

فصل چهارم: طراحی سیگنال مدرن

تئوری و الگوریتم‌های شبکه‌های بیسیم

سید وحید ازهری

دانشگاه علم و صنعت ایران

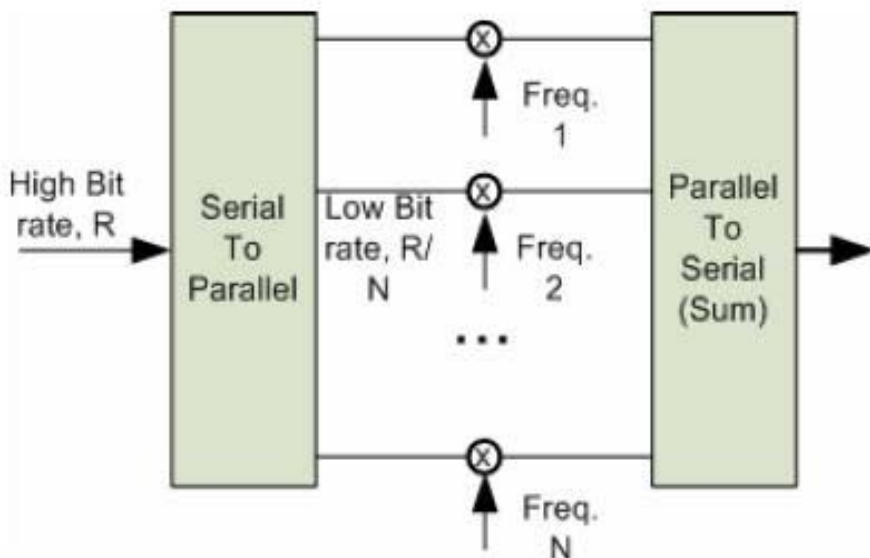
سرخط مباحث

- تکنیک انتقال OFDM
- خانواده تکنیکهای انتقال طیف گسترده (Spread Spectrum)
 - DSSS
 - FHSS

تقسیم فرکانسی متعامد

(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

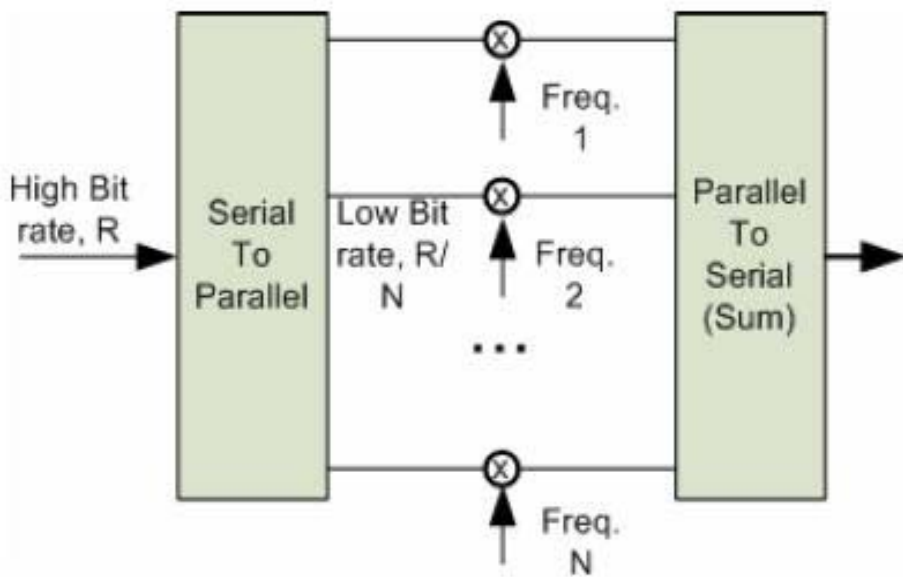
- نوعی مدولاسیون چند حاملی
- سیگنال داده بر روی چند زیر حامل (sub-carrier) به صورت همزمان ارسال می شود



تقسیم فرکانسی متعامد

(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

- نوعی مدولاسیون چند حاملی
- سیگنال داده بر روی چند زیر حامل (sub-carrier) به صورت همزمان ارسال می شود



- رشته بیت ورودی به نرخ بیت R_b به تعداد N زیر رشت هر کدام با نرخ بیت R_b/N شکسته می شود
- هر کدام از زیر رشته ها توسط یکی از مجموع N زیر-حامل مدوله می شود
- تمامی سیگنالها با هم جمع شده و از طریق آنتن ارسال میشوند
- تکنیک مدولاسیون مورد استفاده برای زیر-حاملها یکسان اتخاذ میشود
- - غالباً از میان شیوه های PSK یا QAM

تفاوت‌های FDM و OFDM

FDM

- هر کانال FDM به یک جریان جداگانه از بیت‌های داده اختصاص دارد

OFDM

- در OFDM یک جریان بیت داده به چند زیر رشته تقسیم میشود و هرکدام روی یک زیر حامل مدوله می‌شوند

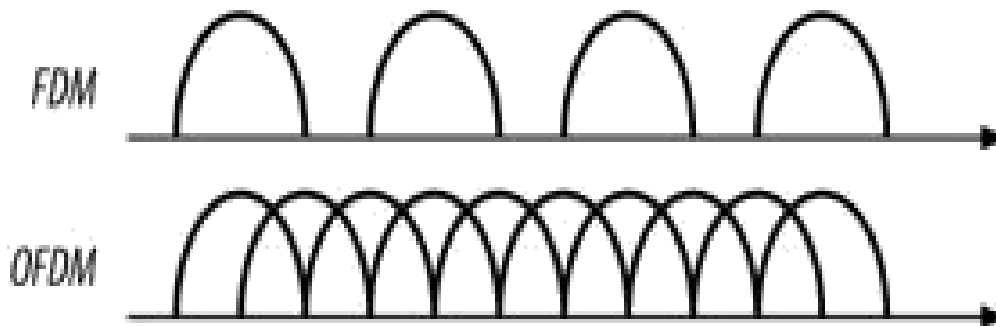
تفاوت‌های FDM و OFDM

FDM

- هر کانال FDM به یک جریان جداگانه از بیت‌های داده اختصاص دارد
- برای جلوگیری از تداخلات کانال مجاور، باید یک شکاف در پهنای باند بین دو کانال مجاور ایجاد کرد
- باند محافظ (Guard Band) باعث اتلاف پهنای باند و کاهش ظرفیت

OFDM

- در OFDM یک جریان بیت داده به چند زیر رشته تقسیم میشود و هر کدام روی یک زیر حامل مدوله می‌شوند
- فرکانس مرکزی و پهنای باند زیر-کانالها بر هم متعامدند
- میزان تداخل زیر-کانال‌های مجاور با یکدیگر صفر می‌باشد

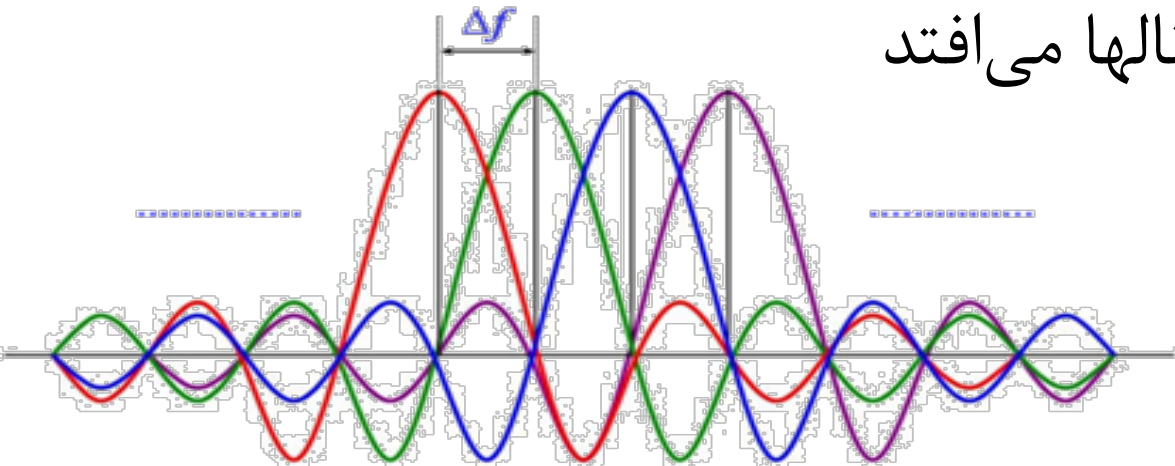


زیر کانالهای متعامد

- میزان تداخل زیر-کانال های متعامد با یکدیگر صفر می باشد
- زیر حاملها باید هارمونیک همدیگر باشند
- فرکانس مرکزی حاملها همگی ضرایب صحیحی از یک فرکانس پایه باشد
- اگر یکی از زیر حاملها 1MHz باشد، در این صورت تمامی مضارب 1MHz میتوانند زیر-حاملها را تشکیل دهند

زیر کانالهای متعامد

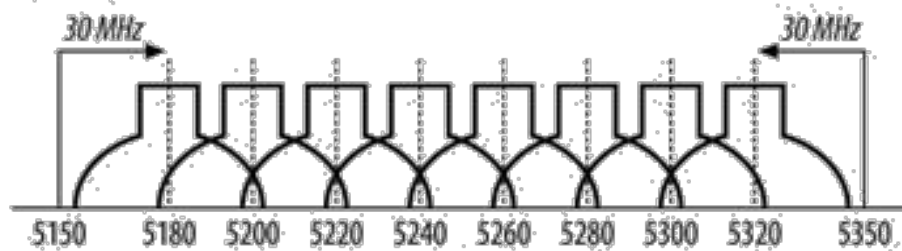
- میزان تداخل زیر-کانال های متعامد با یکدیگر صفر می باشد
- زیر حاملها باید هارمونیک همدیگر باشند
- فرکانس مرکزی حاملها همگی ضرایب صحیحی از یک فرکانس پایه باشد
- اگر یکی از زیر حاملها 1MHz باشد، در این صورت تمامی مضارب 1MHz میتوانند زیر-حاملها را تشکیل دهند
- در چنین شرایطی، حداکثر دامنه سیگنال هر زیر-کانال بر روی دامنه صفر سیگنال سایر زیر-کانالها می افتد



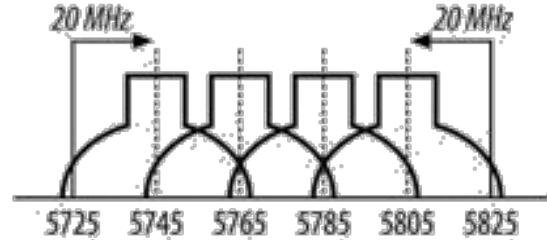
مطالعه موردی تکنولوژی انتقال در سیستم‌های مبتنی بر

IEEE802.11a

Low and Mid U-NII



High U-NII

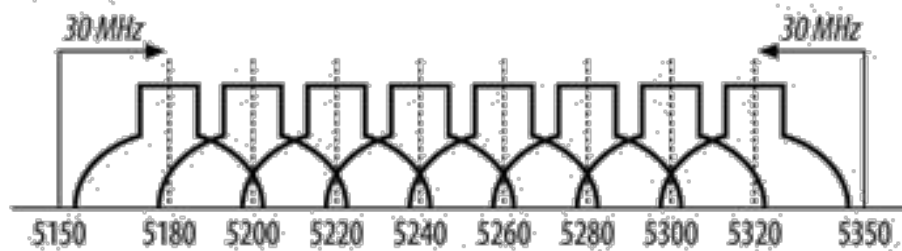


- طیف بدون نیاز به مجوز ISM با فرکانس 5GHz
- حداکثر ۱۲ کانال ۲۰ مگاهرتزی در دو گروه ۸ و ۴ تایی

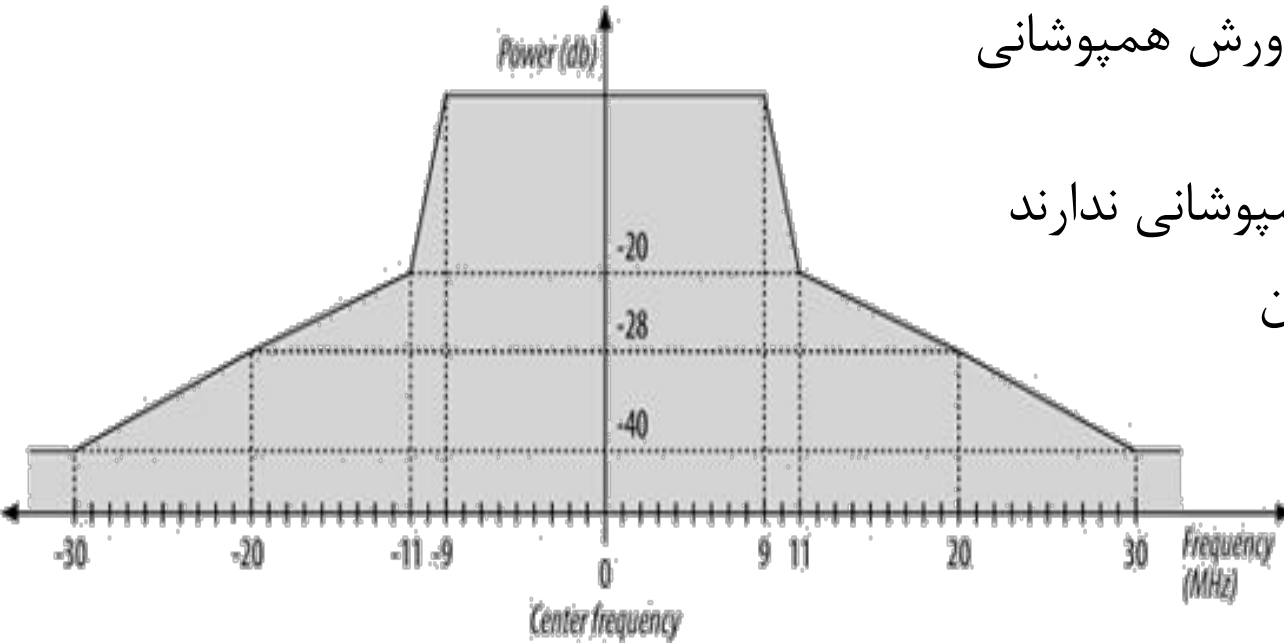
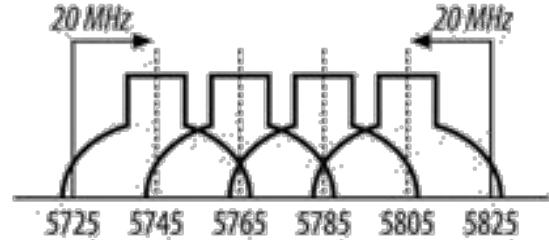
مطالعه موردی تکنولوژی انتقال در سیستم‌های مبتنی بر

IEEE802.11a

Low and Mid U-NII



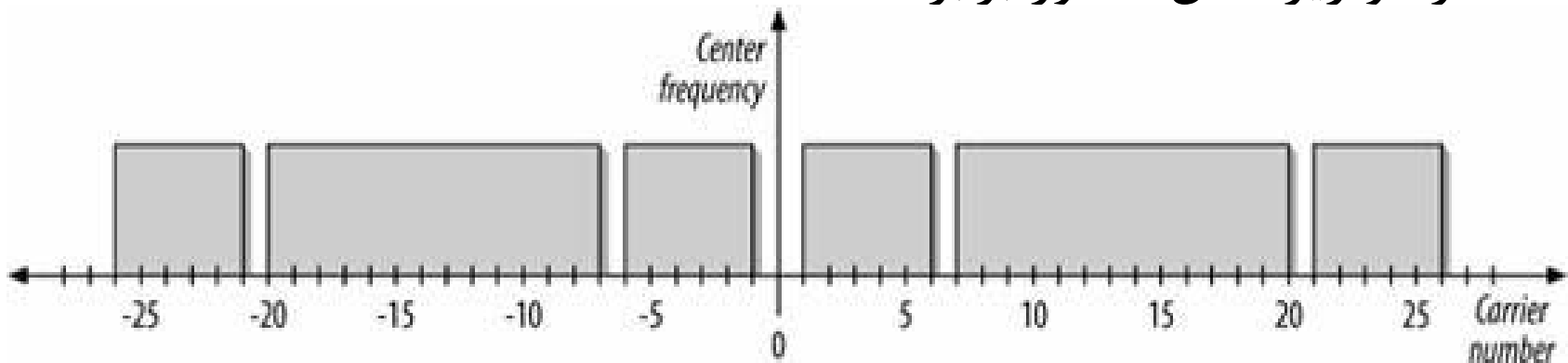
High U-NII



- طیف بدون نیاز به مجوز ISM با فرکانس 5GHz
- حداکثر ۱۲ کانال ۲۰ مگاهرتزی در دو گروه ۸ و ۴ تایی
 - کل پهنای باند برابر ۶۰ مگاهرتز
 - هر کانال با کانالهای مجاورش همپوشانی دارد
 - بصورت یکی در میان همپوشانی ندارند
 - ۶ کانال تقریباً ناهمپوشان

وضعیت زیر حاملها

- هر کانال ۲۰ مگاهرتزی به ۵۲ زیر کانال OFDM تقسیم می شود
 - پهنای باند هر زیر حامل تقریبا ۴۰۰ کیلوهرتز
 - طول سمبل برابر ۴ میکروثانیه
 - بهره وری پهنای باند هر زیر حامل را برای BPSK محاسبه کنید؟
 - $250\text{Ksps} \times 1 \text{ bit} / 400\text{KHz} = 0.625 \text{ bps/Hz}$
- زیر حاملهای ۲۱-، ۷-، ۷ و ۲۱ به منظور پایش وضعیت کانال
 - ارسال یک دنباله بیت از قبل تعیین شده بصورت BPSK
- ۴۸ زیر کانال باقیمانده برای مدوله کردن داده
- فاصله هر دو زیر حامل مجاور برابر 0.3125MHz



نرخ داده‌ی قابل حصول

- مدولاسیون هر زیر کانال از خانواده PSK یا QAM
- کد تصحیح خطای کانولوشن

نرخ داده (Mbps)	مدولاسیون	نرخ کد (R)	کد-بیت بازای هر زیرحامل	کد-بیت بازای هر سمبل (در همه ۴۸ زیر-حامل)	بیت داده بازای هر سمبل (در همه ۴۸ زیر-حامل)
	BPSK	1/2	1	48	24
	BPSK	3/4	1	48	36
	QPSK	1/2	2	96	48
	QPSK	3/4	2	96	72
	16-QAM	1/2	4	192	96
	16-QAM	3/4	4	192	144
	64-QAM	2/3	6	288	192
	64-QAM	3/4	6	288	216

نرخ داده‌ی قابل حصول

- مدولاسیون هر زیر کانال از خانواده PSK یا QAM
- کد تصحیح خطای کانولوشن

نرخ داده (Mbps)	مدولاسیون	نرخ کد (R)	کد-بیت بازای هر زیرحامل	کد-بیت بازای هر سمبل (در همه ۴۸ زیر-حامل)	بیت داده بازای هر سمبل (در همه ۴۸ زیر-حامل)
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

تکنیکهای طیف گسترده

- مدولاسیون باریک باند (Narrow Band)

– پهنای باند سیگنال ارسالی از حد نایکوسیت که در حدود مقدار نرخ سمبل می باشد، تجاوز نمی کند

- ارسال طیف گسترده یا Spread Spectrum

– سیگنال ارسالی بر روی پهنای باندی بسیار بزرگتر از پهنای باند نایکوست ارسال می شود: $B \gg R_s$

– چگالی توان سیگنال به ازای هر هرتز خیلی کوچکتر از باریک-باند

– حتی می تواند کمتر از چگالی توان نویز N_0 باشد

تکنیکهای طیف گسترده

- مدولاسیون باریک باند (Narrow Band)

- پهنای باند

- می باشد، تجا

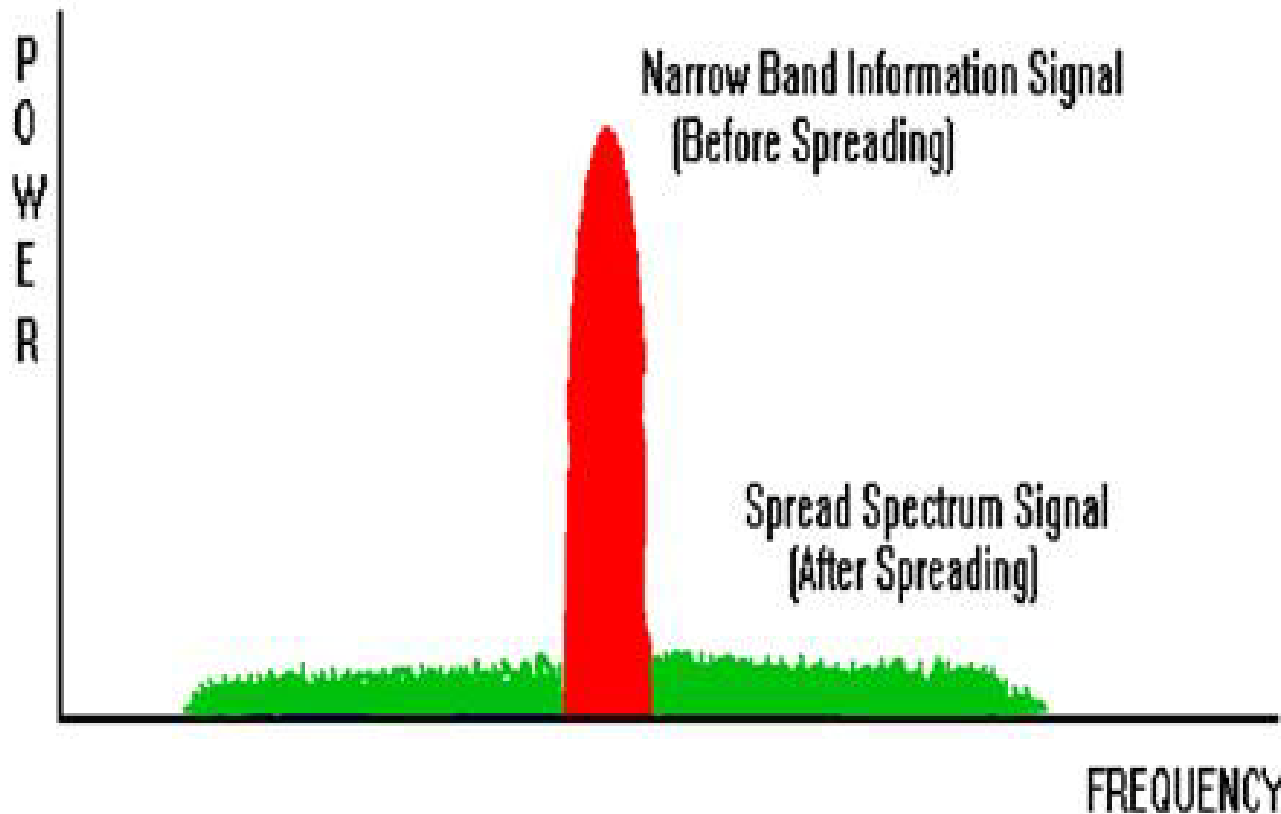
- ارسال طیف گ

- سیگنال ارسا

- ارسال می شو

- چگالی توان

- حتی می توان



مزایای ارسال به روش طیف گسترده

- **مقاومت در برابر تداخلات باریک-باند:**

- تداخلات باریک-باند بخش کوچکی از سیگنال طیف گسترده را تحت تاثیر قرار میدهند
- باعث افزایش نسبی BER میشوند، اما خللی در دریافت سیگنال ایجاد نمی‌شود

- **مقاومت در برابر کور کردن (Jamming):**

- از کارانداختن گیرنده های ماهواره‌ای، از حملات متداول جنگال برای از کارانداختن ارتباطات دشمن
- سیگنال کور کننده غالبا باریک-باند است ← در سمت گیرنده همچون نویز ← فقط میتواند BER را افزایش دهد.

- **مقاومت در برابر تداخلات هم‌فرکانس:**

- سایر سیگنال‌های طیف گسترده و هم فرکانس بصورت نویز دیده می‌شوند
- تنها باعث افت نسبی کیفیت سیگنال و کاهش نسبت SINR

- **داشتن تشعشعات توان کم، مفید برای طیف‌های مجوز آزاد:**

- حداکثر توان ارسالی بر واحد هرتز دارای محدودیت
- جلوگیری از تداخلات فلج کننده
- بدلیل تخفیف در تداخلات هم‌فرکانس بسیار مطلوب باندهای آزاد است

- **دشواری استراق سمع:**

- سیگنال‌های مختلف را در نظر یکدیگر بصورت نویز درمی‌آیند
- یک گیرنده‌ی غیر مجاز نمی‌تواند بسادگی سیگنال ارسالی را تشخیص داده، دریافت نماید

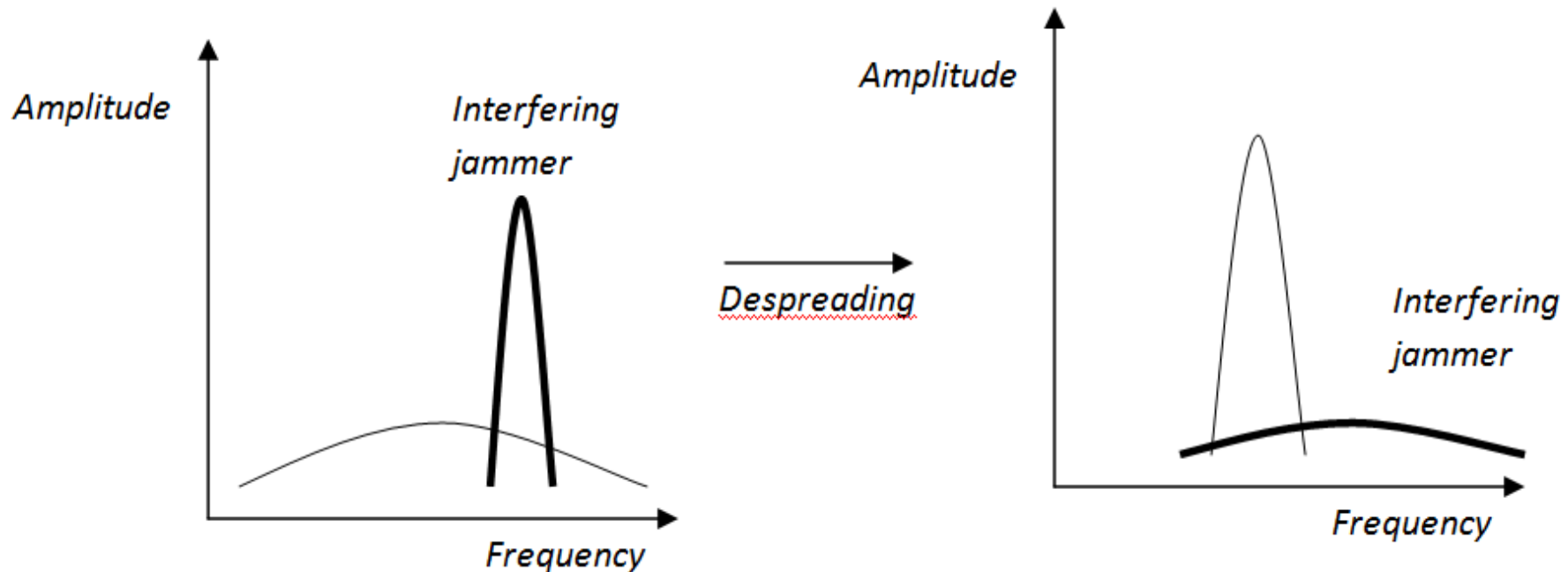
مزایای ارسال به روش طیف گسترده

- مقاومت در برابر تداخلات باریک-باند:

- تداخلات باریک-باند بخش کوچکی از سیگنال طیف گسترده را تحت تاثیر قرار میدهند
- باعث افزایش نسبی BER میشوند، اما خللی در دریافت سیگنال ایجاد نمی‌شود

- مقاومت در برابر کور کردن (Jamming):

- از کارانداختن گیرنده‌های ماهواره‌ای، از حملات متداول جنگال برای از کارانداختن ارتباطات دشمن
- سیگنال کور کننده غالباً باریک-باند است ← در سمت گیرنده همچون نویز ← فقط میتواند BER را افزایش دهد.



- یک گیرنده‌ی غیر مجاز نمی‌تواند بسادگی سیگنال ارسالی را تشخیص داده، دریافت نماید

مزایای ارسال به روش طیف گسترده

- **مقاومت در برابر تداخلات باریک-باند:**

- تداخلات باریک-باند بخش کوچکی از سیگنال طیف گسترده را تحت تاثیر قرار میدهند
- باعث افزایش نسبی BER میشوند، اما خللی در دریافت سیگنال ایجاد نمی‌شود

- **مقاومت در برابر کور کردن (Jamming):**

- از کارانداختن گیرنده های ماهواره‌ای، از حملات متداول جنگال برای از کارانداختن ارتباطات دشمن
- سیگنال کور کننده غالبا باریک-باند است ← در سمت گیرنده همچون نویز ← فقط میتواند BER را افزایش دهد.

- **مقاومت در برابر تداخلات هم‌فرکانس:**

- سایر سیگنال‌های طیف گسترده و هم فرکانس بصورت نویز دیده می‌شوند
- تنها باعث افت نسبی کیفیت سیگنال و کاهش نسبت SINR

- **داشتن تشعشعات توان کم، مفید برای طیف‌های مجوز آزاد:**

- حداکثر توان ارسالی بر واحد هرتز دارای محدودیت
- جلوگیری از تداخلات فلج کننده
- بدلیل تخفیف در تداخلات هم‌فرکانس بسیار مطلوب باندهای آزاد است

- **دشواری استراق سمع:**

- سیگنال‌های مختلف را در نظر یکدیگر بصورت نویز درمی‌آیند
- یک گیرنده‌ی غیر مجاز نمی‌تواند بسادگی سیگنال ارسالی را تشخیص داده، دریافت نماید

مزایای ارسال به روش طیف گسترده

- **مقاومت در برابر تداخلات باریک-باند:**

- تداخلات باریک-باند بخش کوچکی از سیگنال طیف گسترده را تحت تاثیر قرار میدهند
- باعث افزایش نسبی BER میشوند، اما خللی در دریافت سیگنال ایجاد نمی‌شود

- **مقاومت در برابر کور کردن (Jamming):**

- از کارانداختن گیرنده های ماهواره‌ای، از حملات متداول جنگال برای از کارانداختن ارتباطات دشمن
- سیگنال کور کننده غالبا باریک-باند است ← در سمت گیرنده همچون نویز ← فقط میتواند BER را افزایش دهد.

- **مقاومت در برابر تداخلات هم‌فرکانس:**

- سایر سیگنال‌های طیف گسترده و هم فرکانس بصورت نویز دیده می‌شوند
- تنها باعث افت نسبی کیفیت سیگنال و کاهش نسبت SINR

- **داشتن تشعشعات توان کم، مفید برای طیف‌های مجوز آزاد:**

- حداکثر توان ارسالی بر واحد هرتز دارای محدودیت
- جلوگیری از تداخلات فلج کننده
- بدلیل تخفیف در تداخلات هم‌فرکانس بسیار مطلوب باندهای آزاد است

- **دشواری استراق سمع:**

- سیگنال‌های مختلف را در نظر یکدیگر بصورت نویز درمی‌آیند
- یک گیرنده‌ی غیر مجاز نمی‌تواند بسادگی سیگنال ارسالی را تشخیص داده، دریافت نماید

مزایای ارسال به روش طیف گسترده

- **مقاومت در برابر تداخلات باریک-باند:**

- تداخلات باریک-باند بخش کوچکی از سیگنال طیف گسترده را تحت تاثیر قرار میدهند
- باعث افزایش نسبی BER میشوند، اما خللی در دریافت سیگنال ایجاد نمی‌شود

- **مقاومت در برابر کور کردن (Jamming):**

- از کارانداختن گیرنده های ماهواره‌ای، از حملات متداول جنگال برای از کارانداختن ارتباطات دشمن
- سیگنال کور کننده غالبا باریک-باند است ← در سمت گیرنده همچون نویز ← فقط میتواند BER را افزایش دهد.

- **مقاومت در برابر تداخلات هم‌فرکانس:**

- سایر سیگنال‌های طیف گسترده و هم فرکانس بصورت نویز دیده می‌شوند
- تنها باعث افت نسبی کیفیت سیگنال و کاهش نسبت SINR

- **داشتن تشعشعات توان کم، مفید برای طیف‌های مجوز آزاد:**

- حداکثر توان ارسالی بر واحد هرتز دارای محدودیت
- جلوگیری از تداخلات فلج کننده
- بدلیل تخفیف در تداخلات هم‌فرکانس بسیار مطلوب باندهای آزاد است

- **دشواری استراق سمع:**

- سیگنال‌های مختلف را در نظر یکدیگر بصورت نویز درمی‌آیند
- یک گیرنده‌ی غیر مجاز نمی‌تواند بسادگی سیگنال ارسالی را تشخیص داده، دریافت نماید

در میدان عمل: کورکننده های هوشمند

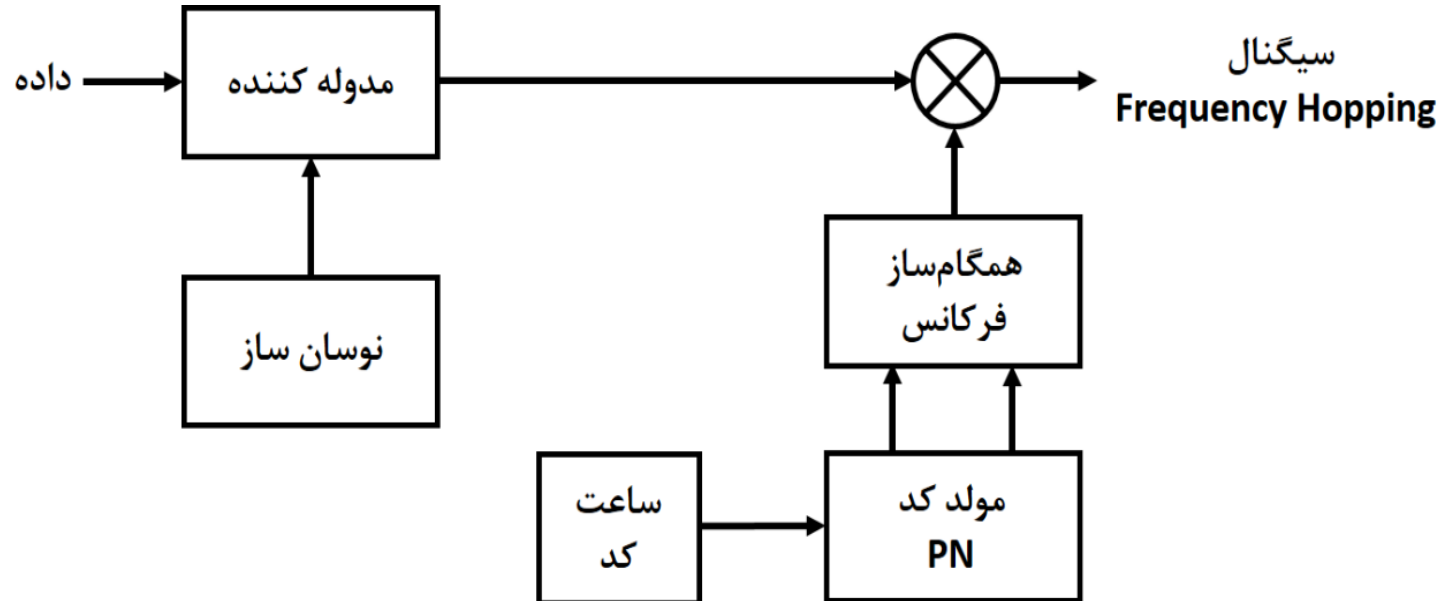
- بمب های انفجاری تعبیه شده (Improvised Explosive Devices: IED)
 - یکی از عوامل زمین گیر کننده که بیشترین تلفات را نیز از ارتش آمریکا در عراق گرفته
 - غالبا در کنار جاده ها و در مسیر عبور نیروهای متخاصم (Road Side Bombs)
 - برخی از انواع IED ها از طریق سیگنال بیسیم و از فاصله نسبتا دور منفجر می شوند
 - هنگامی که خود روی قربانی به شعاع تاثیر بمب می رسد، طرف مقابل با ارسال سیگنالی مدار چاشنی بمب را فعال می کند و بمب منفجر می شود.
- یکی از راهکارهای مقابله با این گونه IED، کور کردن لینک ارتباطی بمب
 - توسط خودروی قربانی و در محدوده فرکانسی مشخصی یک سیگنال ساده با انرژی بسیار بالا
 - چون بمب در مجاورت خودروی قربانی قرار دارد بنابراین سیگنال کور کننده را قویتر از سیگنال فرمان دریافت خواهد نمود
 - علاوه بر بمب خوش را هم کور می کند.
 - کور کردن هوشمند
 - سیستم کور کننده بطور مداوم مشغول گوش دادن به پهنه وسیعی از طیف
 - هرگاه فعالیتی در جایی از طیف احساس نماید، همان محدوده فرکانس را با تمام توان کور می کند

انواع سیستم های طیف گسترده

- سیستم های پرش فرکانسی (Frequency Hopping SS)
 - با تغییر پی در پی فرکانس حامل، انرژی سیگنال را در پهنه وسیعی از طیف توزیع میکند.
- سیستم های ضرب مستقیم (Direct Sequence SS)
 - با جایگزینی هر بیت داده با یک رشته از بیتها (چیپ) پهنای باند سیگنال پایه (baseband) افزایش داده می شود.

سیستم طیف گسترده پخش فرکانس Spread Spectrum (FHSS)

- سیگنال ارسالی بجای اینکه توسط یک فرکانس حامل مدوله شود، توسط یک مجموعه N تایی از فرکانسهای حامل f_1, \dots, f_N مدوله می گردد
- هر فرکانس حامل تنها برای مدت معینی برابر T_h استفاده می شود
- مدولاسیون هر سیگنال حامل معمولاً از خانواده FSK

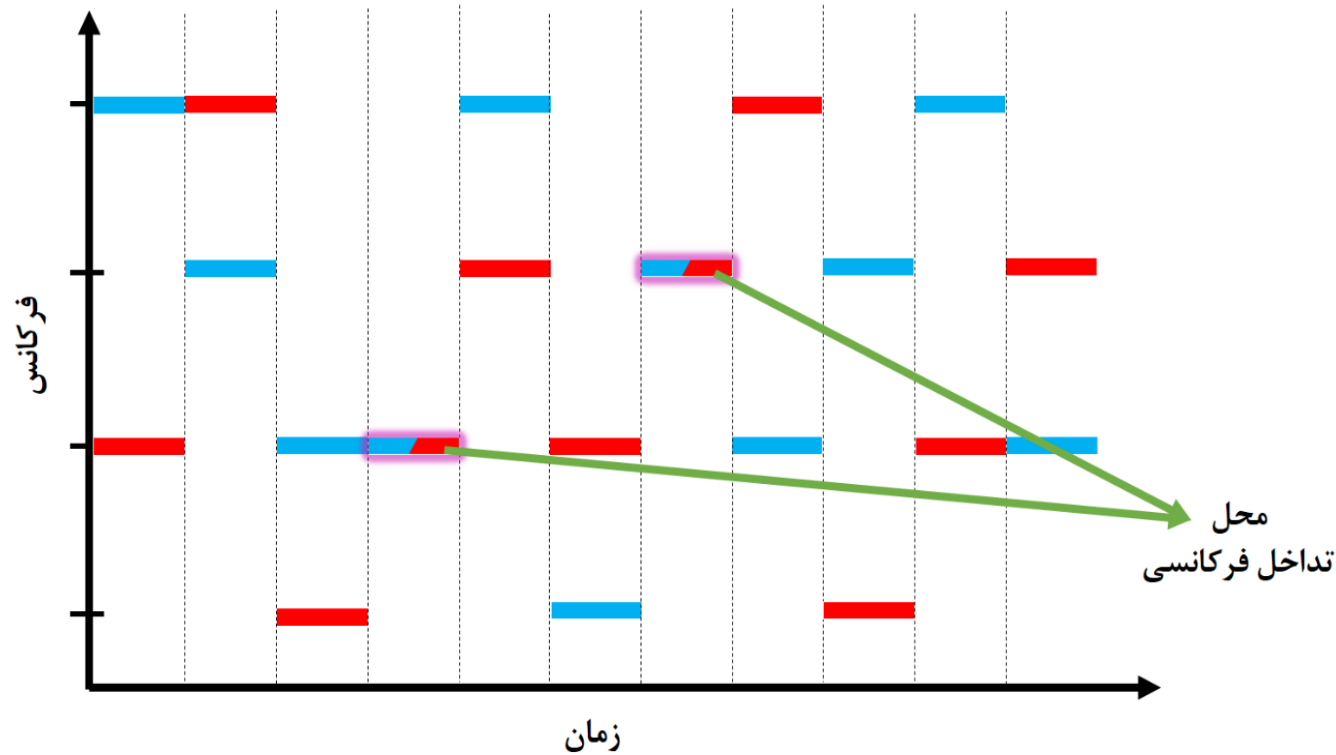


FHSS

- ترتیب انتخاب فرکانسها یک الگوی شبه-تصادفی
- احتمال اینکه دو فرستنده همزمان از یک فرکانس حامل استفاده کنند کوچک است

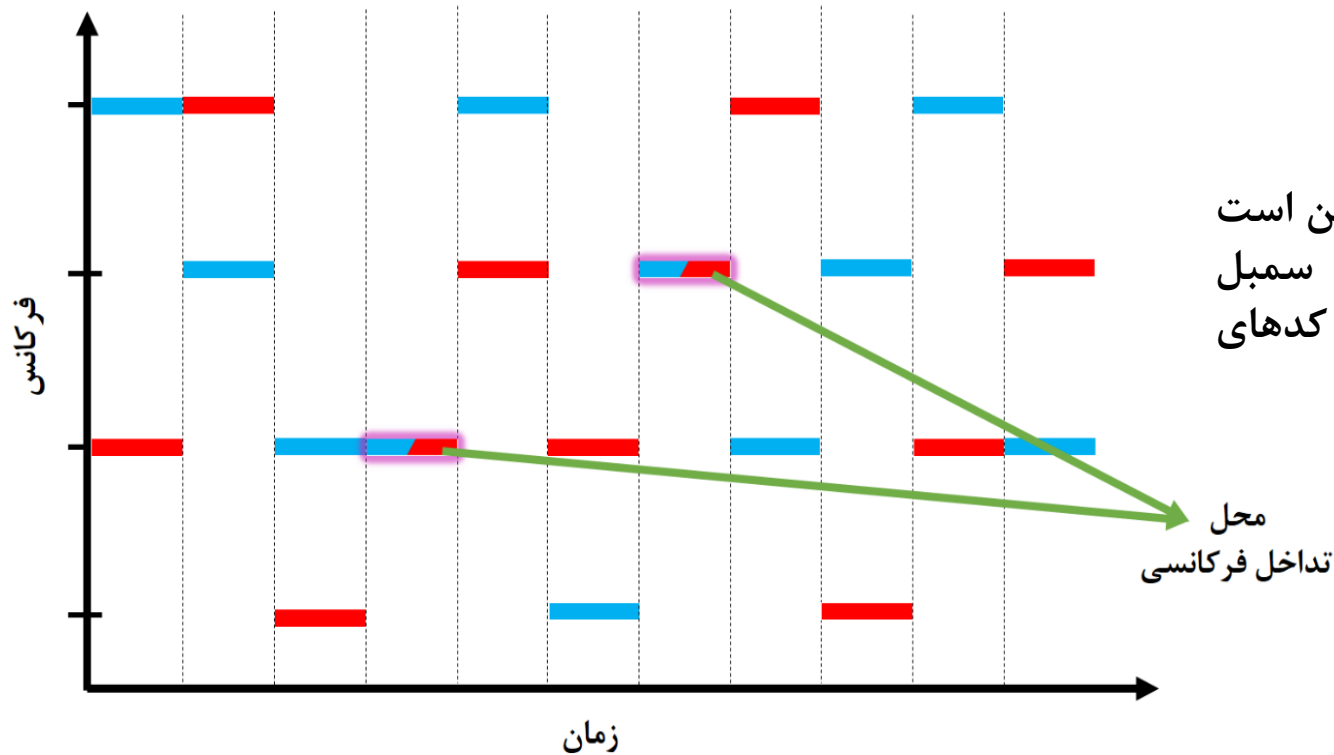
FHSS

- ترتیب انتخاب فرکانسها یک الگوی شبه-تصادفی
- احتمال اینکه دو فرستنده همزمان از یک فرکانس حامل استفاده کنند کوچک است



FHSS

- ترتیب انتخاب فرکانسها یک الگوی شبه-تصادفی
- احتمال اینکه دو فرستنده همزمان از یک فرکانس حامل استفاده کنند کوچک است



تداخلات هم فرکانس تنها ممکن است باعث خراب شدن یکی دو سمبل شوند که آنهم با استفاده از کدهای تصحیح خطا قابل اصلاح است

محل
تداخل فرکانسی

چگالی توان بر واحد هرتز برای سیگنال FHSS

- قله‌های انرژی حول مجموعه گامهای فرکانسی

$$E_s = S \cdot T_s = S / R_s$$

$$E_h = S \cdot T_h$$



شیوه‌های FHSS از این نظر که هر گام فرکانسی حاوی چند سمبل است، به دو دسته کند و تند تقسیم می‌شوند

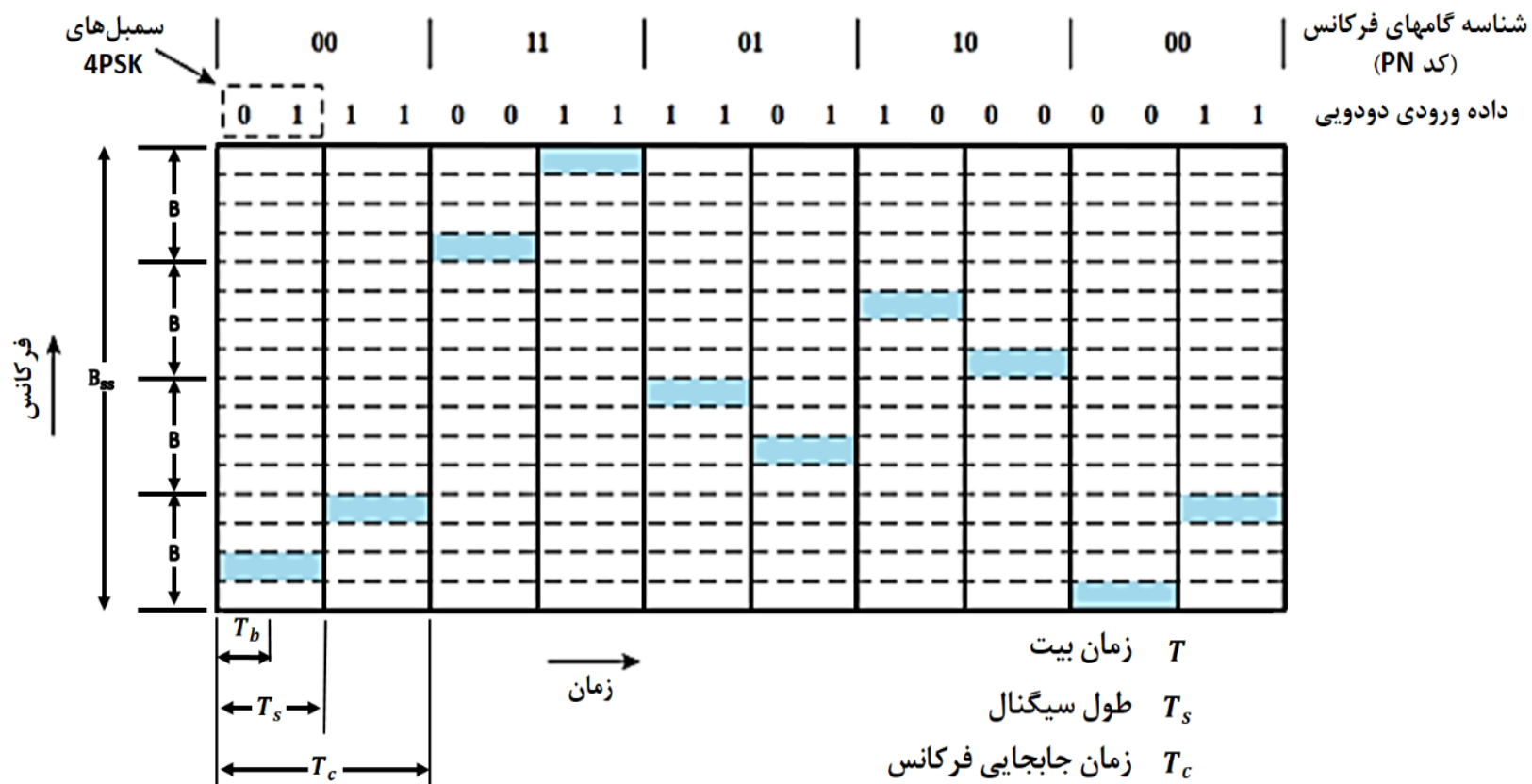
• FHSS کند:

- مدت زمان هر گام بزرگتر از طول سمبل ($T_h \geq T_s$)
- چند سمبل متوالی توسط یک گام فرکانس یکسان مدوله می‌شوند
- طراحی ساده‌تر
- در صورت تداخلی بجای یک سمبل چند سمبل متوالی خراب خواهند شد

• FHSS تند:

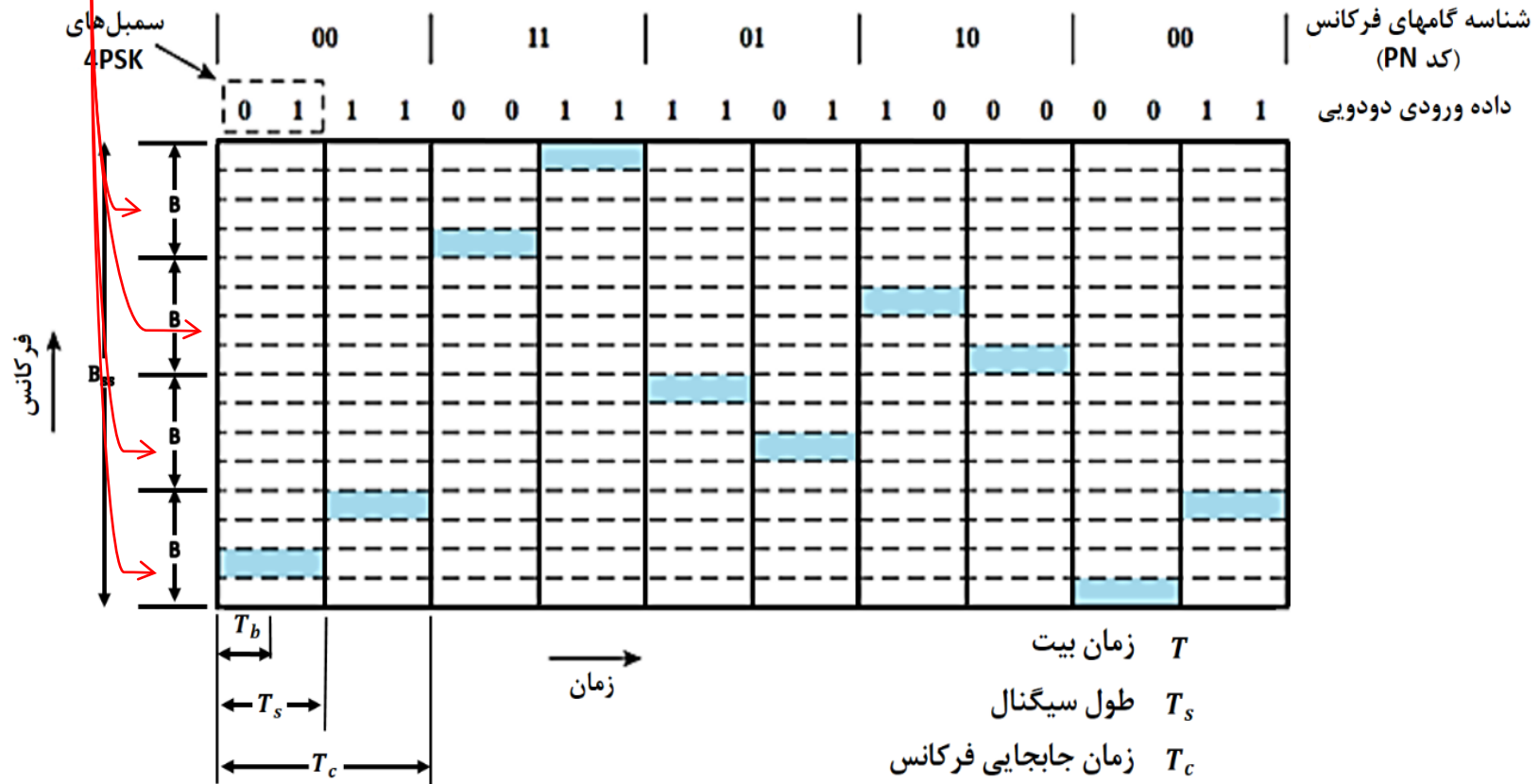
- یک سمبل طی چند گام متوالی ارسال می‌شود
- اگر برخوردی صورت بگیرد باز هم سمبل در گامهای بعدی ارسال می‌شود

FHSS کند



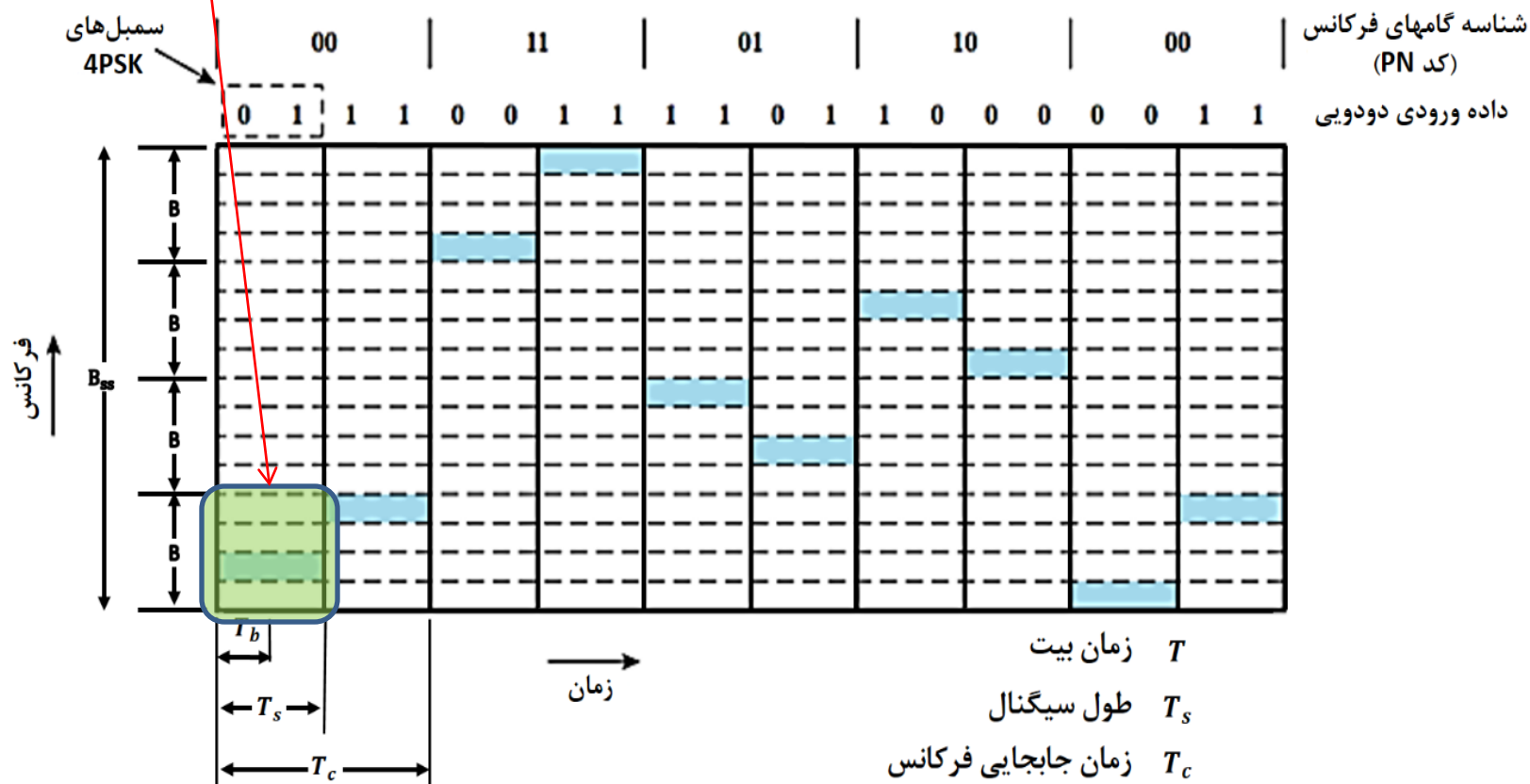
FHSS کند

۴ گام فرکانس



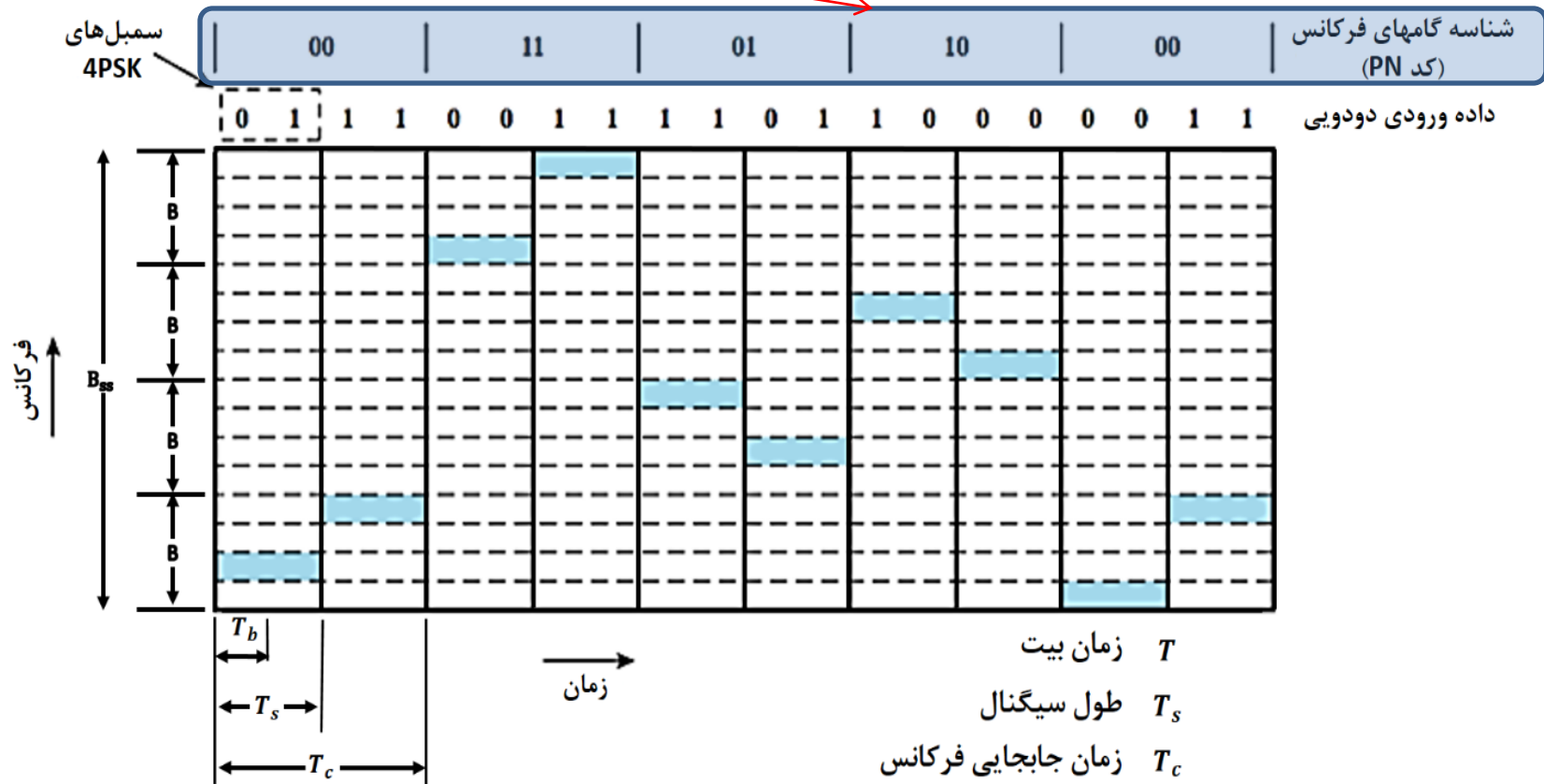
FHSS کند

مدولاسیون بکاررفته: 4FSK



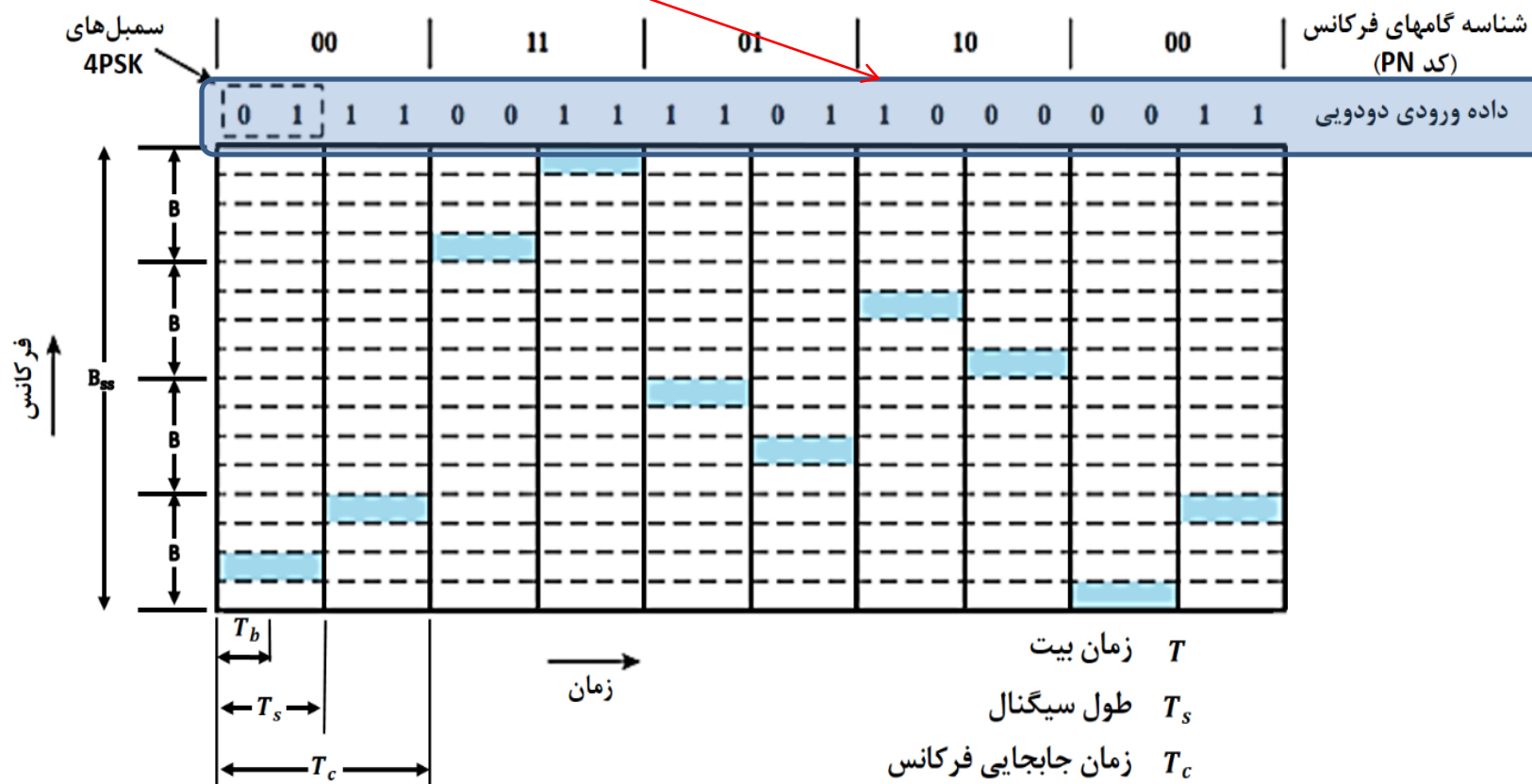
FHSS کند

شماره گام فرکانس



کند FHSS

شماره سمبل مدولاسیون



FHSS کند



خطر خطای متوالی (Burst Error)

- لینکی با $BER=10^{-5}$ مفروض است. در حالت اول فرض کنید خطاهای بیتی مطابق معمول غیر متوالی باشند، به این معنی که رخداد خطاها از یکدیگر مستقل است. اکنون فرض کنید از کد تصحیح خطا به طول بلوک ۱۰ بیت و تعداد بیت اصلاح پذیر ۱ استفاده شود. در چنین شرایطی احتمال وجود یک بیت خطا در یک بلوک برابر 10^{-4} است که قابل اصلاح خواهد بود. از طرفی احتمال وقوع بیش از یک بیت خطا در یک بلوک تقریباً برابر 0.5×10^{-8} است که بسیار ناچیز است. بنابراین نتیجه می‌گیریم احتمال وقوع خطای غیر قابل اصلاح حدود 10^{-8} و قابل صرف‌نظر است و کد FEC استفاده شده مناسب بوده.
- حال فرض کنید خطا متوالی باشد، برای مثال هرگاه خطا اتفاق می‌افتد دو بیت متوالی دچار خطا شوند. در چنین شرایطی خطاهای تک بیتی و قابل اصلاح نادر هستند و اغلب خطاها غیر قابل اصلاح خواهند بود. بنابراین کد FEC بکار رفته عملاً هیچ اثری جز افزایش پهنای باند سیگنال ارسالی نداشته است مگر اینکه از کد FEC با ۲ بیت اصلاح پذیری، استفاده کنیم. در مقایسه با خطاهای مستقل در حالت قبل، احتمال دو بیت خطای متوالی برابر 0.5×10^{-5} خواهد بود که با توجه به عدم امکان تصحیح دو بیت خطا، مقدار نهایی BER پس از استفاده از کدی با اندازه بلوک ۱۰ و ۱ بیت اصلاح پذیری هم همین مقدار خواهد ماند.
- برای مقابله با خطاهای متوالی یکی از بهترین راهکارها استفاده تکنیک interleaving است

تکنیک طیف گسترده ضرب مستقیم

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- هر بیت در سیگنال داده‌ی باند پایه با چندین بیت که اصطلاحاً چیپ (chip) نامیده می‌شوند جایگزین می‌گردد

- $R_c = NR_b$ و $B_{ss} = NB$

تکنیک طیف گسترده ضرب مستقیم

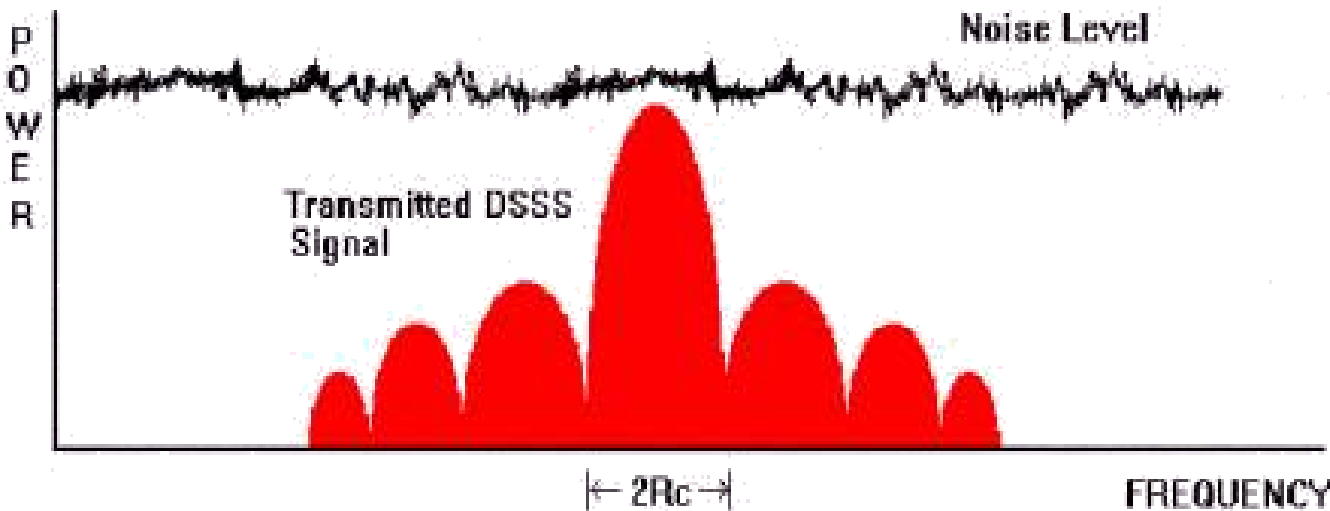
Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- هر بیت در سیگنال داده‌ی باند پایه با چندین بیت که اصطلاحاً چپ (chip) نامیده می‌شوند جایگزین می‌گردد

- $R_c = NR_b$ و $B_{ss} = NB$

- با بزرگ گرفتن مقدار N به اندازه کافی، این امکان وجود دارد که چگالی انرژی طیف سیگنال ارسالی حتی به کمتر از نویز سفید یعنی N_0 برسد

- تفکیک سیگنال SS از نویز بدون دانستن دنباله چپ بکار رفته، عملاً غیر ممکن



تکنیک طیف گسترده ضرب مستقیم

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

(chip

- $R_c = N$

انرژی

میر ممکن

P
O
W
E
R

Transmitted DSSS
Signal

$\leftarrow 2R_c \rightarrow$

FREQUENCY

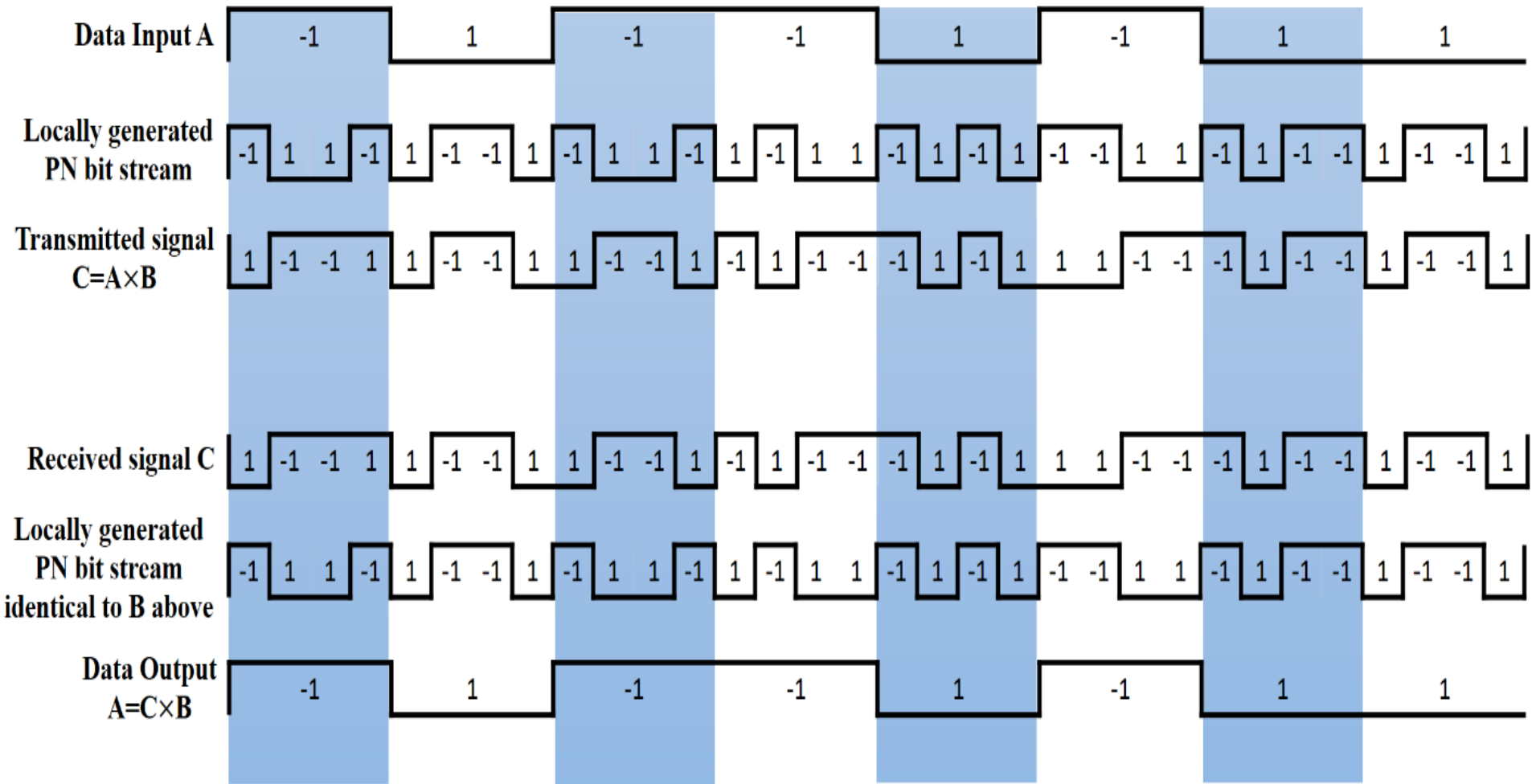
ه
نا

ب

ط

ت

DSSS مثال



$$H_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$H_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$H_{N+1} = \begin{pmatrix} H_N & H_N \\ H_N & H_N \end{pmatrix}$$