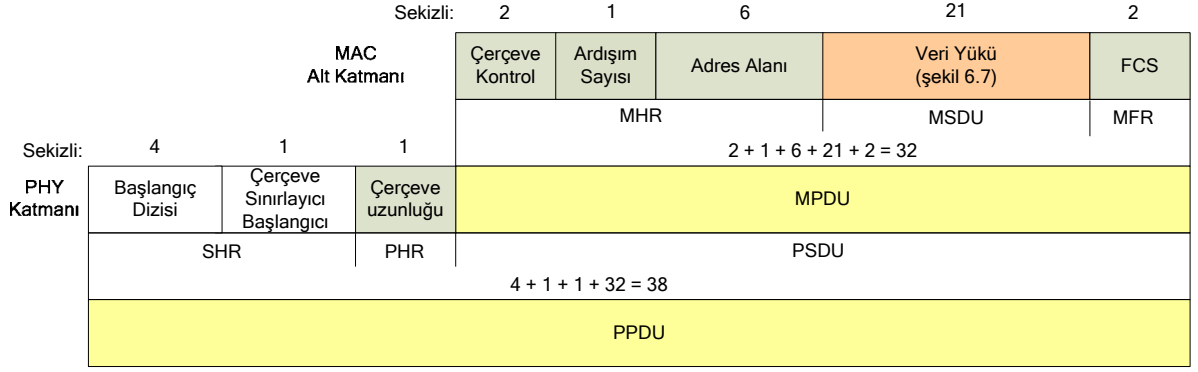


Şekil 6.10 IEEE 802.15.4 Packet Sniffer programı ekran görüntüsü

6.8 İletişim Kanalı Etkinliği

Bu alt bölümde kurulan ağın normal veri aktarımı sırasında iletişim kanalını ne oranda kullandığı ele alınacaktır.

Aynı iletişim kanalında işletilen cihazlar veri aktarımı sırasında işletildikleri iletişim kanalını meşgul ederler. Aynı iletişim kanalından veri aktarımında bulunmak isteyen diğer cihazlar iletişim kanalında yapılan güncel veri aktarımının tamamlanmasını beklemelidir. Aksi durumda iletişim kanalında istenmeyen girişimlerin oluşması kaçınılmazdır. Bu durumu engelleyebilmek için CSMA-CA algoritması kullanılır. Projede oluşturulan PAN pasif-beacon yapısında olduğu için CSMA-CA algoritmasının slotsuz sürümü işletir. Bu sürümde iletişim kanalını temiz bulan cihaz verisini iletişim kanalına gönderir. Her bir veri aktarımı sırasında iletişim kanalının ne kadar meşgul edildiğini hesaplayabilmek için veri aktarımda hava ara yüzüne ne kadar bayt gönderiliği bilinmelidir. Şekil 6.11’de pompa durum bilgisi için gönderilen veri çerçevesinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Pompa durum bilgisini taşıyan veri çerçevesi

Şekilde gösterildiği gibi pompa durum bilgisini taşıyan her veri çerçevesi 38 bayt içermektedir. 2450 Mhz IEEE 802.15.4 ağlarında veri aktarımı 250kbit/s hızında yapıldığı düşünülürse; 38·8 bit aktarımı için yaklaşık 1216 µSn gereklidir.

PAN yapılandırılmasında iletilen her çerçeve alındı onayı istediğinden onaylama süresi için geçen zamanı da cihazın iletişim kanalını işgal ettiği zamana eklemek gereklidir.

CC2420 yongası otomatik onaylama özelliğine sahiptir. Düzgün şekilde alınan veri çerçeveleri 12 sembol periyodu sonra otomatik olarak onaylanır. Sembol hızı 62.5kSembol/sn olduğuna göre onay çerçevesi iletiminden önce geçen süre 192µSn dir.

Bütün onay çerçeveleri sabit uzunluktadır ve 5 sekizli içerirler. Bu verinin aktarılabilmesi yaklaşık 160µSn zaman gerektirir.

