سیگنال‌ها و سیستم‌ها

درس ۲۲

سیستم‌های مخابراتی (۱)

Communication Systems (1)

کاظم فولادی قلعه

دانشکده مهندسی، پردیس فارابی

دانشگاه تهران

http://courses.fouladi.ir/sigsys

طرح درس

COURSE OUTLINE

مدولاسیون دامنه‌ی نمایی مختلط
Complex Exponential Amplitude Modulation
مدولاسیون دامنه‌ی سینوسی
Sinusoidal AM
دمدولاسیون دامنه‌ی سینوسی
Demodulation of Sinusoidal AM
مدولاسیون دامنه‌ی تک–باند کناری
Single-Sideband (SSB) AM
مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی
Frequency-Division Multiplexing
گیرنده‌های سوپرهترودین *
Superheterodyne Receivers

سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

۱

مدولاسیون

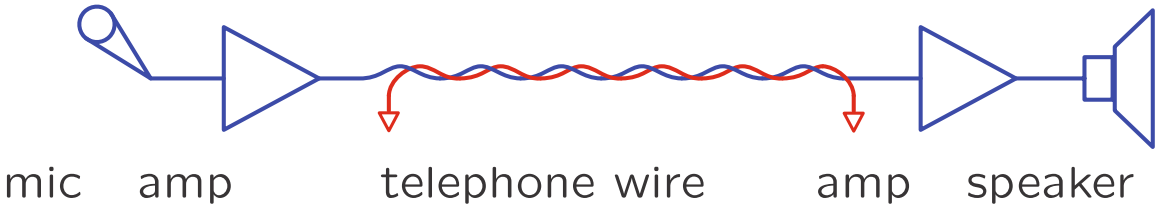
مدولاسیون

MODULATION

مدولاسیون *Modulation*	گنجاندن اطلاعات یک سیگنال (پیام) در یک سیگنال دیگر (حامل)

کاربرد «سیگنال‌ها و سیستم‌ها» در سیستم‌های مخابراتی

مثال: انتقال صدا از طریق سیم‌های (مسی) تلفن

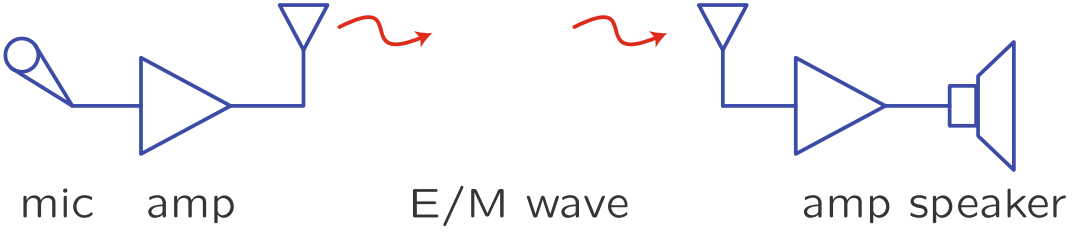


مدولاسیون

مثال: مخابرات بی‌سیم (۱ از ۲)

WIRELESS COMMUNICATION

در سیستم‌های مخابراتی سلولی، سیگنال‌ها از طریق موج‌های الکترومغناطیسی (E/M) فرستاده می‌شوند.



برای ارسال و دریافت کارآمد، طول آنتن باید از مرتبه‌ی طول موج باشد.

سیگنال گفتار با کیفیت تلفن، حاوی فرکانس‌هایی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز است.
طول آنتن چه‌قدر باید باشد؟

مدولاسیون

مثال: مخابرات بی‌سیم (۲ از ۲)

WIRELESS COMMUNICATION

Wavelength is $\lambda = c/f$ so the lowest frequencies (200 Hz) produce the longest wavelengths

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \,\text{m/s}}{200\,\text{Hz}} = 1.5 \times 10^6\,\text{m} = 1500\,\text{km}\,.$$

and the highest frequencies (3000 Hz) produce the shortest wavelengths

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \,\text{m/s}}{3000\,\text{Hz}} = 10^5\,\text{m} = 100\,\text{km}\,.$$

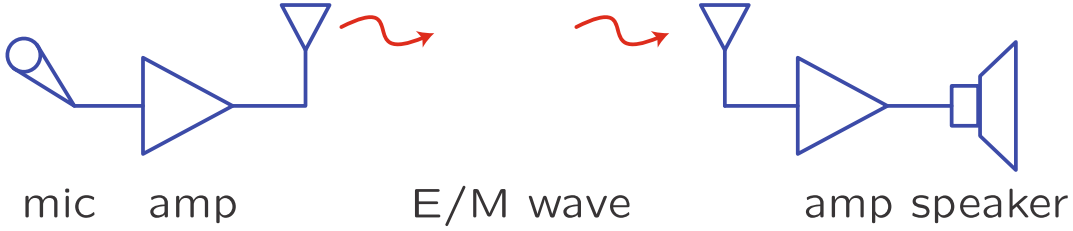
On the order of hundreds of miles!

مدولاسیون

مثال: مخابرات بی‌سیم

WIRELESS COMMUNICATION

چه فرکانسی از موج‌های الکترومغناطیسی (E/M) با یک آنتن ۱۰ سانتی‌متری مطابقت دارد؟



A wavelength of $10\,\text{cm}$ corresponds to a frequency of

$$f = \frac{c}{\lambda} \sim \frac{3 \times 10^8\,\text{m/s}}{10\,\text{cm}} \approx 3\,\text{GHz}\,.$$

تلفن‌های همراه (سلولی) جدید از فرکانس‌هایی نزدیک به ۲ گیگاهرتز استفاده می‌کنند.

مدولاسیون

مثال: مخابرات بی‌سیم

WIRELESS COMMUNICATION

سیگنال گفتار با رسانه‌های بی‌سیم مطابقت ندارد.

بسیاری از کاربردها، نیازمند استفاده از سیگنال‌هایی هستند که به‌خوبی با رسانه‌های لازم مطابقت ندارند.

signal	applications
audio	telephone, radio, phonograph, CD, cell phone, MP3
video	television, cinema, HDTV, DVD
internet	coax, twisted pair, cable TV, DSL, optical fiber, E/M

در این موارد اغلب می‌توان سیگنال را به‌گونه‌ای تغییر داد که مطابقت بهتری حاصل شود.

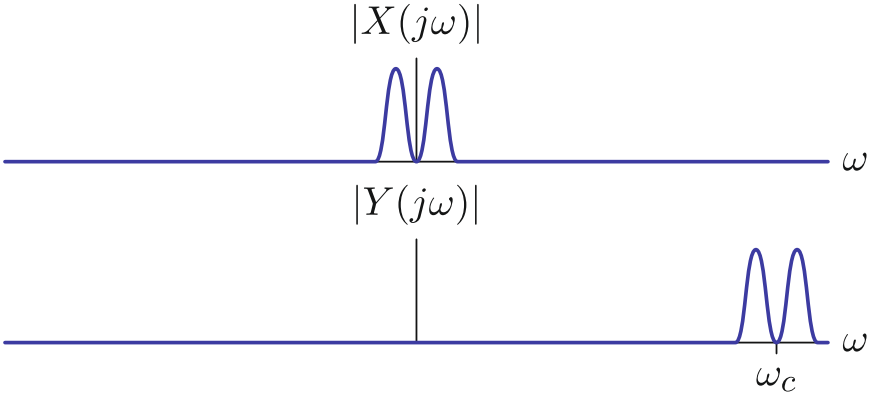
یکی از استراتژی‌های مطابقت ساده بر اساس **مدولاسیون** است.

مدولاسیون

مثال

MODULATION

سیگنال Y را به‌گونه‌ای می‌سازیم که اطلاعات فرکانسی صوتی در X را با استفاده از مؤلفه‌های فرکانسی نزدیک ۲ گیگاهرتز کدگذاری کند.



$$y(t) = x(t)\, e^{j\omega_c t}$$

مدولاسیون

انواع

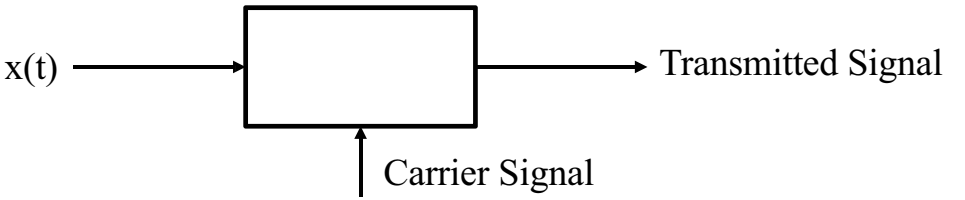
روش‌های مختلفی برای مدولاسیون [گنجاندن سیگنال «پیام» در یک سیگنال «حامل»] وجود دارد.

