KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR · BÖLÜM 4

Fiziksel Katman

Bit dizilerinin kablosuz kanala en uygun işaretlere dönüştürülmesi: iletişim teknolojileri, kanal kodlama, modülasyon, kanal etkileri ve IEEE 802.15.4 standardı.

Kaynak

Akyildiz & Vuran, *Wireless Sensor Networks*, Wiley, 2010 — Bölüm 4

Kapsam

Bölüm 4.1 – 4.6 · 9 şekil · 1 tablo



YOL HARİTASI

Bölümün yapısı

4.1 Fiziksel Katman Teknolojileri — RF · optik · akustik · manyetik indüksiyon

4.2 RF Kablosuz İletişime Genel Bakış — verici – kanal – alıcı blok zinciri

4.3 Kanal Kodlama — blok kodlar · birleşik kaynak–kanal kodlama

4.4 Modülasyon — ASK/FSK/PSK · O-QPSK · ikili ve M'li şemalar

4.5 Kablosuz Kanal Etkileri — zayıflama · çok yollu yayılım · kanal modelleri

4.6 Fiziksel Katman Standartları — IEEE 802.15.4 · alıcı-verici donanımları

Bölümün ana sorusu

Kısıtlı enerjiyle, bozulmaya açık bir kanal üzerinden bitler nasıl güvenilir biçimde taşınır?

Değişmeyen ölçüt

Her kararda — ortam, kod, modülasyon, topoloji — belirleyici olan **enerji verimliliği**dir.

Bağlantılı bölümler

Bölüm 5 MAC · Bölüm 6 hata denetimi · Bölüm 9 kaynak kodlama · Bölüm 10 katmanlar arası tasarım

GİRİŞ

Fiziksel katman neyden sorumlu?

Temel görevler

- Frekans seçimi
- Taşıyıcı frekans üretimi
- İşaret sezimi
- Modülasyon
- Veri şifreleme

Donanıma bağımlılık

İletişimin güvenilirliği düğümün donanım özelliklerine de bağlıdır: anten duyarlılığı ve alıcı-verici devresinin kalitesi doğrudan başarı oranını belirler.

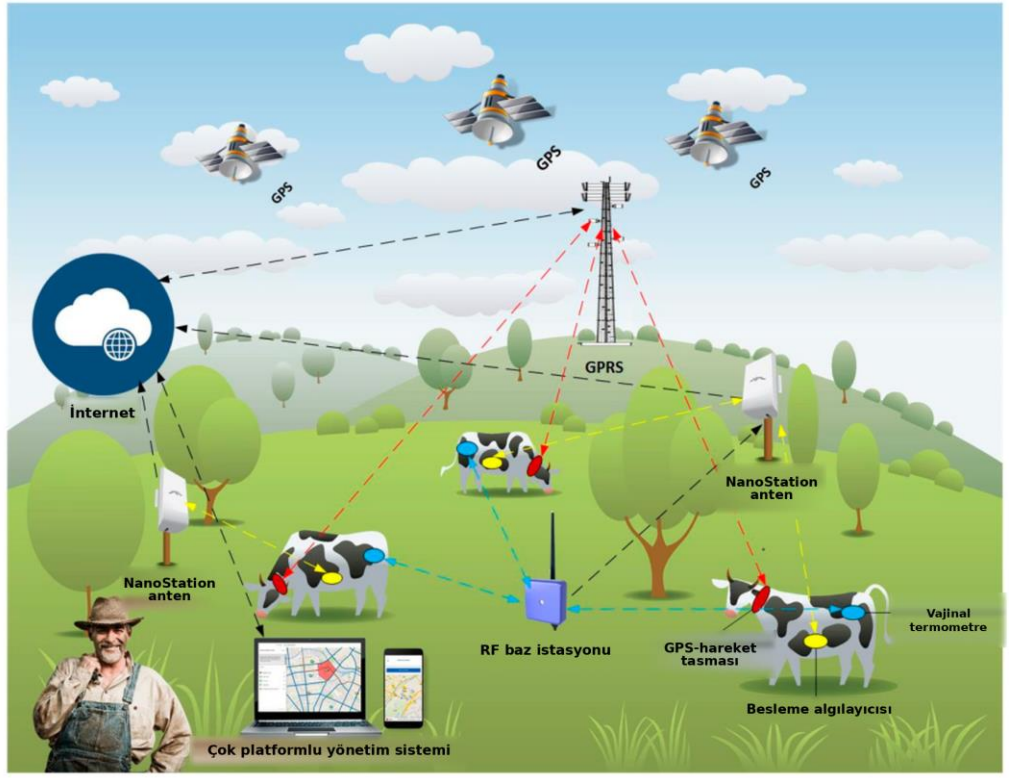
Tasarımın ekseni

Kablosuz algılayıcı ağlarda fiziksel katman tasarımında **enerji en aza indirme**, sönümleme ve yayılım kayıplarının bile önüne geçen bir tasarım ölçütüdür.

Fiziksel katman, bit dizisini kablosuz kanalda taşınmaya en uygun işaretlere dönüştürür — ve bu dönüşümün maliyeti, düğümün pil ömrünü belirleyen en büyük kalemdir.

GERÇEK BİR UYGULAMA

Akıllı hayvancılıkta kablosuz algılayıcı ağ



Bölümün soyut kavramlarını bu şemada somut olarak görebiliriz. Her ok, bugün inceleyeceğimiz bir fiziksel katman kararının sonucudur.

Şemada hangi kavram nerede?

Düğüm ve algılayıcılar — tasma, besleme algılayıcısı, termometre: pille çalışan, enerjisi kıt düğümler (4.1)

RF baz istasyonu ve antenler — anten duyarlılığı ve yol kaybı doğrudan menzili belirliyor (4.5.1)

Ağaçlar ve tepeler — yansıma, kırınım ve saçılma kaynakları; çok yollu etkiler (4.5.2)

Çok sekmeli yol — hayvandan baz istasyonuna, oradan NanoStation antenle kuleye: tek uzun atlama yerine kısa sekmeler (4.5.1)

GPRS ve bulut — fiziksel katmanın üstündeki katmanlar; bizim konumuz ilk bağlantı

AVANTAJLAR VE ZORLUKLAR

Kablosuz iletişim ne getirir, ne götürür?

Getirdikleri

- Kolay serim, altyapı gerektirmeyen ağ kurulumu
- Yayın (broadcast) tipi iletişim
- Düğüm yoğunluğu yeterliyse çok sekmeli iletişimle gölgeleme ve yol kaybının aşılması
- Yayılım kayıpları uzamsal frekans tekrar kullanımına olanak verir

Götürdükleri

- Sınırlı iletişim menzili
- Sık görülen hatalar ve girişim
- Sönümleme, saçılma, gölgeleme, yansıma, kırınım ve çok yollu etkiler

$$P_{\min} \propto d^{n}, \qquad 2 < n < 4$$

Alçak yerleşimli antenler ve yere yakın kanallarda üs *n*, 4'e yaklaşır — algılayıcı ağlarda tipik durum budur.