Tüm bu veriler ışığında, onaylamalı pompa durumu iletimi için 1568µSn iletişim kanalı meşgul durumda kalacaktır. Uygulamada kullanılan akaryakıt simülatörü 2 pompa içermektedir. Buna göre toplam zaman 3136µSn dir. 1 saniye aralıklar ile veri güncellemesi yapılan sistem için iletişim kanalının kullanılma verimi,

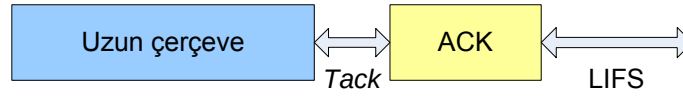
$$\eta = \frac{3136[\mu Sn]}{10^6[\mu Sn]} \cdot 100 = 0,3136 \quad (6.1)$$

Yaklaşık %0,3 olarak hesaplanır.

Koordinatör cihazın aldığı veriyi işleyebilmesi içinde belli bir miktar zamana ihtiyacı vardır. Gönderilen çerçeve 18 sekizliden büyük olduğu için uzun çerçeve olarak değerlendirilir. Bu nedenle çerçeveler arası uzun-IFS periyodu bırakmak gerekir. Uzun-IFS (LIFS) periyodu en az 40 sembol süresi kadardır ve 640µSn ye süreye karşılık gelir. IFS kavramı bölüm 4.5.1.2

de anlatılmıştır.

Onaylamalı iletim



Şekil 6.12 Pompa durum bilgisinin hava ara yüzünde iletimi

Bir sonraki veri çerçevesinin iletiminden önce gerekli IFS periyodu da aktarım için gereken zamana eklenmelidir. IFS periyoduna ilaveten alınan verinin 9600bps hızında bilgisayara aktarılmasını da geçen süreye eklersek, her saniye bilgi güncellemesi gerektiren bir izleme sistemine bağlanabilecek son nokta cihaz sayısı,

$$n = \frac{10^6}{1568 + 640 + 44791} = 21.3 \quad (6.2)$$

Yaklaşık 21 adettir. 21 noktadan veri aktarımı yapılırsa iletişim kanalının kullanılma verimi %3.3 olarak hesaplanır.

Yapılan hesaplarda son nokta cihazının DCR' dan gerekli zamanda istenilen veriyi aldığı farz edilmiştir.

6.9 Veri İletim Mesafesi

CC2420 yongasında üretilen RF sinyali güç kuvvetlendiricisinden geçirildikten sonra anteni besler. Güç kuvvetlendiricinin kazanç ayarı kullanıcı tarafından programlanabilir. RF Çıkış gücü değiştirilerek iletim sırasındaki akım tüketimi değiştirilebilir. CC2420 yongasının çıkış gücüne göre akım tüketimi çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 CC2420 yongası çıkış gücü ve akım tüketimi

Çıkış gücü [dBm]	Akım tüketimi [mA]
0	17.4
-1	16.5
-3	15.2
-5	13.9
-7	12.5
-10	11.2
-15	9.9
-25	8.5

Veri iletim mesafesi ölçümü için kurulan test düzeneğinde cihazların çıkış gücü 0 dBm olarak ayarlanmıştır. Ölçüm her iki yanda yüksek binaların ve park halinde araçların bulunduğu bir sokakta gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar altında görüş hattında yaklaşık 70m mesafeye kadar veri iletiminin yapıldığı tespit edilmiştir.

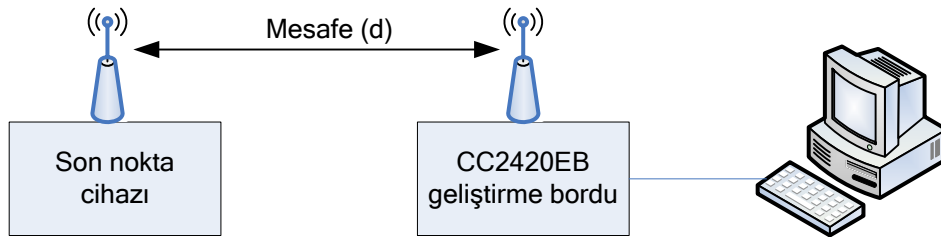
6.10 Alınan Sinyal Gücü

Hava ara yüzeyinden alınan sinyalin gücü RSSI değeri ile tanımlanır. CC2420 yongası donanımsal olarak RSSI ölçümü yapan modüle sahiptir. Ölçüm sonucu 8 bitlik RSSI.RSSI_VAL yazmacından okunabilir. Üretilen değer işaretli 2'ye tümlenmiş sayıdır. Modül yaklaşık olarak 0 ile -100dBm arasında değer üretir.