Amplitude Modulation (AM): $y_1(t) = x(t)\cos(\omega_c t)$

Phase Modulation (PM): $y_2(t) = \cos(\omega_c t + kx(t))$

Frequency Modulation (FM): $y_3(t) = \cos\left(\omega_c t + k\int_{-\infty}^{t} x(\tau)d\tau\right)$

The Concept of Modulation

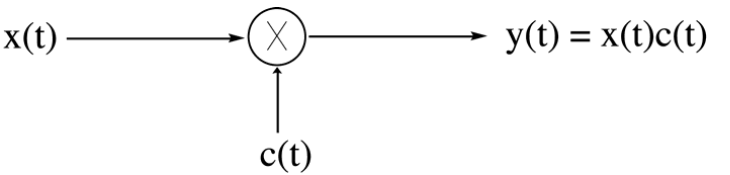


Why?

- More efficient to transmit E&M signals at higher frequencies
- Transmitting multiple signals through the same medium using different carriers
- Transmitting through "channels" with limited passbands
- Others...

How?

- *Many* methods
- Focus here for the most part on *Amplitude Modulation* (AM)



سیگنال‌ها و سیستم‌ها

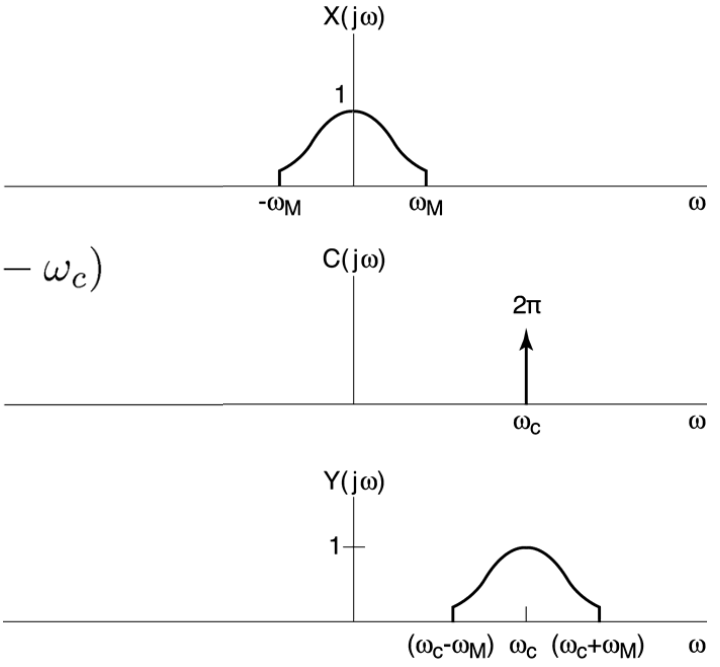
سیستم‌های مخابراتی (۱)

۲

مدولاسیون دامنه‌ی نمایی مختلط

*A*mplitude *M*odulation (AM) of a Complex Exponential Carrier

$$
\begin{aligned}
c(t) &= e^{j\omega_c t}, \quad \omega_c - \text{carrier frequency} \\
y(t) &= x(t)e^{j\omega_c t} \\
Y(j\omega) &= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * C(j\omega) \\
&= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * 2\pi\delta(\omega - \omega_c) \\
&= X(j(\omega - \omega_c))
\end{aligned}
$$

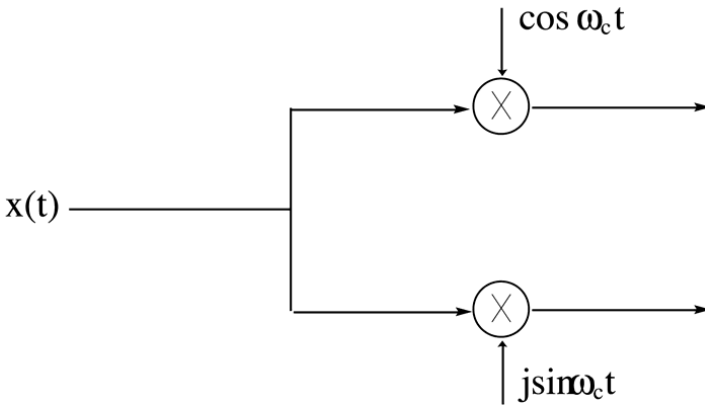


Demodulation of Complex Exponential AM

$$e^{j\omega_c t} = \cos\omega_c t + j\sin\omega_c t$$

$$\Downarrow$$

Corresponds to two separate modulation channels (quadratures) with carriers 90^o out of phase

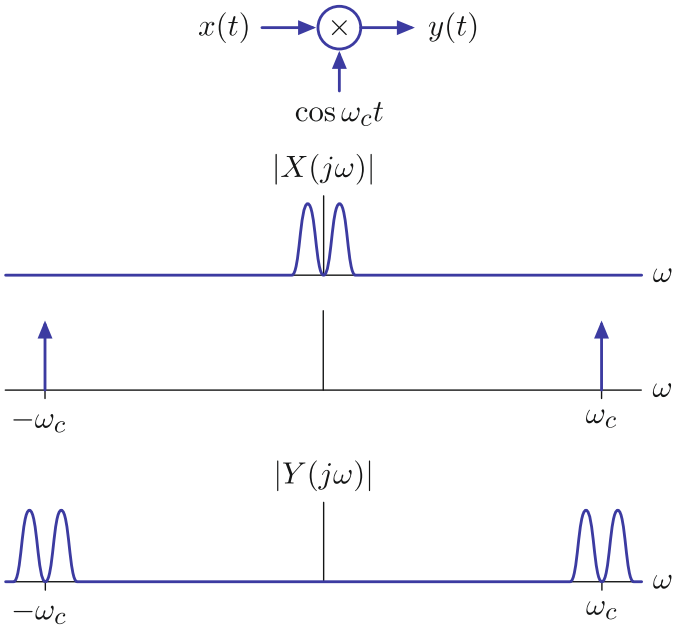


مدولاسیون دامنه

AMPLITUDE MODULATION (AM)

مدولاسیون دامنه
Amplitude Modulation (AM)

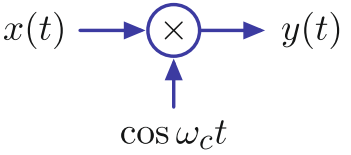
ضرب یک سیگنال در یک **حامل** سینوسی

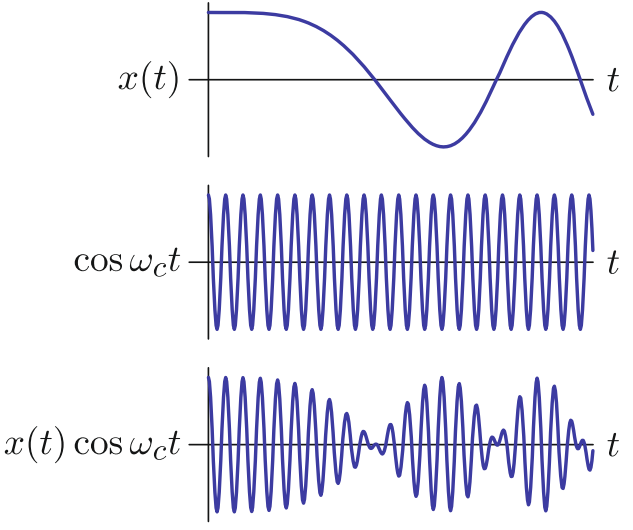


AM مؤلفه‌های فرکانسی را به‌میزان $\pm\omega_c$ شیفت می‌دهد.

مدولاسیون دامنه

AMPLITUDE MODULATION (AM)





در AM، سیگنال، دامنه‌ی حامل را مدوله می‌کند.

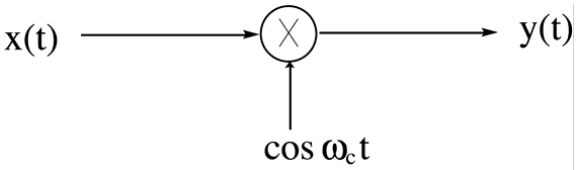
سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

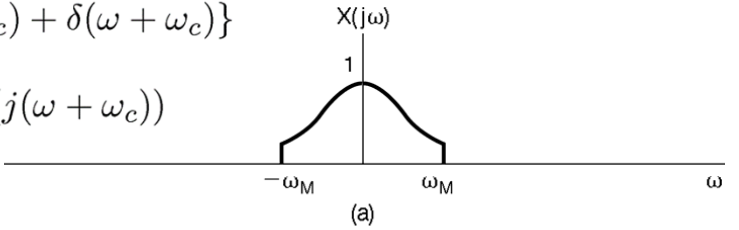
۳

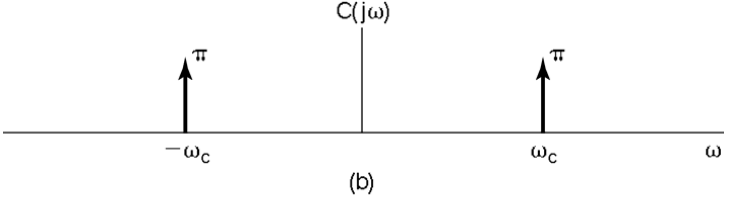
مدولاسیون دامنه‌ی سینوسی

Sinusoidal AM



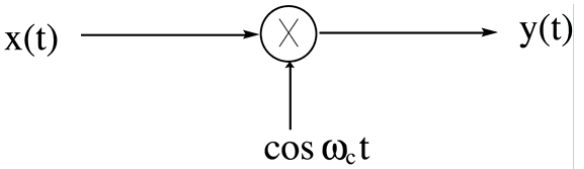
$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi}X(j\omega) * \pi\{\delta(\omega-\omega_c)+\delta(\omega+\omega_c)\}$$
$$= \frac{1}{2}X(j(\omega-\omega_c)) + \frac{1}{2}X(j(\omega+\omega_c))$$