Dört kablosuz ortam

RF

3 Hz – 300 GHz elektromanyetik dalgalar. Çoğu düğüm donanımının temeli; çoğu ülkede lisanssız ISM bantları kullanılabilir.

Dar bant · yayılı spektrum · UWB

Baskın seçenek

Optik

750–1000 nm kızılötesi bandı. Elektromanyetik girişimden etkilenmez, buna karşılık görüş hattı ve konum kararlılığı ister.

Dış ortamda güneş ışığı, iç ortamda floresan ışıklar girişim kaynağıdır

Smart Dust

Akustik

Suda RF ve optik menzili ciddi biçimde kısıtlıdır; ses dalgaları ise çok uzun mesafeler yayılır.

Veri hızı onlarca kbps; bağlantılar dikey ve yatay olarak sınıflandırılır

Su altı ağları

Manyetik indüksiyon

Toprak ve su gibi yoğun ortamların manyetik geçirgenliği havaya yakındır; zayıflama oranı az değişir.

Elektromanyetik dalgaların toprakta karşılaştığı anten boyutu sorununu da çözer

Yer altı ağları

Ortamın özellikleri fiziksel katmanın yeteneklerine doğrudan kısıt koyar — bu yüzden ortam seçimi bir tasarım kararıdır, verilmiş bir koşul değil. RF genel kabul görmüş seçenektir; diğer üçü belirli uygulama senaryolarına özgüdür.

Üç RF iletişim tekniği

Dar bant

Dar bir bantta M'li modülasyon şemalarıyla bant genişliği verimliliğini en iyilemeyi amaçlar.

Mica2 — CC1000 alıcı-verici
433 / 868 / 915 MHz
175 kHz'e kadar bant, 76 kbps

Yayılı spektrum

Bilgi çok daha geniş bir banda yayılır; yüksek hızlı çip kodları kullanılır.

FHSS — Bluetooth, µAMPS düğümü
DSSS — IEEE 802.15.4'ün fiilî standardı

UWB (darbe radyosu)

İletişimi, bir referans zamana göre darbelerin göreli konumlandırılmasıyla gerçekleştirir.

Taşıyıcı yok, temel bantta iletim
Genellikle darbe konum modülasyonu (PPM)

Dar bant bant genişliğini verimli kullanır; yayılı spektrum ve UWB ise bilgiyi çok daha geniş bir banda yayarak girişime ve çok yollu etkilere dayanıklılık kazandırır.

YAYILI SPEKTRUM

FHSS ve DSSS

FHSS — Frekans atlamalı yayılı spektrum

Geniş bant spektrumu frekans kanallarına bölünür. Verici–alıcı çifti, önceden tanımlı bir atlama düzenine göre bu kanallar arasında atlar.

Bluetooth standardının temeli. µAMPS algılayıcı düğümü, tümleşik frekans sentezleyicili 2,4 GHz Bluetooth uyumlu alıcı-verici kullanır.

DSSS — Doğrudan dizili yayılı spektrum

Çip adı verilen sözde-gürültü (PN) kodları kullanılır. Bir çip dizisi, gönderilecek bilgi bitlerini modüle eder; çip süresi bit süresinden çok kısadır.

Çip hızı bit hızından çok yüksek olduğu için dar bant bilgi geniş bir banda yayılır. Alıcı, PN kod dizisini bildiği için işareti çözebilir.

CC2420 | MicaZ | TelosB | Imote2 | 2,4 GHz · 2 Mçip/s · 250 kbps

ULTRA GENİŞ BANT

UWB: avantajlar ve sınırlar

Güçlü yanları

- Çok yollu sönümlemeye karşı yüksek dayanıklılık
- Temel bantta iletim — ara frekans katı gerekmez, alıcı-verici devresi basitleşir
- DSSS sistemlerine göre belirgin biçimde düşük gerçekleme maliyeti
- Düşük iletim gücü ile artan güvenilirlik

Kısıtları

- İletişim menzili çok kısa (< 10 m) — ağ serimini kısıtlar
- Taşıyıcı bulunmadığı için yerleşik taşıyıcı sezme (CS) teknikleri MAC katmanında kullanılamaz
- Eşit bant genişliğinde ikili modülasyon için DSSS daha iyi paket hata oranı verir

Sonuç: yayılı spektrum teknikleri, sistem karmaşıklığı ile girişim bastırma arasında en dengeli noktayı tutar. Dar bant, bant genişliği verimliliğini enerji verimliliğiyle takas ettiği için algılayıcı ağlarda zayıf başarım gösterir.

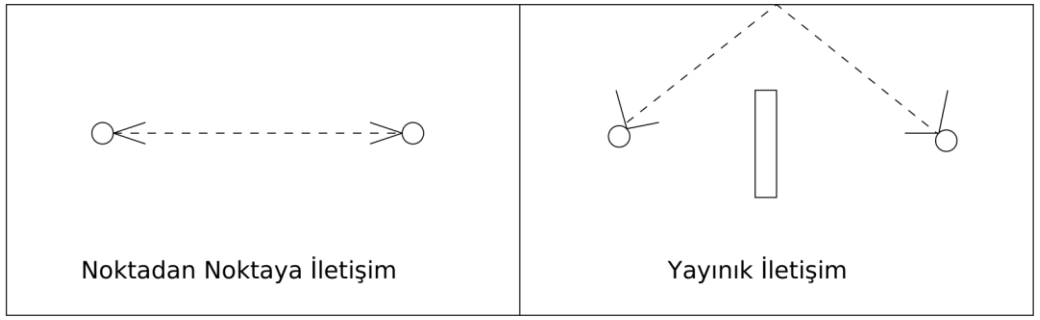
KARŞILAŞTIRMA

Üç RF tekniği yan yana

Ölçüt	Dar bant	Yayılı spektrum	UWB
Bant genişliği kullanımı	Dar, verimli	Geniş	Çok geniş
Enerji verimliliği	Zayıf — modülasyon seviyesi arttıkça düşer	İyi — düşük güçle çalışır	İyi
Girişime dayanıklılık	Düşük	Yüksek — işaret gürültü gibi görünür	Yüksek
Çok yollu dayanıklılığı	Düşük	Orta	En yüksek
Devre karmaşıklığı	Düşük	Orta	Düşük — ara frekans yok
İletişim menzili	Orta	Orta–uzun	Kısa (< 10 m)
Taşıyıcı sezme (MAC)	Yapılabilir	Yapılabilir	Yapılamaz

Aynı iletişim başarısı için yayılı spektrum, dar banda göre daha düşük iletim gücüyle yetinebilir — algılayıcı ağlar için belirleyici üstünlük budur.

İki kızılötesi iletişim biçimi



Şekil 4.1 — Kızılötesi iletişim teknikleri. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 56.

Noktadan noktaya

Verici ve alıcı birbirine doğrultulur. Görüş hattı (LoS) zorunludur. Dar hüzmelerle 10 m'den uzun mesafeler elde edilebilir.

Yayınık

Görüş hattı gerektirmez; çevredeki nesnelerden yansımalarla yürütülür. Geniş hüzme ve geniş görüş açısı kullanılır, menzil kısıtlıdır.