RSSI ölçümü ortalama 8 sembol periyodu ($128\mu\text{Sn}$) üzerinden yapılır. Modülün değer üretebilmesi için alıcı en azında 8 sembol periyodu kadar açık kalmalıdır. Çerçeve alımı sırasında ölçülen RSSI değeri çerçevenin FCS alanına eklenir.

IEEE uyumlu alıcıların en azında -85dBm duyarlılığına sahip olması gerekir. (bakınız bölüm 3.5.3.3). CC2420 yongası tipik olarak -94dBm duyarlılığı sağlar.

Değişik mesafelerden alınan sinyal gücünü ölçebilmek için şekil 6.13'te görülen test düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 6.13 RSSI ölçümü test düzeneği

Kurulan test düzeneğinde, son nokta cihazından gönderilen çerçevelere ait RSSI ölçümleri “IEEE 802.15.4 Packet Sniffer” programı ile izlenmiştir. Ölçüm değerleri çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Farklı durumlarda ölçülen RSSI değerleri

Mesafe (d)	RSSI [dBm]
0.1 m	-23
1 m	-45
3m arada 1 duvar	-62
5m arada 2 duvar	-85

Yapılan testlerde geçerli veri çerçevesi alımında en düşük -93dBm değeri ölçülebilmektedir.

RSSI yazmacındaki değer ile RF pini üzerindeki gücü aşağıdaki eşitlik ile hesaplayabiliriz,

$$P = \text{RSSI_VAL} + \text{RSSI_OFFSET [dBm]} \quad (6.3)$$

RSSI_OFFSET değeri sistem geliştirilirken deneysel olarak bulunur ve yaklaşık değeri -45 dBm dir. Bu değer üretilen 0 ile -100 dBm aralığında son derece lineer karakteristik taşır.

Ölçülen RSSI değerinin bağlantısının kalitesi olarak düşünmek hatalıdır. İletişim kanalında bulunan gürültü sinyalleri RSSI değerini yükseltir. Normal uygulamada bağlantı kalitesi ölçülen değerden daha düşük değerlerde olabilir.

RSSI değerinden CCA uygulaması içinde faydalanılır. İletişim kartların yapılandırılmasında IEEE 802.15.4 standardının CCA için tanımladığı 3.mod uygulanmıştır. Bu modda geçerli IEEE 802.15.4 çerçevesi alınmadığında ve kanalda bulunan enerji belli bir eşik değerinin altında olduğunda kanal temiz olarak kabul edilir.

Uygulamada kullanılan eşik değeri CCA_THR ve CCA_HYST yazmaçlarına yazılan değerlerin farkı ile belirlenir. Bu yazmaçların varsayılan değerleri; CCA_THR = -77dBm ve CCA_HYST = 2dBm' dir.

$$\text{RSSI} < \text{CCA_THR} - \text{CCA_HYST} \rightarrow \text{RSSI} < -75\text{dBm} \quad (6.4)$$

Bu bilgilere göre kanalın temiz olarak değerlendirilebilmesi için geçerli bir IEEE 802.15.4 paketi alınmamalı ve RSSI değeri -75 dBm değerinden daha küçük olmalıdır. Geçerli bir paket alınırken veya RSSI değeri CCA_THR değerine eşit veya büyük olduğunda ise iletişim kanalı meşgul olarak değerlendirilir.

Test ortamında iletişim kanalı kullanılmıyorken RSSI değeri -99dBm olarak ölçülmüştür. Ortamda bulunan mobil telefonların ölçülen RSSI değerini etkilemezken, aktif Bluetooth cihazlarının değeri yükselttiği gözlemlenmiştir.

7. SONUÇ

Projede IEEE 802.15.4 LR-WPAN ağı kurulmuş ve özgün bir uygulama alanı olarak akaryakıt istasyonlarında kullanılan otomasyon sistemi belirlenmiştir. Akaryakıt istasyonu otomasyon sisteminde kullanılan veri aktarım kablolarının yerine RF sinyallerinin kullanılması düşünülmüş ve bu amaç için IEEE 802.15.4 uyumlu iletişim kartları tasarlanmıştır. Hazırlanan iletişim kartları ile akaryakıt pompası durum bilgisinin uzak noktadan izlenmesi ve kontrolü sağlanmıştır.