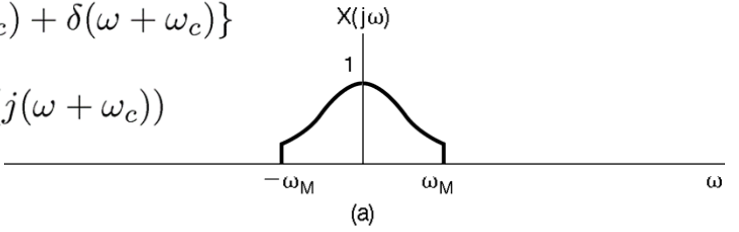


Drawn assuming
$\omega_c > \omega_M$

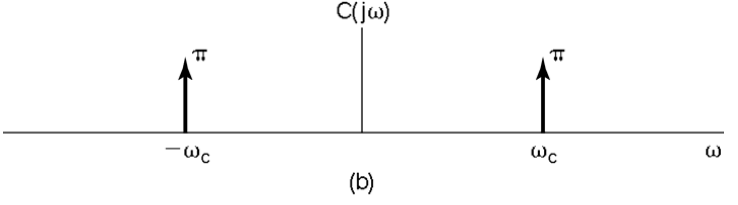
Sinusoidal AM

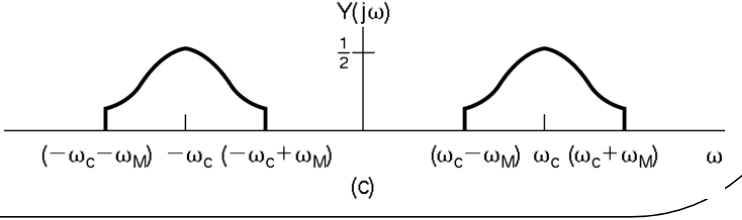


$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * \pi\{\delta(\omega-\omega_c)+\delta(\omega+\omega_c)\}$$
$$= \frac{1}{2} X(j(\omega-\omega_c)) + \frac{1}{2} X(j(\omega+\omega_c))$$



Drawn assuming
$\omega_c > \omega_M$





سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

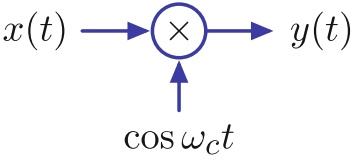
۴

دمدولاسیون دامنه‌ی سینوسی

دمدولاسیون

DEMODULATION

چگونه می‌توانیم سیگنال اصلی ($x(t)$) را از سیگنال مدوله‌شده ($y(t)$) بازیابی کنیم؟



X می‌تواند از ضرب در حامل و سپس عبور از یک فیلتر پایین‌گذر بازیابی شود.
(این فرآیند دمدولاسیون ناهمگام نام دارد.)

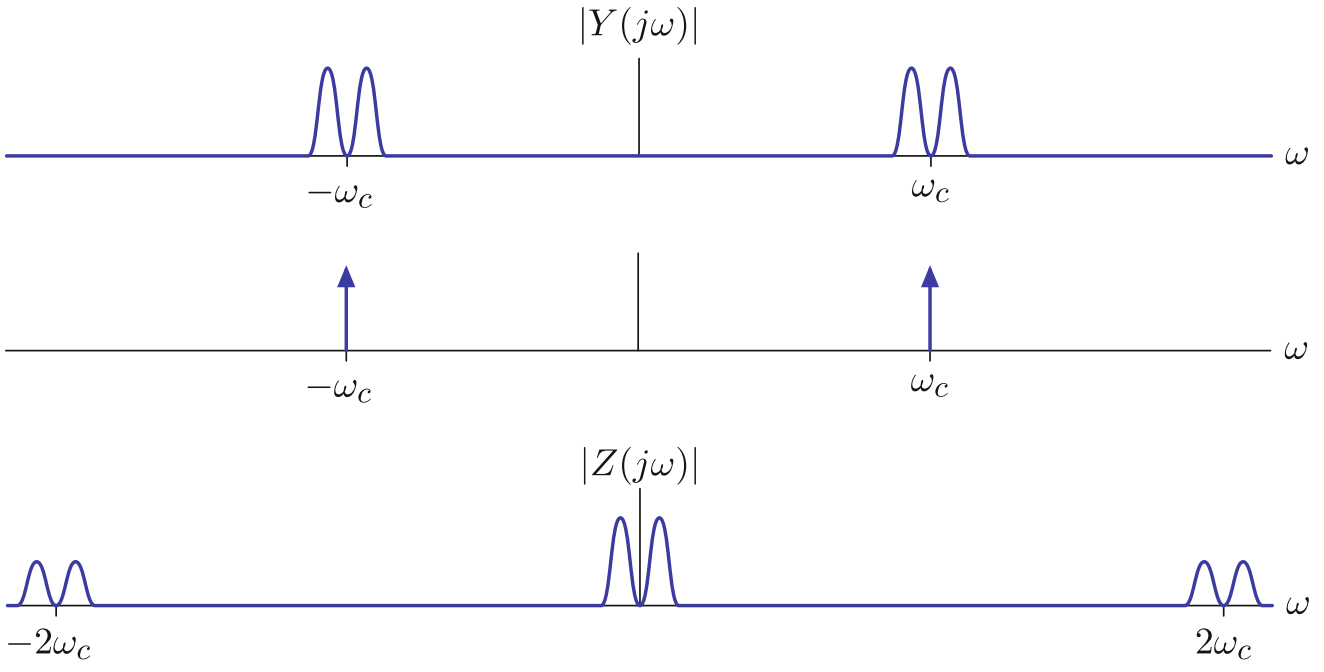
$$y(t) = x(t) \cos \omega_c t$$

$$z(t) = y(t) \cos \omega_c t = x(t) \times \cos \omega_c t \times \cos \omega_c t = x(t) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_c t) \right)$$

دمدولاسیون ناهمگام

SYNCHRONOUS DEMODULATION

دمدولاسیون ناهمگام: کانوولوشن در حوزه‌ی فرکانس

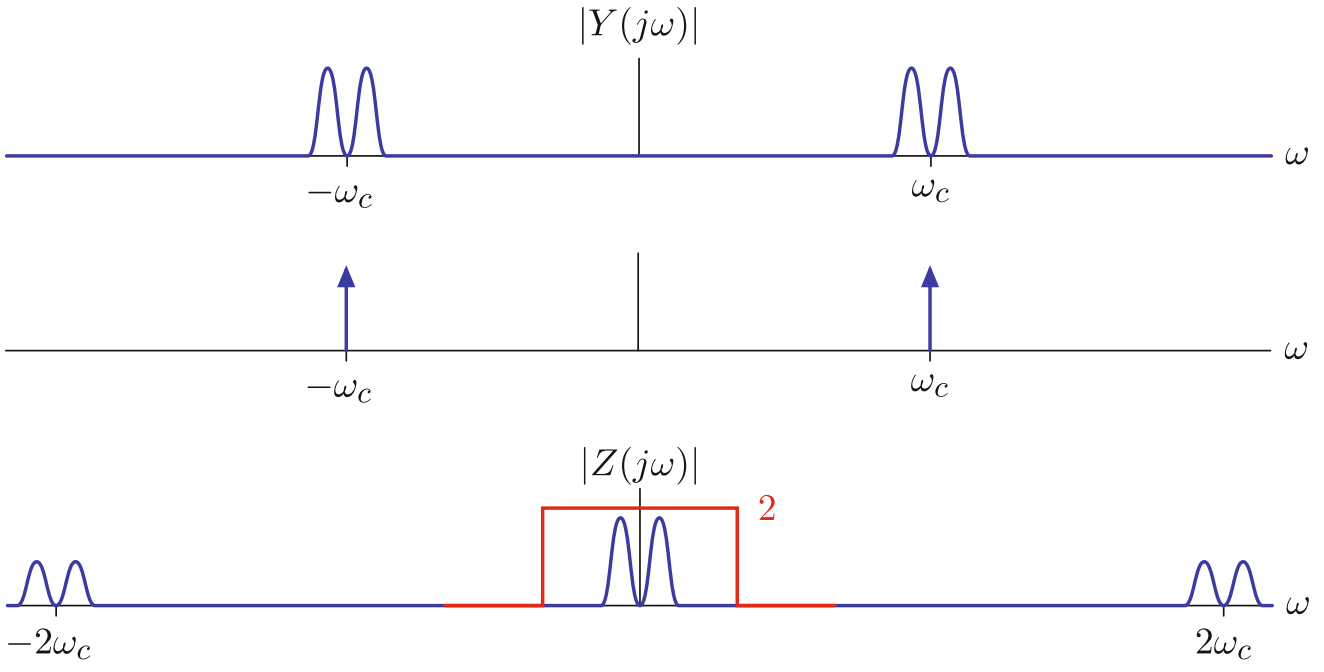


Prepared by Kazim Fouladi | Fall 2017 | 2nd Edition
کاظم فولادی

دمدولاسیون ناهمگام

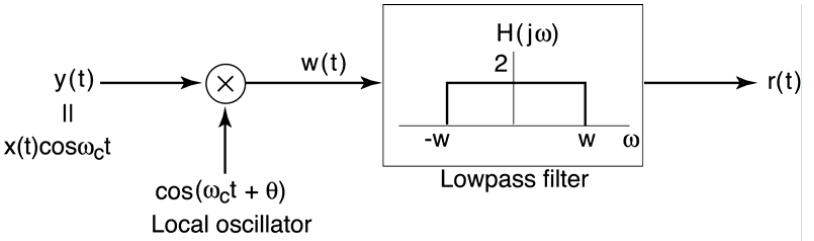
SYNCHRONOUS DEMODULATION

X می‌تواند به‌وسیله‌ی فیلتر پایین‌گذر بازیابی شود.