Donanım

Verici bir LED ya da lazer diyot, alıcı bir fotodiyottur. Kızılötesinin şiddeti bilgi içeriğine göre modüle edilir: IM/DD sistemi.

SMART DUST

Milimetre küp boyutunda bir düğüm

Amaç, **bir milimetre küplük** algılayıcı düğüm geliştirmektir. Bu boyutta yeterli veri hızı sağlayan RF alıcı-vericiler uygulanabilir olmadığı için optik verici ve alıcılar kullanılır.

Pasif yansıtmalı sistem

Köşe-küp geri yansıtıcı (CCR): birbirine dik üç mikro ölçekli ayna. Aynalardan biri düğüm tarafından denetlenerek gelen ışık hüzmesi modüle edilir.

180 m menzilde 4 kbps

Etkin yönlendirmeli lazer

Bir ışık kaynağı ve MEMS denetleyicili yönlendirilebilir mikro ayna. Aynaya düşen ışık, denetleyicinin seçtiği yönde yansıtılır.

3,5 mW ile 21,4 km

Optik iletişimin bilançosu

Artı: elektromanyetik girişimden etkilenmez; görüş hattı sayesinde yakın çiftler aynı anda iletişebilir, MAC karmaşıklığı azalır.
Eksi: güneş ışığı ve floresan ışıklar girişim yaratır; görüş hattı ve konum değişimlerine duyarlılık serimi zorlaştırır.

ÖZEL ORTAMLAR

Su altı ve yer altı

Akustik iletişim — su altı ağları

Suda RF ve optik menzilleri ciddi biçimde kısıtlıdır; ses dalgaları ise çok uzun mesafeler yayılır.

Başarı; yol kaybı, gürültü, çok yolluluk, Doppler yayılması ve yayılım gecikmesinden etkilenir. Bunların hepsi suyun sıcaklığına, derinliğine ve bileşimine bağlıdır.

Veri hızı mevcut cihazlarda onlarca kbps ile sınırlı. Bağlantılar, ses ışınının deniz tabanına göre yönüne bakılarak **dikey** ve **yatay** olarak sınıflandırılır.

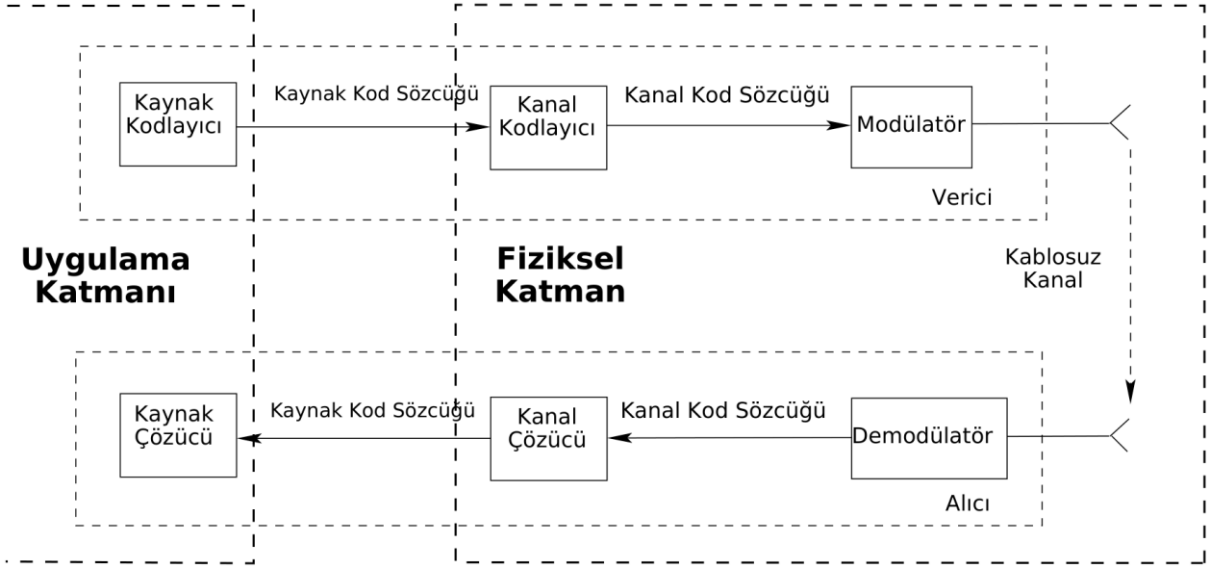
Manyetik indüksiyon — yer altı ağları

Elektromanyetik dalgaların toprakta üç sorunu:

- Toprak, kaya ve su soğurması nedeniyle yüksek zayıflama
- Yol kaybı; su içeriği, toprak bileşimi (kum, mil, kil) ve yoğunluğa güçlü biçimde bağlı, zamanla ve konumla çarpıcı biçimde değişir
- Pratik menzil için MHz ve altı frekanslar gerekir — bu da toprağa gömülemeyecek kadar büyük antenler demektir

Manyetik indüksiyon her iki sorunu da çözer: toprak ve su gibi yoğun ortamların manyetik geçirgenliği havaya yakın olduğundan manyetik alanların zayıflama oranı az değişir.

Uçtan uca iletişim zinciri



Şekil 4.2 — RF iletişim bloklarına genel bakış. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 58. · Kaynak kodlama/çözme uygulama katmanında, kanal kodlama ve modülasyon fiziksel katmanda yürütülür.

ZİNCİRİN ADIMLARI

Bilgi vericiden alıcıya nasıl gider?

1 · Kaynak kodlama

Kaynak kodlayıcı, bilginin istatistiksel özelliklerinden yararlanarak kaynağı daha az bitle temsil eder. **Veri sıkıştırma** da denir.

Uygulama katmanında — Bölüm 9

2 · Kanal kodlama

Kaynak kod sözcüğü, kanal hatalarına karşı kanal kodlayıcı tarafından kodlanır. **Hata denetim kodlaması** da denir.

Fiziksel katmanda — Bölüm 4.3

3 · Serpiştirme ve modülasyon

Kanal sembolleri, art arda gelen çok sayıda biti etkileyen küme hatalara karşı serpiştirilir; ardından sayısal bilgiyle bir analog işaret modüle edilir.

Fiziksel katmanda — Bölüm 4.4

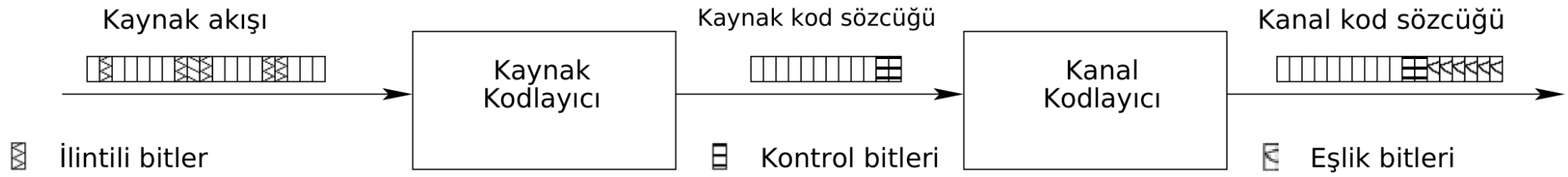
4 · Kanalda yayılım

İletilen dalga biçimi — özünde bir elektromanyetik dalga — kanalda ilerlerken zayıflar ve bozulur.