Hazırlanan iletişim kartları ile yapılan ölçümler neticesinde 70m mesafeye kadar başarılı veri aktarımının gerçekleştiği görülmüştür. Elde edilen netice hedeflenen uygulamaya alanı için yeterli düzeyde olduğu kabul edilebilir. Uygulama alanında 70 metreden daha uzak noktalardan veri aktarımı gerekli ise veya bazı özel koşullar altında veri iletim mesafesinin kısılması söz konusu ise uygulama alanı içinde uygun noktalara yerleştirilecek yönlendirici cihazlar ile bu sorunlar giderilebilir.

Mevcut veri aktarım mesafesinde veya değişik sebeple veri aktarım mesafesinin arttırılması sonucunda birden çok PAN ağı aynı POS içinde çalışması gerekebilir. Ağ kurulumu esnasında koordinatör cihazın tekil PAN belirteci seçmesi ve ağdaki tüm cihazların CSMA-CA algoritmasını işletmesi nedeniyle farklı PAN' lara bağlı cihazların aynı POS içinde sorunsuz veri aktarımında bulunabileceği öngörülmektedir. Tasarlanan senaryoda ortaya çıkan bir diğer sorun ise, son nokta cihazlarının kendi POS' u içinde hangi koordinatörü seçeceğidir. Uygun koordinatör seçimi standardın kapsamı dışında kalır. Uygulama aşamasında da bu amaç için herhangi bir algoritma kodlanmamıştır. Bu sorunun aşılabilmesi için cihazların 64 bitlik adreslerinden yararlanılarak algoritma geliştirilebilir veya koordinatörün beacon çerçevesi içine uygulamaya özel bilgiler eklenebilir.

Kurulan sistemde göz önünde bulundurulması gereken diğer sorunda veri aktarımı kesintiye uğramış son nokta cihazlarının koordinatör tarafından tespit edilmesidir. Uygulamada koordinatör işlevini yerine getirmezse bu durum son nokta cihazları tarafında algılanamamakta ve son nokta cihazı veri aktarımını durdurarak yeni ağ bağlantısı için tarama işlevini başlatabilmektedir. Fakat herhangi bir son nokta cihazının ağ bağlantısı kesilirse koordinatör bu durumu tespit edememektedir. Uygulama tüm son nokta cihazlarının her saniye veri güncellenmesi üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımdan yararlanılarak veya belli zamanlarda koordinatör kendi ağına bağlı cihazları sorgulayarak eksik cihazlar tespit edilebilir.

IEEE 802.15.4 standardının 2.4GHz PHY katmanı 16 fiziksel kanalı tanımlar. Koordinatör cihazında yürütülen yığın yapısı tanımlı 16 kanal üzerinde enerji ölçümü yaparak iletişime uygun kanalı seçebilecek kapasitedir. Diğer cihazlarda iletişim yapılan kanalı tespit edebilir. Tanımlı tüm kanalların iletişime izin vermeyecek düzeyde enerji içermeleri uygulamanın ötesinde bir problemdir.

Uygulama aşamasında hazır yığın yapıları kullanılmamış, yığın yapısı projenin hedefleri kapsamında yeniden kodlanmıştır. Yığın yapısını yeniden kodlamanın bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Önceki paragraflarda yığın yapısını yeterli ve yetersiz olduğu noktalar tespit edilmiş ve öngörülen sorunlar için çözümü önerileri sunulmuştur. Bunlara ilaveten, ağ içindeki iletişimin her aşamasında kaynak kodlara müdahale edebilmek ve daha düşük bellek gereksinimi avantaj olarak sayılabilir. Diğer yandan yığın yapısı kodlanırken harcanan zaman ve standardın tamamen uygulanamamış olması dezavantajlardır.

Kullanılacak yığın yapısının hazır olduğunu düşünürsek; kurulmak istenen telsiz iletişim sistemi basitçe ve hızlı bir şekilde oluşturulabilir. Belki de bu yüksek lisans tezinin en önemli sonucu IEEE 802.15.4 standardının gömülü cihazlar ile gerçekleştirilen telsiz uygulamalarına son derece uygun olmasıdır.