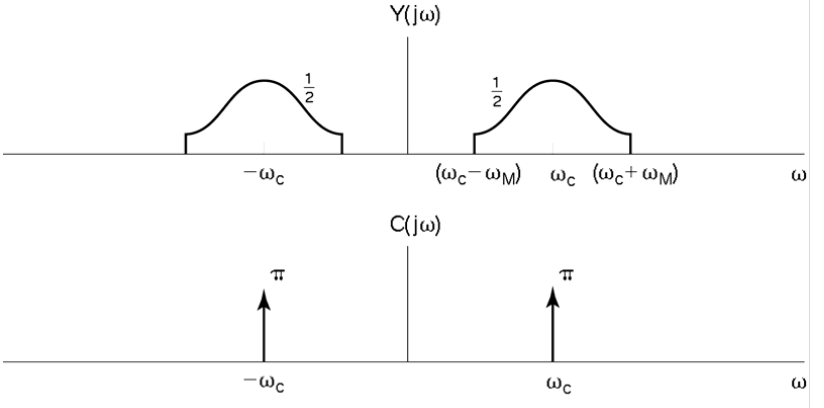


Prepared by Kazim Fouladi | Fall 2017 | 2nd Edition
کاظم فولادی

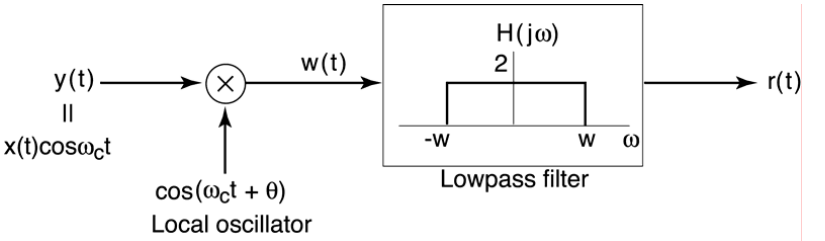
Synchronous Demodulation of Sinusoidal AM



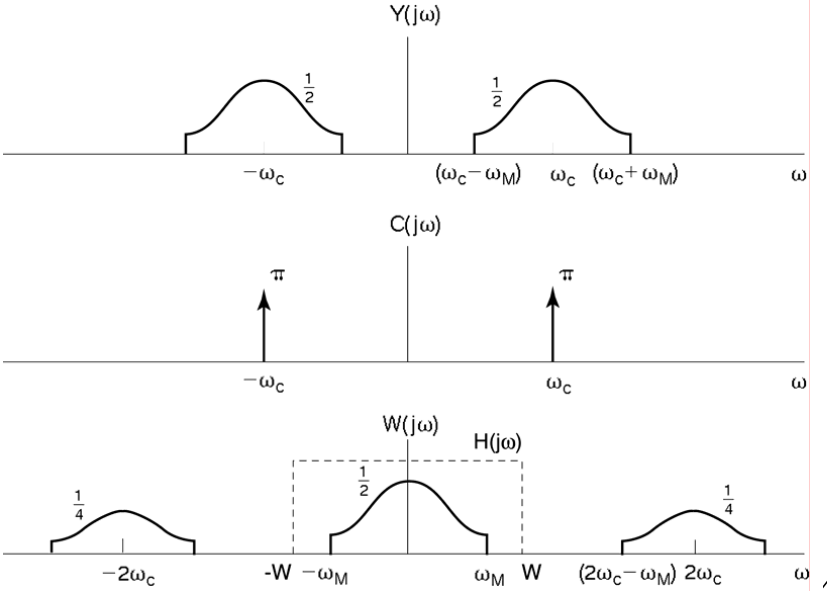
Suppose $\theta = 0$ for now,
$\Rightarrow$ Local oscillator is in phase with the carrier.



Synchronous Demodulation of Sinusoidal AM



Suppose $\theta = 0$ for now,
$\Rightarrow$ Local oscillator is in phase with the carrier.



Synchronous Demodulation in the Time Domain

$$w(t) = y(t)\cos\omega_c t = x(t)\cos^2\omega_c t = \frac{1}{2}x(t) + \underbrace{\frac{1}{2}x(t)\cos 2\omega_c t}_{\text{High-frequency signals filtered out by the LPF}}$$

Then $r(t) = x(t)$

Now suppose there is a phase difference, *i.e.* then ,0≠ θ

$$\begin{aligned} w(t) &= y(t)\cos(\omega_c t + \theta) = x(t)\cos\omega_c t\cos(\omega_c t + \theta) \\ &= \frac{1}{2}x(t)\cos\theta + \underbrace{\frac{1}{2}x(t)(\cos(2\omega_c t + \theta))}_{\text{HF signal}} \end{aligned}$$

Now $r(t) = x(t)\cos\theta$

Two special cases:

1) $\theta = \pi/2$, the local oscillator is 90° out of phase with the carrier, $\Rightarrow r(t) = 0$, signal unrecoverable.
2) $\theta = \theta(t)$ — slowly varying with time, $\Rightarrow r(t) \cong \cos[\theta(t)] \cdot x(t)$, $\Rightarrow$ time-varying "gain".

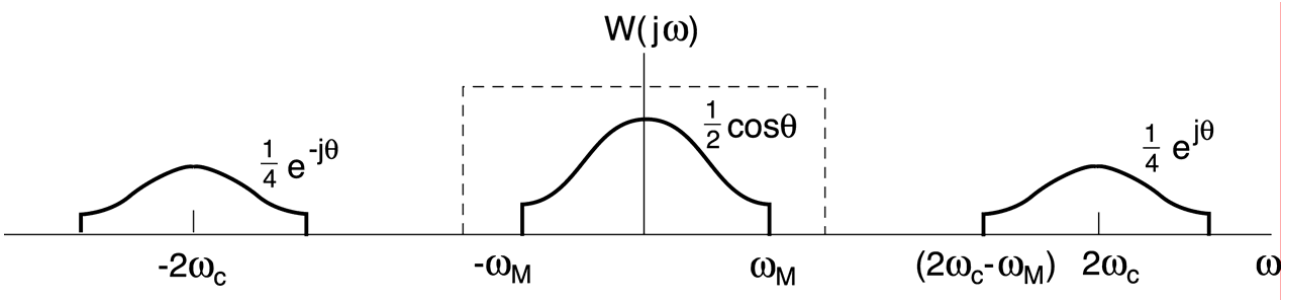
Synchronous Demodulation (with phase error) in the Frequency Domain

Demodulating signal – has phase difference θ w.r.t. the modulating signal

$$\cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2} e^{j\theta} e^{j\omega_c t} + \frac{1}{2} e^{-j\theta} e^{-j\omega_c t}$$

$$\Downarrow \mathcal{F}$$

$$\pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_c) + \pi e^{-j\theta} \delta(\omega + \omega_c)$$

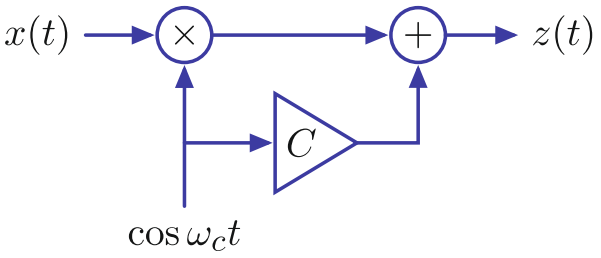


Again, the low-frequency signal ($\omega < \omega_M$) = 0 when $\theta = \pi/2$.

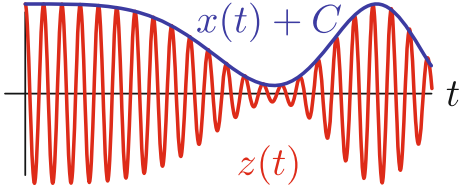
مدولاسیون دامنه با حامل

AM WITH CARRIER

یک راه برای همگام‌سازی فرستنده و گیرنده، ارسال حامل به‌همراه پیام است.



$$z(t) = x(t)\cos\omega_c t + C\cos\omega_c t = (x(t) + C)\cos\omega_c t$$

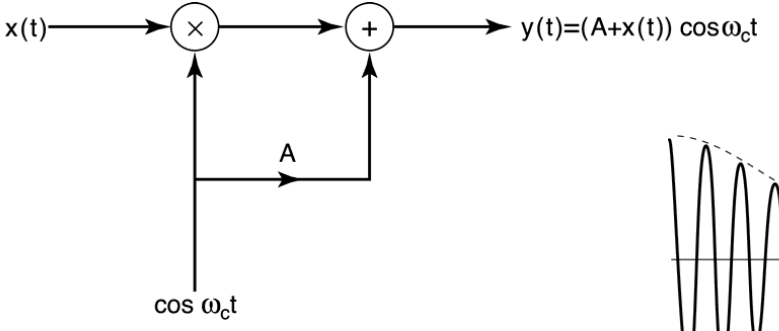


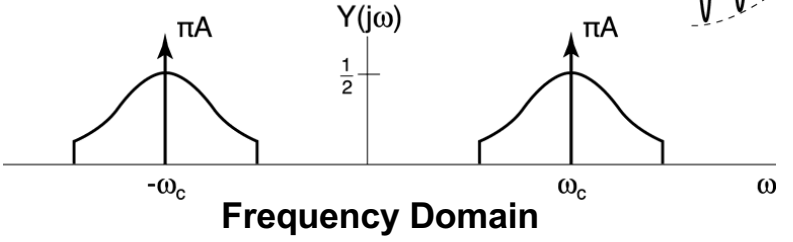
اضافه کردن حامل، معادل با شیفت دادن مقدار DC سیگنال $x(t)$ است.

اگر شیفت مقدار DC کافی باشد، پیام به‌سادگی کدگشایی می‌شود: پیام، پوش منهای یک مقدار ثابت است.

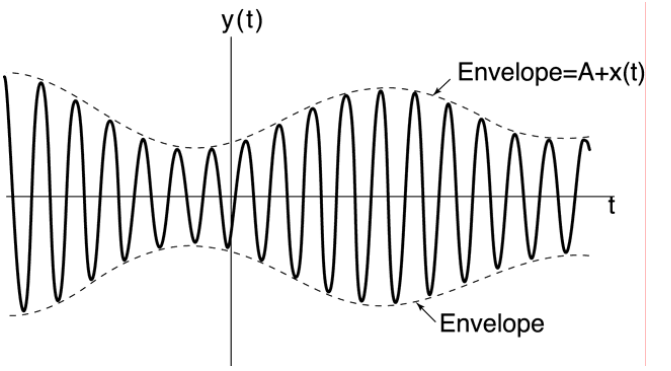
Alternative: Asynchronous Demodulation

- Assume $\omega_c >> \omega_M$, so signal envelope looks like $x(t)$
- Add same carrier with amplitude A to signal





Frequency Domain

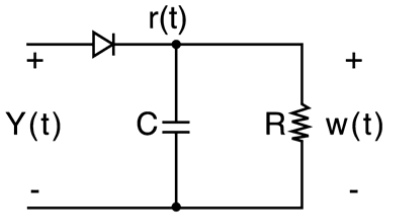


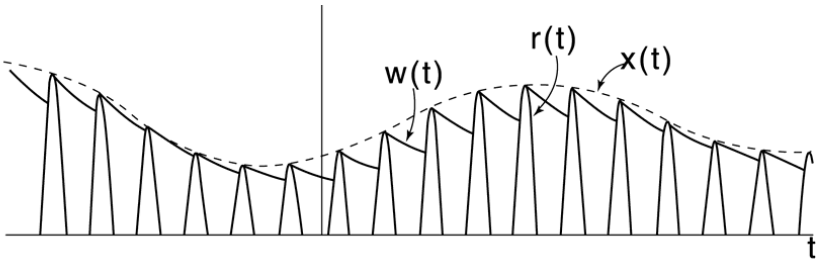
Time Domain

$A = 0 \Rightarrow$ DSB/SC (Double Side Band, Suppressed Carrier)

$A > 0 \Rightarrow$ DSB/WC (Double Side Band, With Carrier)

Asynchronous Demodulation (continued)
Envelope Detector





In order for it to function properly, the envelope function must be positive for all time, *i.e.* $A + x(t) > 0$ for all t.

Demo: Envelope detection for asynchronous demodulation.

Advantages of asynchronous demodulation:

— Simpler in design and implementation.

Disadvantages of asynchronous demodulation:

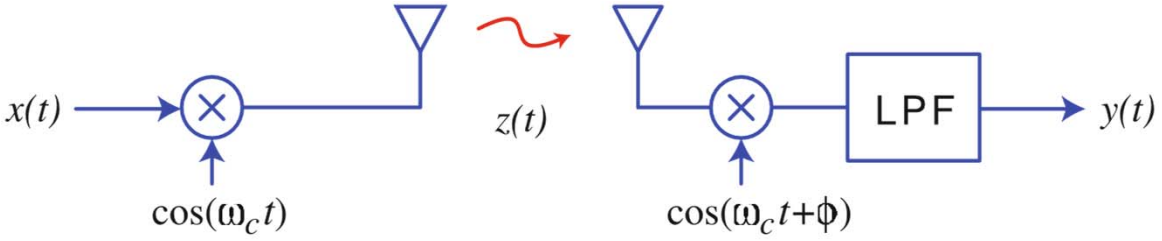
— Requires extra transmitting power $[A \cos \omega_c t]^2$ to make sure $A + x(t) > 0 \Rightarrow$ Maximum power efficiency = 1/3 (P8.27)

مدولاسیون دامنه با حامل

گیرنده‌ی رادیویی غیرگران

INEXPENSIVE RADIO RECEIVER

The problem with making an inexpensive radio receiver is that you must know the carrier signal exactly!

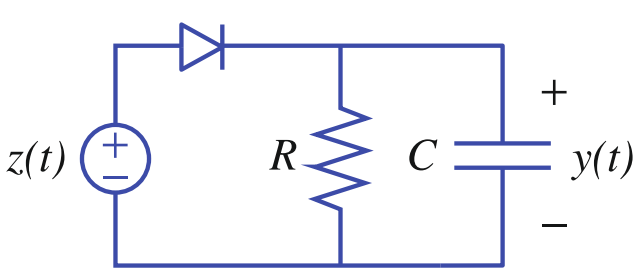


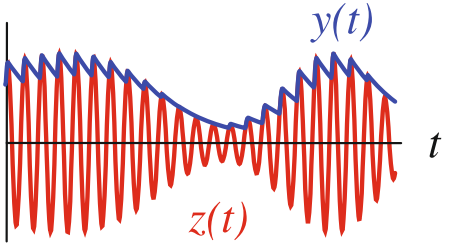
مدولاسیون دامنه با حامل

گیرنده‌ی رادیویی غیرگران

INEXPENSIVE RADIO RECEIVER

If the carrier frequency is much greater than the highest frequency in the message, AM with carrier can be demodulated with a peak detector.





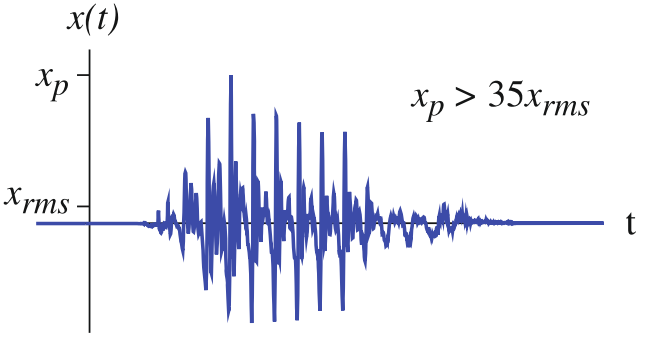
In AM radio, the highest frequency in the message is 5 kHz and the carrier frequency is between 500 kHz and 1500 kHz. This circuit is simple and inexpensive. But there is a problem.

مدولاسیون دامنه با حامل

گیرنده‌ی رادیویی غیرگران

INEXPENSIVE RADIO RECEIVER

AM with carrier requires more power to transmit the carrier
than to transmit the message!



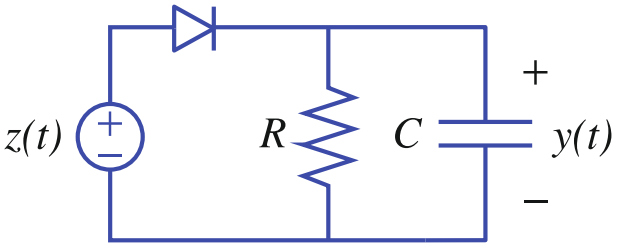
Speech sounds have high crest factors (peak value divided by rms value).
The DC offset C must be larger than x_p for simple envelope detection to work.
The power needed to transmit the carrier can be 352 ≈ 1000× that needed to transmit the message.
Okay for broadcast radio (WBZ: 50 kwatts).
Not for point-to-point (cell phone batteries wouldn't last long!).

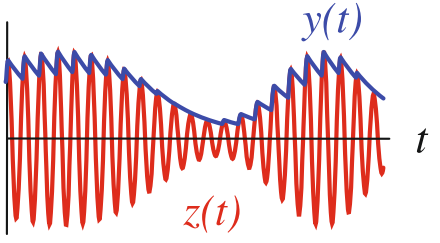
مدولاسیون دامنه با حامل

گیرنده‌ی رادیویی غیرگران

INEXPENSIVE RADIO RECEIVER

Envelope detection also cannot separate multiple senders.





سیگنال‌ها و سیستم‌ها

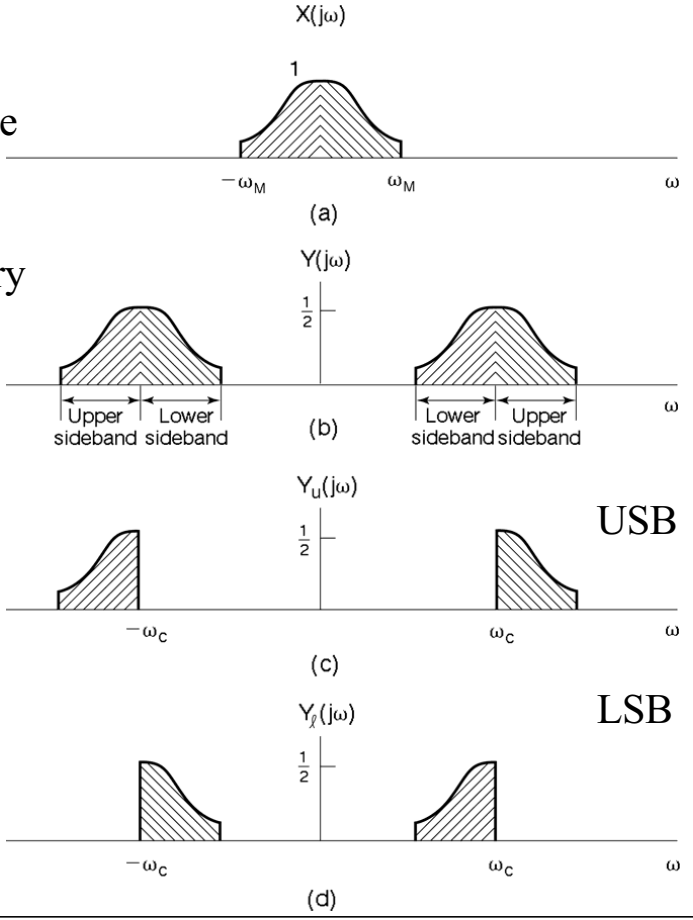
سیستم‌های مخابراتی (۱)

۵

مدولاسیون دامنه‌ی تک-باند کناری

Double-Sideband (DSB) and Single-Sideband (SSB) AM

Since $x(t)$ and $y(t)$ are *real*, from conjugate symmetry both *LSB* and *USB* signals carry exactly the same information.



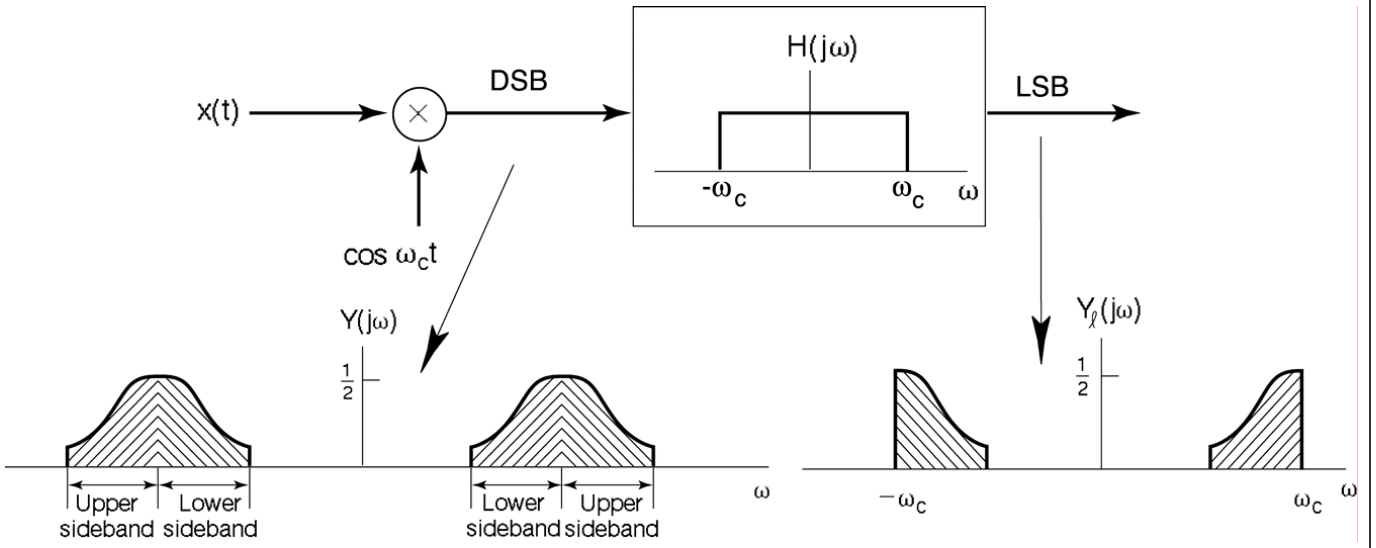
DSB, occupies $2\omega_M$ bandwidth in $\omega > 0$.

USB

LSB

Each sideband approach only occupies ω_M bandwidth in $\omega > 0$.

Single Sideband Modulation



Can also get SSB/SC
or SSB/WC

سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

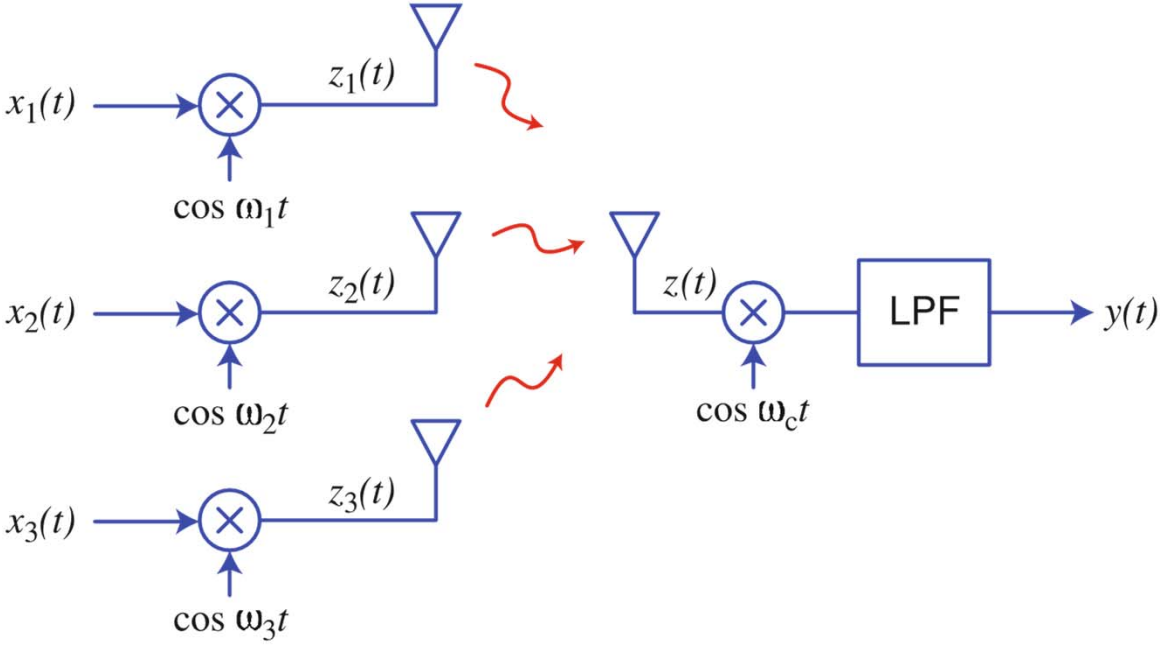
۶

مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

فرستنده‌های چندگانه می‌توانند همزمان کار کنند؛
مادامی که فرکانس‌های ارسالی آنها با یکدیگر همپوشانی نداشته باشد.

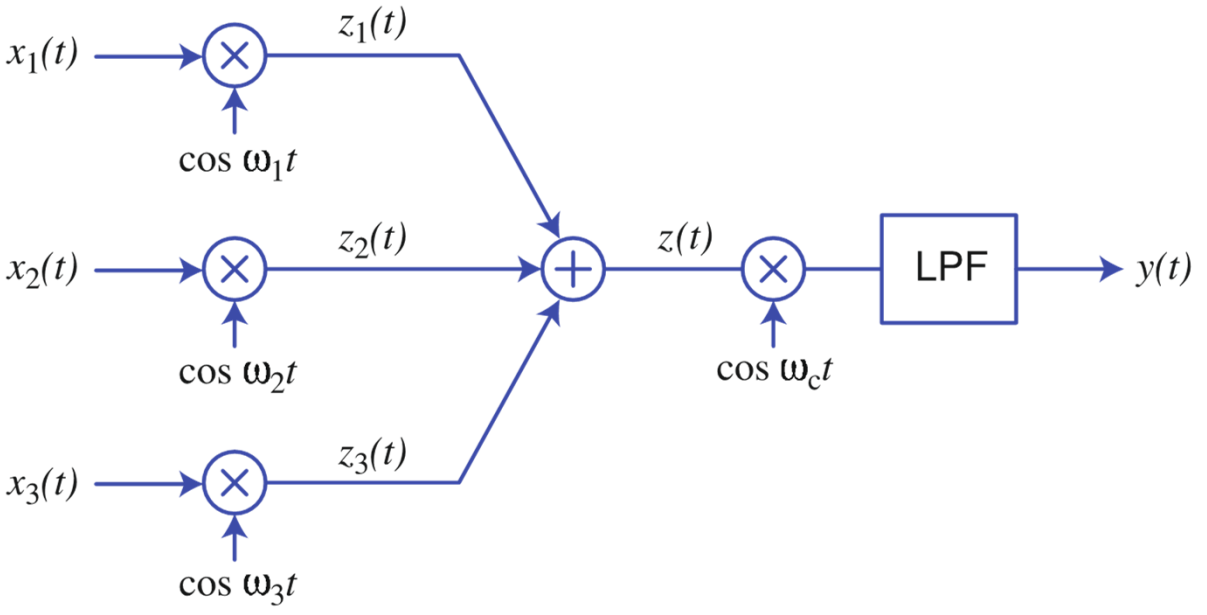


Prepared by Kazim Fouladi | Fall 2017 | 2nd Edition
کاظم فولادی

مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

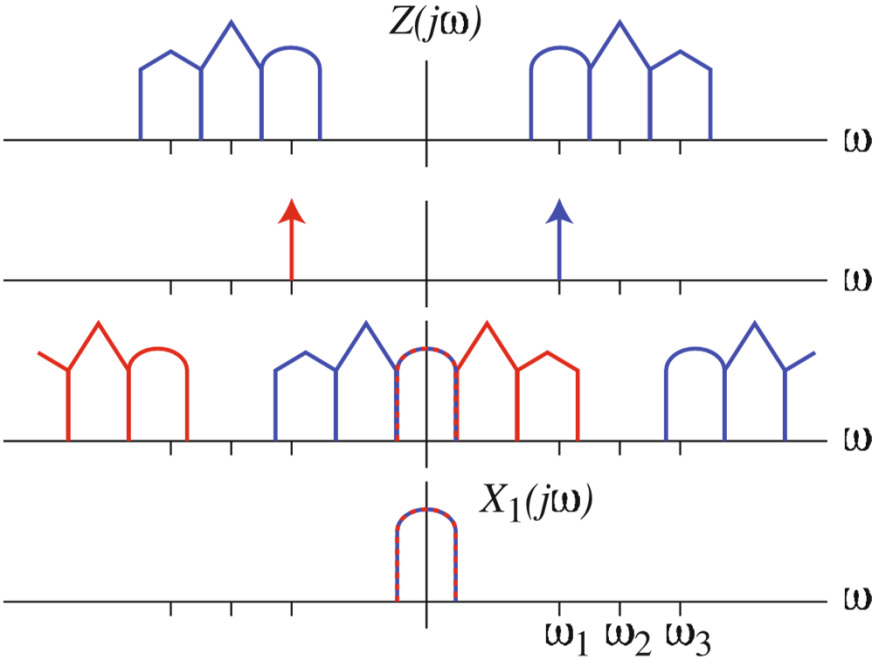
فرستنده‌های چندگانه به‌سادگی با هم جمع می‌شوند.



مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

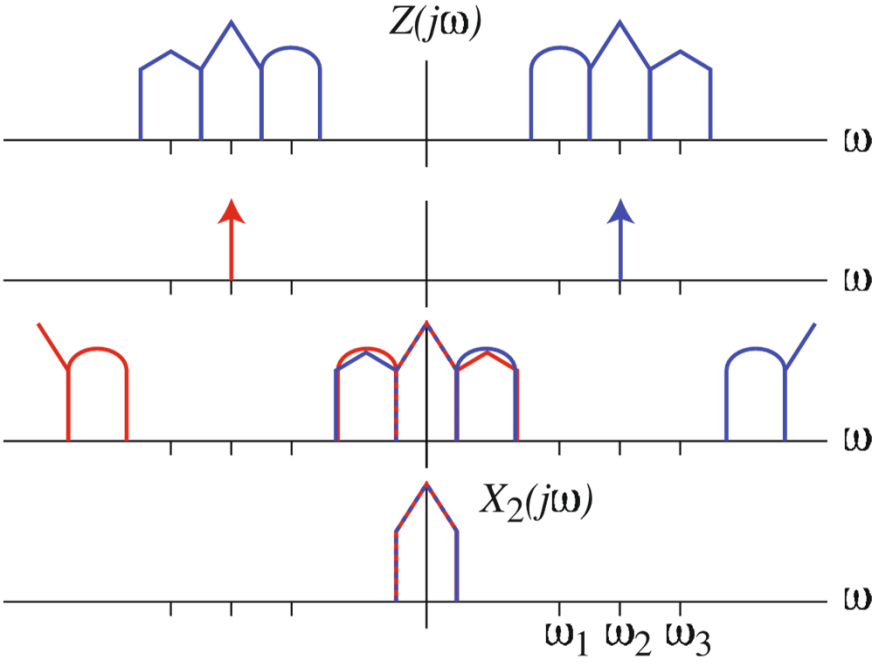
گیرنده می‌تواند فرستنده‌ی مورد نظرش را با گزینش فرکانس دمدولاسیون متناظر انتخاب کند.



مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

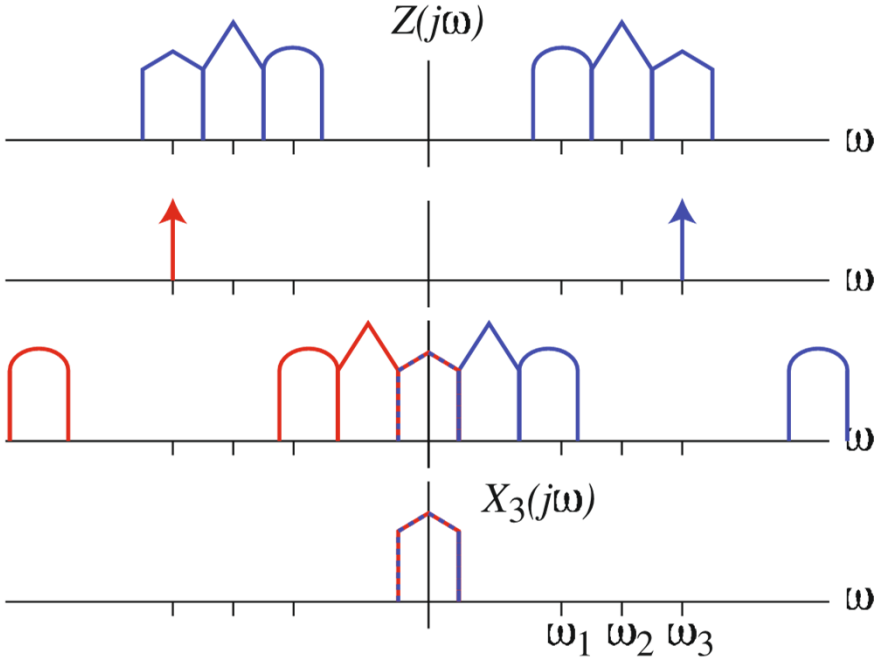
گیرنده می‌تواند فرستنده‌ی مورد نظرش را با گزینش فرکانس دمدولاسیون متناظر انتخاب کند.



مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی

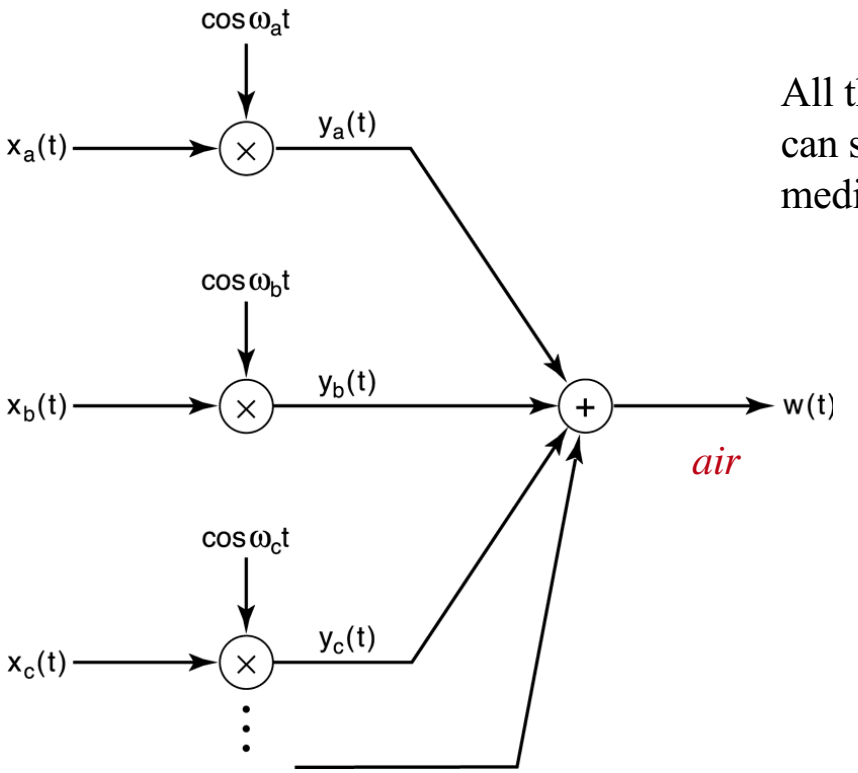
FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

گیرنده می‌تواند فرستنده‌ی مورد نظرش را با گزینش فرکانس دمدولاسیون متناظر انتخاب کند.



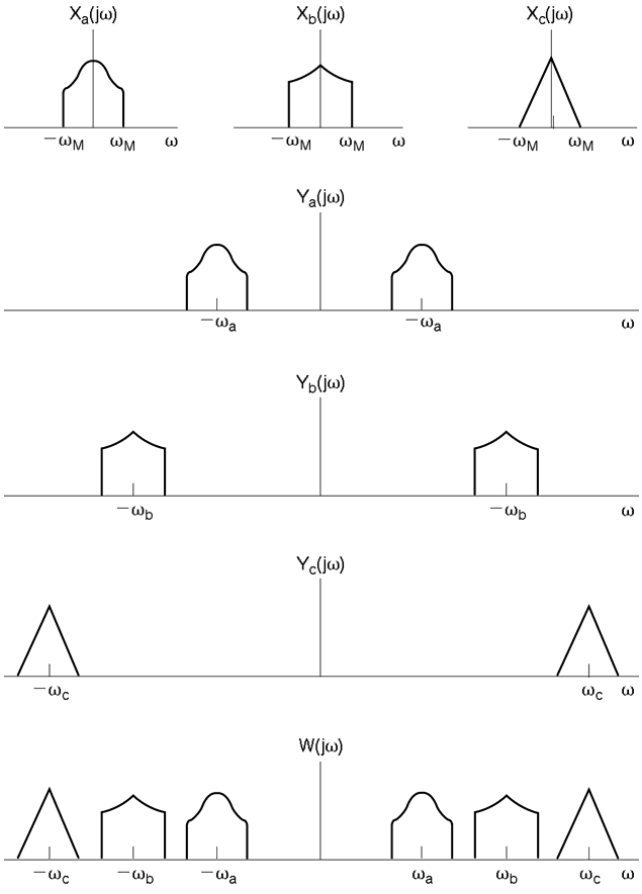
Frequency-Division Multiplexing (FDM)

(Examples: Radio-station signals and analog cell phones)



All the channels can share the same medium.

FDM in the Frequency-Domain



"Baseband" signals

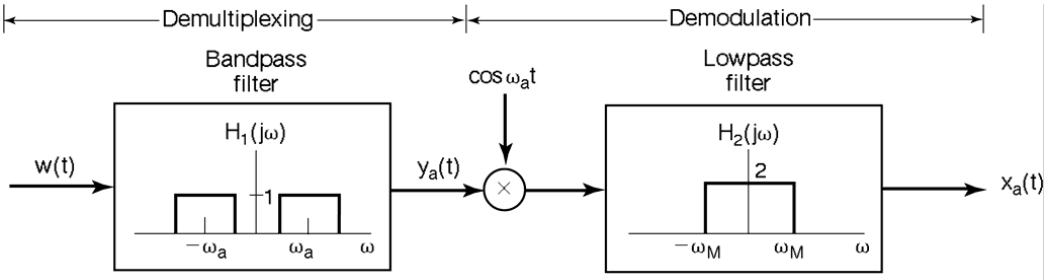
Channel a

Channel b

Channel c

Multiplexed signals

Demultiplexing and Demodulation



ω_a needs to be tunable

- Channels must not overlap ⇒ Bandwidth Allocation
- It is difficult (and expensive) to design a highly selective bandpass filter with a tunable center frequency
- Solution – Superheterodyne Receivers

سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

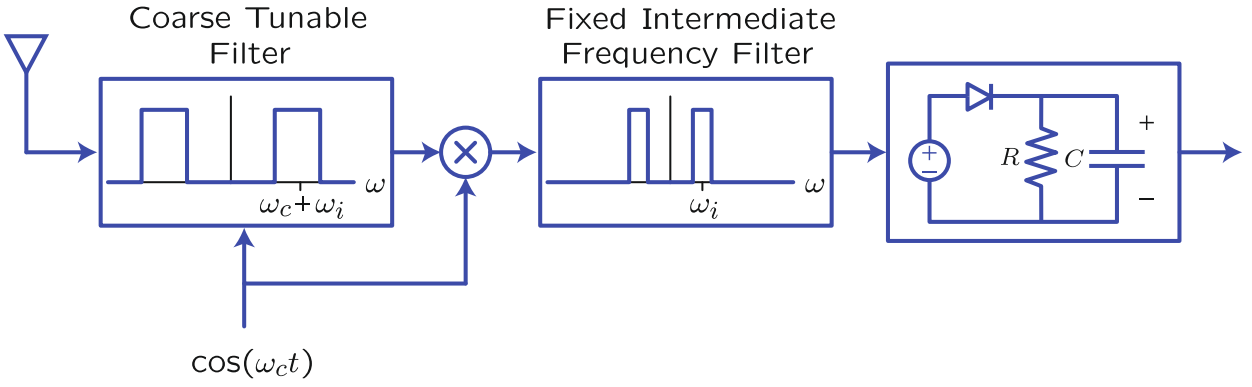
۷

گیرنده‌های سوپرهترودین

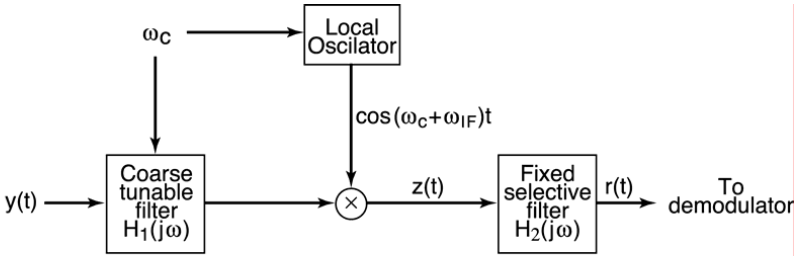
گیرنده‌ی سوپرهترودین

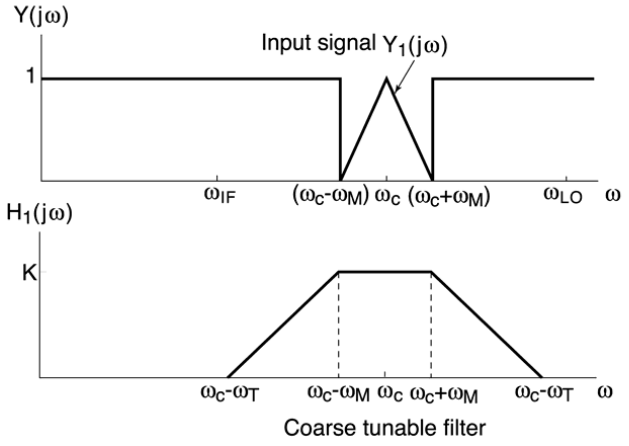
THE SUPERHETERODYNE RECEIVER

گیرنده‌ی سوپرهترودین، پخش AM را در عمل امکان‌پذیر می‌کند.



The Superheterodyne Receiver





AM, $\frac{\omega_c}{2\pi} = 535 - 1605\,kHz$ ___ RF

FCC, $\frac{\omega_{IF}}{2\pi} = 455\,kHz$ ___ IF

Operation principle:

— Down convert from ω_c to ω_{IF}, and use a coarse tunable BPF for the front end.

— Use a sharp-cutoff *fixed* BPF at ω_{IF} to get rid of other signals.

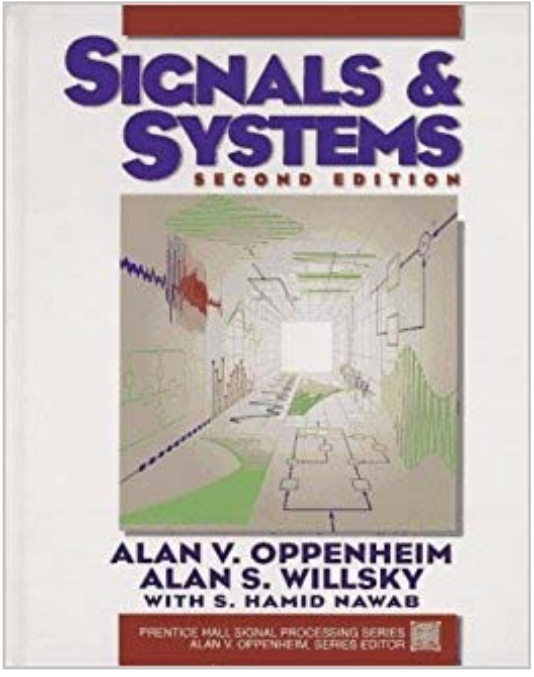
سیگنال‌ها و سیستم‌ها

سیستم‌های مخابراتی (۱)

۸

منابع

منبع اصلی



A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab,
Signals and Systems,
Second Edition, Prentice Hall, 1997.

Chapter 8