Bölüm 4.5

Serpiştirme ve kanal kodlama birlikte alıcıya iki olanak verir: (1) bit hatalarını saptayıp yeniden iletim başlatmak, (2) sınırlı sayıda biti doğrudan düzeltmek.

Sıkıştır, sonra bilinçli fazlalık ekle



Şekil 4.3 — Kaynak ve kanal kodlama. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 59.

Kaynak kodlayıcı

Girişteki bilgi bitlerinden **daha az** bitlik bir çıkış üretir. Sıkıştırılmış olmasına karşın başarıyla alınırsa özgün bitler geri çözülebilir.

Kanal kodlayıcı

Kaynak kod sözcüğünden **daha fazla** bitlik bir çıkış üretir. Eklenen fazlalık (eşlik) bitleri kanal hatalarıyla savaşır.

Net sonuç

Kaynak kodlamadaki azalma bilgi içeriğine, kanal kodlamadaki artış kanal özelliklerine bağlıdır. İkisi bağımsız yürütüldüğü için kanal sözcüğü özgün bilgiden uzun da olabilir, kısa da.

Neden algılayıcı ağlarda blok kodlar?

Görece basit gerçeklenmeleri ve küçük bellek gereksinimleri nedeniyle blok kodlar KAA'larda tercih edilir.

Tanım

Bir blok kod, *k* bitlik giriş iletisi **u**'yu *n* bitlik çıkış iletisi **v**'ye dönüştürür (*n* > *k*). Çıkış iletisi **kanal kod sözcüğü**dür.

Kod, karmaşıklığına bağlı olarak *t* bite kadar hatayı düzeltebilir. Böylece bir blok kod **(*n*, *k*, *t*)** üçlüsüyle tanımlanır.

Hamming uzaklığı

İki kod sözcüğü arasındaki Hamming uzaklığı, farklı oldukları konumların sayısıdır. ***d*min** ise koddaki herhangi iki sözcük arasındaki en küçük uzaklıktır.

$d_{\min} - 1$ hataya kadar **sezme**

$$2t + 1 \leq d_{\min} \leq 2t + 2$$

t hataya kadar **düzeltme**

Kodlama karmaşıklığı ihmal edilebilir; bu nedenle yalnızca çözme karmaşıklığı dikkate alınır: yazılımla gerçeklemede $(2nt + 2t^2)$ toplama ve $(2nt + 2t^2)$ çarpma.

BCH · RS · CRC

BCH kodları

Bose, Chaudhuri ve Hocquenghem. Hem hata sezme hem düzeltme yeteneği sunar. *n*: blok uzunluğu, *k*: bilgi uzunluğu, *t*: düzeltilebilen en fazla hata.

$$\begin{aligned} n &= 2^m - 1 \\ n - k &\le mt \\ d_{\min} &\ge 2t + 1 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Kodlama ve çözme, 2*m* elemanlı sonlu cisim GF(2*m*) — Galois cismi — üzerinde yürütülür.

RS kodları

Reed–Solomon. BCH kodlarının **ikili olmayan** bir ailesi: işlemler, *q* asal olmak üzere GF(*q*) üzerinde yapılır. İkili BCH özelliklerini korur.

$$\begin{aligned} n &= q - 1 \\ n - k &= 2t \\ d_{\min} &= 2t + 1 \end{aligned} \tag{4.2}$$

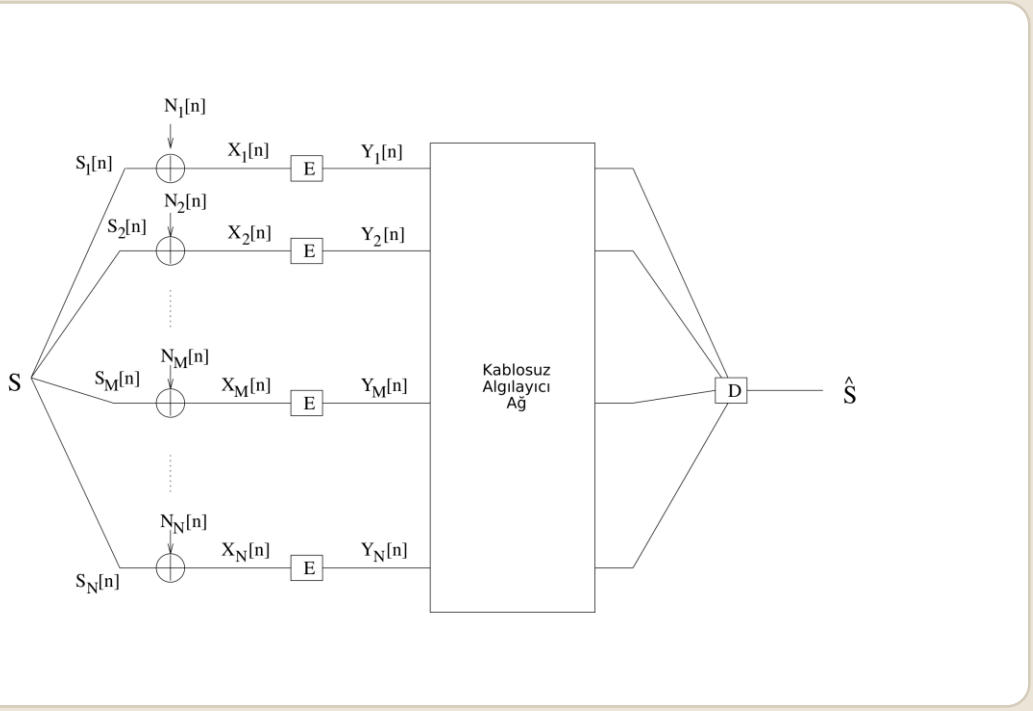
CRC kodları

Çevrimsel fazlalık denetimi. Pakette hata olup olmadığını **saptar**, ancak **düzeltemez**.

Bir hata denetim kodu kullanılsın ya da kullanılmasın, hemen her iletişim sisteminde yer alır.

***d*min = 4** olan BCH kodlarıdır. Yeniden iletime dayanan ARQ şeması (Bölüm 6) CRC üzerine kuruludur.

Algılayıcı ağlarda ayrışım neden bozulur?



Şekil 4.4 — İlinti modeli ve mimarisi. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 61.

Geleneksel bilgi kuramı kaynak ve kanal kodlamayı ayırır; çünkü bilgi ile kanal genellikle bağımsız davranır. KAA'da ise uygulamalar **fiziksel olayları** gözler: kaynağın özellikleri kanalınkilerle yakından eşleşebilir.

$$X_i[n] = S_i[n] + N_i[n] \tag{4.3}$$

$$Y_i[n] = f_i(X_i[n]) \tag{4.4}$$

Fiziksel olay, zaman ve konumun işlevi olarak *s*(*t*, *x*, *y*) uzay–zaman süreciyle modellenir. Gürültü *Ni*[*n*], sıfır ortalamalı ve σN^2 değişintili bağımsız özdeş dağılımlı Gauss değişkenidir.

Ayrı kodlama $1/\log N$, birleşik kodlama $1/N$

$$\hat{S} = g(Y_1[n_1], \ldots, Y_1[n_\tau];\ \ldots;\ Y_N[n_1], \ldots, Y_N[n_\tau]) \tag{4.5}$$

$$D = \mathrm{E}\left[d\left(S, \hat{S}\right)\right] \tag{4.6}$$

$$Y_i[n] = \sqrt{\frac{P_E}{\sigma_S^2 + \sigma_N^2}}\, X_i[n] \tag{4.7}$$

$$Z[n] = \frac{\mathrm{E}[S[n]\, Y[n]]}{\mathrm{E}[Y^2[n]]}\, Y[n] \tag{4.8}$$

(4.7) sayıl güç kısıtıyla kodlama, (4.8) toplayıcıdaki MMSE kestirici.

Kuramsal kazanç

Kaynak ve kanal kodlama **ayrı** yapıldığında (4.6)'daki bozunum yalnızca 1/log *N* ile azalır. **Birleşik** kodlamada ise, olayı gözleyen düğüm sayısı *N* arttıkça bozunum **1/*N*** ile azalır.

Gauss algılayıcı ağlarında birleşik kodlama ayrışım tekniklerini geçmekle kalmaz, en iyi iletişim çözümünü verir.

Pratikteki engel

Mevcut platformlar hâlâ ayrışım ilkesini izler; çünkü sayısal alanda gerçeklenirler. Birleşik kodlama ise genellikle **doğrusal olmayan** ve gerçeklenmesi zor analog iletişim teknikleri ister.

Pratik birleşik kaynak–kanal çözümleri geliştirmek, alanın önemli açık sorunlarından biridir.

Üç temel sayısal modülasyon şeması

$$s(t) = r(t)\cos[2\pi f_c t + \psi(t)] \qquad (4.9)$$

ASK — Genlik kaydırmalı anahtarlama

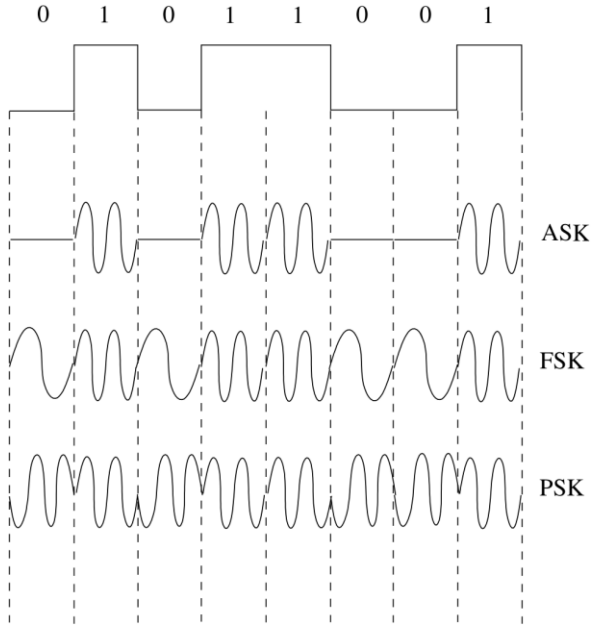
Dalga biçiminin **genliği** gönderilecek bite göre değiştirilir. En basit biçimi AÇ–KAPA anahtarlamadır (OOK): 1 için dalga gönderilir, 0 süresince susulur.

FSK — Frekans kaydırmalı anahtarlama

Dalga biçiminin **frekansı** *fc* bite göre değiştirilir. Birbirinden uzak frekans değerleri seçilerek bitler alıcıda ayırt edilir.

PSK — Faz kaydırmalı anahtarlama

Dalga biçiminin **fazı** $\psi(t)$ değiştirilir. Alınan işaretin fazındaki değişimler iletilen bitlere eşlenir.



Şekil 4.5 — Üç temel modülasyon şeması: ASK, FSK ve PSK. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 63.

FSK ve O-QPSK

İkili FSK — Mica2

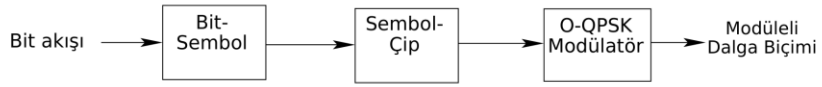
İki ayrı frekans değeri sayısal 1 ve 0'ı temsil eder. Verici, bitler arasında fazın korunmasını sağlar. Alıcıda dalga biçimi *f*1 ve *f*2 frekanslarında çalışan iki uyumlu süzgeçten geçirilir; süzgeç çıkışları zarf sezicilere verilir ve sonuçlar karşılaştırılarak karar verilir.

$$p_b^{\mathrm{FSK}} = \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \qquad (4.10)$$

Eb/*N*0: bit başına enerjinin gürültü spektral yoğunluğuna oranı — alıcıdaki işaret kalitesinin ölçüsü.

O-QPSK — MicaZ, IEEE 802.15.4

Standartta bir bayt, sembol başına 4 bitle iki sembolle temsil edilir: **16'lı modülasyon**. Her sembol 32 çipin bir bileşimiyle gösterilir, her çip O-QPSK ile iletilir.



Şekil 4.6 — IEEE 802.15.4 modülasyon yapısı. Kaynak: s. 64.

$$p_b^{\mathrm{OQPSK}} = Q\left(\sqrt{(E_b/N_0)_{\mathrm{DS}}}\right)$$

$$(E_b/N_0)_{\mathrm{DS}} = \frac{2N \times E_b/N_0}{N + 4\,(E_b/N_0)(K-1)/3} \qquad (4.11–4.12)$$

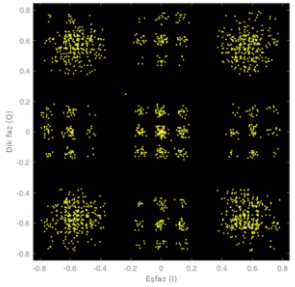
N: bit başına çip sayısı, *K*: eşzamanlı ileten kullanıcı sayısı.

Kısa süre mi, düşük güç mü?

Vaat ve bedeli

M = 2*n* dalga biçimi kullanılır, her biri *n* bit taşır; verici daha **kısa süre** açık kalır. Buna karşılık:

- Alıcı-verici devresinde daha yüksek karmaşıklık
- Dalga biçimi sayısı arttıkça ayırt etmek zorlaşır, çözme hataları artar
- Aynı hata oranı için daha **yüksek iletim gücü**; *M* büyüdükçe yükselticinin verimi düşer



Gürültülü kanalda 16'lı takımyıldız: her küme bir sembol.

$$E_2 = (P_{\text{mod-B}} + P_{\text{FS-B}})\,T_{\text{on}} + P_{\text{FS-B}}T_{\text{st}} + P_{\text{out-B}}T_{\text{on}} \qquad (4.13)$$

$$E_M = (P_{\text{mod-M}} + P_{\text{FS-M}})\,\frac{T_{\text{on}}}{n} + P_{\text{FS-M}}T_{\text{st}} + P_{\text{out-M}}\frac{T_{\text{on}}}{n} \qquad (4.14)$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{mod-M}}}{P_{\text{mod-B}}}, \qquad \beta = \frac{P_{\text{FS-M}}}{P_{\text{FS-B}}} \qquad (4.15\text{–}4.16)$$

$$E_M < E_2 \iff \alpha < n\left[1 + \frac{P_{\text{FS-B}}}{P_{\text{mod-B}}} \cdot \frac{(1-\beta/n)T_{\text{on}} + (1-\beta)T_{\text{st}}}{T_{\text{on}}}\right] \qquad (4.17)$$

Karar kuralı: M'li modülasyon, şemanın ek yükü α ve başlatma süresi *T*st küçük olduğunda daha enerji verimlidir. Başlatmanın baskın olduğu durumda (*T*st ≫ *T*on) açık kalma süresindeki azalma etkisini yitirir; β nedeniyle toplam tüketim artar ve α ne olursa olsun **ikili şema** daha verimlidir.

Bozulmanın dört kaynağı

1 · Zayıflama

İşaret dalgası havada ilerledikçe işaret gücü azalır; azalma kat edilen mesafeyle orantılıdır. Radyo dalgaları için **yol kaybı** ile sonuçlanır.

2 · Yansıma ve kırılma

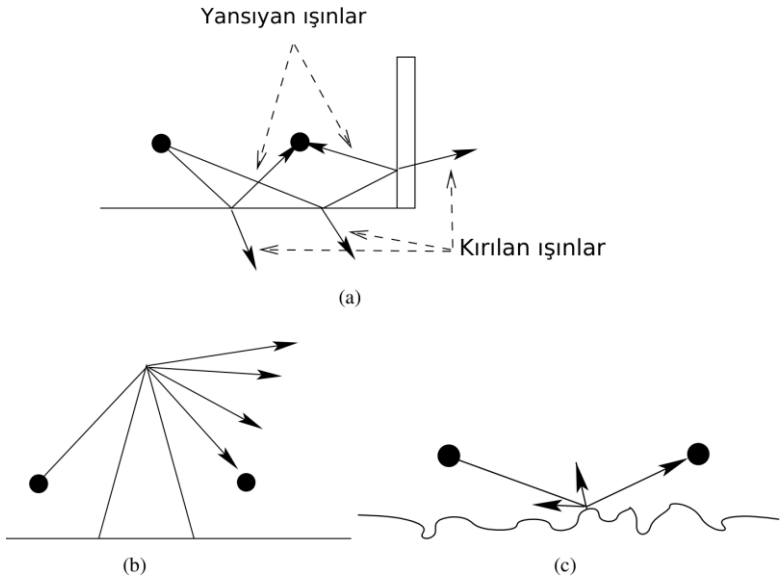
Dalga iki farklı malzemenin sınırına çarptığında bir kesri yüzeyden sıçrar (**yansıma**), bir kesri sınırdan geçebilir (**kırılma**). Genellikle yerde ya da bina duvarlarında görülür.

3 · Kırınım

Dalga; dağ tepesi ya da bina köşesi gibi **keskin kenarlardan** da yayılabilir. Kenar yeni dalgaların doğduğu bir kaynak gibi davranır, işaret gücü bu dalgalara dağılır.

4 · Saçılma

Pürüzlü bir yüzeye çarpan dalga farklı yönlere saçılır; kusursuz sınırlar gerçekte nadirdir.



Şekil 4.7 — Bozulma kaynakları: (a) yansıma ve kırılma, (b) kırınım, (c) saçılma. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 66.

Yol kaybı ve iletim menzili

İşaret gücü mesafenin işlevi olarak azalır. Belirli bir eşiğin altına düştüğünde alıcı dalgayı doğru sezemez. Bu eşik **alıcı duyarlılığı**, bu mesafe ise düğümün **iletim menzili**dir.

$$\frac{P_t}{P_r(d)} = \mathrm{PL}(d) = \mathrm{PL}(d_0)\left(\frac{d_0}{d}\right)^{-\eta} \tag{4.18}$$

$$\mathrm{PL}(d)\,[\mathrm{dB}] = \mathrm{PL}(d_0)\,[\mathrm{dB}] + 10\eta\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{4.19}$$

$$P_r(d) = P_t - \mathrm{PL}(d_0) - 10\eta\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{4.20}$$

Terimler

PL(*d*) — *d* mesafesindeki yol kaybı
PL(*d*0) — *d*0 referans mesafesindeki alınan işaret gücü
η — zayıflama sabiti / yol kaybı üsteli

Tasarıma yansıması

İletişim menzili arttıkça başarılı iletim için gereken iletim gücü yükselir. Uzun mesafeli kablosuz iletişim hem enerji hem maliyet açısından pahalıdır.

İşaret gücü d^{η} ($\eta \geq 2$) ile azaldığından, **kısa düğüm aralıklarıyla çok sekmeli iletişim** daha enerji verimlidir.

Çok sekmeli iletişim yalnızca düğüm başına gereken en yüksek iletim gücünü sınırlamakla kalmaz, uzun mesafeli iletime göre toplam enerji tüketimini de azaltır.

Kanala rastgelelik girer

Yansıma ve saçılma, işaretin **birden çok kopyasının** alıcıya ulaşmasına yol açar. Verici ile alıcı arasındaki doğrudan yol **görüş hattı (LoS)** yoludur; çevredeki yüzeylerden yansıyan ya da saçılan ışınların izlediği yollar ise **görüş hattı dışı (NLoS)** yollardır.

LoS yoluyla karşılaştırılabilir zayıflamaya uğrayan NLoS ışınları da iletişimin başarısına katkıda bulunur.

Neden formülle modellenemez?

NLoS yollarının etkisi hem çevreye hem işletim frekansına bağlıdır ve çevre zamanla değiştiği için **zamanla da değişir**. Bu yüzden (4.20)'deki zayıflama bağıntısıyla doğru biçimde modellenemez.

Deneysel sonuç

Çok yollu etkiler **rastgeledir** ve iletişim ölçeğine, frekansa ve konuma göre çeşitli olasılık dağılımlarıyla temsil edilir. KAA gibi **kısa menzilli** iletişimde bu etkiler bir **log-normal** rastgele değişkenle modellenir.

$$\mathrm{PL}(d) = \mathrm{PL}(d_0)\,[\mathrm{dB}] + 10\eta \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \qquad (4.21)$$

$X\sigma \sim N(0, \sigma)$: sıfır ortalamalı, σ^2 değişintili normal rastgele değişken.

Sonuç

İletişimin başarısı artık yalnızca verici–alıcı mesafesine bağlı **değildir**. η ve σ^2'ye göre başarı son derece belirlenimsiz hâle gelebilir — bu durum üst katman protokollerinin tasarımında dikkate alınmalıdır.

Gürültü, girişim ve hata oranları

Gürültü

Alıcı elektroniği ve dış kaynaklar ihmal edilemez gürültü üretir. Alıcının dalga biçimini çözebilmesi için gereken en küçük işaret gücü **alıcı duyarlılığı**dır; alıcı mimarisine, ortama ve sıcaklığa bağlıdır.

Girişim

Yayın doğası gereği kanal çok kullanıcılıdır. Aynı anda ileten birden çok cihaz **eş kanal girişimi** yaratır; yakın bantta enerji yayan cihazlar ise **komşu kanal girişimi**ne yol açar — kablosuz yerel ağlar ve mikrodalga fırınlar gibi.

MAC protokolleri eşzamanlı iletimleri sınırladığı için KAA'larda eş kanal girişimi ihmal edilebilir; komşu kanal girişimi rastgele kabul edilip ek gürültü olarak modellenir. Böylece SNIR yerine daha yalın SNR tanımı kullanılabilir. *Pn* gürültü tabanıdır; ortama (iç mekân, dış mekân, fabrika) ve zamana bağlıdır.

$$\mathrm{SNIR}\,[\mathrm{dB}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{N_0 + \sum_{i=1}^{k} I_i}\right) \tag{4.22}$$

$$\mathrm{SNR}(d) = \psi(d) = P_t - \mathrm{PL}(d) - P_n \tag{4.23}$$

$$E_b/N_0 = \psi\,\frac{B_N}{R} \tag{4.24}$$

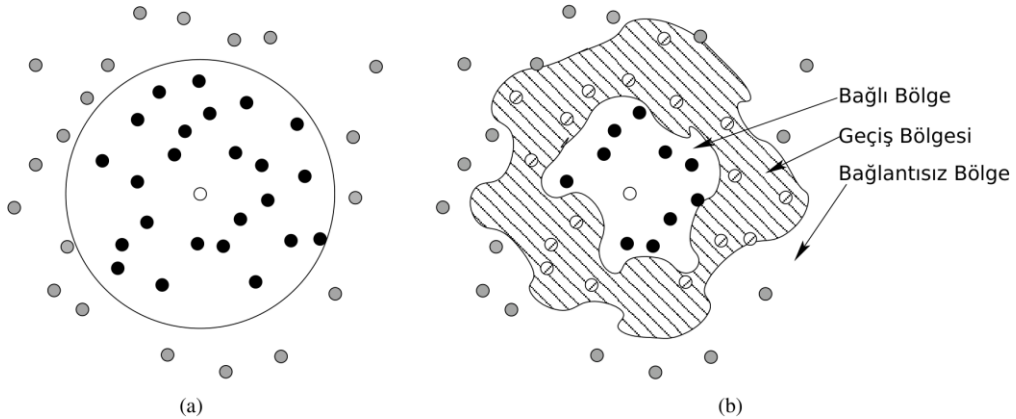
$$\mathrm{PER}_{\mathrm{CRC}}(l) = 1 - (1 - p_b)^l \tag{4.25}$$

$$\mathrm{BLER}(n,k,t) = \sum_{i=t+1}^{n} \binom{n}{i} p_b^i (1-p_b)^{n-i} \tag{4.26}$$

$$\mathrm{PER}_{\mathrm{FEC}}(l,n,k,t) = 1 - [1 - \mathrm{BLER}(n,k,t)]^{\lceil l/k \rceil} \tag{4.27}$$

Zincir: SNR → *Eb*/*N*0 → BER (modülasyona göre 4.10 ya da 4.11) → PER (kodlamaya göre 4.25 ya da 4.27).

Birim disk grafı mı, istatistiksel model mi?



Şekil 4.8 — KAA'lar için kanal modelleri. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 70.

(a) Birim disk grafı

Düğümün menzili, yarıçapı 1 olan bir daire. İçindeki komşularla kusursuz iletişim, dışındakilerle hiç iletişim yok. Menzil sabit bir mesafedir: *r*comm.

$$p_b^{\text{udg}} = \begin{cases} 0, & d \le r_{\text{comm}} \\ 1, & d > r_{\text{comm}} \end{cases} \quad (4.28)$$

(b) İstatistiksel model — üç bölge

Bağlı bölge: yüksek olasılıkla (*pc*) düşük paket hata oranı.

Bağlantısız bölge: yüksek olasılıkla (*pd*) yüksek hata oranı.

Geçiş bölgesi: ikisinin arasında; paket hata oranının **değişintisi yüksek**. Buradaki düğümler zamanın bir bölümünde yüksek kaliteli bağlantı görebilir.

$$\psi(d) = P_t - \text{PL}(d_0)[\text{dB}] - 10\eta \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma - P_n \longrightarrow \Psi(d) = \mathcal{N}(\beta(d,\eta),\, \sigma) \quad (4.29–4.31)$$

GEÇİŞ BÖLGESİ

Menzilin çoğu aslında ”belirsiz” bölgede

$$d_c^{\max} = 10^{e_c}, \qquad e_c = \frac{\psi_c - \sigma Q^{-1}(p_c) - P_t + P_n + \mathrm{PL}(d_0)}{-10\eta} \tag{4.37}$$

$$d_d^{\min} = 10^{e_d}, \qquad e_d = \frac{\psi_d - \sigma Q^{-1}(1 - p_d) - P_t + P_n + \mathrm{PL}(d_0)}{-10\eta} \tag{4.38}$$

$$\Lambda = \frac{d_d^{\min} - d_c^{\min}}{d_c^{\min}} \tag{4.39}$$

Geçiş bölgesi katsayısı Λ, zayıflama sabiti η ile **azalır**, çok yollu etkilerin değişintisi σ^2 ile **artar**.

$\Lambda \leq 10$

Geçiş bölgesinin uzunluğu, bağlı bölgenin **10 katına** kadar çıkabilir. Yani düğümün potansiyel iletişim menzilinin büyük bölümü bu belirsiz bölgededir.

Çıkarımlar

- Birim disk grafı, istatistiksel modelin $\Lambda = 0$ olduğu özel bir durumudur
- $\Lambda \gg 1$ iken birim disk grafı **aşırı kötümser** sonuç verir: menzil yalnızca bağlı bölgeyle sınırlanır
- Geçiş bölgesinden yararlanmak daha uzun bağlantılar, dolayısıyla **daha az sekme** demektir
- Bunun için **kanal farkında yönlendirme** gerekir: bağlantılar anlık SNR'ye göre seçilir — katmanlar arası çözümler (Bölüm 10)

4.6.1 · IEEE 802.15.4

Düşük güçlü iletişimin fiilî standardı

Frekans bantları

2,4 GHz — küresel, 16 kanal
915 MHz — Amerika, 30 kanal
868 MHz — Avrupa, 1 kanal
Toplam 47 kanal; ayrıca UWB için ayrılmış daha geniş bantlar.

Başarım

Veri hızı **20–250 kbps**
İletim menzili **10–100 m**
Altı farklı fiziksel katman tanımı.

Fiziksel katman seçenekleri

Üçü DSSS tabanlı: 868/915 MHz'de BPSK ve O-QPSK, 2,4 GHz'de O-QPSK.
Ek olarak 868/915 MHz'de **PSSS**; 2,4 GHz'de yüksek hareketli cihazlar için **CSS**; 1, 3–5 ve 6–10 GHz bantlarında **doğrudan dizili UWB** (802.15.4a).

MAC katmanı

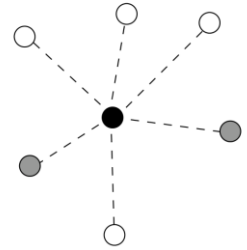
Süper çerçeve yapısına dayanır ve **CSMA/CA** tekniklerini kullanır (Bölüm 5). Yıldız, örgü ve küme ağacı topolojilerini destekler.

Standart, fiziksel ve MAC katmanlarını tanımlar; üst katmanlara esneklik bırakır. Böylece farklı üreticilerin ürettiği uyumlu alıcı-vericiler birbirleriyle iletişebilir. Uygulama alanları: algılayıcı ağlar, endüstriyel algılama ve denetim cihazları, bina ve ev otomasyonu ürünleri, hatta ağ bağlantılı oyuncaklar.

IEEE 802.15.4 TOPOLOJİLERİ

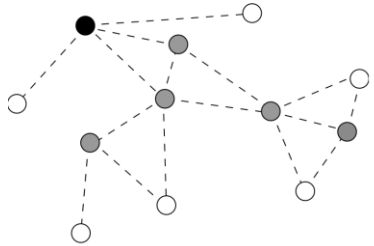
Yıldız, örgü ve küme ağacı

(a) Yıldız



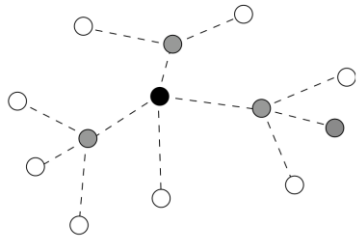
Sınırlı işlevli cihazlar **yalnızca** yıldız topolojisinde yer alır; bir RFD sadece ağ koordinatörüyle iletişebilir.

(b) Örgü



Tam işlevli cihazlar herhangi bir topolojide çalışabilir; ağ koordinatörü ya da yönlendirici olarak görev alabilir.

(c) Küme ağacı



Bir FFD ağdaki her cihazla iletişebilir. RFD'ler basit gerçeklenme nedeniyle yönlendirme ve koordinatörlük yapamaz.

Şekil 4.9 — IEEE 802.15.4 ağları için topoloji yapıları. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 73. · ● PAN Koordinatörü (FFD) ● Tam İşlevli Cihaz (FFD) ○ Sınırlı İşlevli Cihaz (RFD)

KAA'larda kullanılan alıcı-verici mimarileri

Özellik	RFM TR1000	Infineon TDA5250	TI CC1000	TI CC2420	Zeevo ZV4002
Platformlar	WeC, Rene, Dot, Mica	eyesIFX	Mica2Dot, Mica2, BTnode	MicaZ, TelosB, SunSPOT, Imote2	Imote, BTnode
Standart	—	—	—	IEEE 802.15.4	Bluetooth
Veri hızı (kbps)	2,4–115,2	19,2	38,5	250	723,2
Modülasyon	OOK/ASK	ASK/FSK	FSK	O-QPSK	FHSS–GFSK
Frekans (MHz)	916	868	315/433/868/915	2,4 GHz	2,4 GHz
Besleme gerilimi (V)	2,7–3,5	2,1–5,5	2,1–3,6	2,1–3,6	0,85–3,3
TX en çok (mA/dBm)	12 / −1	11,9 / 9	26,7 / 10	17,4 / 0	32 / 4
TX en az (mA/dBm)	—	4,9 / −22	5,3 / −20	8,5 / −25	—
RX (mA)	1,8–4,5	8,6–9,5	7,4–9,6	18,8	32
Uyku (µA)	5	9	0,2–1	0,02	3,3 mA
Başlatma süresi (ms)	12	0,77–1,43	1,5–5	0,3–0,6	—

Tablo 4.1 — KAA'larda kullanılan mevcut alıcı-vericiler. Kaynak: Akyildiz & Vuran (2010), s. 74.

ALICI-VERİCİ EĞİLİMLERİ

On yılda ne değişti?

10 → 250

Veri hızı (kbps)

Artış, daha karmaşık modülasyon şemaları ve devreler nedeniyle güç tüketimini yükseltti. Ancak iletim süreleri kısaldığı için yeni mimariler toplamda **çok daha enerji verimli**.

4 : 1 → 1 : 1

İletim / alım gücü dengesi

RFM TR1000'de iletim gücü tüketimi 4'e 1 baskındı; alıcı elektroniği görece basitti. CC1000'de iletim ve alım enerjisi neredeyse eşitlendi.

1 : 1 000 000

Uyku / boşta oranı (CC2420)

Uyku ve boşta modları arasındaki bu büyük fark, düğümü zamanın çoğunda uyutan protokolleri zorunlu kılıyor. Başlatma süresi de kısaldığı için sık uyku geçişinin ek yükü azaldı.

CC2420'de yayılı spektrumun getirdiği karmaşıklık nedeniyle **alıcı elektroniği, yükselticinin enerji tüketimini geçti**: alım enerjisi artık iletim enerjisinden yüksek. Bu köklü değişim, MAC protokollerinin evrimini de belirliyor (Bölüm 5).

ÖZET

Bölümden çıkan altı temel sonuç

- **Enerji en aza indirme**, fiziksel katman tasarımında zayıflama, yansıma, kırılma, kırınım ve saçılma etkilerinin önüne geçen ölçüttür.
- **Yayılı spektrum**, sistem karmaşıklığı ile girişim bastırma arasında en dengeli noktayı tutar; DSSS fiilî standart hâline gelmiştir.
- Düğüm yoğunluğu yeterliyse **çok sekmeli iletişim**, gölgeleme ve yol kaybı etkilerini etkili biçimde aşar.
- Çok yollu etkiler kanala **rastgelelik** katar: iletişim başarısı artık yalnızca mesafeye bağlı değildir.
- **Geçiş bölgesi** menzilin büyük bölümünü oluşturabilir; bundan yararlanmak kanal farkında yönlendirme ve katmanlar arası çözümler gerektirir (Bölüm 10).
- Ağ katmanı en kısa sekmeli rotaları verse de, artan iletim menzili yüksek hata oranı cezası getirir; fiziksel katman bilgisiyle **daha az hataya açık bağlantılar** seçilebilir.

Alan hâlâ büyük ölçüde keşfedilmemiş durumda — özellikle **güç verimli alıcı-verici tasarımı**, **yeni modülasyon teknikleri** ve düşük güçlü iletişim çözümlerinin verimli gerçeklenmesi başlıklarında.

Kaynak: Akyildiz, I. F. & Vuran, M. C. (2010). *Wireless Sensor Networks*, Bölüm 4: Physical Layer, s. 53–76. John Wiley & Sons.