KAYNAKLAR

Chipcon AS., (2003), SmartRF CC2420DK Development Kit User Manual, rev 1.0

Chipcon AS., (2005), SmartRF CC2420 - 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver datasheet, rev1.3

FlexiPanel Ltd., (2005), EasyBee DS480-7, 2.4GHz ZigBee ready IEEE 802.15.4 RF transceiver User Manual

IEEE, (2003), IEEE std. 802.15.4 - 2003: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)

Microchip Technology Inc., (1997), PICmicro™ Mid-Range MCU Family Reference Manual

Orhon, M.Y., (2005), DCR to ECR Communication Protocol, rev 1.04a, Teosis A.S.

Tunheim, S.A., (2005), Implementing an IEEE 802.15.4 and ZigBee Compliant RF Solution, Chipcon AS, Norway

INTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/>

[2] http://www.chipcon.com/index.cfm?kat_id=2&subkat_id=12&dok_id=115

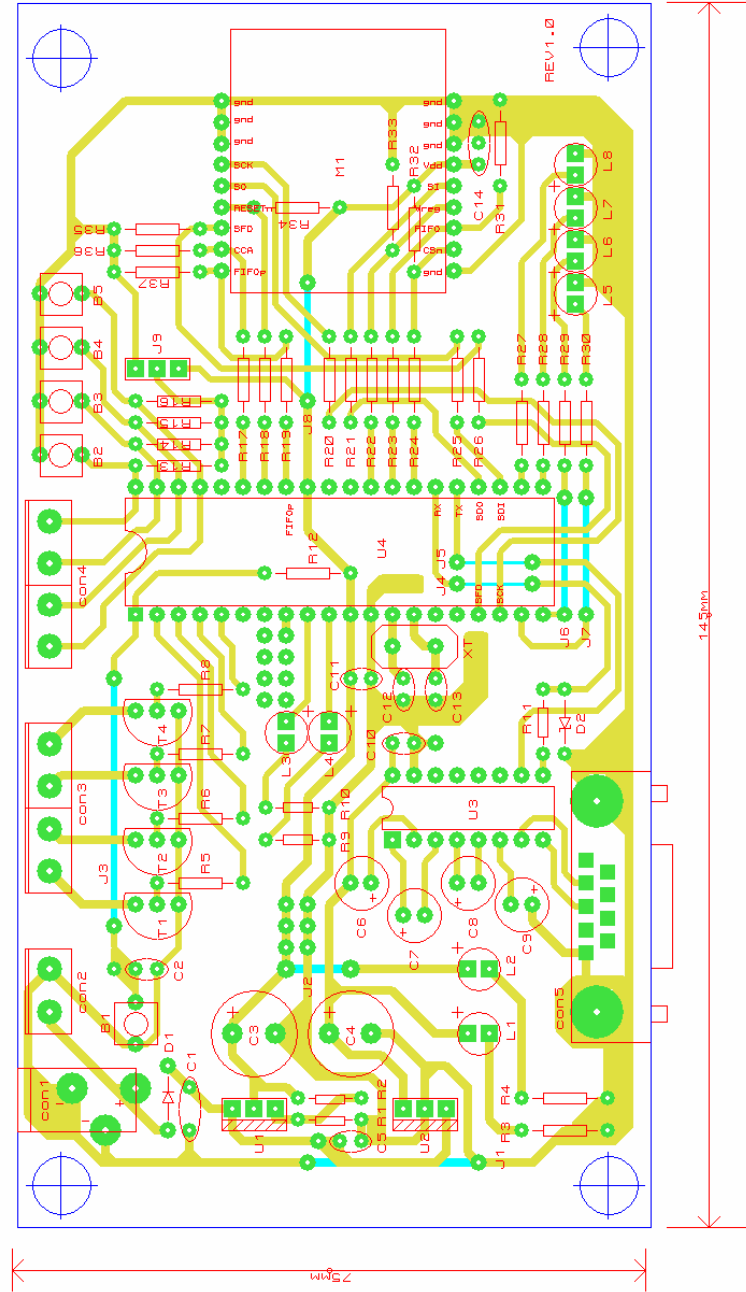
[3] <http://www.flexipanel.com/WirelessProducts.htm>

[4] http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021925&part=DM163027-2

[5] http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=74&mid=10&lang=en&defID=1

