通信工学概論
Introduction to Communication Engineering

第1回講義資料
Lecture notes 1

物理層の概観
Overview of Physical Layer

豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology
電気・電子情報工学系
Department of Electrical and Electronic Information Engineering
准教授　竹内啓悟
Associate Professor　Keigo Takeuchi

信号伝送の簡単な例(Toy example for signal transmission)

0または1を取る二つのデジタル信号X_1とX_2を誤りが生じないように伝送したい。

Realize error-free transmission of two digital signals X_1 and X_2 that take 0 or 1.

例1.1

Example 1.1

二つの信号X_1とX_2を同時に伝送する。

Transmit the two signals X_1 and X_2 simultaneously.

$$Y = X_1 + X_2$$

受信者は実信号Yを受け取る。(The receiver receives the real signal Y.)

X_1	0	1	0	1
X_2	0	0	1	1
Y	0	1	1	2

$Y = 1$を受け取った場合、受信者は$(X_1, X_2) = (0, 1)$が送られたのか$(X_1, X_2) = (1, 0)$が送られたのかを区別できない。

For $Y = 1$, the receiver cannot distinguish whether $(X_1, X_2) = (0, 1)$ or $(X_2, X_1) = (1,0)$ was sent.

信号間干渉のため、誤りなしの伝送は不可能

Error-free transmission is impossible because of interference between signals.

TOYOHASHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

時分割多重 (Time-division multiplexing)

例1.2
Example 1.2

時点$n=1$に信号X_1を送り、時点$n=2$に信号X_2を送る。
Send the signal X_1 at time $n=1$ and X_2 at time $n=2$.

$$Y_n = X_n, \qquad n = 1, 2$$

受信者は時点$n=1$に信号Y_1を受け取り、時点$n=2$にY_2を受け取る。
The receiver gets the signals Y_1 and Y_2 at times $n=1$ and $n=2$, respectively.

X_1	0	0	1	1
X_2	0	1	0	1
Y_1	0	0	1	1
Y_2	0	1	0	1

$(X_1, X_2) = (Y_1, Y_2)$として誤りなしの受信が可能である。
Error-free reception is possible due to $(X_1, X_2) = (Y_1, Y_2)$.

欠点
Disadvantage

伝送に時間がかかる。(Transmission requires more time.)

周波数分割多重 (Frequency-division multiplexing)

例1.3 周波数の異なる二つの余弦波を使って、X_1とX_2を同時に送る。

Example 1.3 Send X_1 and X_2 simultaneously using two sinusoids with different frequencies.

$$y(t) = X_1 \cos(2\pi f t) + X_2 \cos(3\pi f t)$$

整合フィルタによる受信(Reception via matched filter)

$$\int_0^{\frac{1}{f}} y(t)\cos(2\pi f t)\,dt = X_1 \int_0^{\frac{1}{f}} \cos^2(2\pi f t)\,dt + X_2 \int_0^{\frac{1}{f}} \cos(2\pi f t)\cos(3\pi f t)\,dt = \frac{X_1}{2f}$$

$$\int_0^{\frac{1}{f}} y(t)\cos(3\pi f t)\,dt = X_1 \int_0^{\frac{1}{f}} \cos(2\pi f t)\cos(3\pi f t)\,dt + X_2 \int_0^{\frac{1}{f}} \cos^2(3\pi f t)\,dt = \frac{X_2}{2f}$$

最後の等号は、次ページの補題を参照(See a lemma in the next paper for the last equalities.)

利点

Advantage

誤りなしの同時伝送が可能(Simultaneous and error-free transmission is possible.)

積分区間は高周波数ほど狭くなる。

The integral interval becomes narrower as the frequency increases.

余弦波の直交性(Orthogonality between sinusoids)

補題1.1(Lemma 1.1)　任意の自然数kに対して、(For any natural number k)

$$\int_0^{1/f} \cos^2(k\pi f t)\,dt = \frac{1}{2f}, \qquad \int_0^{1/f} \cos(3\pi f t)\cos(2\pi f t)\,dt = 0.$$

証明(Proof)　2倍角の公式$\cos(2\alpha) = 2\cos^2\alpha - 1$を使うと、

Using the double-angle formula $\cos(2\alpha) = 2\cos^2\alpha - 1$, we obtain

$$\int_0^{1/f} \cos^2(k\pi f t)\,dt = \int_0^{1/f} \frac{1+\cos(2k\pi f t)}{2}\,dt = \left[\frac{t}{2} + \frac{\sin(2k\pi f t)}{4k\pi f}\right]_0^{1/f} = \frac{1}{2f}.$$

積和公式$2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$を使うと、

Using the product-to-sum formula $2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$ yields

$$\int_0^{1/f} \cos(3\pi f t)\cos(2\pi f t)\,dt = \int_0^{1/f} \frac{\cos(5\pi f t)}{2}\,dt + \int_0^{1/f} \frac{\cos(\pi f t)}{2}\,dt$$

$$= \left[\frac{\sin(5\pi f t)}{10\pi f}\right]_0^{1/f} + \left[\frac{\sin(\pi f t)}{2\pi f}\right]_0^{1/f} = 0. \qquad \blacksquare$$

帯域制限通信システム (Band-limited communication systems)

周波数分割多重は、干渉のない信号受信を実現できる。

Frequency-division multiplexing realizes interference-free signal reception.

帯域制限システム（Band-limited systems）

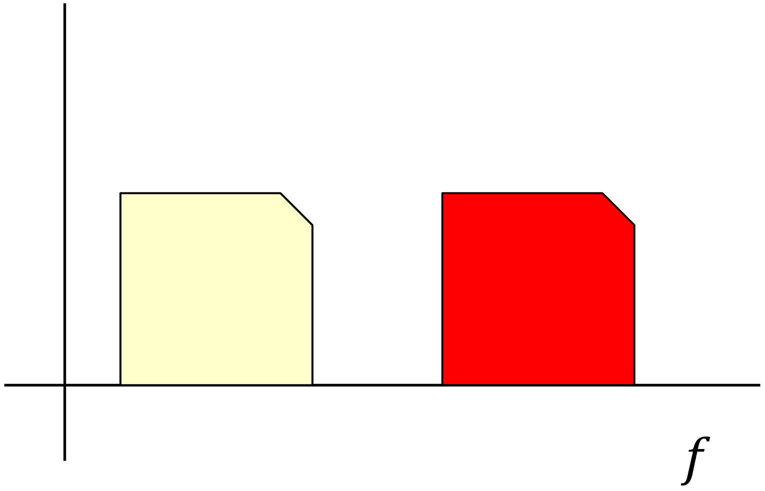
使用する周波数帯域を分割することで、異なる通信システム間の干渉を防ぐ。

Circumvent interference between different communication systems via frequency-division multiplexing.

帯域幅(Bandwidth)

連続的に割り当てられた周波数区間の幅

Width of a consecutively assigned frequency interval.



中心周波数（Center frequency）

使用する周波数区間の中心

Center of the used frequency interval

帯域制限信号(Band-limited signals)

中心周波数f_{c}、帯域幅Wの帯域制限信号$x(t)$

Band-limited signal $x(t)$ with center frequency f_{c} and bandwidth W

$$x(t) = x_{\mathrm{b}}(t)\cos(2\pi f_{\mathrm{c}} t), \qquad x_{\mathrm{b}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \operatorname{sinc}(Wt - n),$$

$$\operatorname{sinc}(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}, \qquad \operatorname{sinc}(0) = 1$$

X_nは複素数だが、簡単化のために実数と仮定した。

X_n has been assumed to be real for simplicity while it should be a complex number.

注意(Remark)

この信号表現の導出は第3週と第4週の講義で行う。より厳密な導出については、信号解析論、情報通信システム(特)論II等で学ぶ。

This signal representation is derived in lecture notes 3 and 4. Learn Signal Processing and Information and Communication Systems 2 for more rigorous derivation.

用語のまとめ (Terminology)

ベースバンド信号 Baseband signal

$x_{\mathrm{b}}(t)$のこと。$x_{\mathrm{b}}(t)$の中心周波数が0のため。

Means $x_{\mathrm{b}}(t)$, because $x_{\mathrm{b}}(t)$ has zero center frequency.

搬送波 Carrier wave

$\cos(2\pi f_{\mathrm{c}} t)$のこと。そのため、$f_{\mathrm{c}}$は搬送波周波数とも呼ばれる。

Means $\cos(2\pi f_{\mathrm{c}} t)$, so that f_{c} is also called carrier frequency.

変調 Modulation

送りたいメッセージを物理信号に変換する操作

To transform messages into physical signals.

X_n, $x_{\mathrm{b}}(t)$, $x(t)$を生成する操作をすべて変調と呼ぶ。

Modulation may indicate operations to generate X_n, $x_{\mathrm{b}}(t)$, or $x(t)$.

復調 Demodulation

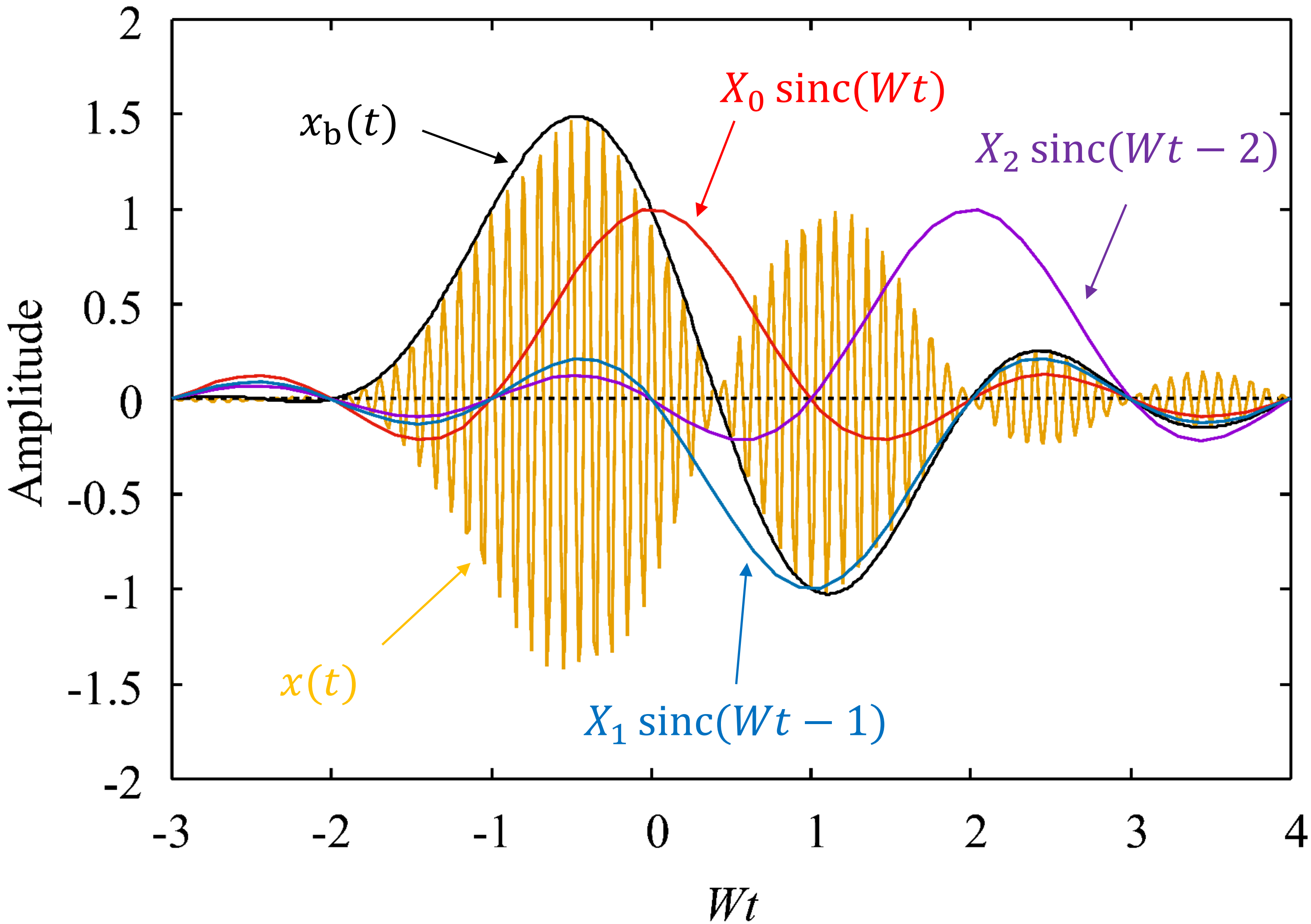
物理信号を元のメッセージに変換する操作

To transform the physical signals into the original messages.

$x(t)$や$x_{\mathrm{b}}(t)$等からメッセージを推定する操作をすべて復調と呼ぶ。

Demodulation may imply operations to estimate the messages from $x(t)$, $x_{\mathrm{b}}(t)$, or etc.

帯域制限信号の例(Example of band-limited signals)



$N=3,\ X_0=1,\ X_1=-1,\ X_2=1,\ f_\mathrm{c}=10W$の場合

復調(Demodulation)

帯域制限信号の性質(Properties of the band-limited signal)

1. $f_\mathrm{c} \gg W$の場合に、$x(t)$は$x_\mathrm{b}(t)$よりも遥かに速く変動する。

   For $f_\mathrm{c} \gg W$, $x(t)$ changes much faster than $x_\mathrm{b}(t)$.

2. 整数$n \neq 0$に対して、$\mathrm{sinc}(n) = 0$が成立する。

   $\mathrm{sinc}(n) = 0$ holds for any integer $n \neq 0$.

$x_\mathrm{b}(t)$の再構成　性質1から区間$[t, t+f_\mathrm{c}^{-1}]$で$x_\mathrm{b}(t')$が変化しないと近似すると、

Reconstruction of $x_\mathrm{b}(t)$　Assuming that $x_\mathrm{b}(t')$ is approximately fixed in $[t, t+f_\mathrm{c}^{-1}]$, from Property 1, we have

$$\int_t^{t+f_\mathrm{c}^{-1}} x(t')\cos(2\pi f_\mathrm{c} t')\,dt' \approx x_\mathrm{b}(t)\int_t^{t+f_\mathrm{c}^{-1}} \cos^2(2\pi f_\mathrm{c} t')dt' = \frac{x_\mathrm{b}(t)}{2f_\mathrm{c}}$$

最後の等号は補題1.1から従う。(The last equality follows from Lemma 1.1.)

積分により、$x_\mathrm{b}(t)$を再構成できる。($x_\mathrm{b}(t)$ can be reconstructed via the integration.)

復調(Demodulation)

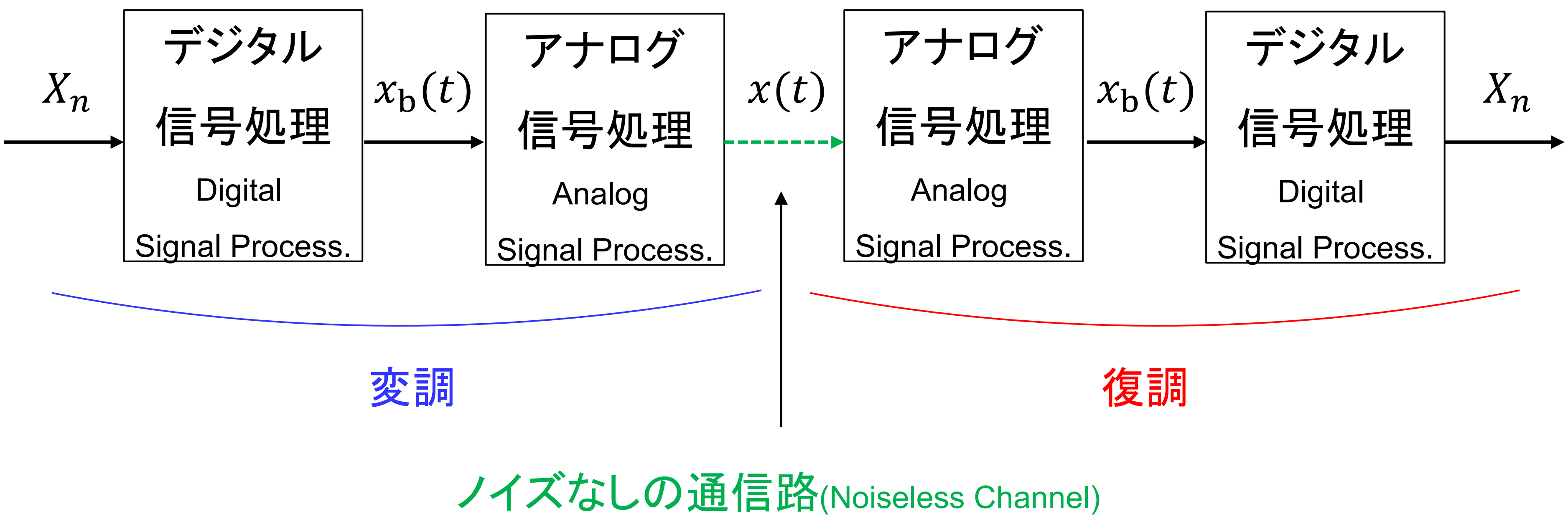
性質2から、$x_\mathrm{b}(t)$のサンプリングによりX_nを再構成できる。

Property 2 implies that X_n can be reconstructed via sampling of $x_\mathrm{b}(t)$.

$$x_\mathrm{b}\left(\frac{n}{W}\right) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \operatorname{sinc}(n-n') = X_n \operatorname{sinc}(0) = X_n, \qquad n = 0, \dots, N-1$$

実際のシステムでは、別の方法で再構成される。

Another method is used for the reconstruction in practical systems.



デジタルとは何か？(What is digital?)

離散時間(Discrete time)

信号X_nの添え字nは、整数値のみを取る。

The index n in the signal X_n only takes integers.

時間を離散化したことによる性能劣化は理論上ない。

Time discretization does not degrade theoretical performance.

離散信号(Discrete signal)

信号X_nは離散的な値のみを取る。

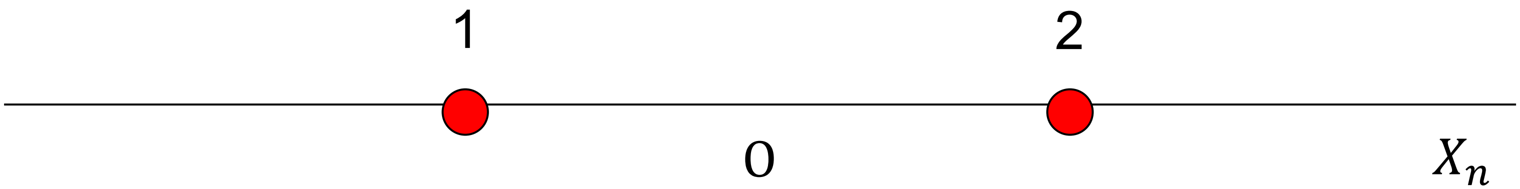
A signal X_n only takes discrete values.

物理層の中心的話題

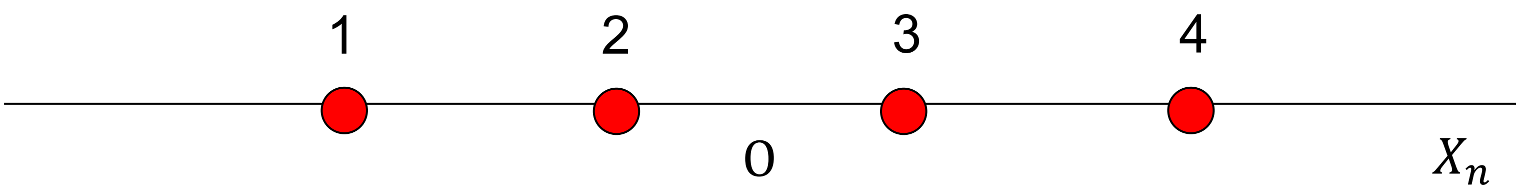
The main topic in the physical layer

デジタル信号の例 (Digital signal examples)

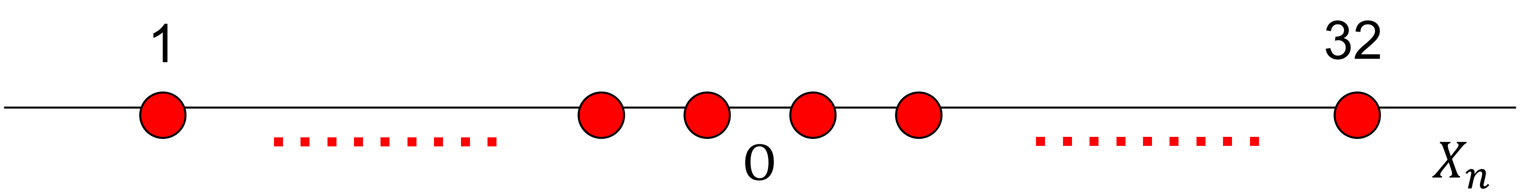
2位相偏移変調(Binary phase-shift keying, BPSK)



4パルス振幅変調(4-level pulse-amplitude modulation, 4 PAM)



32パルス振幅変調(32-level pulse-amplitude modulation, 32 PAM)



なぜデジタル信号を使っても良いのか？(Why are we allowed to use digital signals?)

払うべき代償(Price to pay)

本講義は、どの程度の性能劣化を許容すれば、デジタル信号を使用することができるのかを明らかにする。

This lecture reveals how much degradation has to be tolerated to use digital signals.