EKLER

Ek 1 İletişim kartı baskı devre çizimi

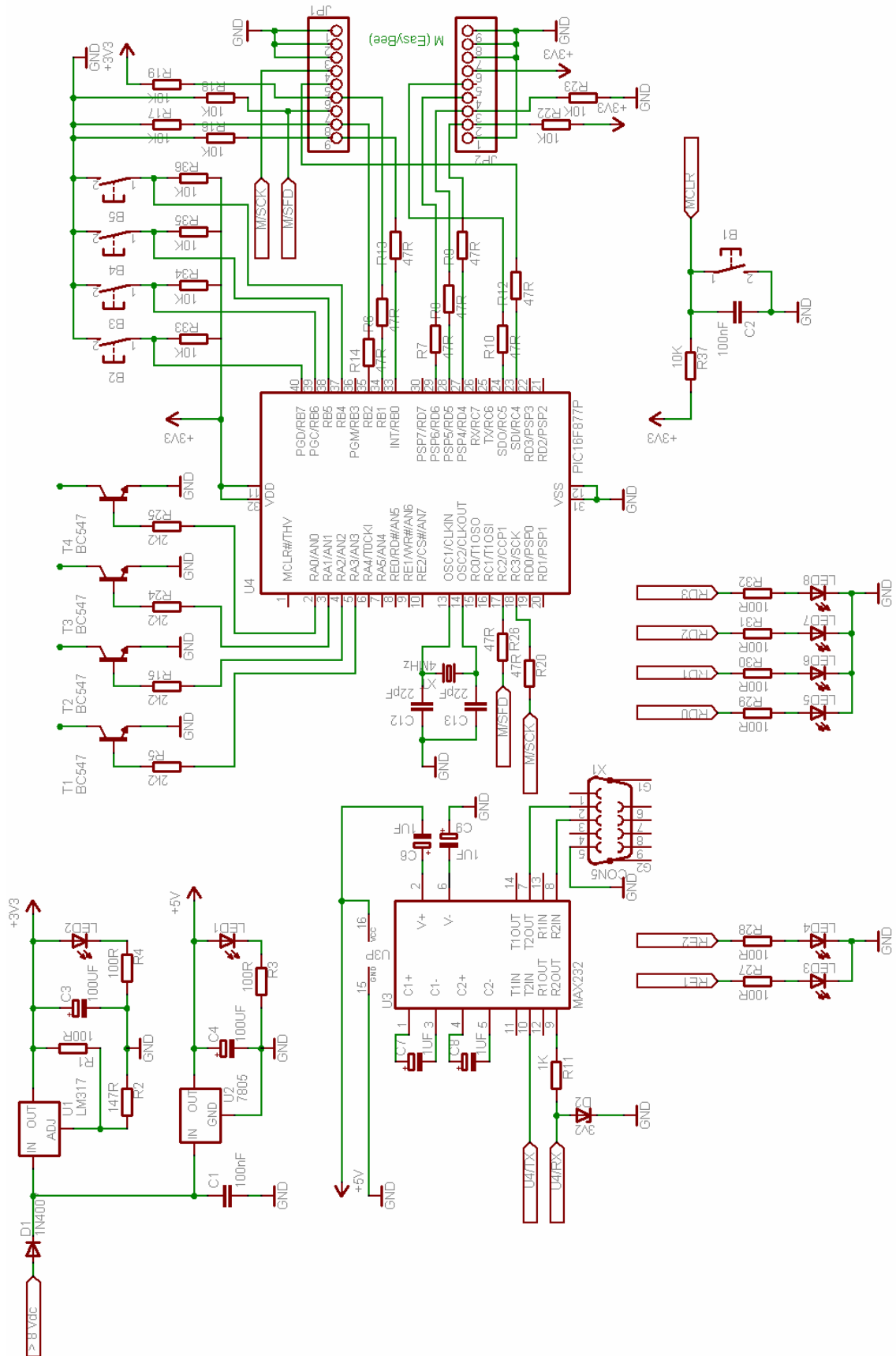


IEEE 802.15.4 - İLETİŞİM KARTI

CİZEN SONMEZ İSAK REV 1.0

TARİH 1/05/2006

Ek 2 İletişim kartı şematik devre çizimi



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.03.1981	
Doğum yeri	Trabzon	
Lise	1995-1998	Trabzon Affan Kitapçıoğlu Lisesi
Lisans	1998-2002	İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü