

令和2年9月25日版

伝送工学

Part 1: 通信システムの概要

千葉大学工学部

総合工学科電気電子工学コース

橋本研也

k.hashimoto@ieee.org

<http://www.te.chiba-u.jp/lab/ken>

周りにある通信・放送システム

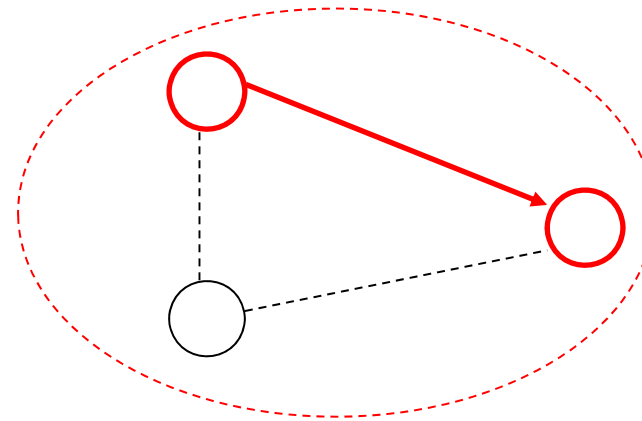
- テレビ(地上波、衛星、光ケーブル)
- 電話(固定、携帯、衛星)
- 専用無線(警察、消防、航空、海洋、軍)
- レーダー、ソナー、魚群探知機
- LAN (Local Area Network、有線・無線)
- USB、DVI、HDMI、赤外線通信(リモコン、パソコン等)
- GPS
- パソコンや携帯電話内部での信号伝送
- ICチップ内の信号伝送
- HDDデータの読み書きも通信システムの様
- マイクロホン・スピーカケーブル
- IOT (Internet of Things)

通信の形態

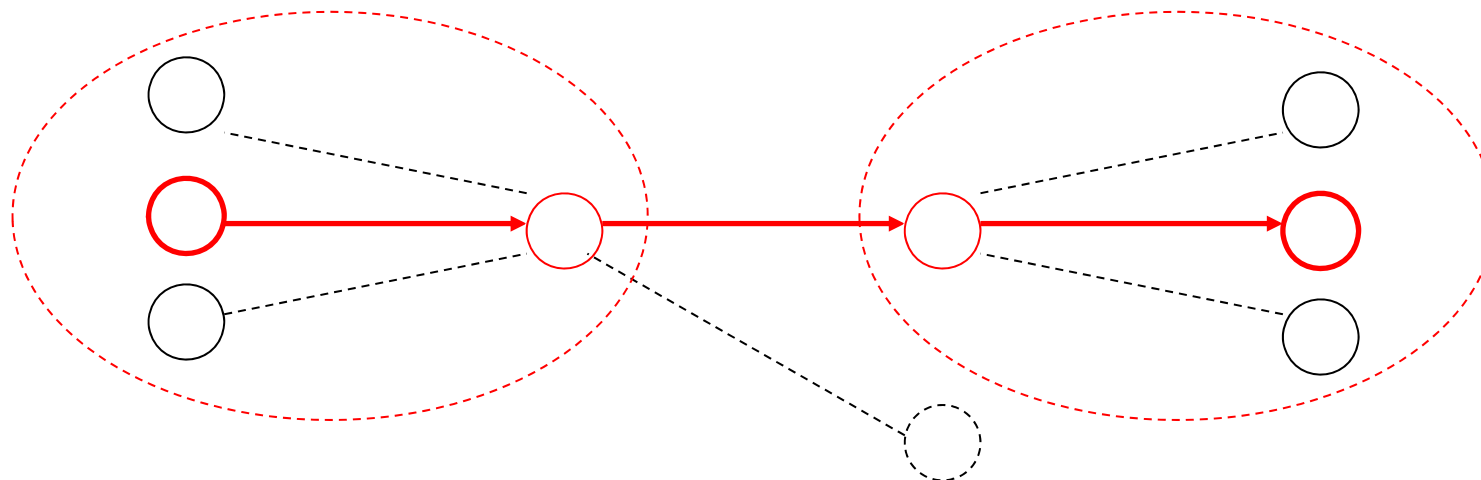
ピアツーピア通信



同一ネットワーク内通信

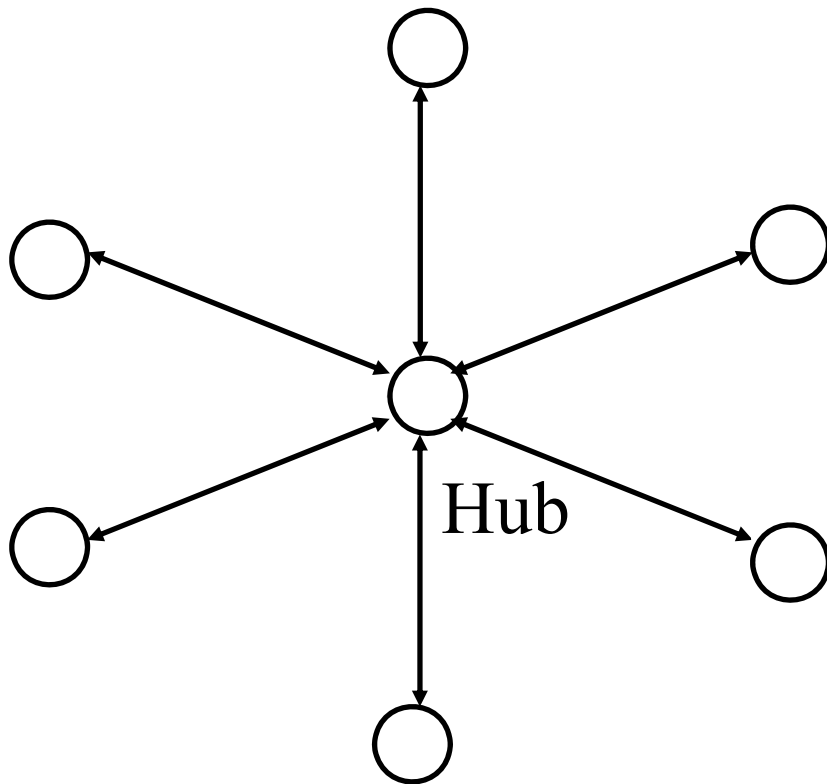


ネットワークをまたがる通信

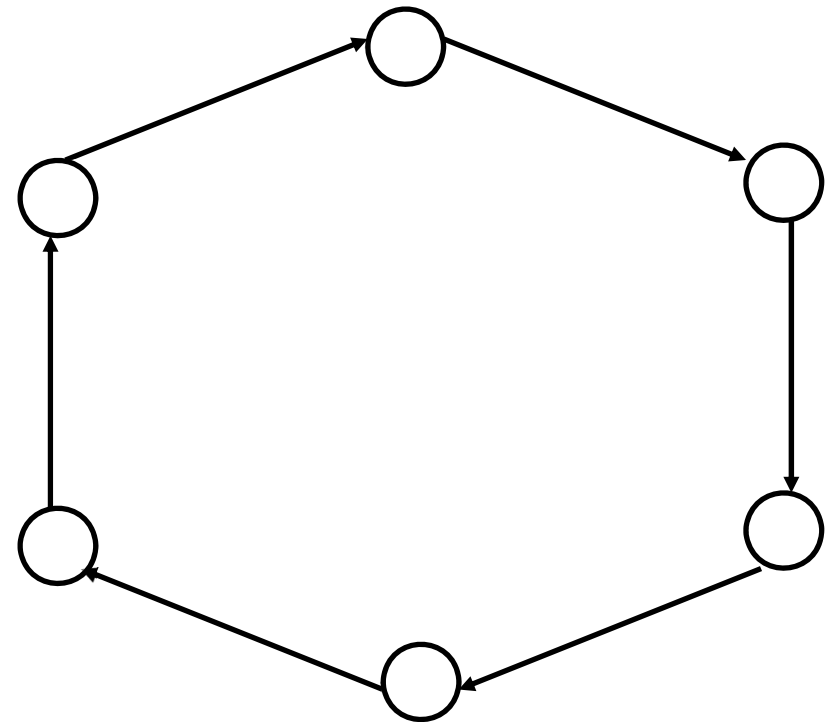


ネットワークの形態

スター型ネットワーク



リング型ネットワーク



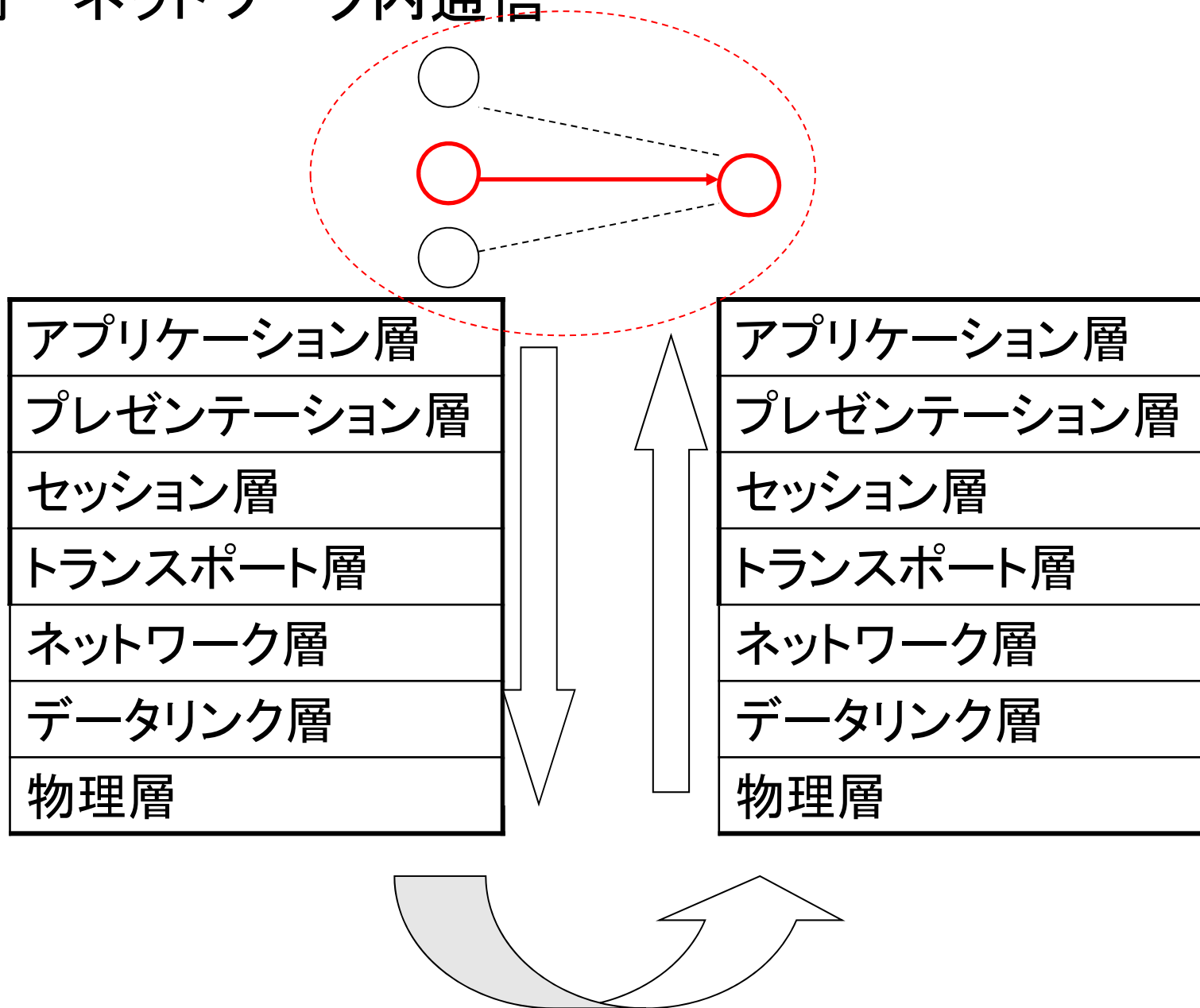
OSI(Open Systems Interconnection)7層モデル ISO設定

第7層 アプリケーション層 データの処理 Webブラウザ、メーラ
第6層 プレゼンテーション層 データの表現形式 ASCII, BMP, JPEG, MIDI
第5層 セッション層 通信手順 HTTP, SMTP, POP
第4層 トランスポート層 端末間の通信制御 TCP, UDP
第3層 ネットワーク層 ネットワーク内の通信制御 IP, Apple Talk, NetBEUI
第2層 データリンク層 ノード間のリンク制御 Ethernet, FDDI, MACアドレス
第1層 物理層 電気信号 100Base-T, RS-232C

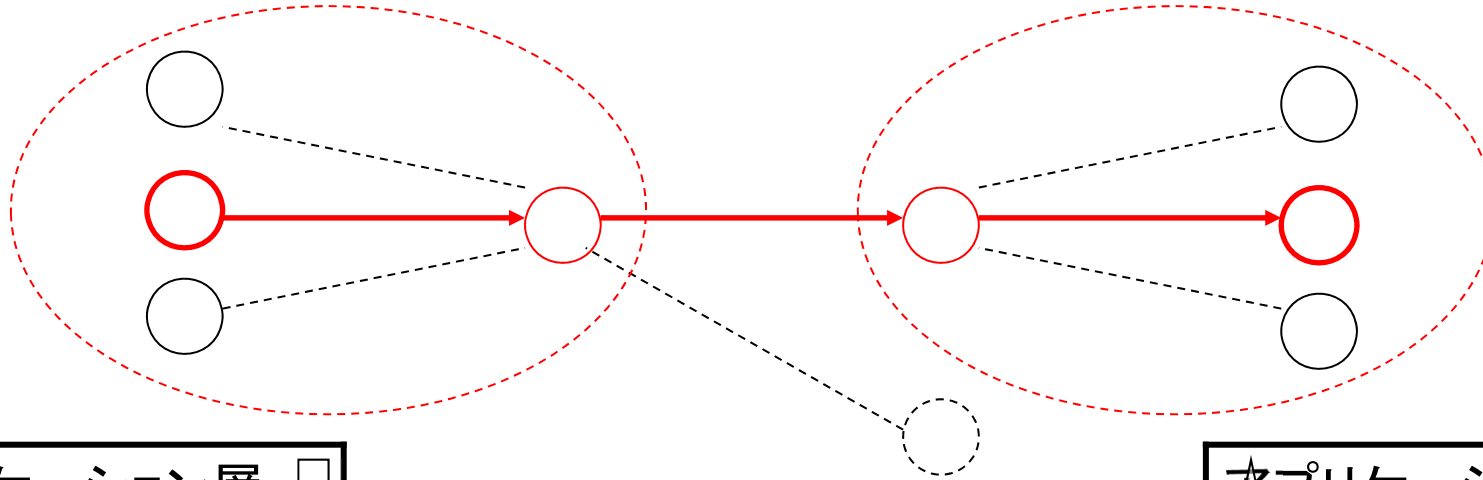
通信
ネット
ワーク

狭義の通
信工学
(本授業
の範囲)

同一ネットワーク内通信



ネットワークをまたがる通信

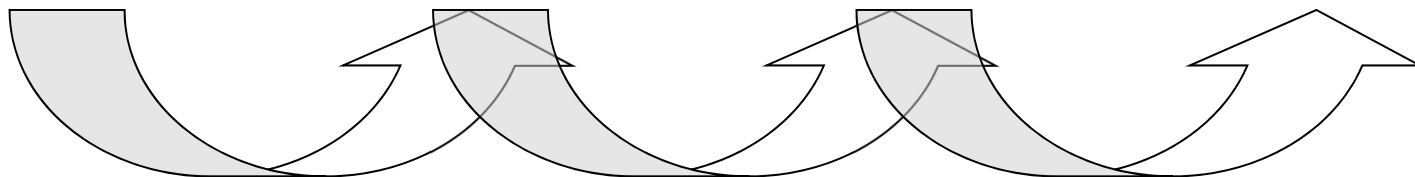


アプリケーション層	↓
プレゼンテーション層	↓
セッション層	↓
トランスポート層	↓
ネットワーク層	↓
データリンク層	↓
物理層	↓

ネットワーク層	↓
データリンク層	↓
物理層	↓

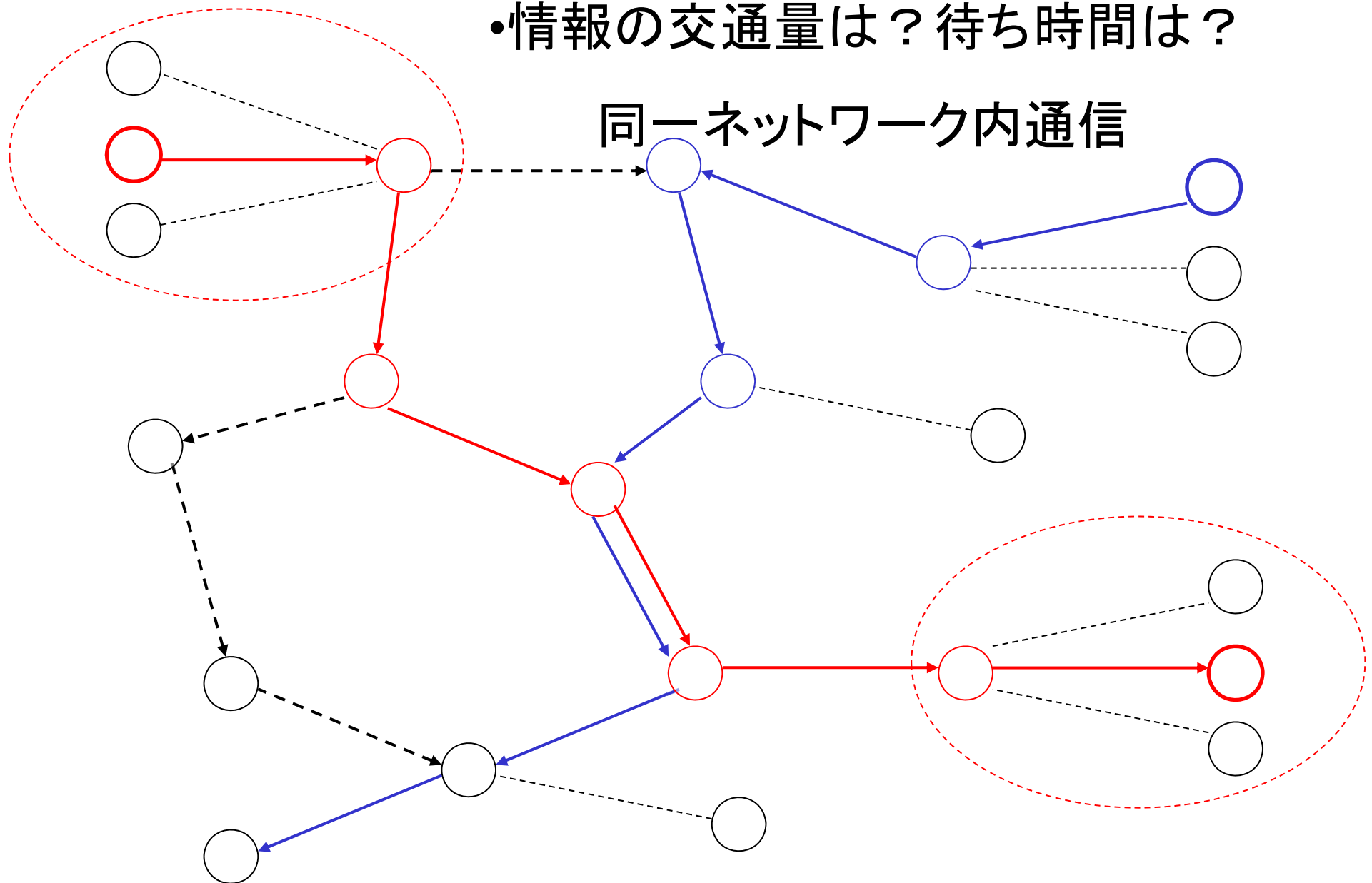
ネットワーク層	↓
データリンク層	↓
物理層	↓

アプリケーション層	↑
プレゼンテーション層	↑
セッション層	↑
トランスポート層	↑
ネットワーク層	↑
データリンク層	↑
物理層	↑

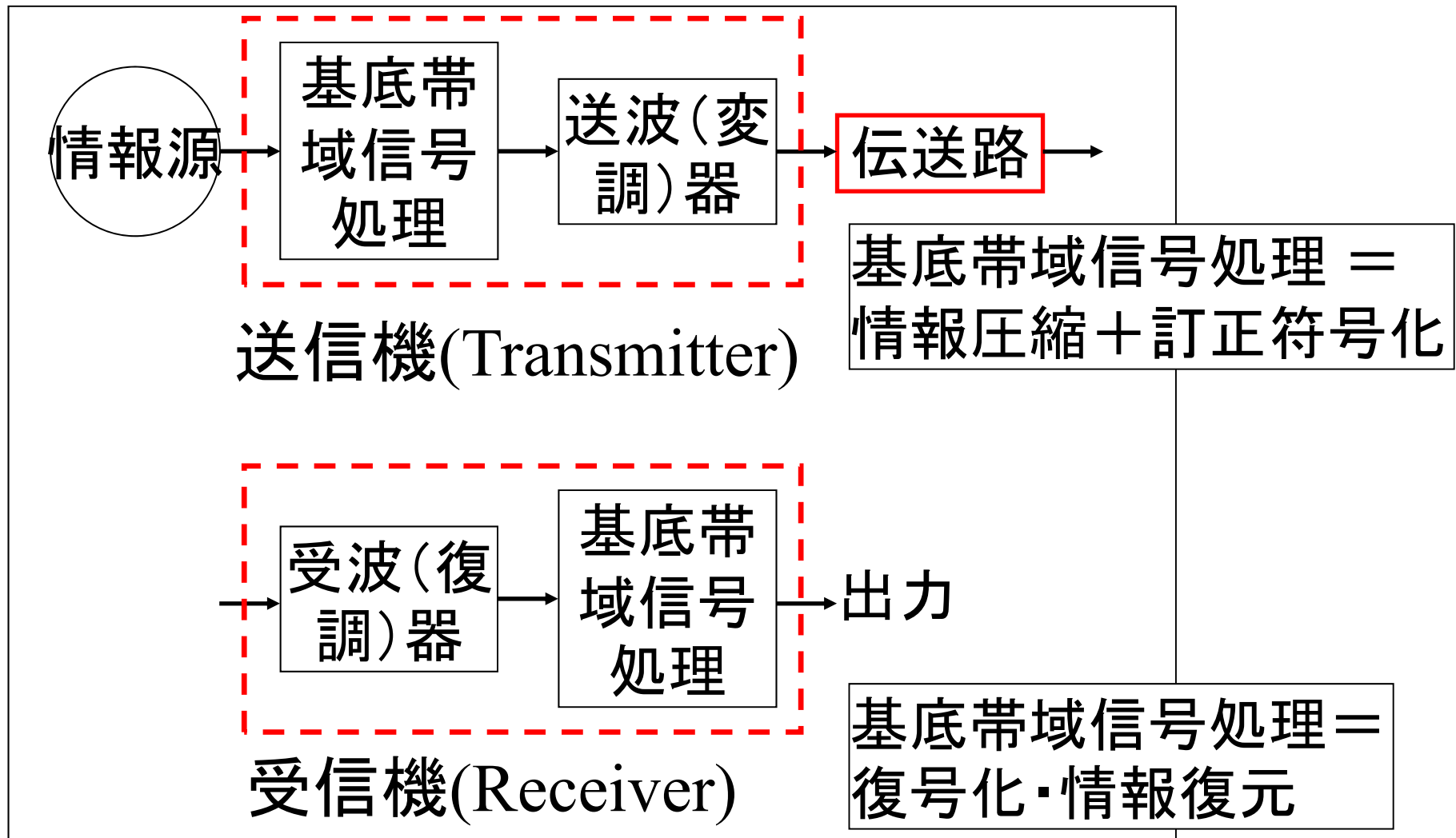


経路制御

- どの経路をたどるのが最良？
- 情報の交通量は？ 待ち時間は？

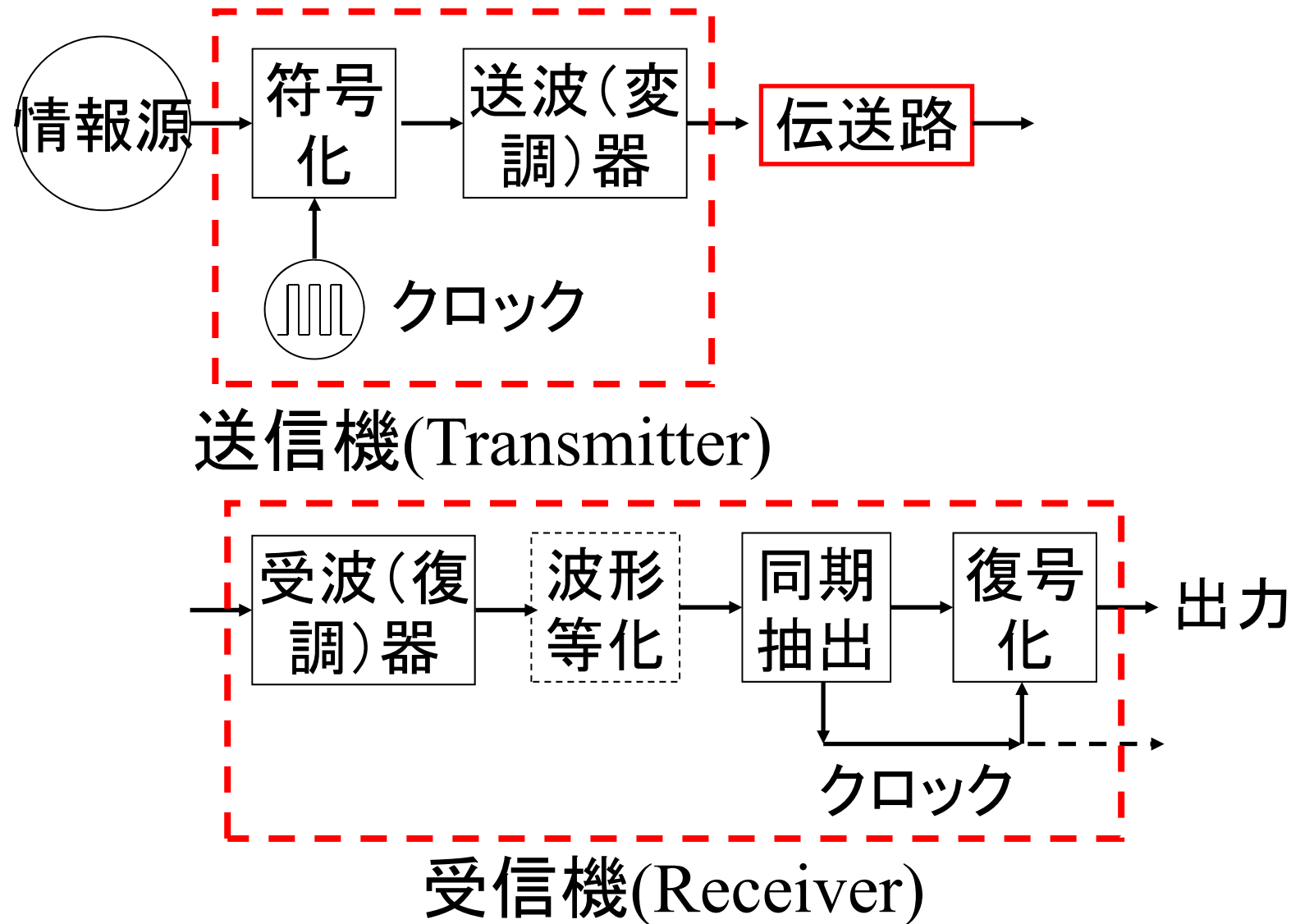


通信システムの形態



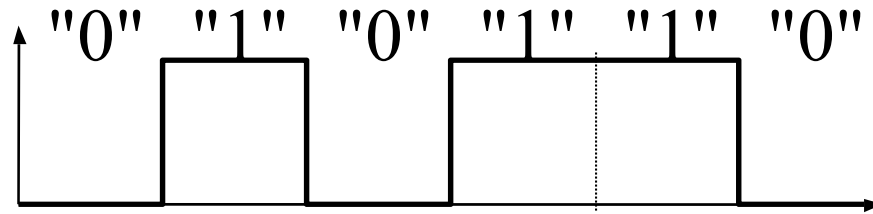
両機能を持つ装置 = 送受信機 (Transceiver)

デジタル伝送の形態



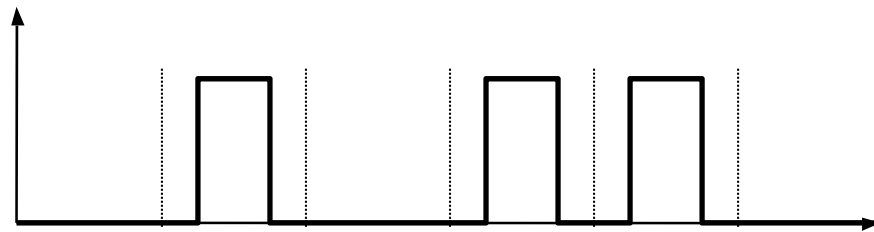
両機能を持つ装置＝送受信機(Transceiver)

基本的なデジタル変調信号



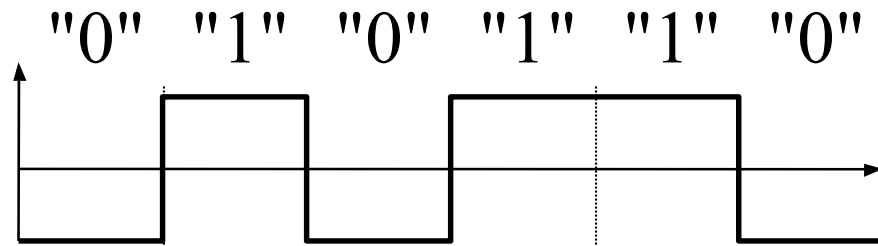
(a) 単極性(unipolar)
NRZ (non return to zero)

- 占有帯域幅最小
- 直流成分残存
- 同期情報無



(b) 単極性(unipolar)
RZ (return to zero)

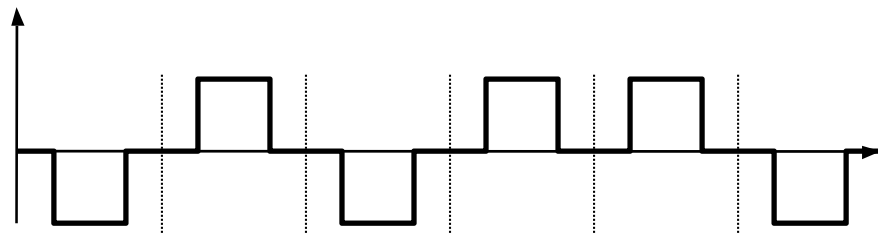
- 占有帯域幅倍增
- 直流成分残存
- 同期情報有



(c) 極性(polar)

NRZ (non return to zero)

- 占有帶域幅最小
- 直流成分消去可
- 同期情報無

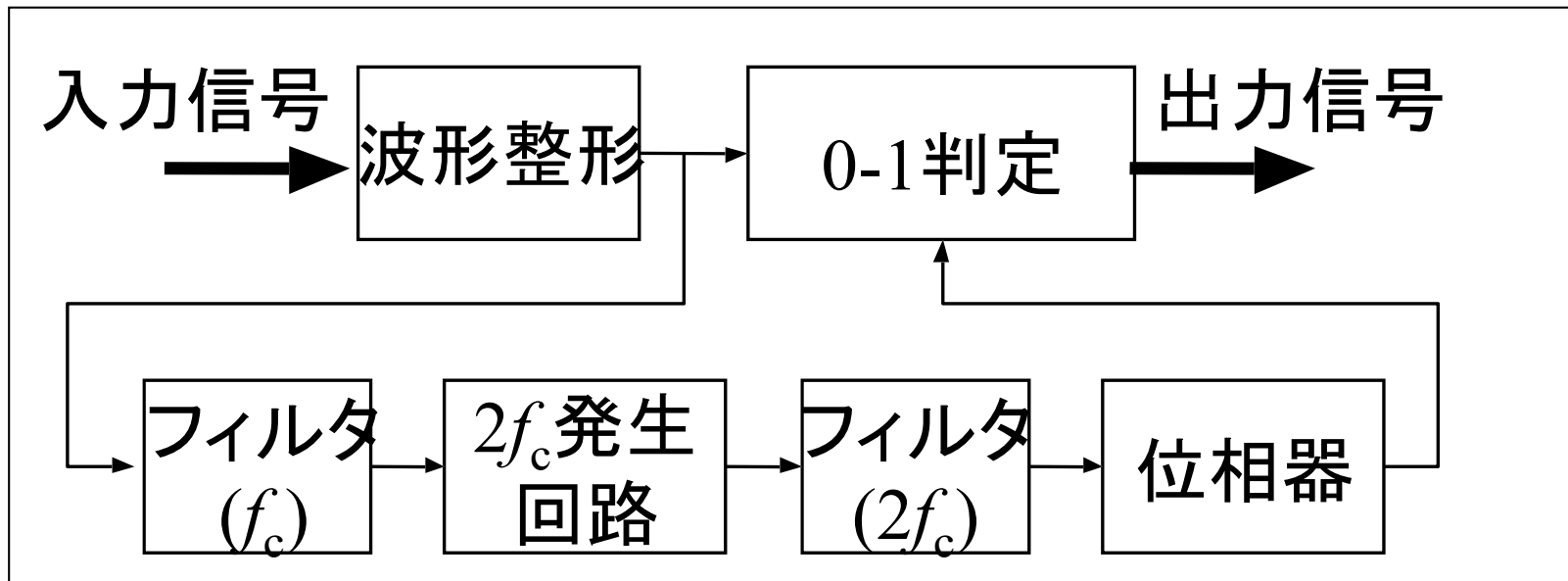
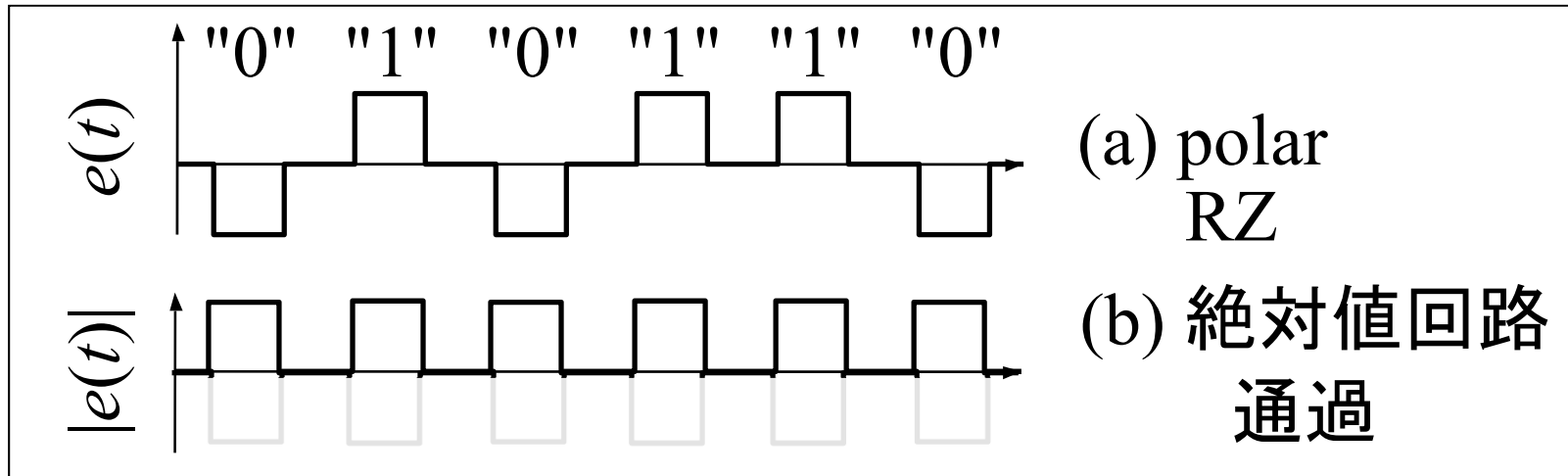


(d) 極性(polar)

RZ (return to zero)

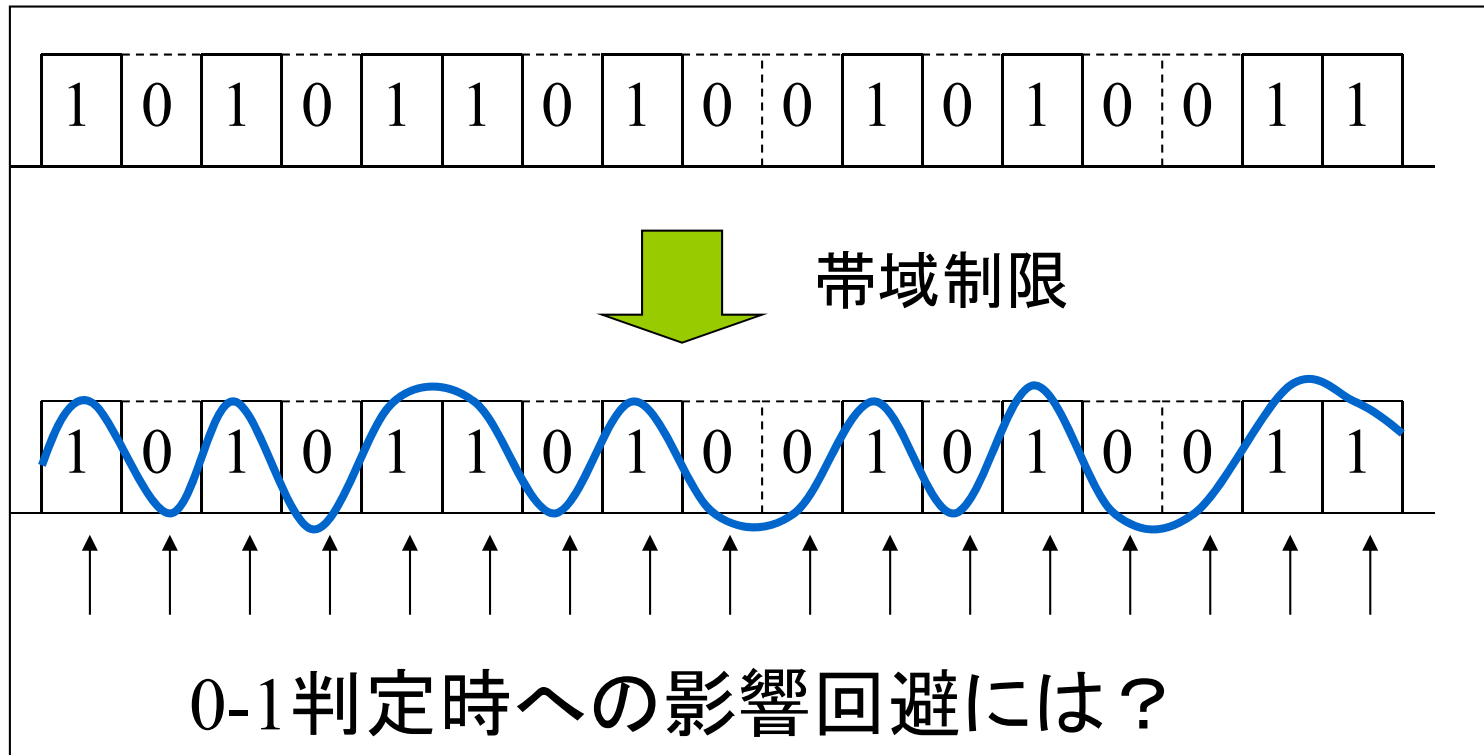
- 占有帶域幅倍增
- 直流成分消去可
- 同期情報有

基本的なタイミング情報抽出法



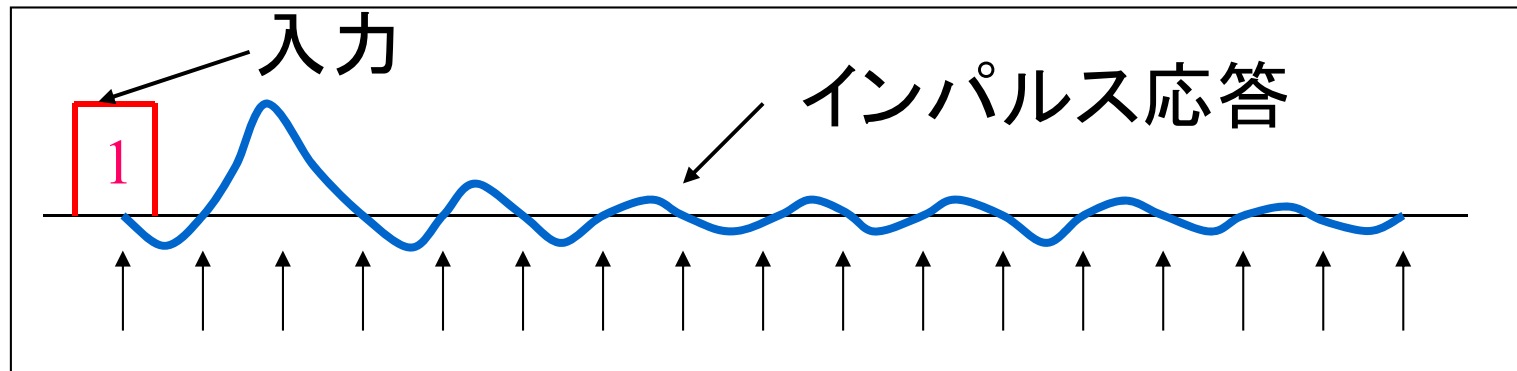
符号間干渉(Inter-Symbol Interference, ISI)

他の符号による干渉

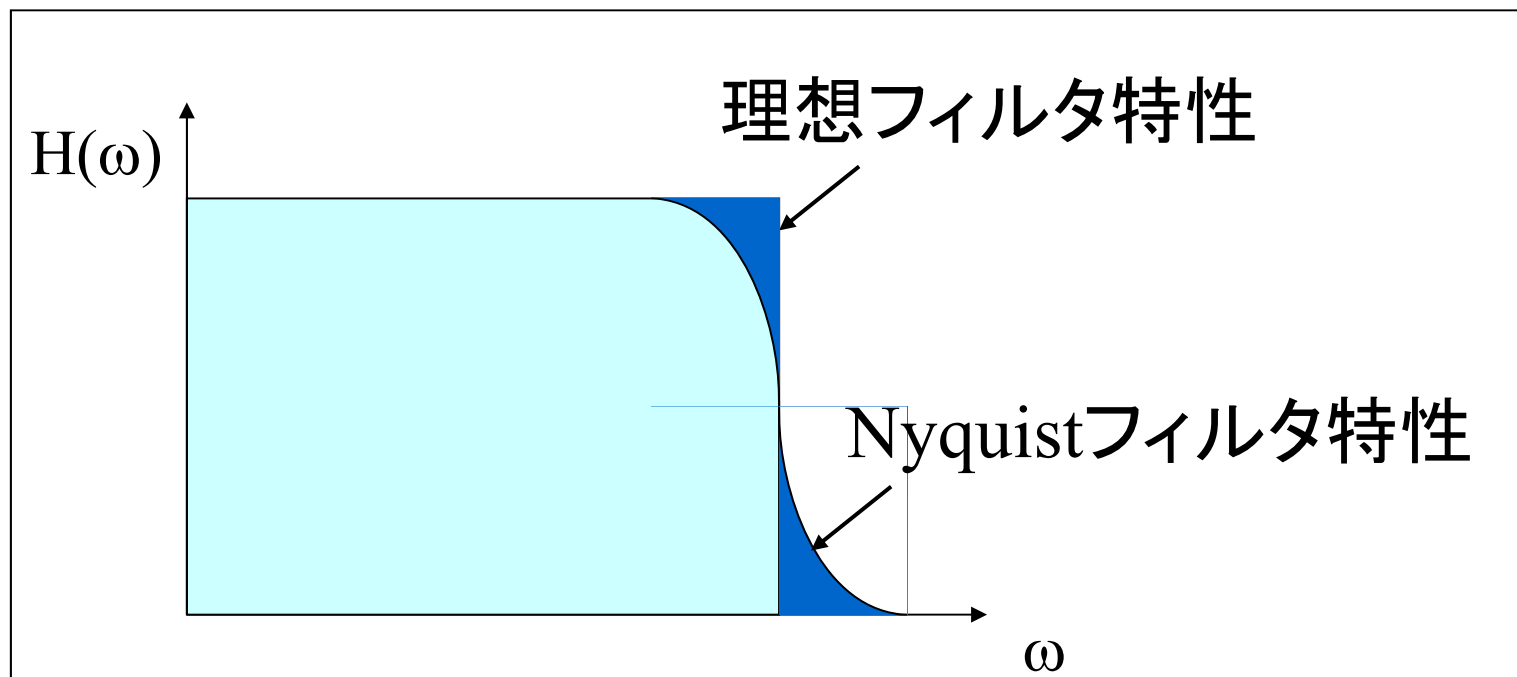


パルス整形 (Nyquist Filter)

パルス整形

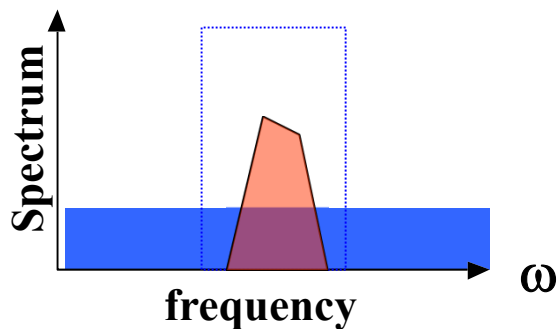


所定の判定点以外の判定点では零

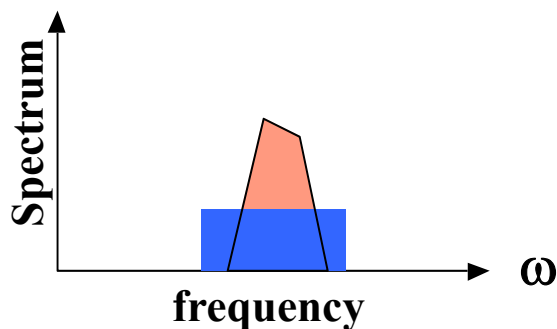


符号間干渉を発生しない周波数特性(位相は線形)

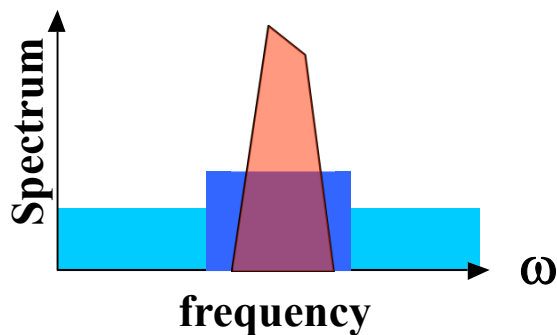
信号雑音比(SNR) と特性の関係



(a) 入力信号＋雑音

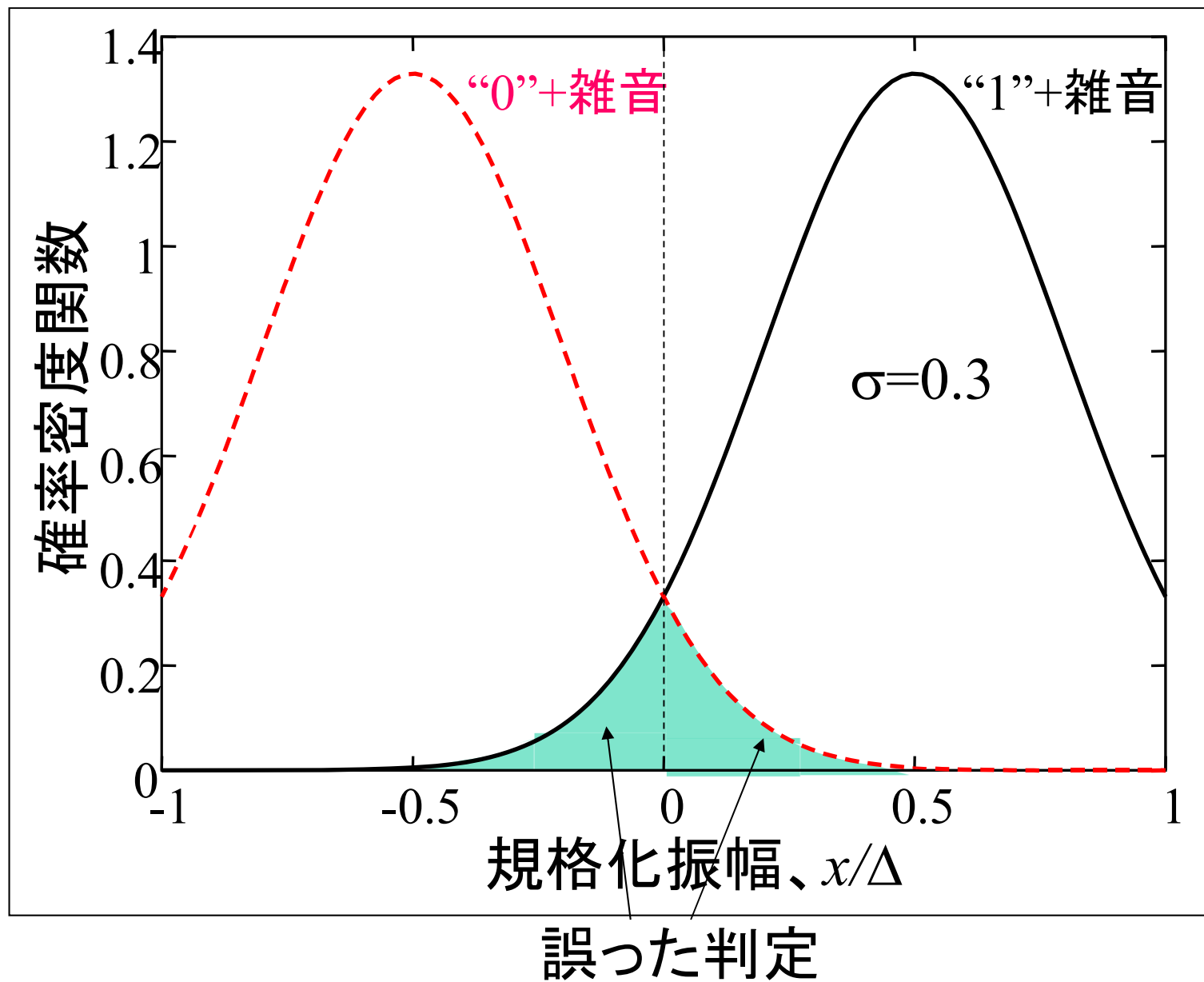


(b) 初段フィルタ通過後

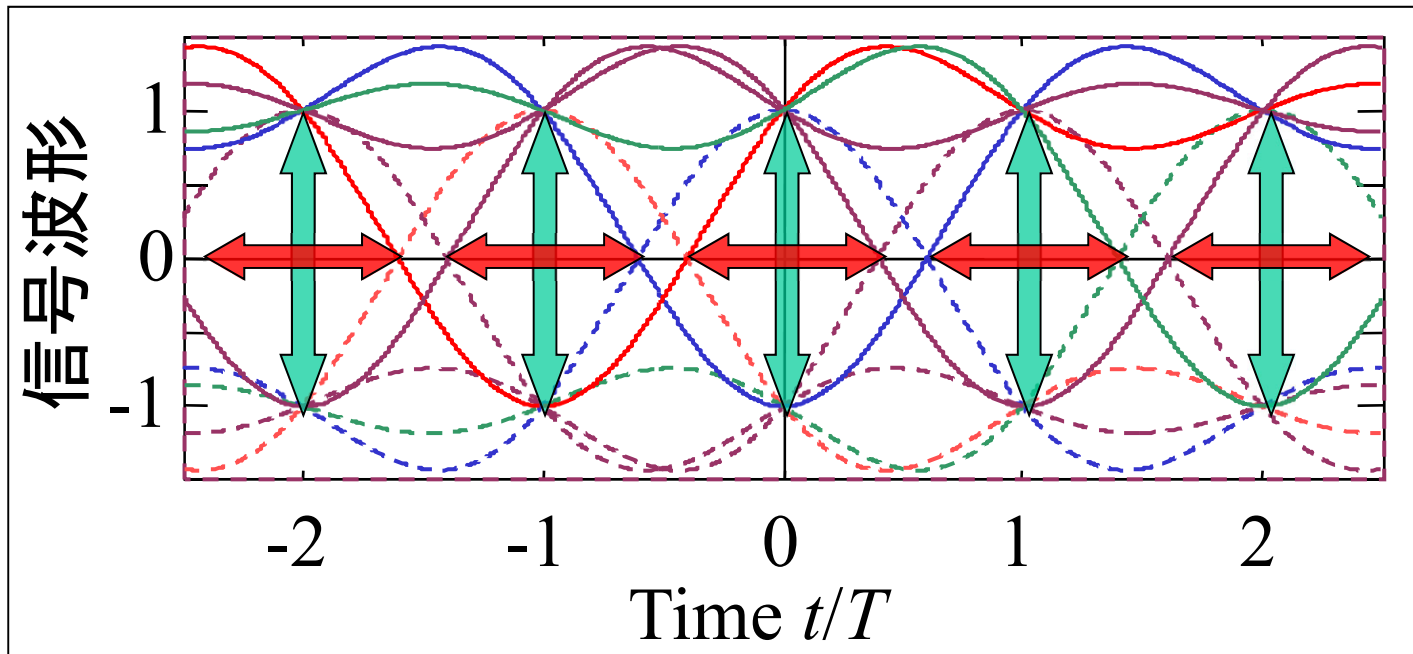


(c) 増幅器通過後

ガウス性雑音による"0","1"判定の誤り



信号波形を重ね書きすると

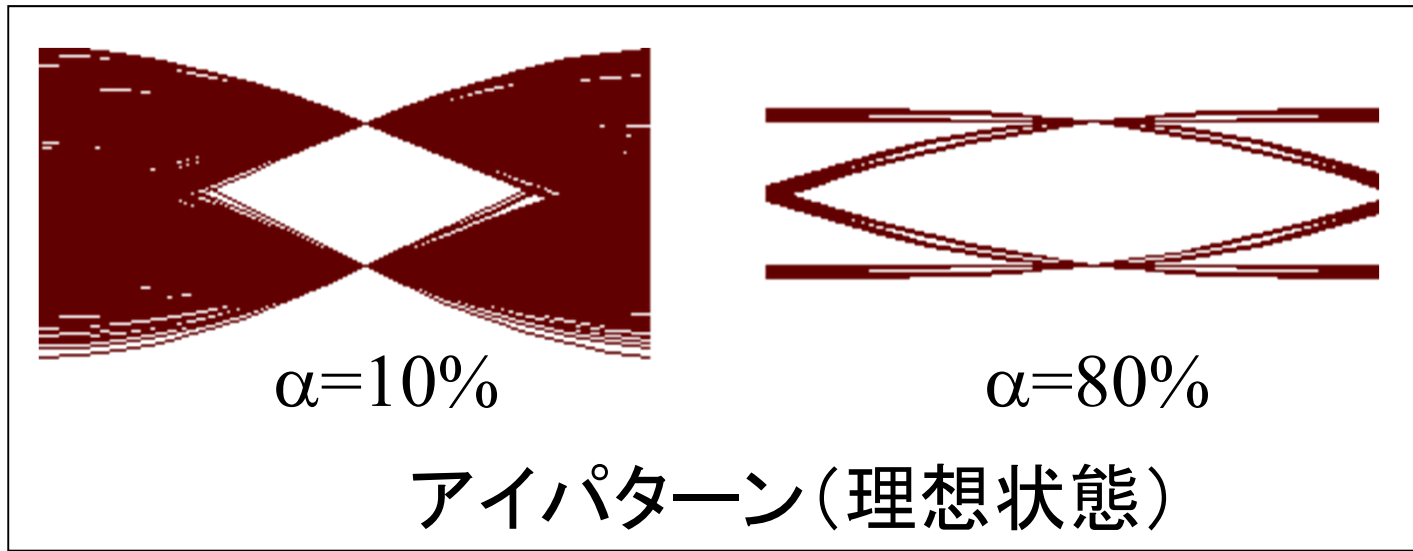


判定時での上下の開き＝雑音への耐性

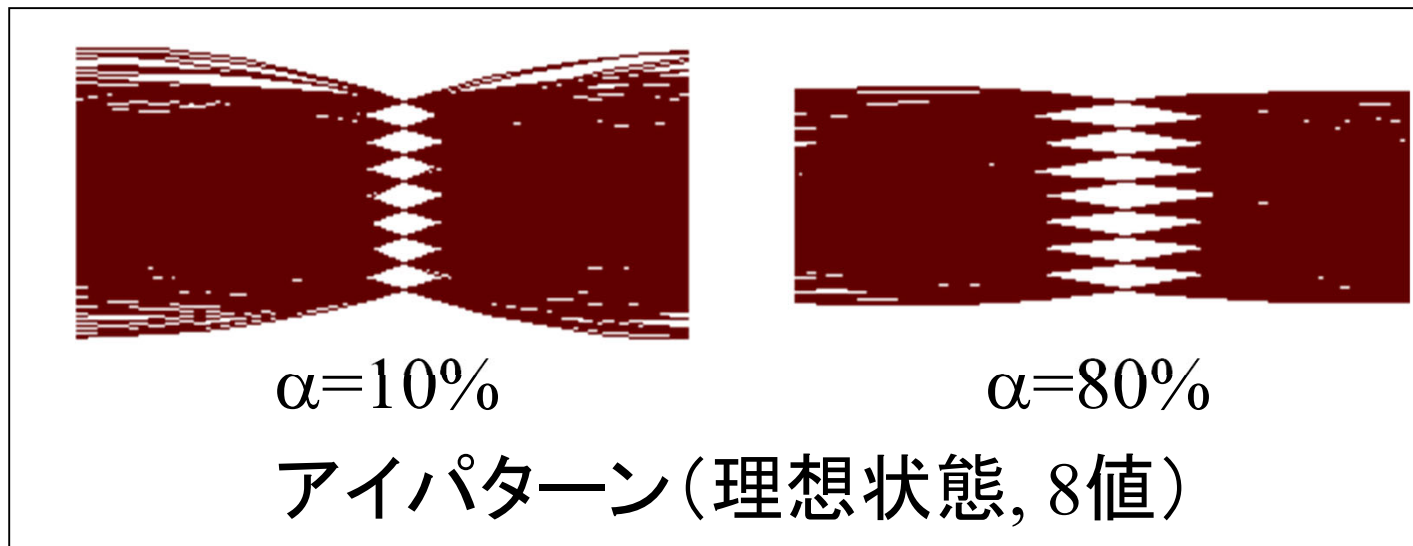
判定時での左右の開き＝ジッタ(時間的揺らぎ)への耐性

↓ 余裕があれば
多値変調

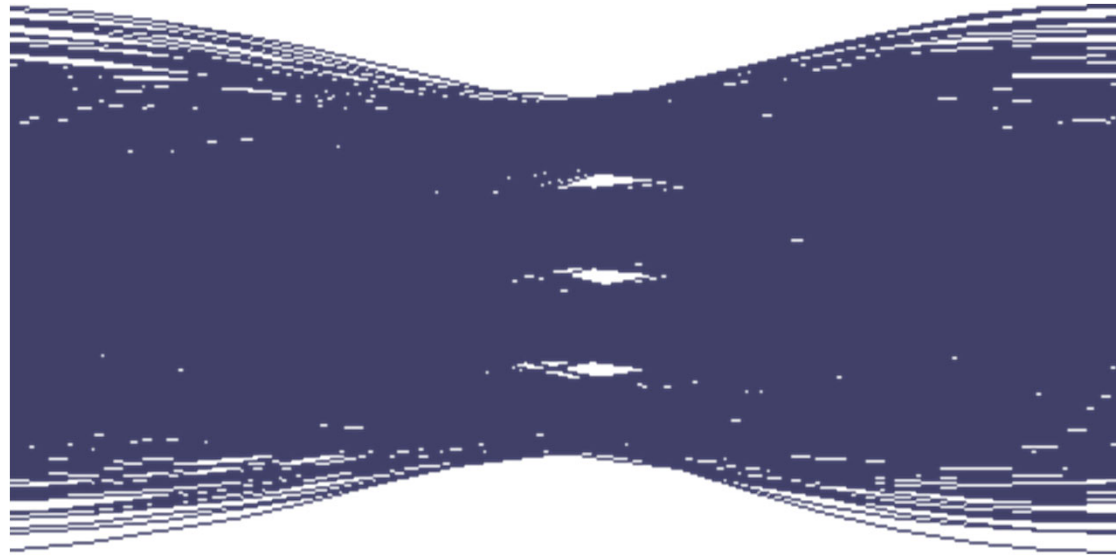
全ての周期を重ねると(α :ロールオフ比)



振幅により多値(M 値)で表現すると



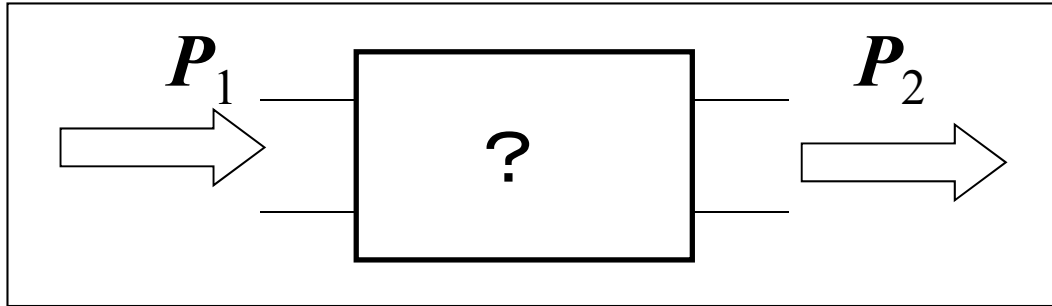
雑音とジッタが重畳すると



瞳が閉じる！

デシベル(dB)とは？

dは補助単位(1/10)



情報は電力比 P_2/P_1 によって伝送

1. 二つの信号間の電力比: $10\log_{10}(P_2/P_1)$

回路のインピーダンスが等しいとすれば:

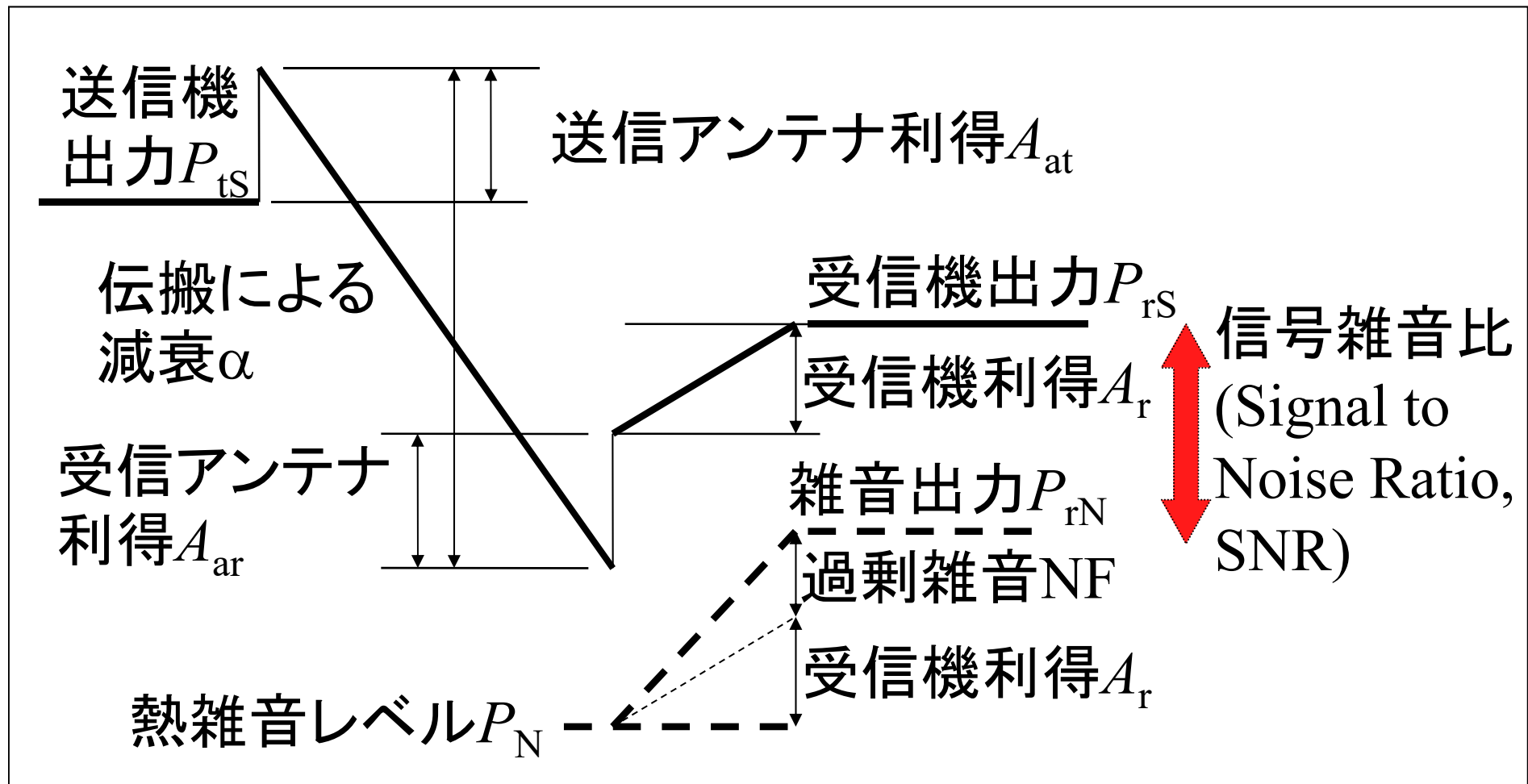
$$P=V^2/R \Rightarrow 20\log_{10}|V_2/V_1|$$

2. P_1 を1mWと選べば、電力の単位

$$0\text{dBm}=1\text{mW}$$

3. P_1 を最小可聴電力と選べば、音響電力の単位

通信システムにおける伝送レベル



$$P_{rS} = P_{tS} + A_{at} - \alpha + A_{ar} + A_r \text{ [dBm]}$$

$$P_{rN} = P_N + NF + A_r \text{ [dBm]}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{rS} = P_{tS} + A_{at} - \alpha + A_{ar} + A_r \text{ [dBm]} \\ P_{rN} = P_N + NF + A_r \text{ [dBm]} \end{array} \right\} \text{SNR} = P_{rS} - P_{rN} \text{ [dB]}$$

通信可能な距離を制限するものは？

$$\text{SNR} = P_{\text{tS}} + A_{\text{at}} + A_{\text{ar}} - \alpha - P_{\text{N}} - \text{NF} \text{ [dB]}$$

$$P_{\text{N}} = 4kTB \text{ [W]} \quad k: \text{ボルツマン定数}$$

B : 周波数帯域幅

$$P_{\text{N}} = -174 + 10\log_{10} B \text{ [dBm]} \text{ (} T=300\text{Kの時)}$$

必要とされる信号雑音比、送信電力、アンテナの利得、
雑音指数、帯域幅が判れば、許容される減衰が決定

シャノン限界

信号帯域幅 B [Hz]で誤り無く送付
できる最大の情報伝送速度は

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad [\text{bit/秒}]$$

C は通信容量と呼ばれる。

SNR: 信号雑音電力比

最適な信号は白色雑音の振る舞い

通信容量向上には？

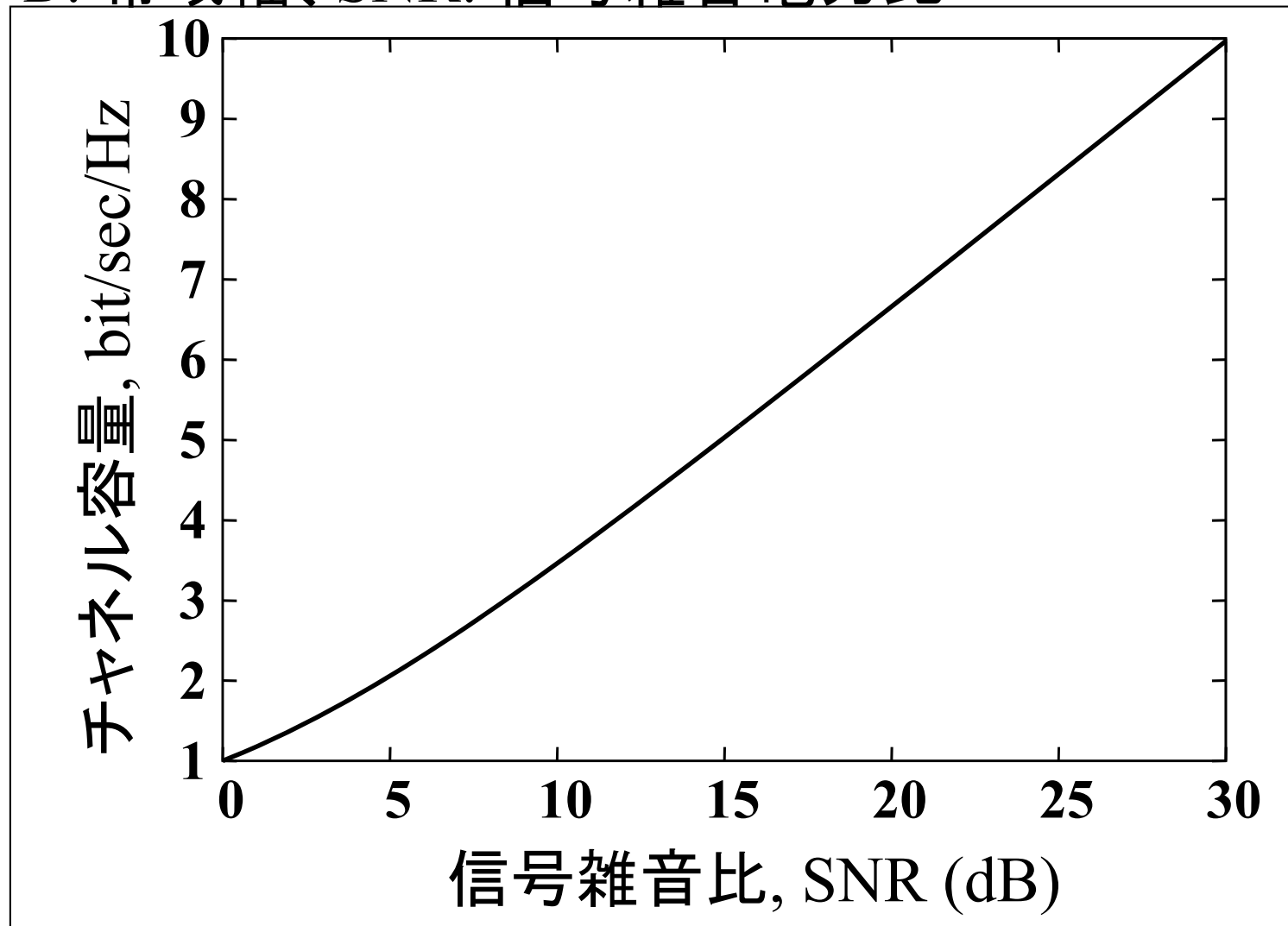
広帯域化 + 高SNR化

理論限界に近い符号化手法の適用

チャンネル容量 $C = B \log_2(1 + \text{SNR})$

伝送可能な最大情報速度

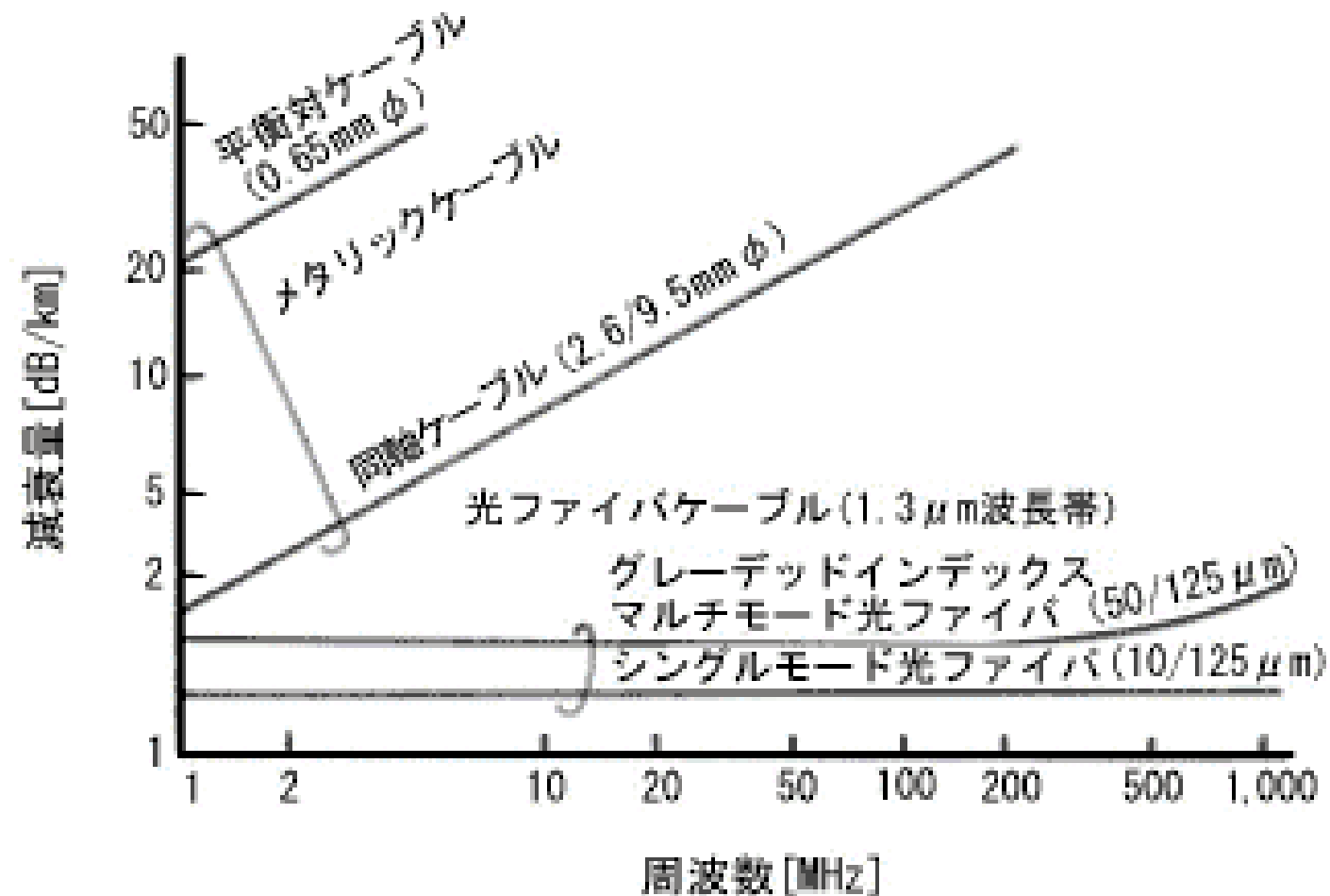
B : 帯域幅、SNR: 信号雑音電力比



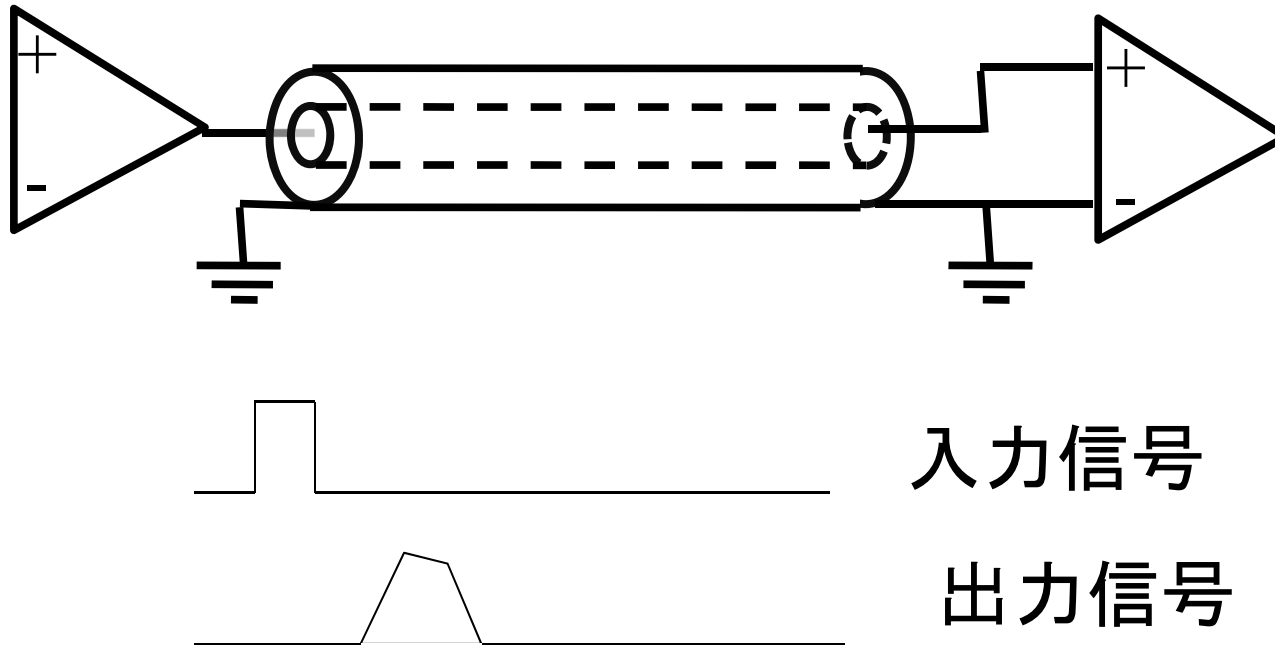
媒体の選択

- 到達範囲(利便性⇔秘匿性、媒体の再利用)
- 通信速度
- 固定もしくは無線
- 対象端末の台数
- 脱着の可否(利便性⇔秘匿性、拡張性、信頼性)
- 移動速度(ドップラー効果、通信速度を制限)
- 免許の要・不要
- 障害対策の要・不要(日射・風雨、妨害波、高電圧等)
- 権利、価格、信頼性

媒体による伝搬損失の違い



周波数分散性の影響

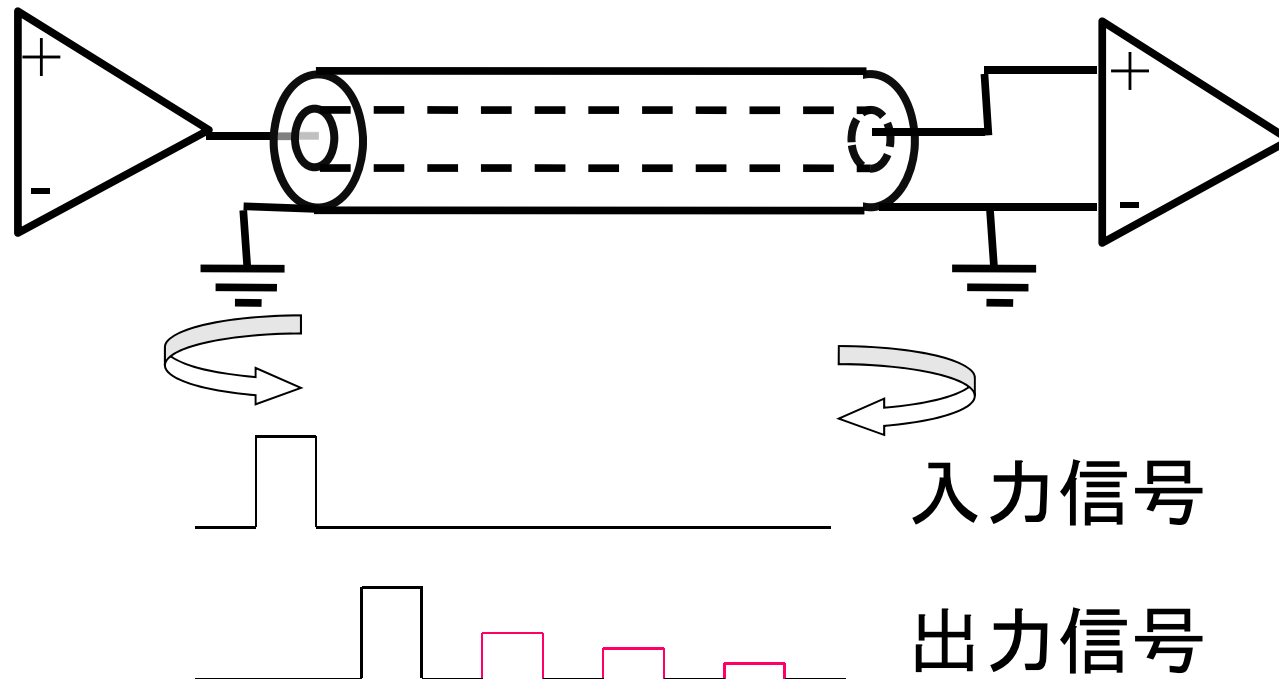


- ・周波数による遅れ時間の変動
- ・波形の乱れ
- ・周波数特性の乱れ

群遅延

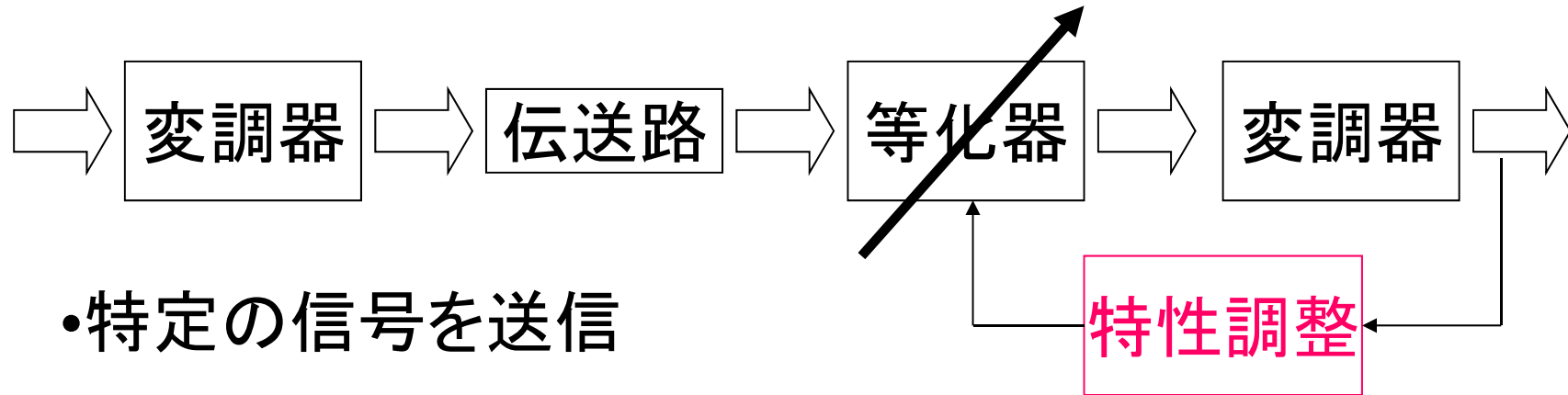
$$\tau = -\frac{\partial \phi}{\partial \omega}$$

反射の影響



- ・伝送路端での反射、伝送路接続部・コネクタでの反射
- ・多重エコーの発生
- ・周波数特性の乱れ

等化器(イコライザ)

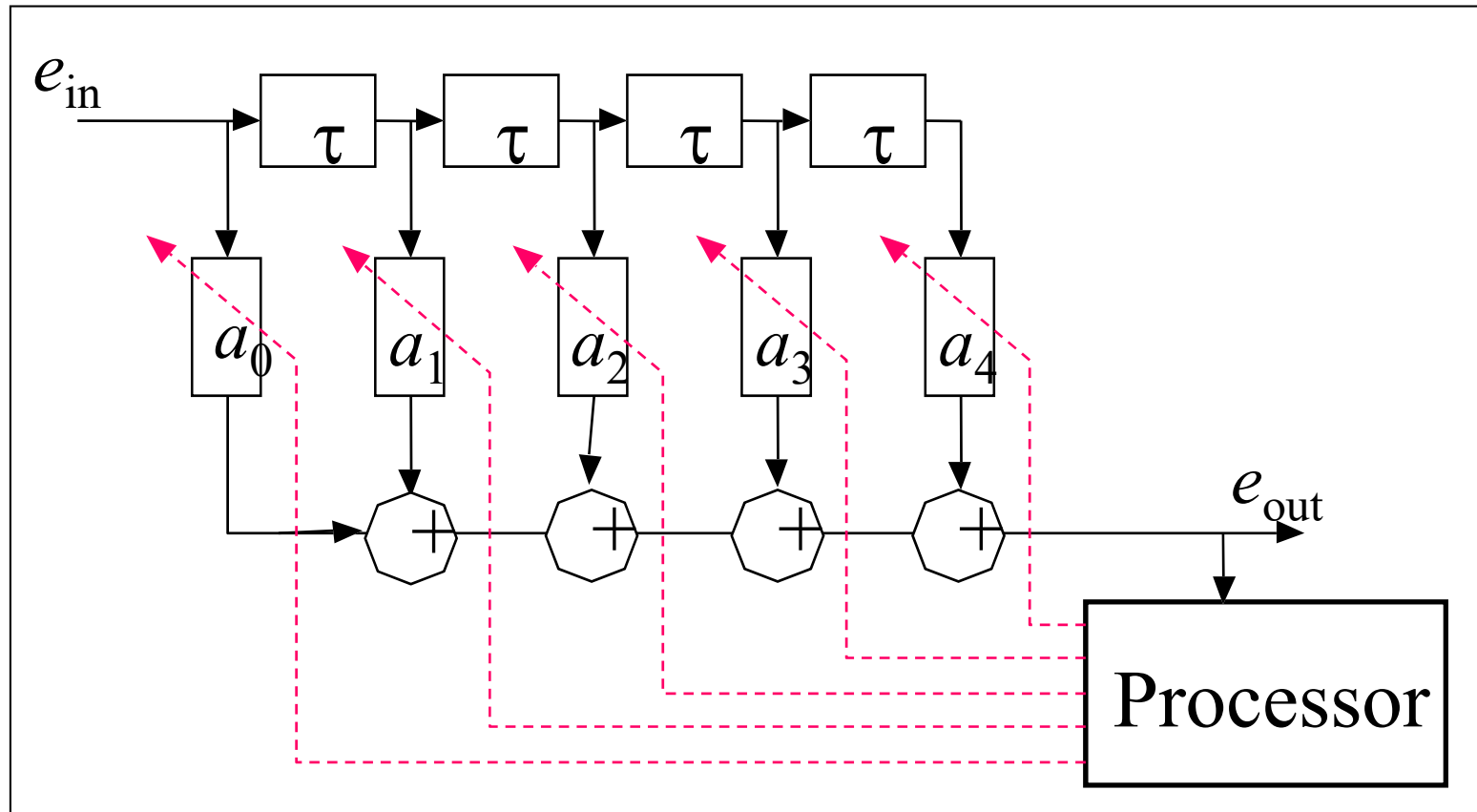


- 特定の信号を送信
- 信号を誤り無く受信できるように等価器を調整
- 調整不能な場合は信号伝送速度を低減

比較: 自動利得制御 (AGC: Auto Gain Control)

ただし、一般の光通信では等化不可能
(光の振幅情報のみを利用のため)

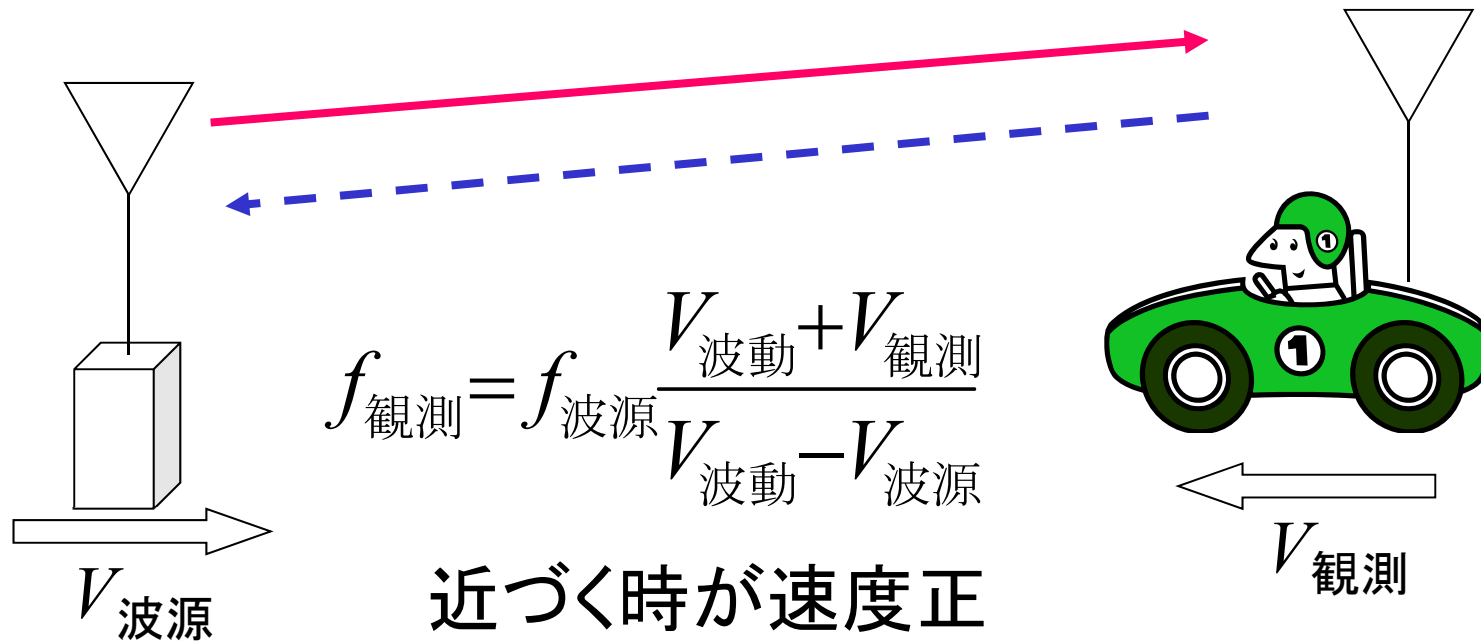
適応フィルタ



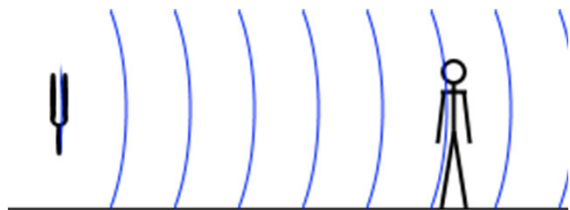
通信環境の自動補正(等化器、イコライザ)

ドップラー効果

送信器もしくは受信器が移動したら？



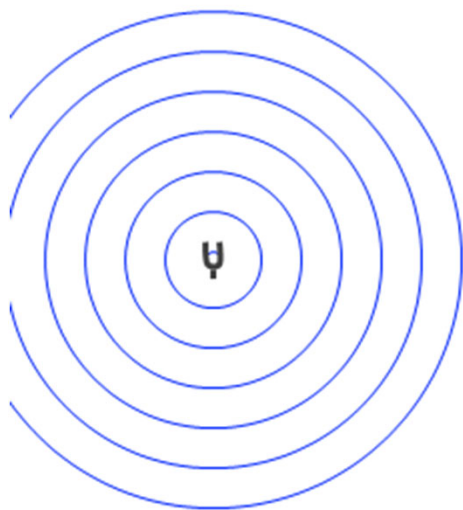
信号の周波数を変換 ⇒
高速移動時の通信を制限



波源と観測者が固定



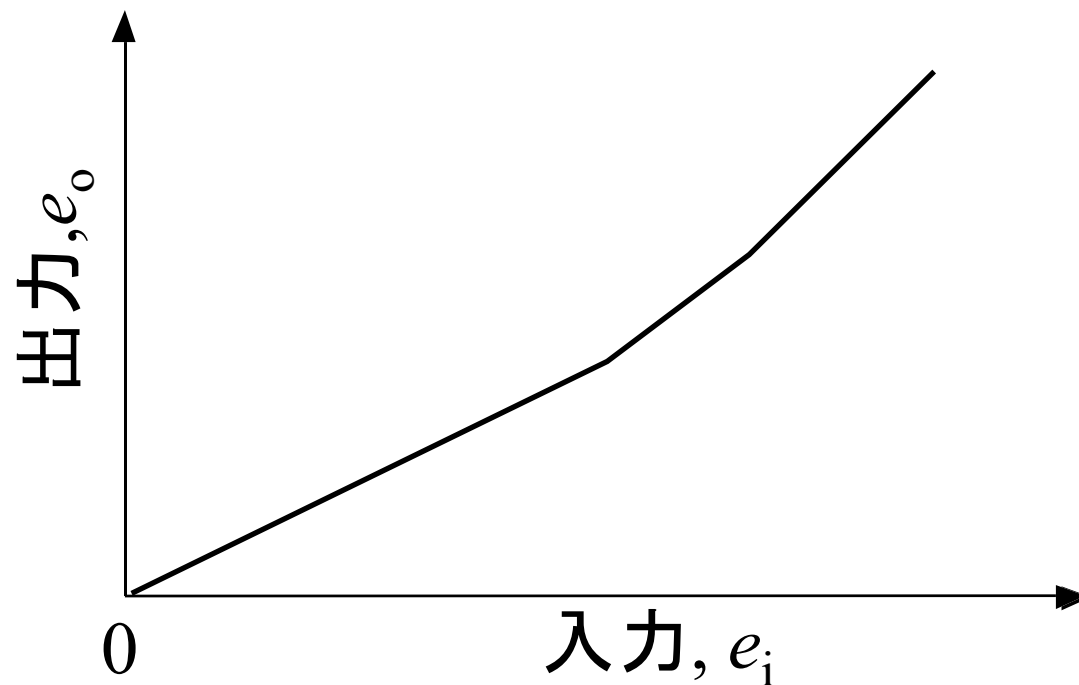
観測者が移動



波源が移動
(音の速さは不変)

<http://wakariyasui.sakura.ne.jp/p/wave/dopp/doppura-.html>

非線形性があると



$$e_o = c_1 e_i + c_2 e_i^2 / 2 + c_3 e_i^3 / 3 + \dots$$

2つの信号が入ると？ $e_i = e_a \cos(\omega_a t) + e_b \cos(\omega_b t)$ ($|e_a| \gg |e_b|$),

$$e_o = c_1(e_a \cos \omega_a t + e_b \cos \omega_b t) + c_2(e_a \cos \omega_a t + e_b \cos \omega_b t)^2 / 2 \\ + c_3(e_a \cos \omega_a t + e_b \cos \omega_b t)^3 / 3 + \dots$$

$$\begin{aligned} & \cong e_a \{c_1 + c_2 e_a^2 / 4\} \cos \omega_a t \\ & + e_b \{c_1 + c_2 e_a^2 / 2\} \cos \omega_b t \\ & + c_2 e_a^2 \cos(2\omega_a t) / 4 + c_2 e_a^2 / 4 \\ & + c_2 e_a e_b [\cos \{(\omega_a + \omega_b)t\} + \cos \{(\omega_a - \omega_b)t\}] / 2 \\ & + c_3 e_a^2 e_b [\cos \{2\omega_a + \omega_b)t\} + \cos \{2\omega_a - \omega_b)t\}] / 4 \\ & + \dots \end{aligned}$$

線形成分

+利得圧縮

H2+DC発生

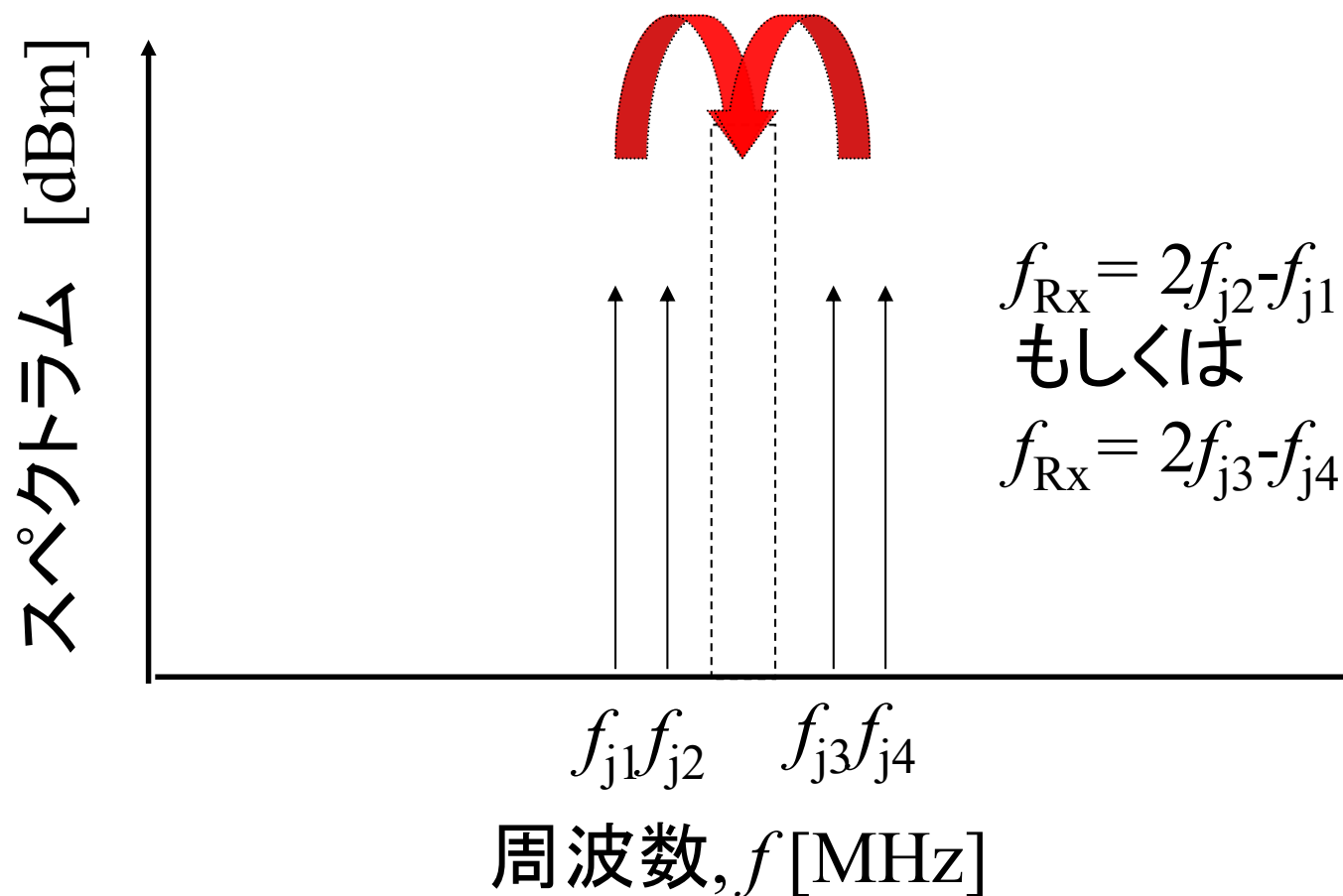
IMD2発生

IMD3発生

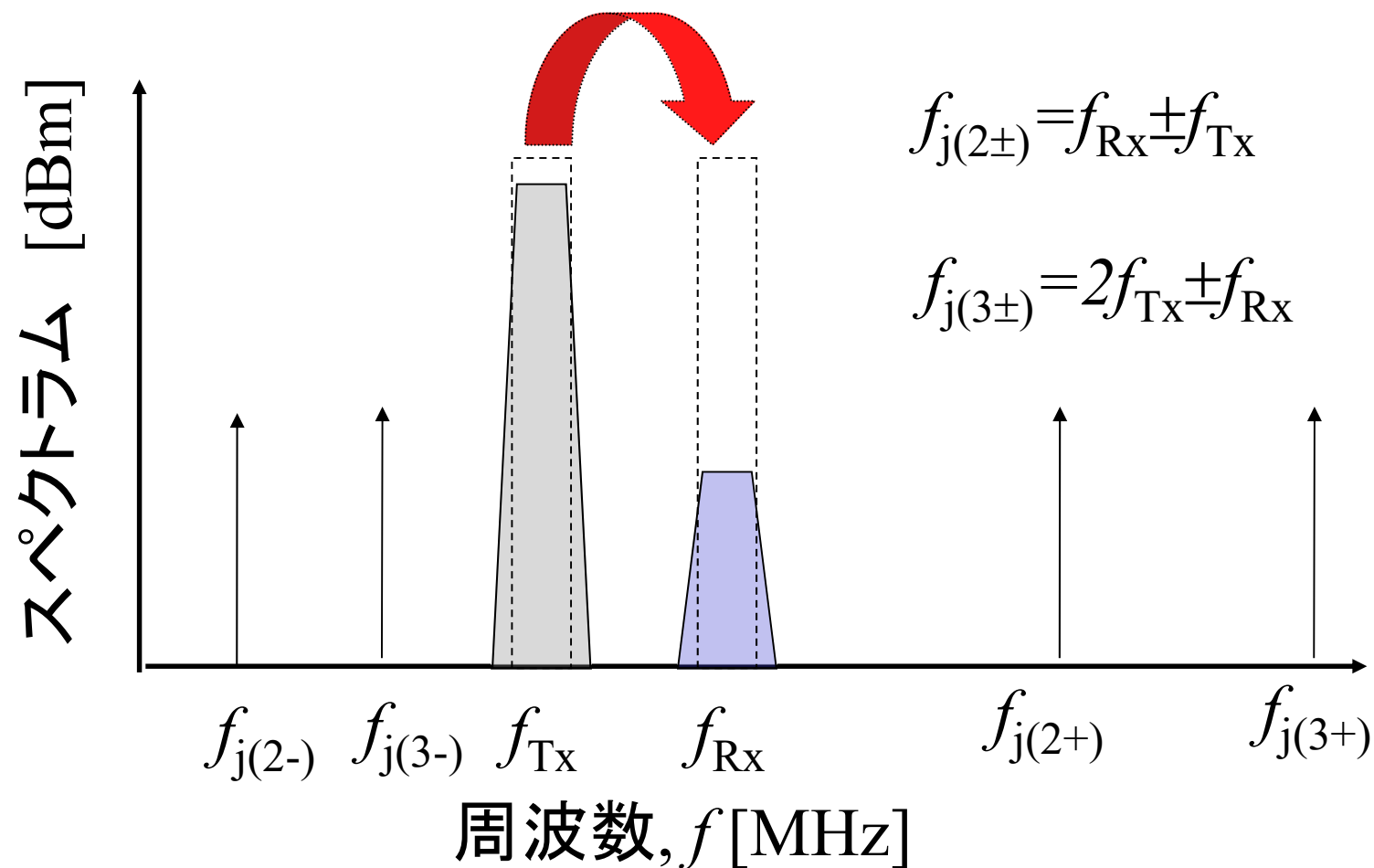
H2: 2次高調波(Second Harmonics)

IMD: 相互変調(Inter-Modulation Distortion)

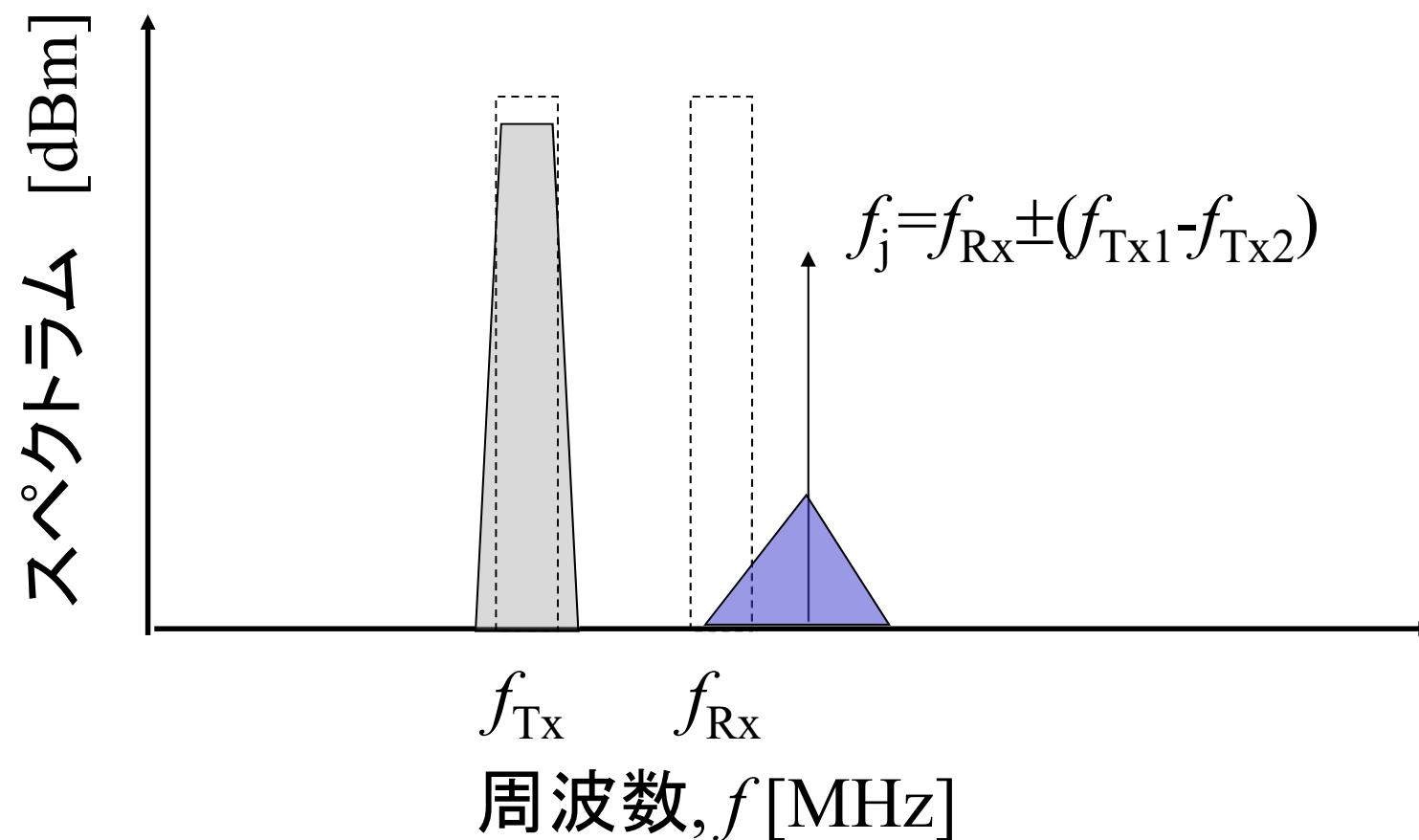
近接チャネル信号間の3次混変調 信号による妨害



送信波との相互変調歪 による妨害

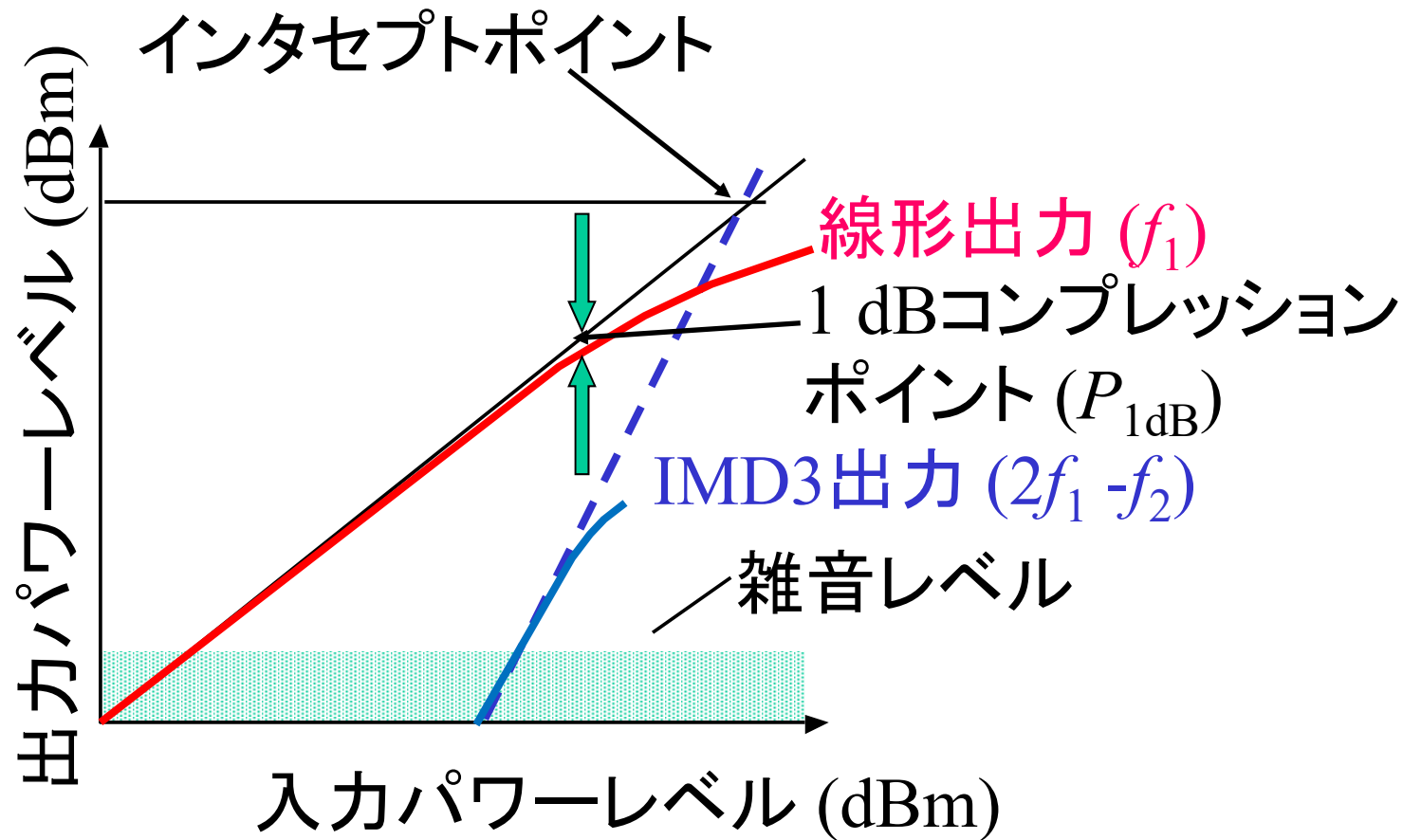


送信波と近接チャネル信号との3 次相互混変調歪による妨害



3次インタセプトポイント (IP3)

相互変調歪による妨害波の発生

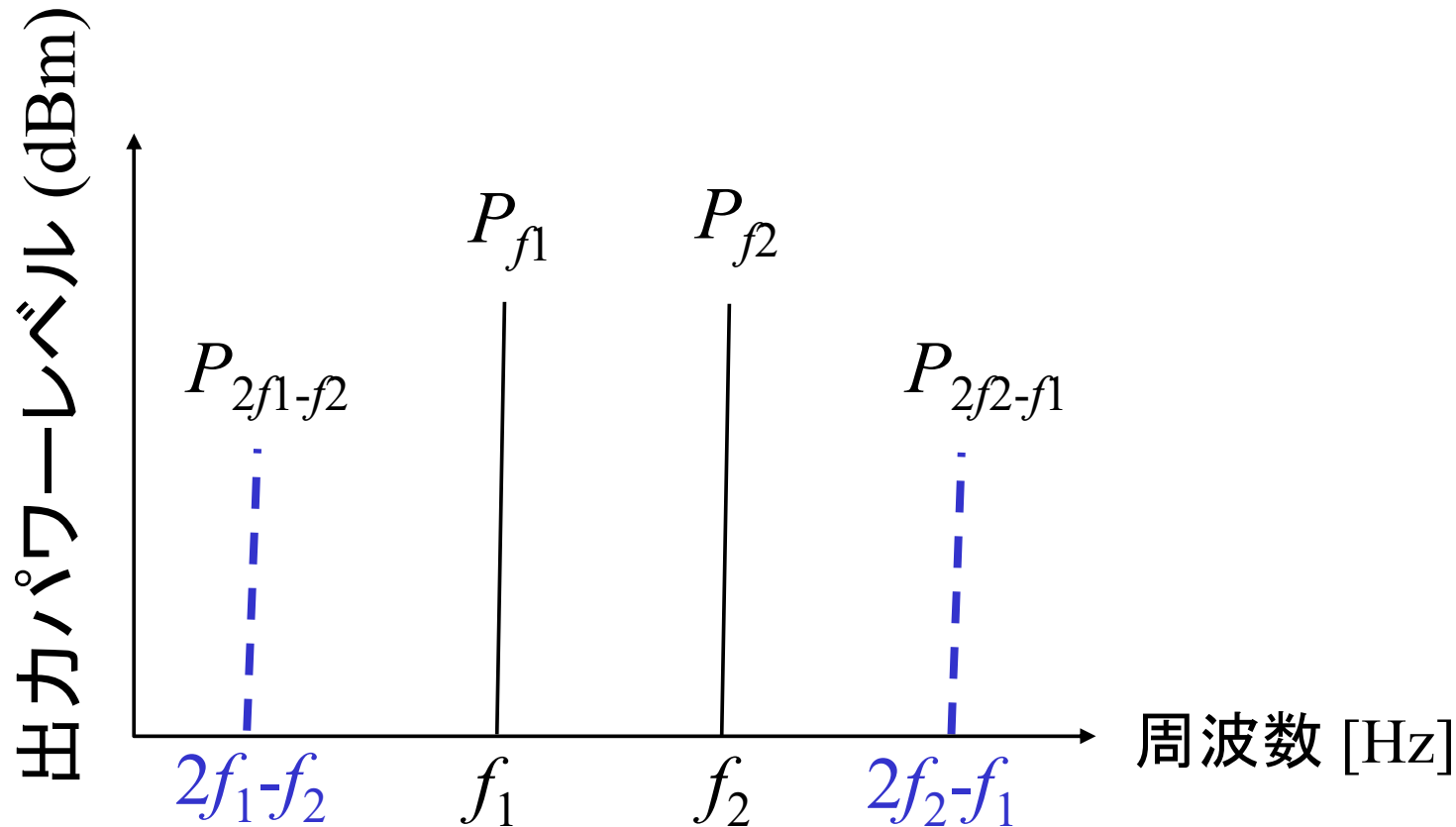


$$IIP3 \approx P_{1dB} + 9.6 \text{ [dB]: 周波数依存性を無視した導出}$$

3次インタセプトポイント (IP3)

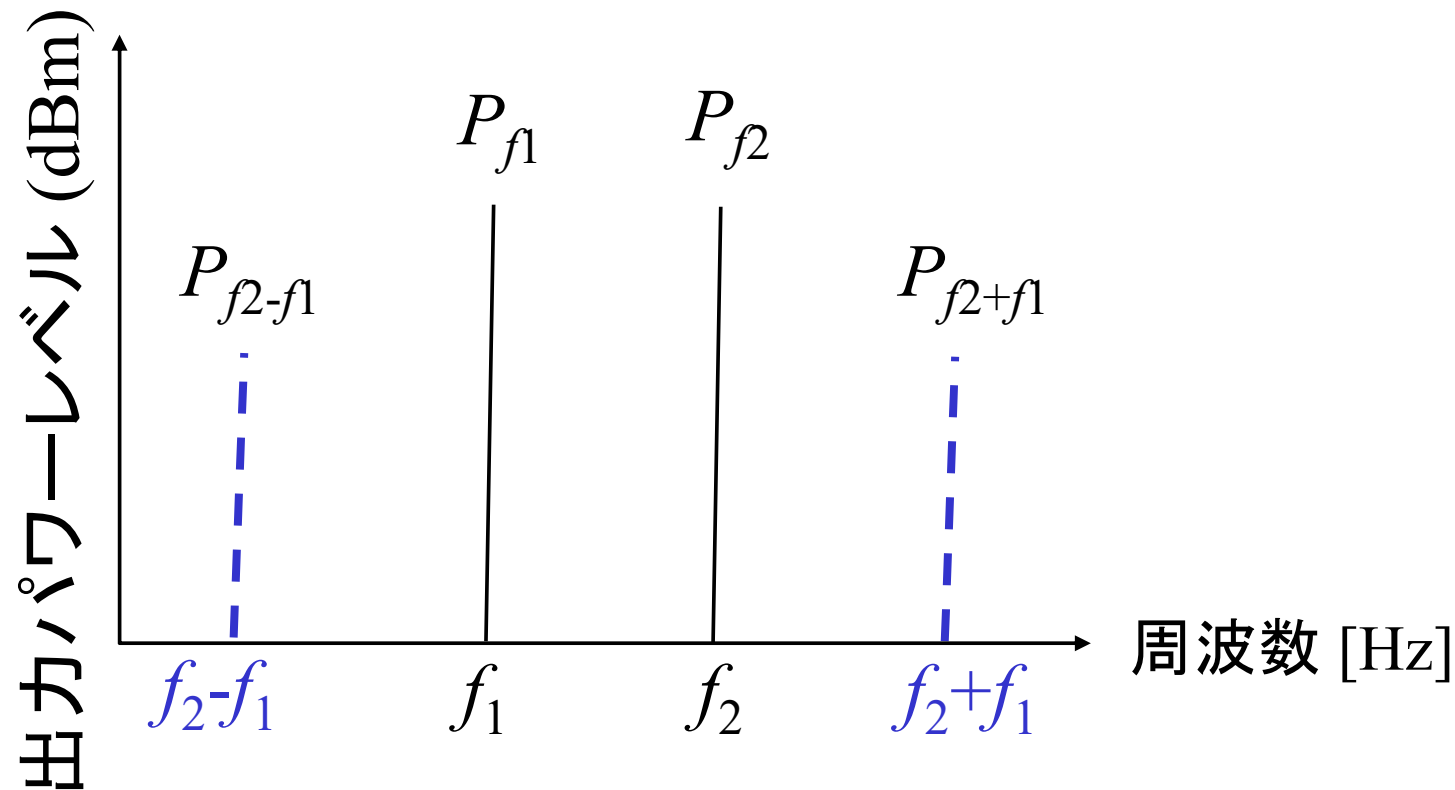
$$P_{2f_1-f_2} [\text{dBm}] = 2 \times P_{f_1} [\text{dBm}] + P_{f_2} [\text{dBm}] - 2 \times \text{IP3} [\text{dBm}]$$

$$P_{2f_2-f_1} [\text{dBm}] = 2 \times P_{f_2} [\text{dBm}] + P_{f_1} [\text{dBm}] - 2 \times \text{IP3} [\text{dBm}]$$



2次インタセプトポイント (IP2)

$$P_{f_2 \pm f_1} [\text{dBm}] = P_{f_2} [\text{dBm}] + P_{f_1} [\text{dBm}] - \text{IP2} [\text{dBm}]$$

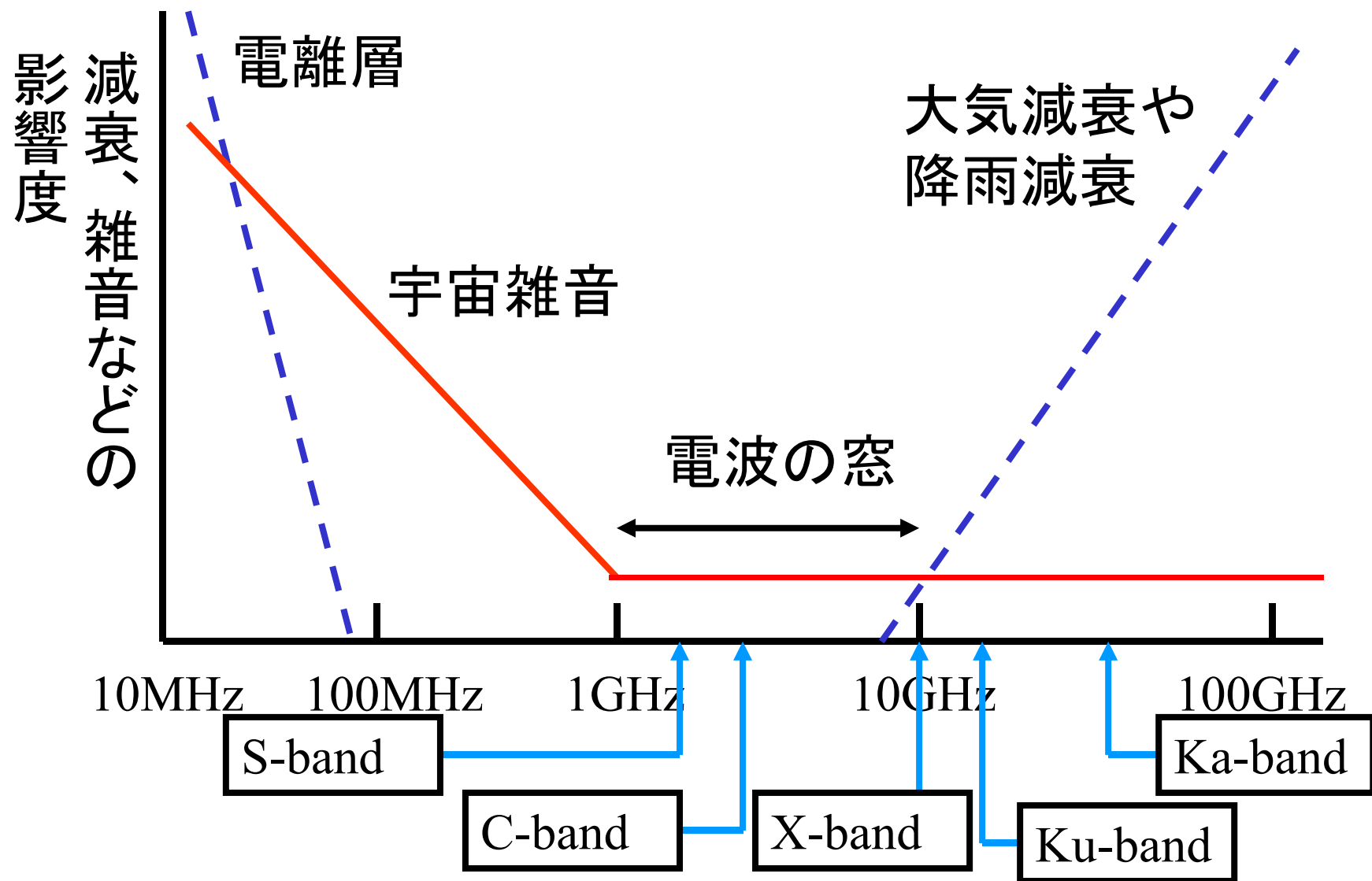


通信に利用される電波の区分

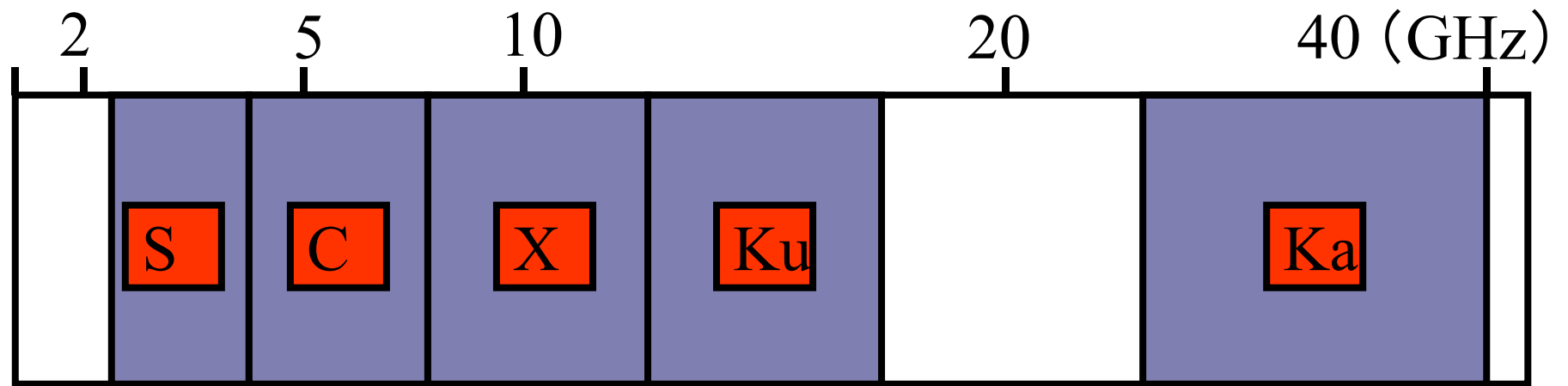
区分	周波数	伝搬の形態
VLF: 極長波	3 - 30kHz	地球・電離層間に沿って伝搬
LF: 長波	30k - 300kHz	地球・電離層間伝搬 - 地表波
MF: 中波	300k- 3MHz	昼間は地表波 - 夜間は電離層反射
HF: 短波	3M - 30MHz	電離層反射 - 電離層反射
VHF: 超短波	30 - 300MHz	見通し距離の直接波 - 電離層反射
UHF: 極超短波	300M - 3GHz	見通し距離の直接波
SHF: マイクロ波	3G - 30GHz	見通し距離の直接波、衛星通信
EHF: ミリ波	30G - 300GHz	レーダ、衛星通信
サブミリ波*	300G - 3THz	

*電波法上では電波に区分せず(赤外線)

電波の窓



マイクロ波通信の信号帯



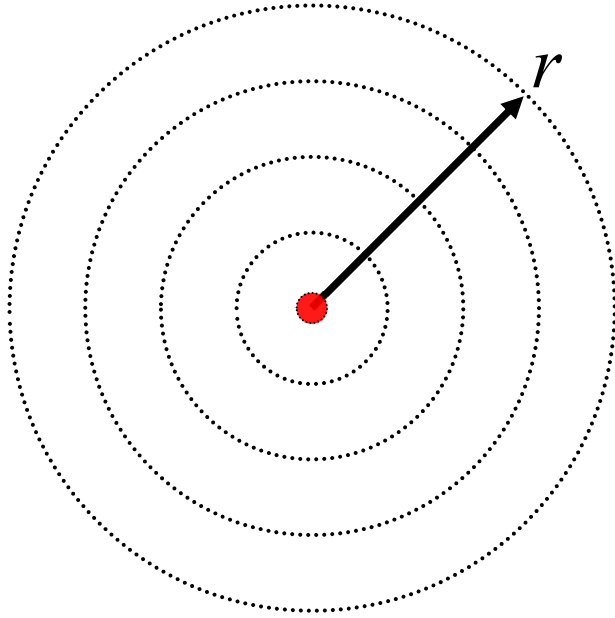
←

降雨減衰
伝搬損失が小
大気や電離層による
フェージング大

→

降雨減衰
伝搬損失が大
大気や電離層による
フェージング小

電波の伝搬



等方的な励振であれば、電波の電力密度 I_i [W/m²]は

$$I_i = P_t / 4\pi r^2$$

方向によって励振強度に差があれば(異方性)、電波の電力密度 I_a [W/m²]は

$$I_a = A_{at}(\theta) I_i = A_{at}(\theta) P_t / 4\pi r^2$$

$A_{at}(\theta)$: アンテナの利得

$A_{at}(\theta)$ 大 $\Rightarrow$ 受信感度良、指向性强

アンテナの特性例

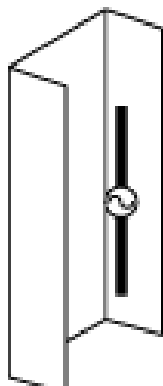
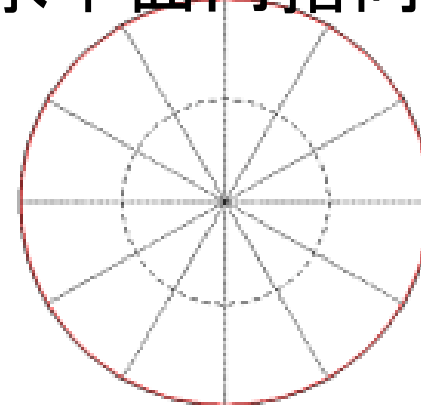
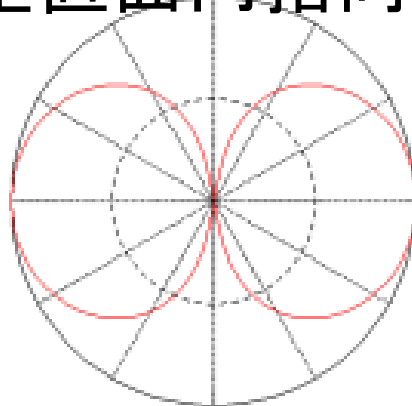
利得

垂直面内指向性

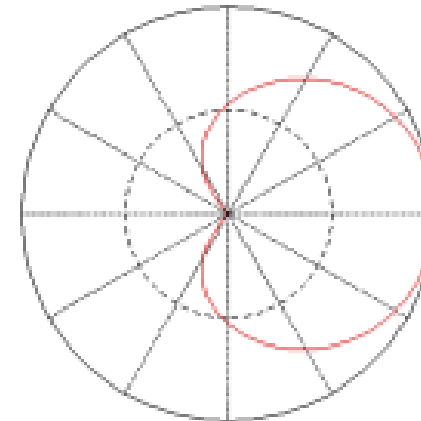
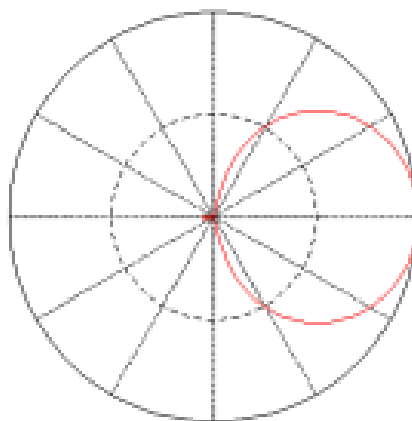
水平面内指向性



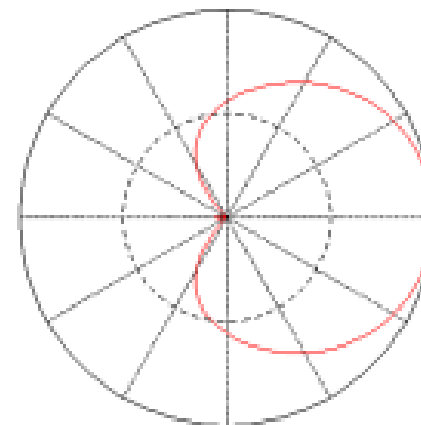
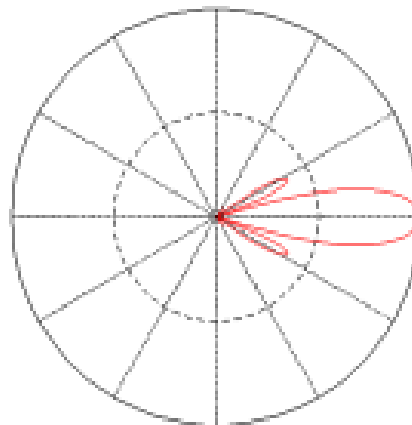
2.1 dBi



7.0 dBi



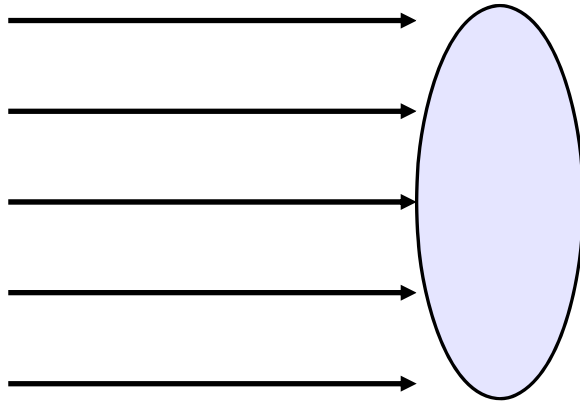
13.0 dBi



<http://www.den-gyo.com/labo/kouza/kouza03.html>

電波の受信

電力密度 I [W/m²]



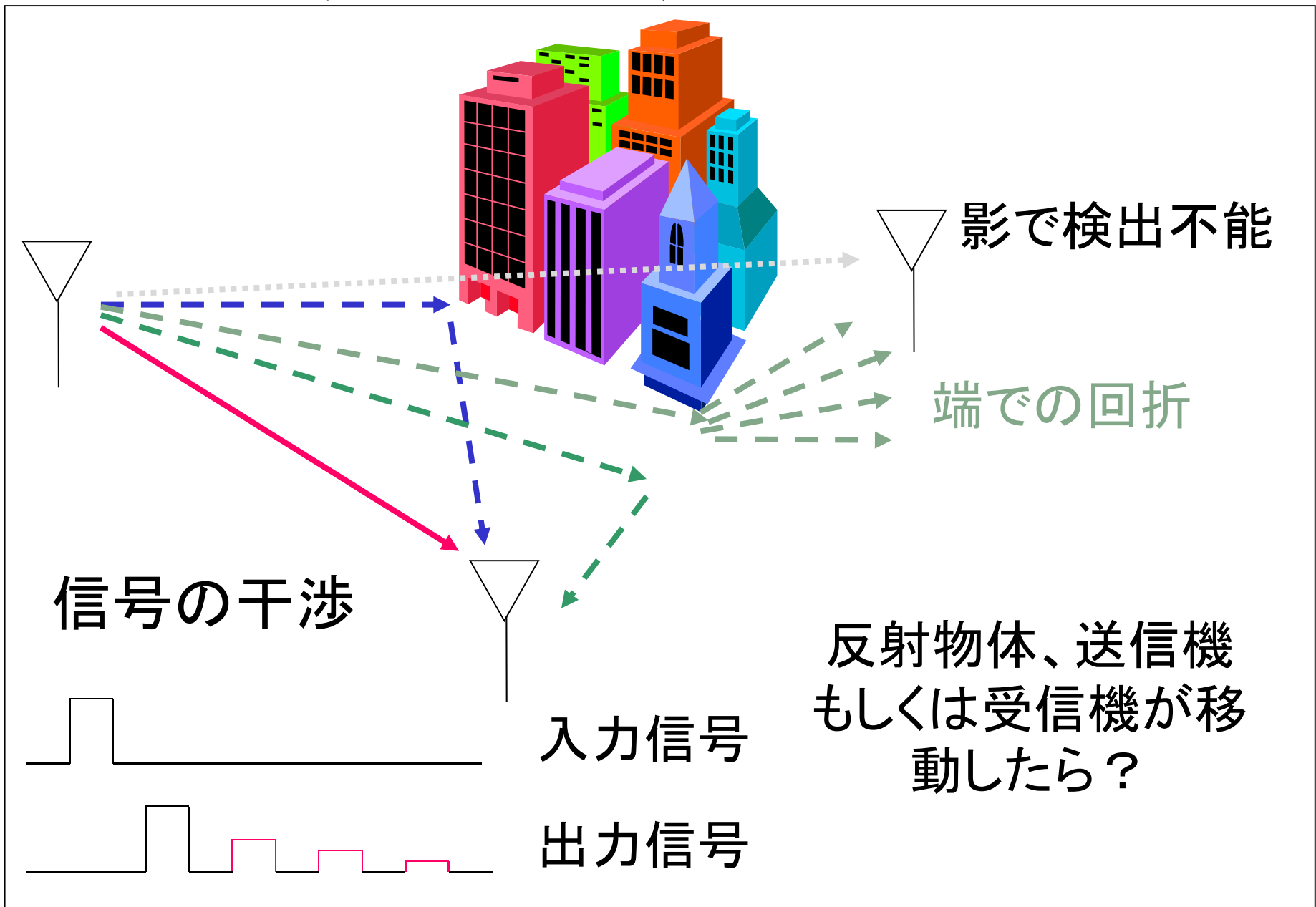
実効的な面積 S [m²] のアンテナ
で受信 $\Rightarrow$ 受信電力 $P_r = IS$

$A_{ar}(\theta)$: アンテナ利得 $S = A_{ar}(\theta) \lambda^2 / 4\pi$

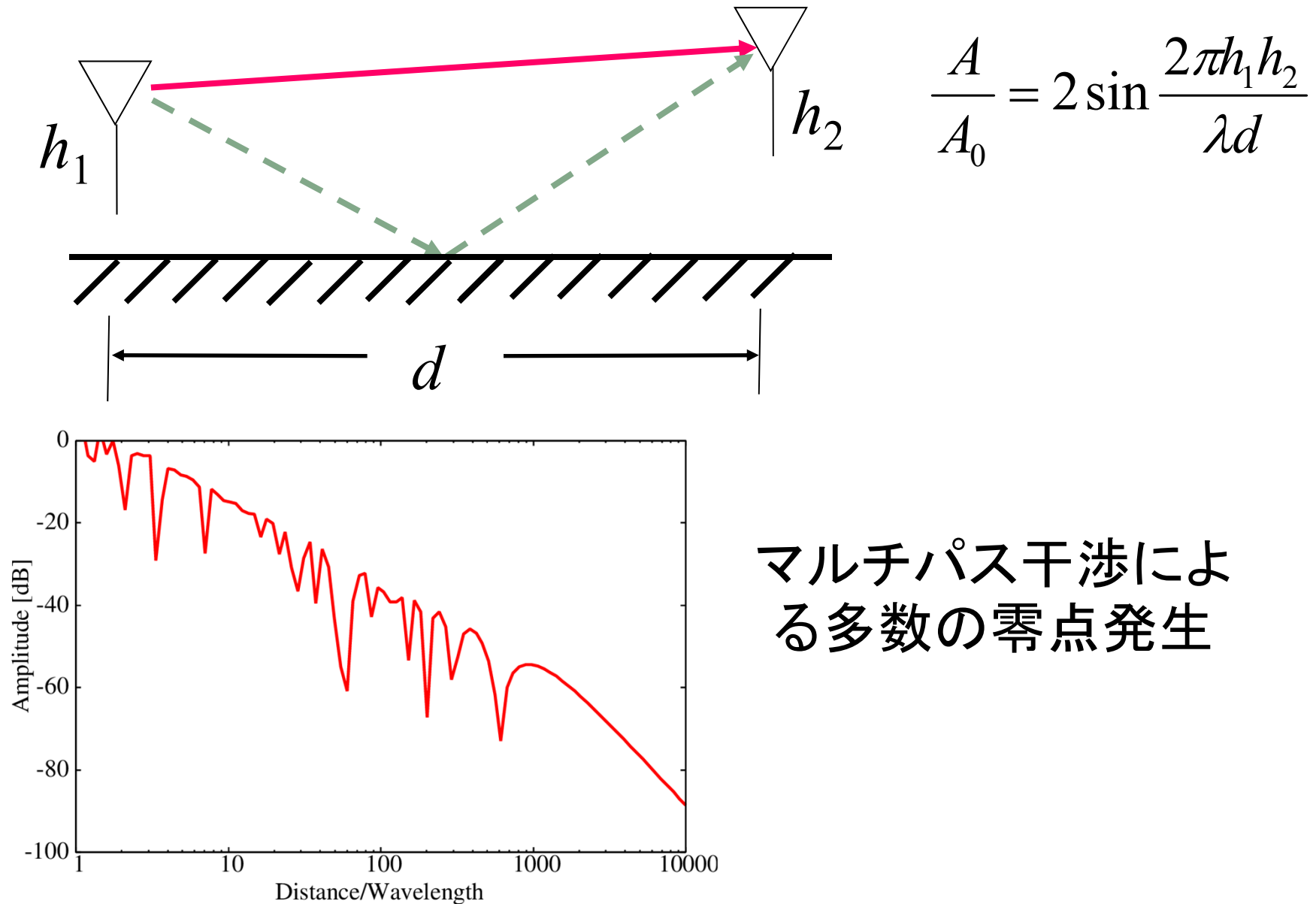
受信電力 P_r [W/m²]:

$$P_r = A_{at}(\theta) S P_t / 4\pi r^2 = A_{at}(\theta) A_{ar}(\theta) P_t \lambda^2 / 16\pi^2 r^2$$

多重経路(Multi-Path)

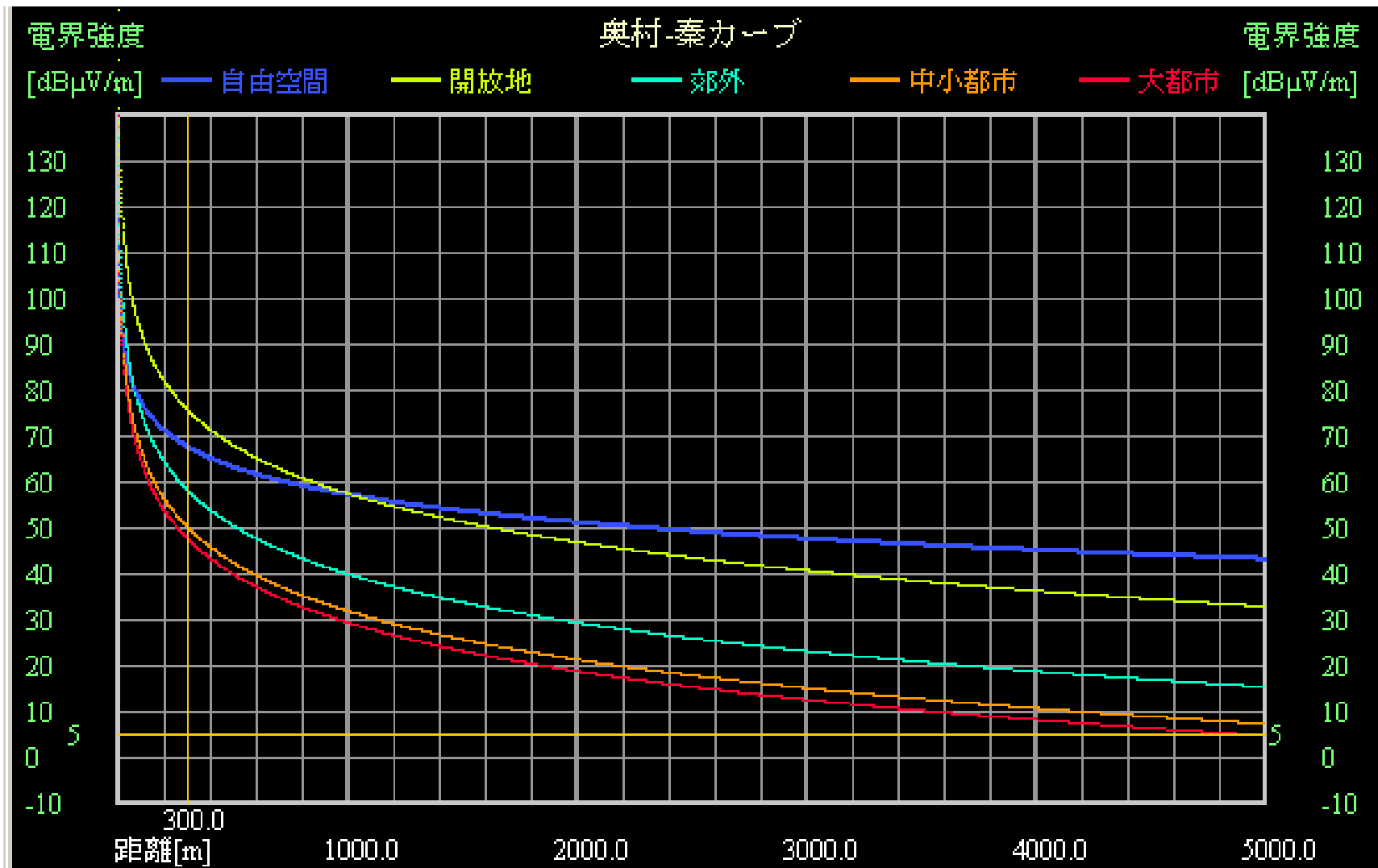


直接波と大地反射波の干渉



伝搬減衰のモデル(奥村-秦カーブ)

建物や地面の影響を測定結果に基づきモデル化



400 MHzの例

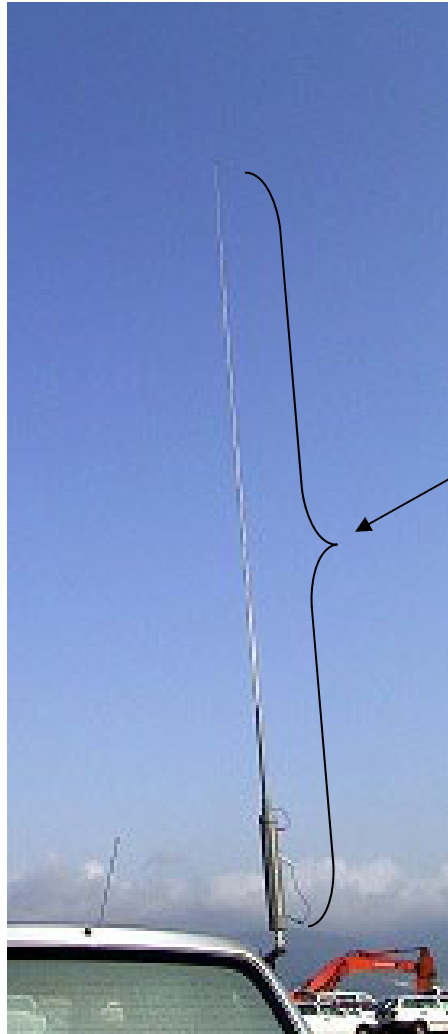
ダイポール(双極子)アンテナ



$\lambda/4$ 伝送線路
(端点開放、左右で極性反転)

構造簡単・利得少

モノポール(単極子)アンテナ



$\lambda/4$ 伝送線路
(端点開放、地
面で鏡像)

構造簡単、寸法半分・利得少

八木・宇田アンテナ



構造簡単・利得大

パラボラ(放物面)アンテナ

放射器



放物面鏡

利得大、寸法大、精度要、雨や風の影響大

帯域制限された信号のフーリエ積分表示

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp(+j\omega t) d\omega$$

$S(\omega)$: 信号 $s(t)$ のスペクトラム

ω_w : 信号の帯域幅

$s(t)$ は実数であるから、 $S(-\omega)=S(+\omega)^*$

帯域制限された信号 $s(t)$ のスペクトラム表示

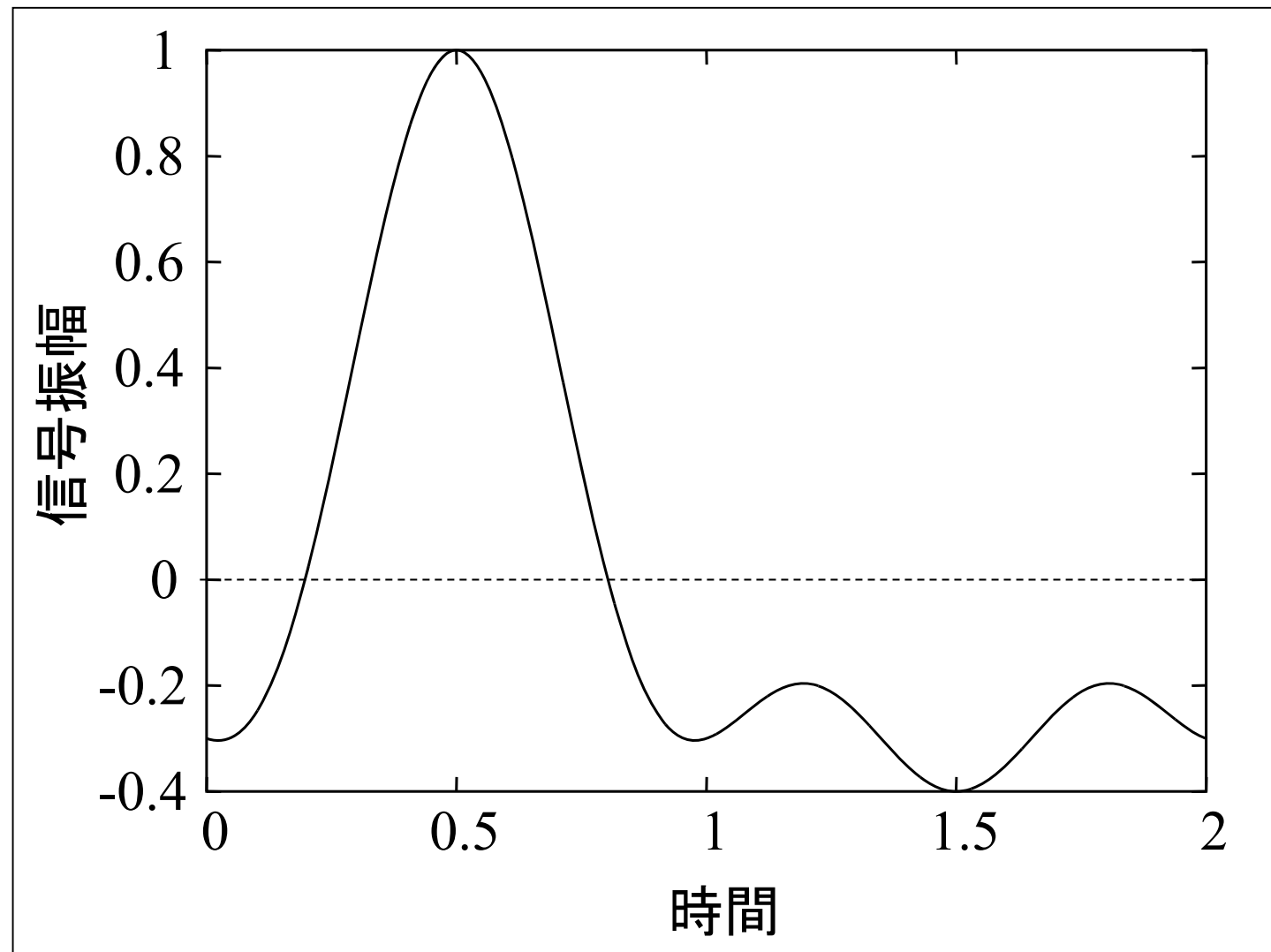
$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp(+j\omega t) d\omega$$

$c(t)=\cos(\omega_c t)$ を乗ずると **搬送波**

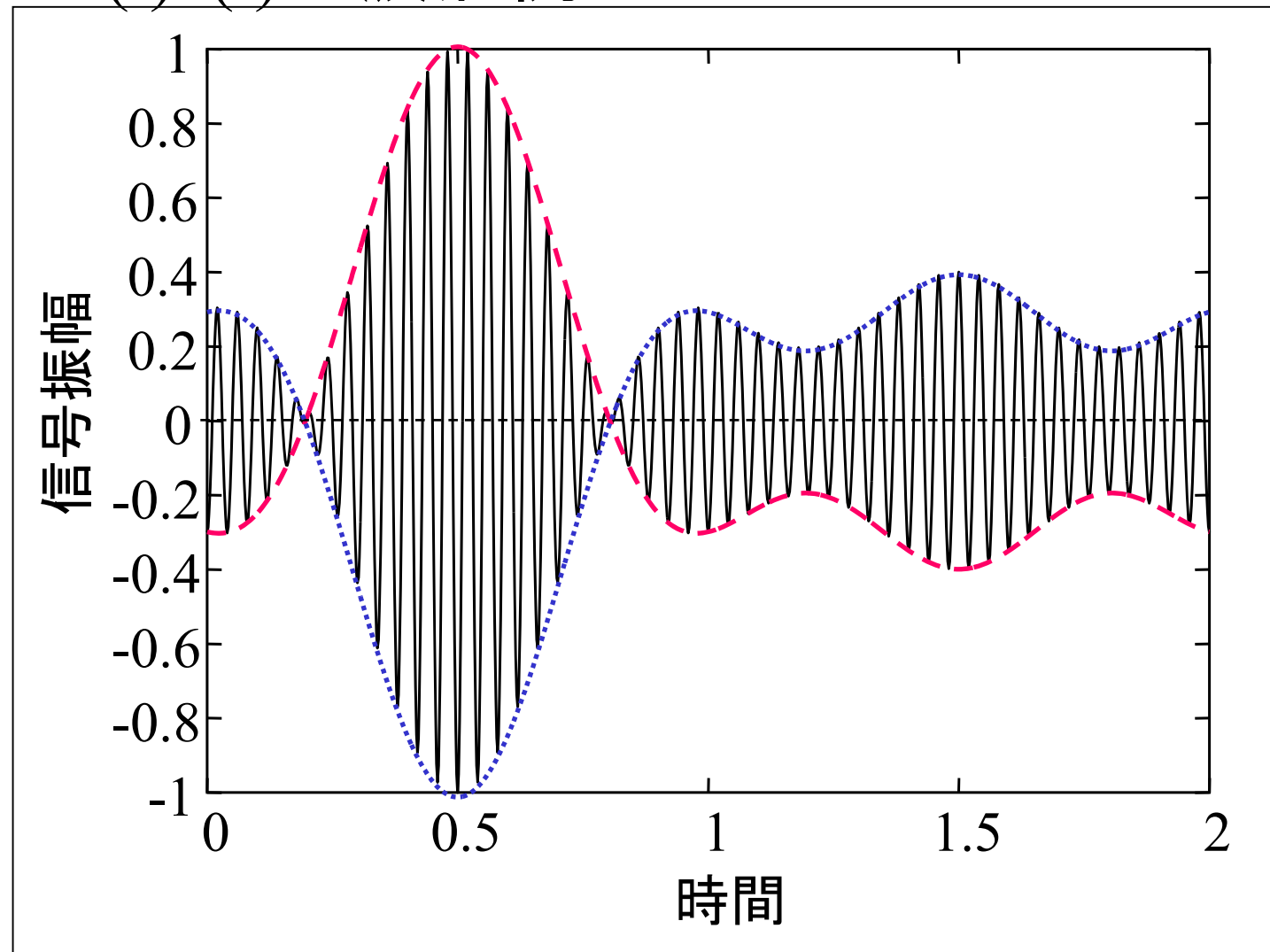
$$\begin{aligned} s(t)c(t) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp\{+j(\omega + \omega_c)t\} d\omega \\ &\quad + \frac{1}{4\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp\{+j(\omega - \omega_c)t\} d\omega \end{aligned}$$

和と差の周波数成分の発生

$s(t)$ の波形例



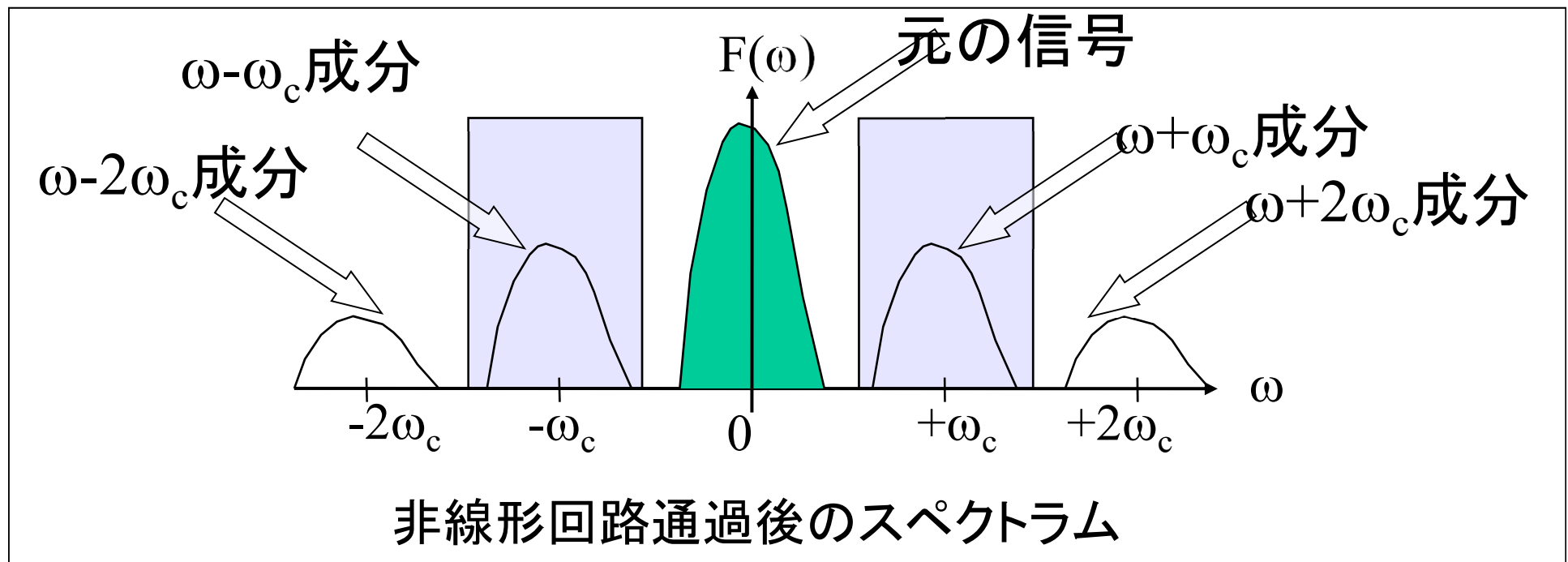
$s(t)c(t)$ の波形例



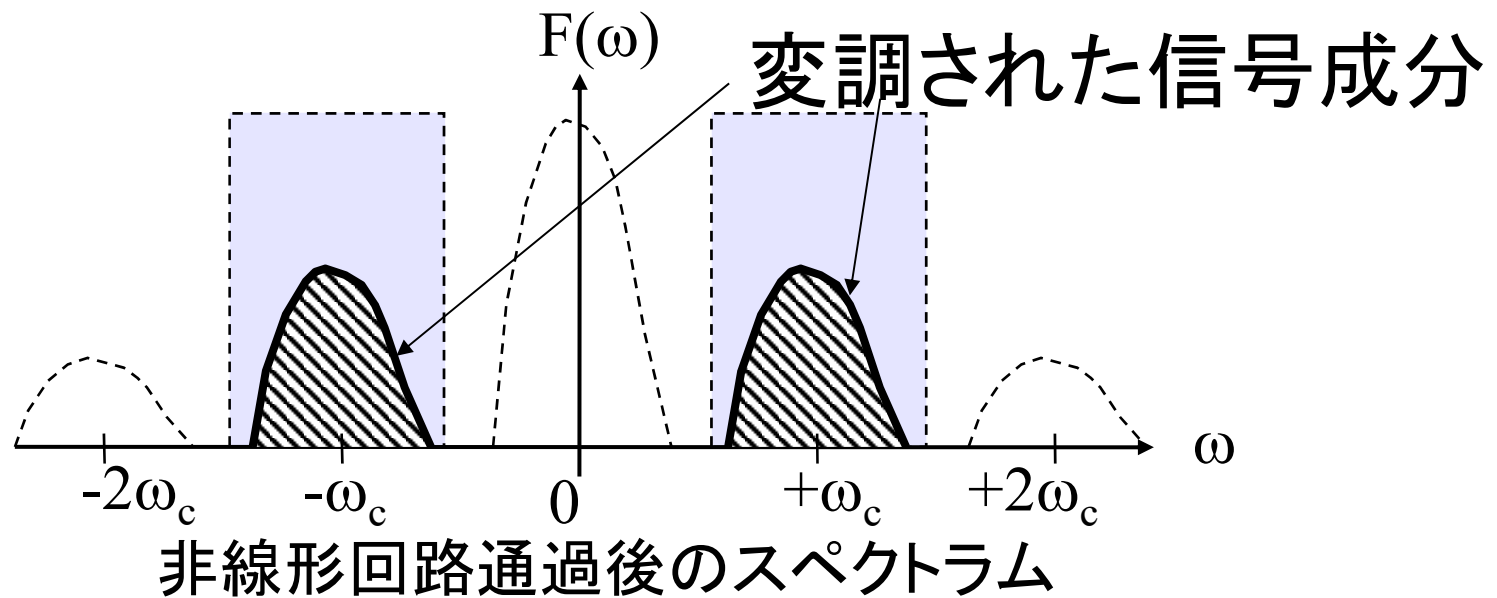
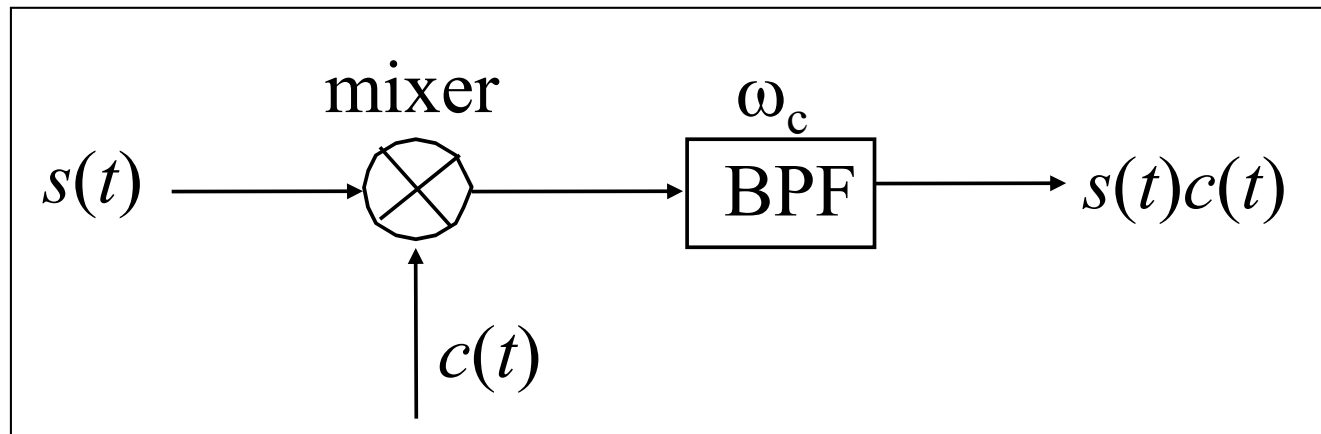
ピークを結ぶ線(包絡線)によって $s(t)$ を伝送 $\Rightarrow$
両側波帯(Double-Sideband)変調

非線形回路を通過すると(テーラー展開)

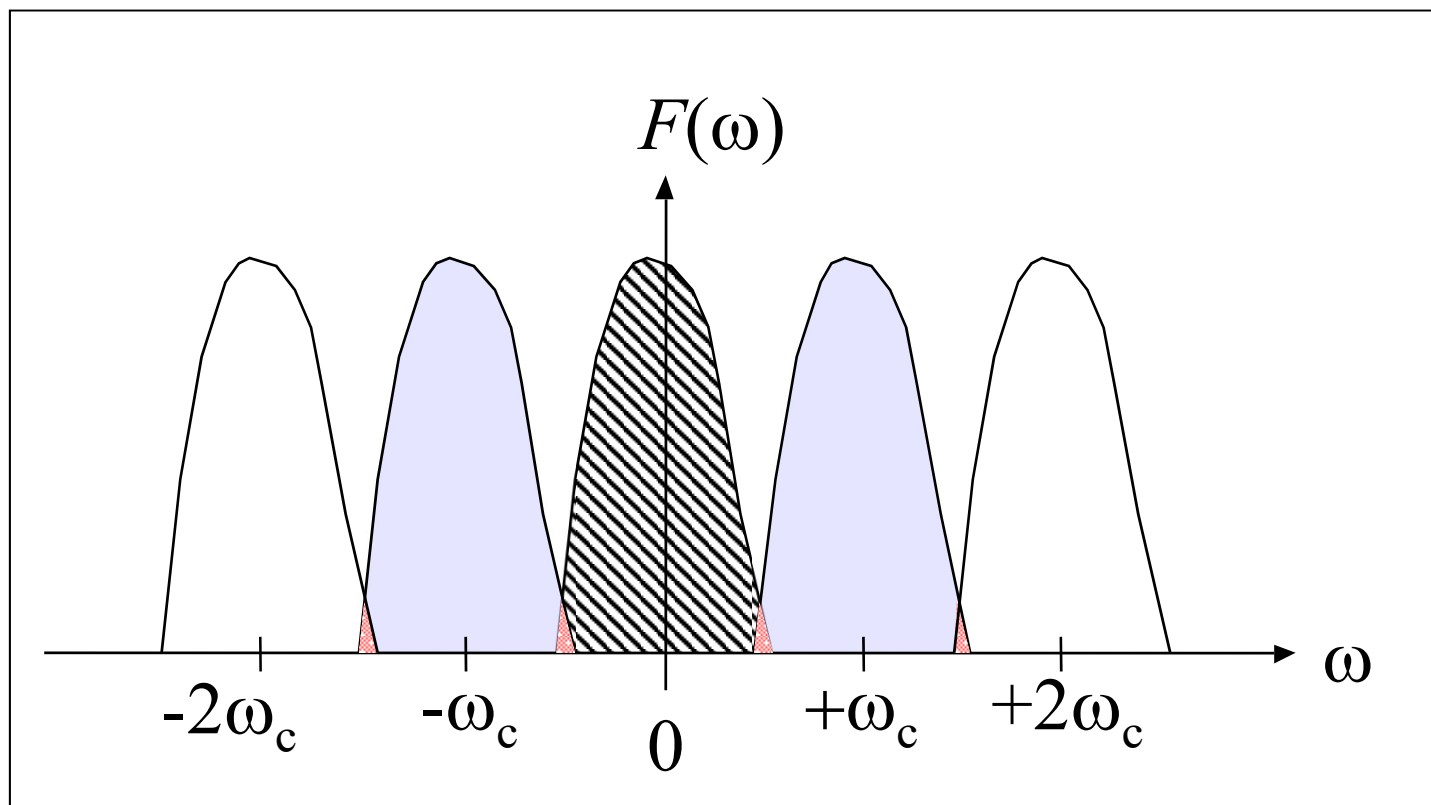
$$\begin{aligned} f[s(t), c(t)] = & F_{00} + F_{01}s(t) + F_{10}c(t) \\ & + F_{20}s(t)^2 + \boxed{F_{11}s(t)c(t)} + F_{20}c(t)^2 \\ & + F_{30}s(t)^3 + F_{21}s(t)^2c(t) \\ & + F_{12}s(t)c(t)^2 + F_{03}c(t)^3 + \dots \end{aligned}$$



非線形回路(ミキサ)とフィルタとの組合せ



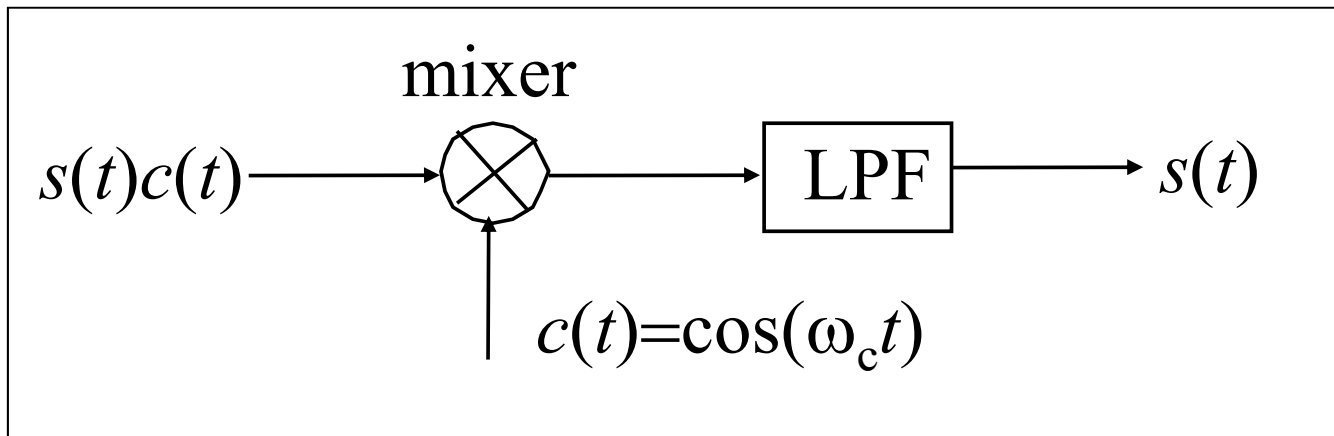
エイリアジング $\omega_c < 2\omega_w$ の時に発生



スペクトラムの重なり⇒元信号の復元不可能

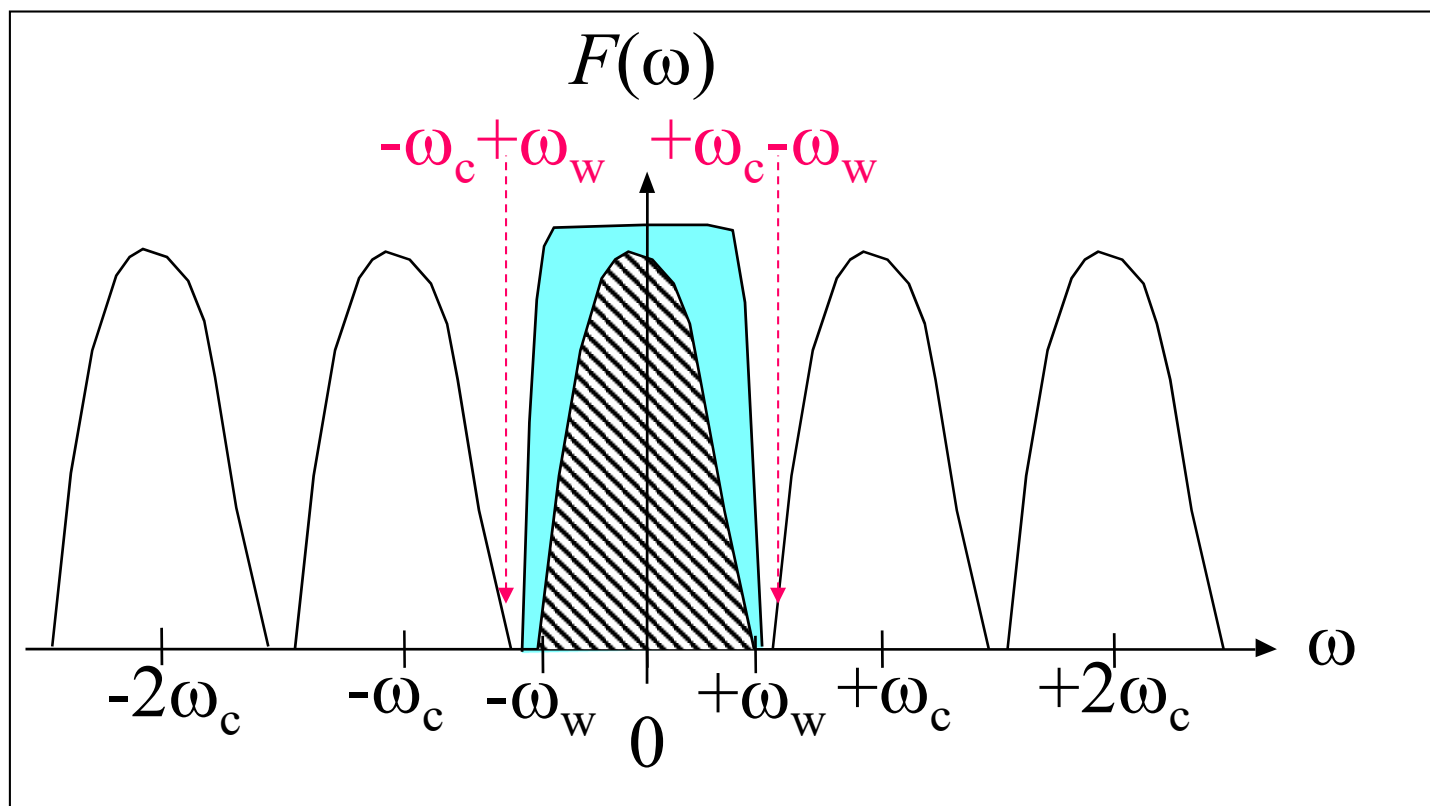
コヒーレント検波器(同期検波器)

$$\begin{aligned} s(t)c(t)^2 &= \frac{1}{8\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp\{+j(\omega + 2\omega_c)t\} d\omega \\ &+ \frac{1}{8\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp\{+j(\omega - 2\omega_c)t\} d\omega \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int_{-\omega_w}^{+\omega_w} S(\omega) \exp(+j\omega t) d\omega \end{aligned}$$



受信機にて $c(t)$ をどの様に発生？

$s(t)c(t)^2$ のスペクトラム



$|\omega_c - \omega_w| < \omega_w$ の時は？



エイリアジング

振幅変調(Amplitude Modulation, AM)

($m_{\text{AM}}(t)$:変調指数)

$$e_{\text{AM}}(t) = A\{1 + m_{\text{AM}}(t)\} \cos(\omega_c t)$$

周波数変調(Frequency Modulation, FM)

($m_{\text{FM}}(t)$:変調指数)

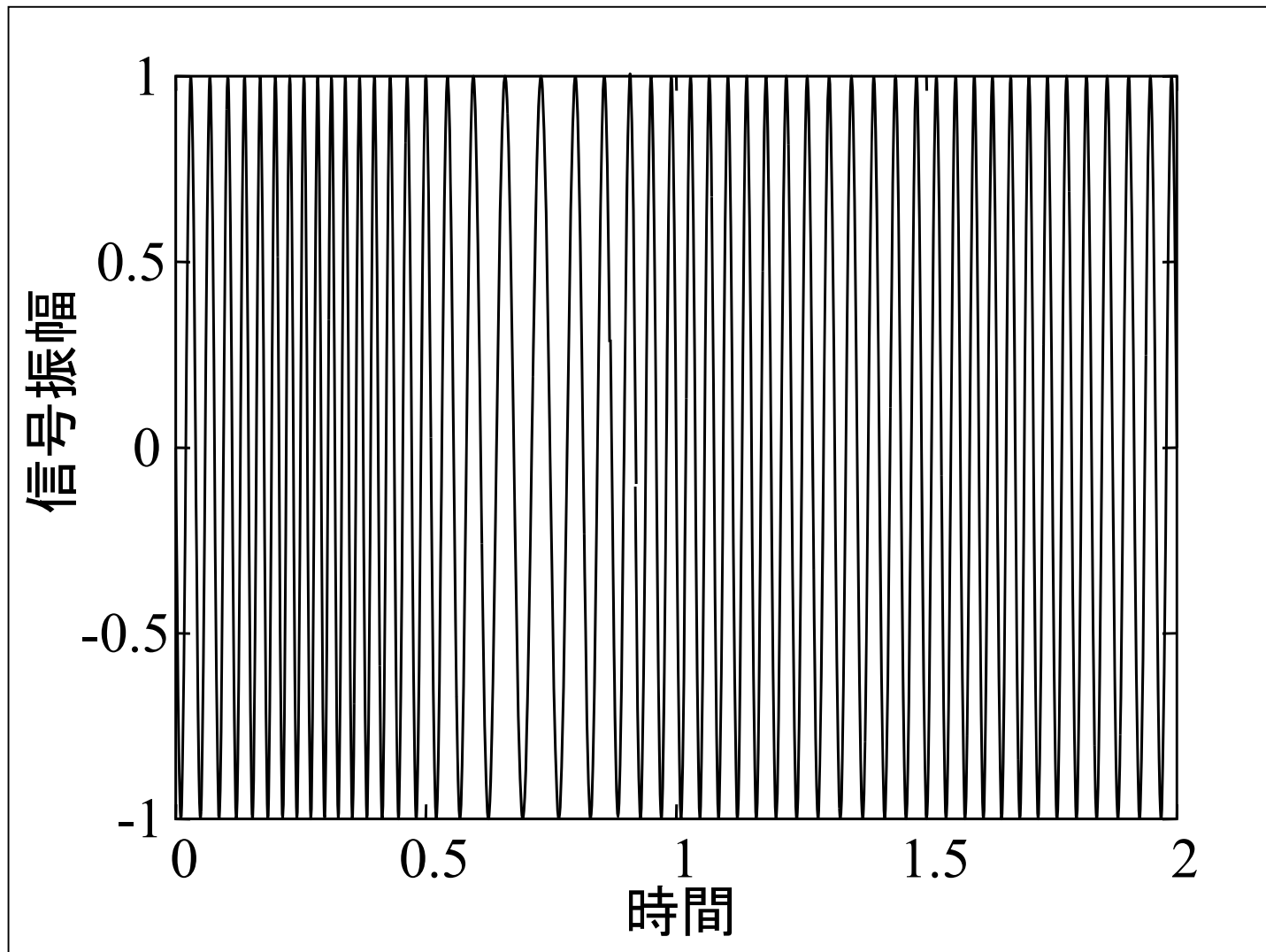
$$e_{\text{FM}}(t) = A \cos[\omega_c t \{1 + m_{\text{FM}}(t)\}]$$

位相変調(Phase Modulation, PM)

($m_{\text{PM}}(t)$:変調指数)

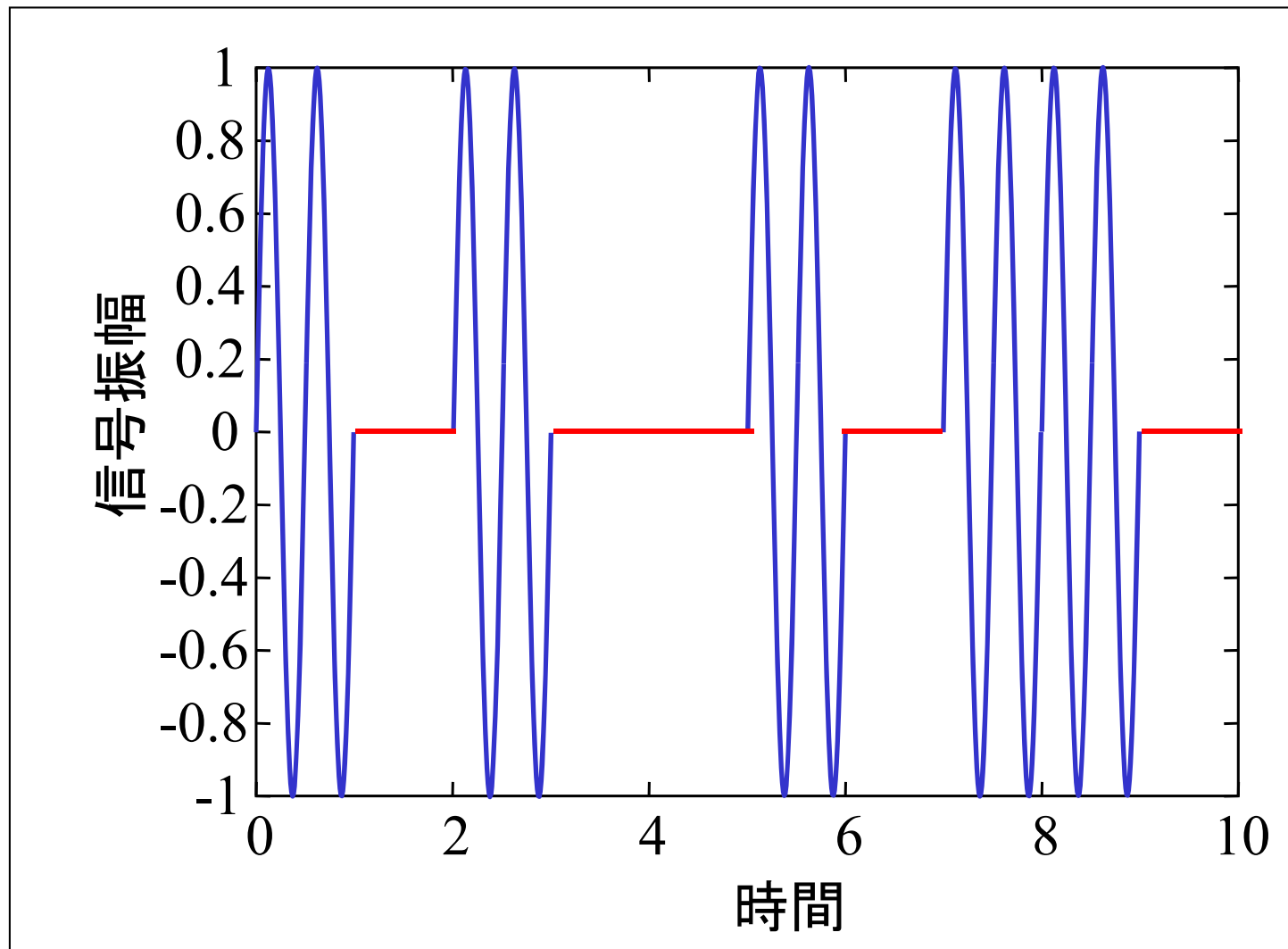
$$e_{\text{PM}}(t) = A \cos\{\omega_c t + m_{\text{PM}}(t)\}$$

$$m_{\text{FM}}(t) = \frac{dm_{\text{PM}}(t)}{dt} \quad \longleftrightarrow \quad m_{\text{PM}}(t) = \int m_{\text{FM}}(t) dt$$



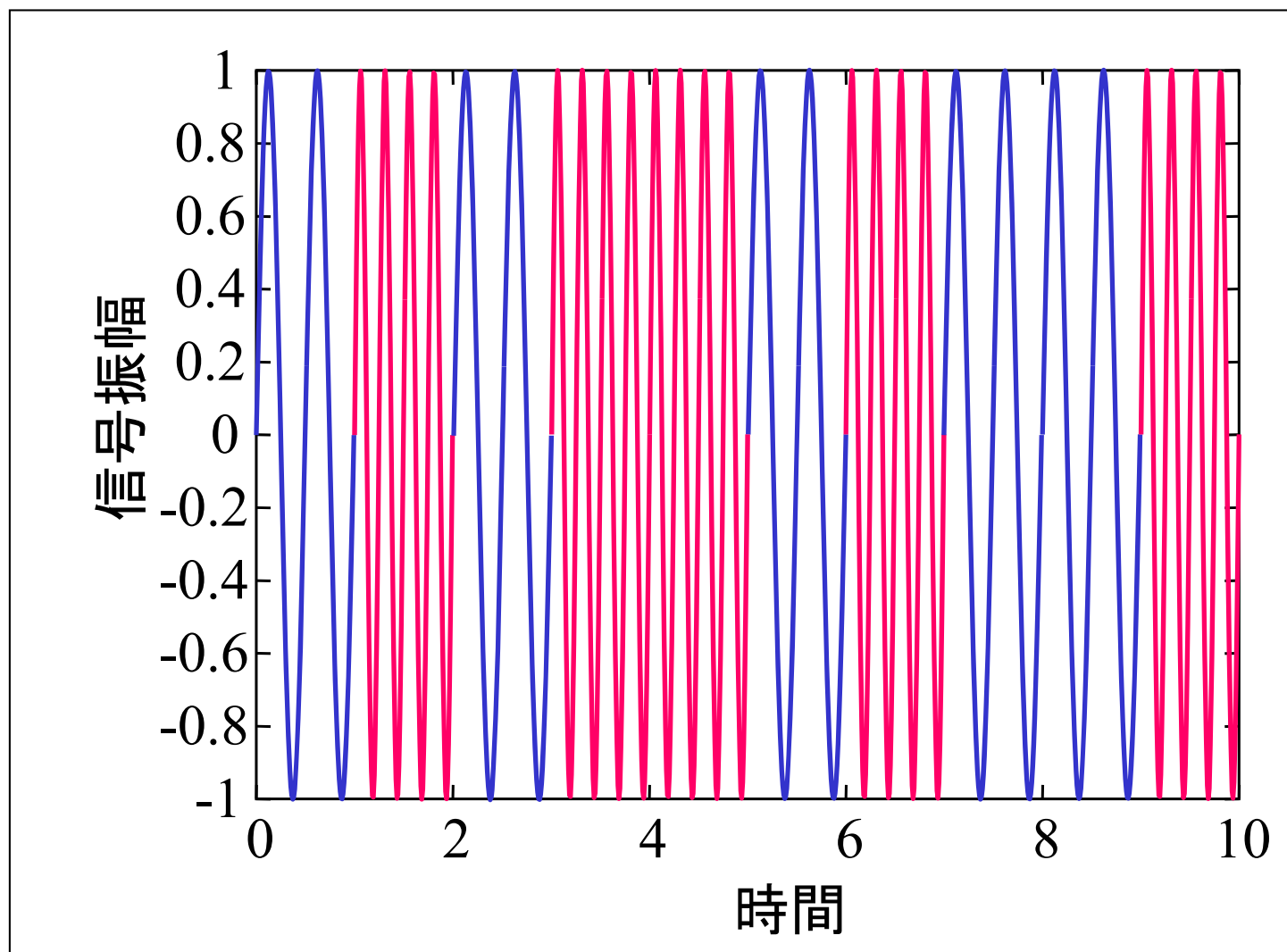
瞬時周波数で $s(t)$ を伝送 $\Rightarrow$ 周波数変調
(FM: Frequency Modulation)

振幅シフトキーイング(ASK)の波形例



AM変調のデジタル版

周波数シフトキーイング(FSK)の波形例



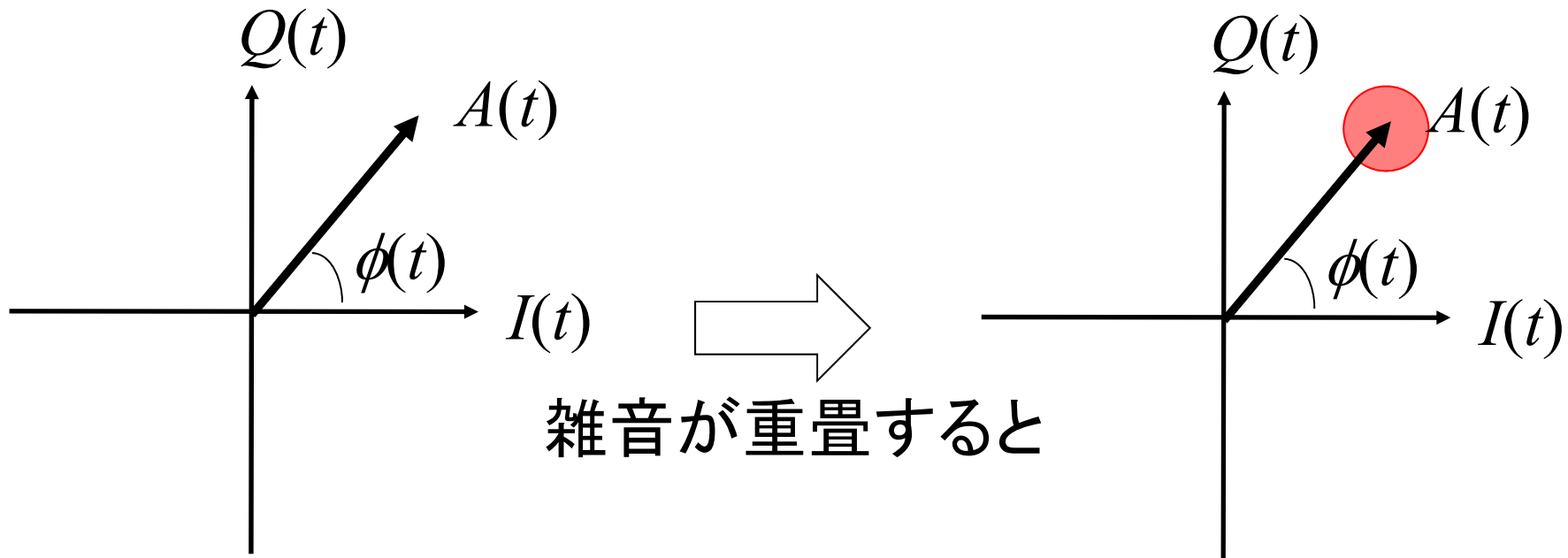
FM変調のデジタル版

信号空間

I: in-phase (同相成分)

Q: quadrature (直交成分)

$$\begin{aligned} e(t) &= A(t) \sin\{\omega_c t + \phi(t)\} \\ &= \underbrace{A(t) \cos\{\phi(t)\}}_{I(t)} \sin(\omega_c t) + \underbrace{A(t) \sin\{\phi(t)\}}_{Q(t)} \cos(\omega_c t) \end{aligned}$$

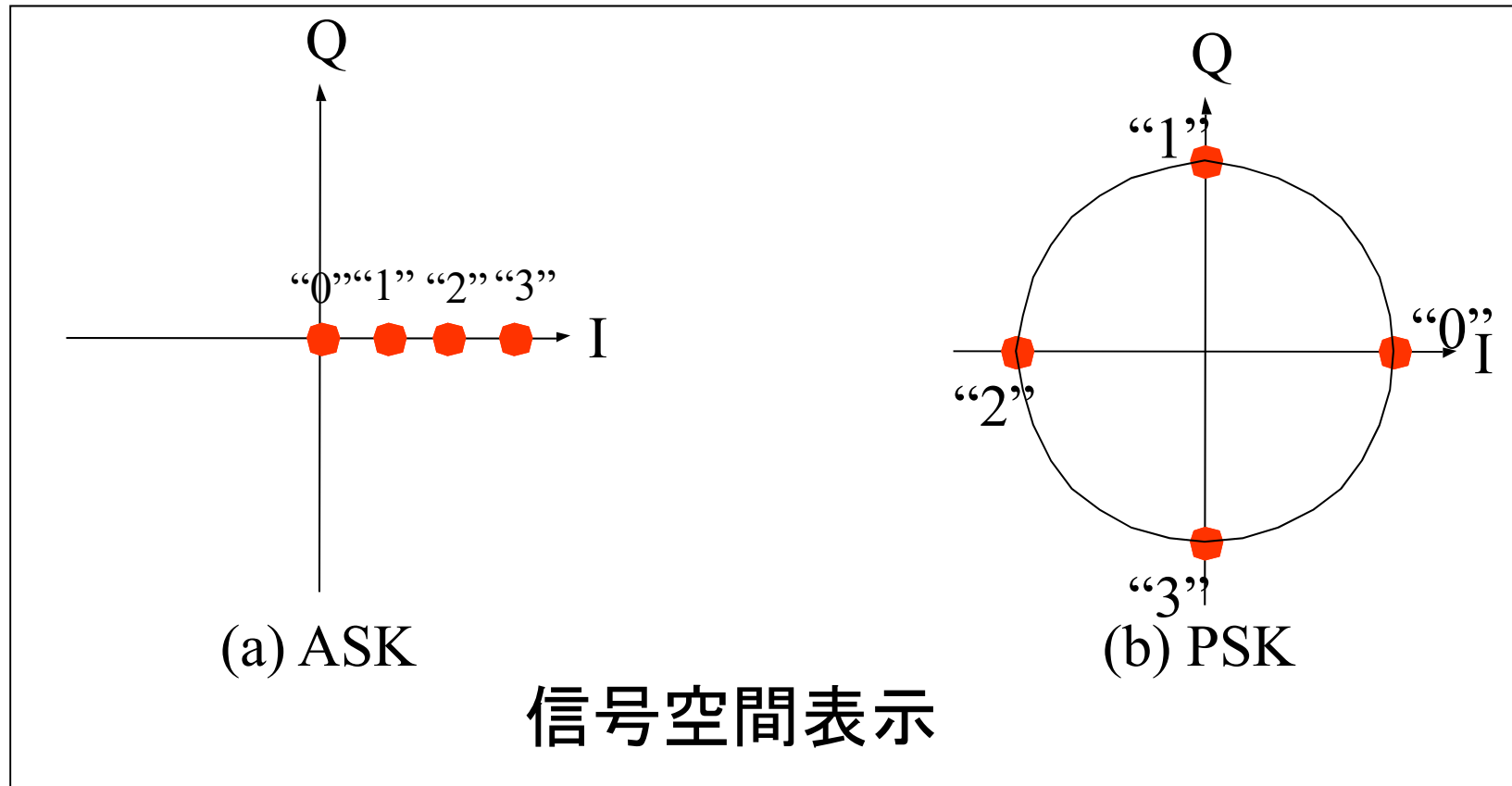


拡がり＝雑音の実効値

多値変調

I: in-phase (同相成分)

Q: quadrature (直交成分)



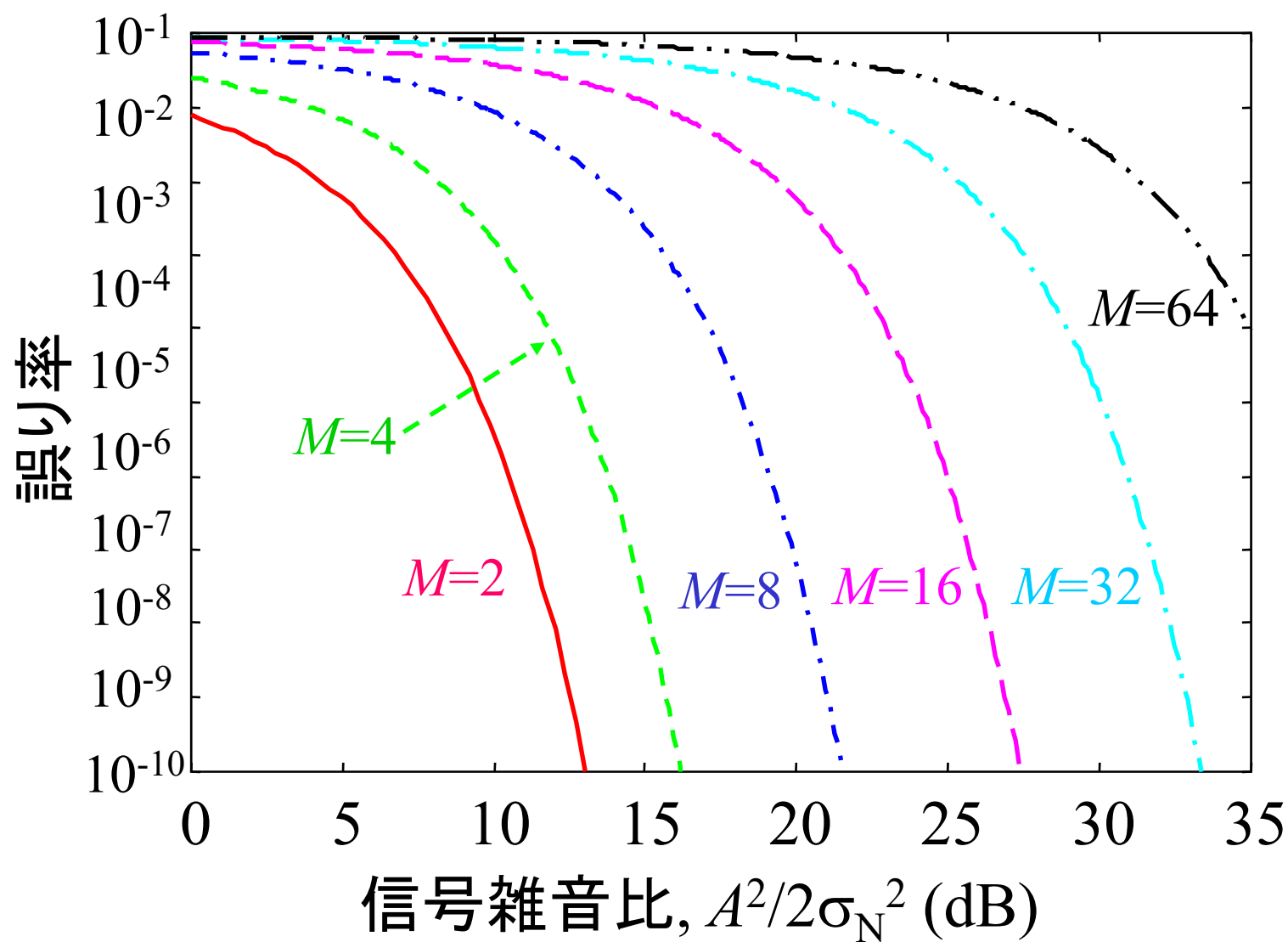
近隣のデータ間隔 $= A/3$

雑音耐性弱

近隣のデータ間隔 $= 2^{0.5}A$

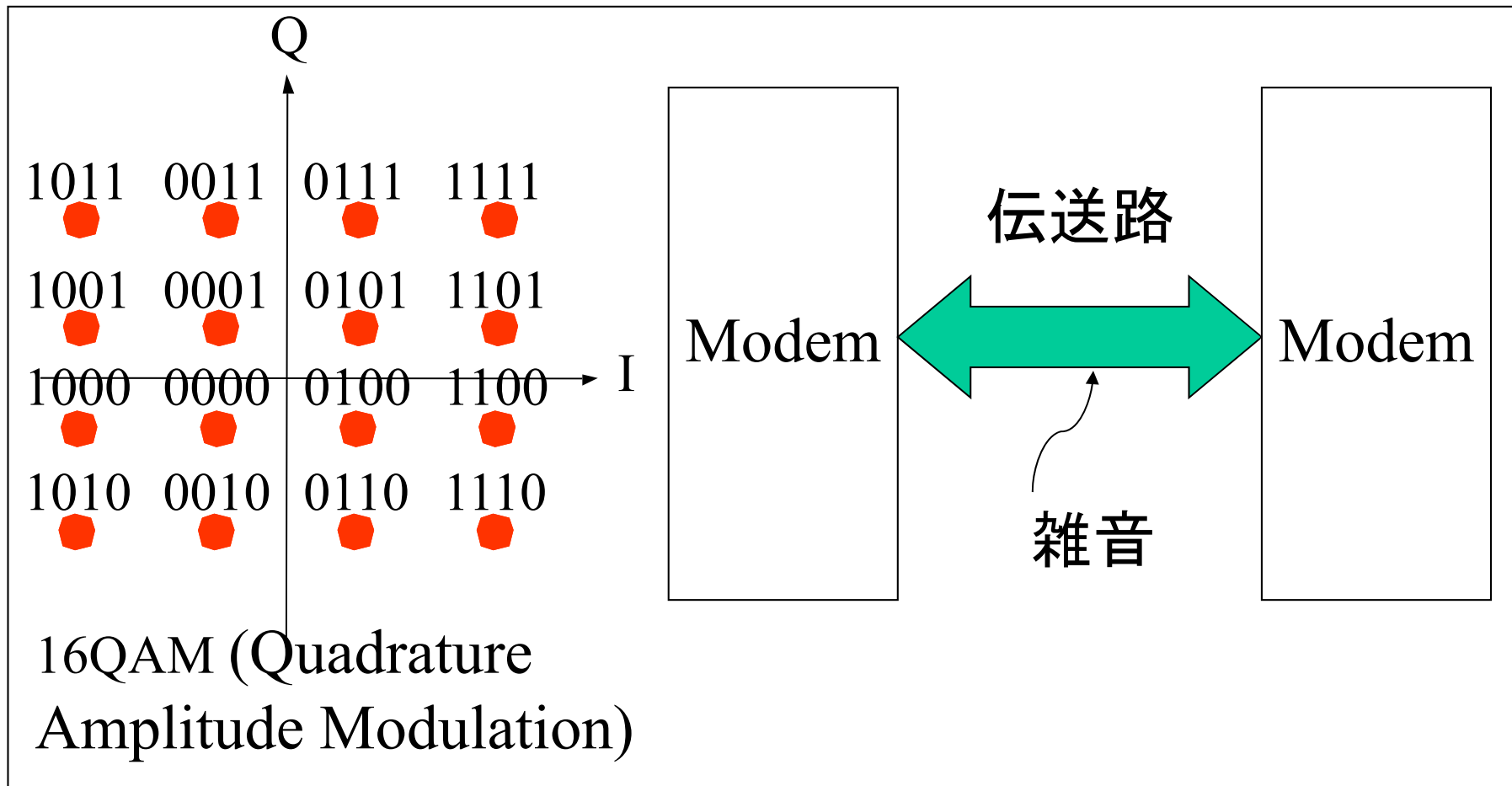
雑音耐性强

M 値PSKの誤り率(同期検波)



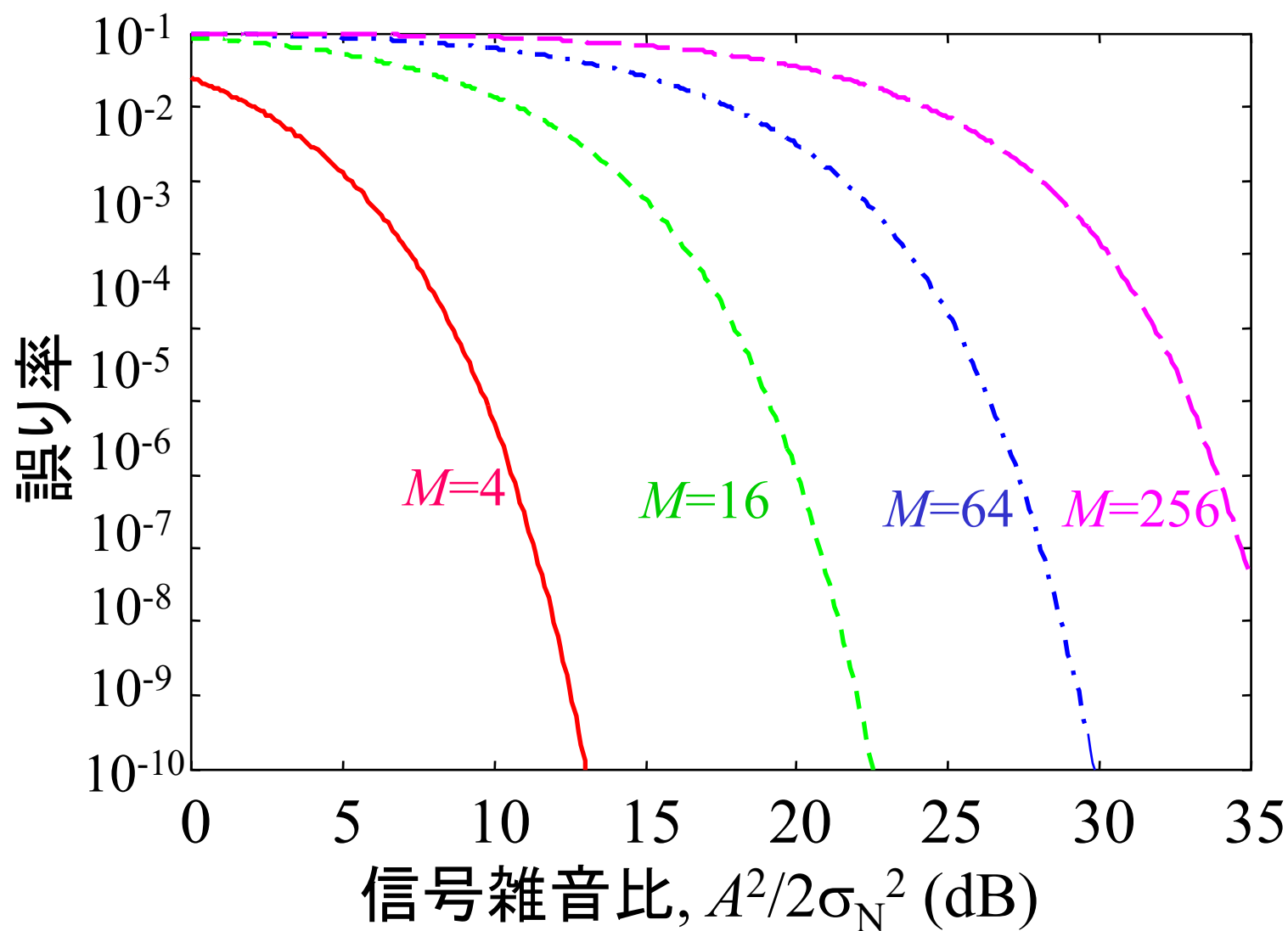
$M=4$ が優位

限られた帯域で多くの情報を送るには？



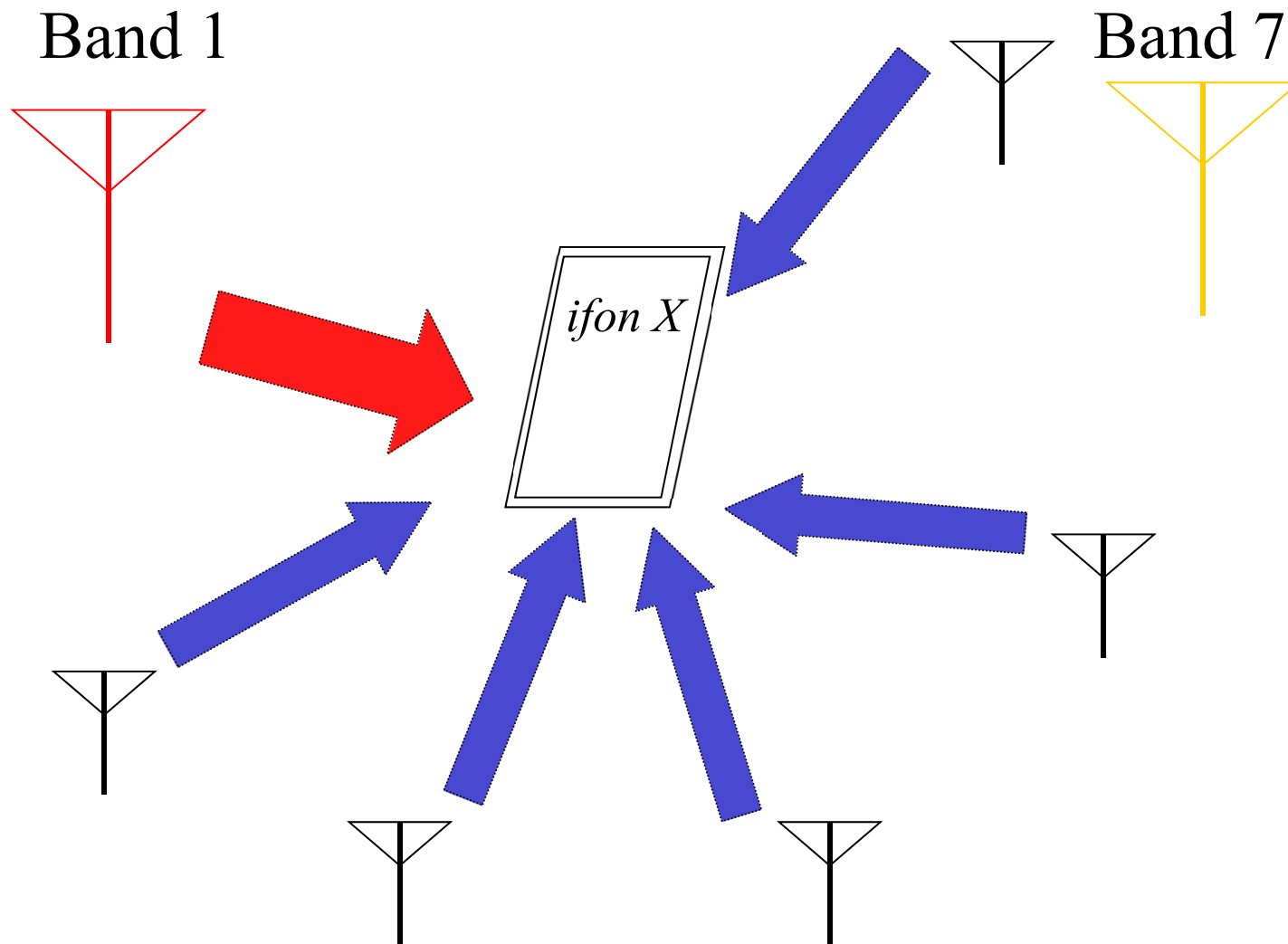
注：隣り合うデータ間で誤り率大 $\Rightarrow$ 隣り合ったデータ間では1ビットだけの違い = 誤り訂正容易

多値(M)QAMの誤り率



大きな M で優位顕著

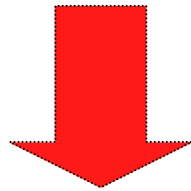
Carrier Aggregation



通信容量のさらなる拡大には？

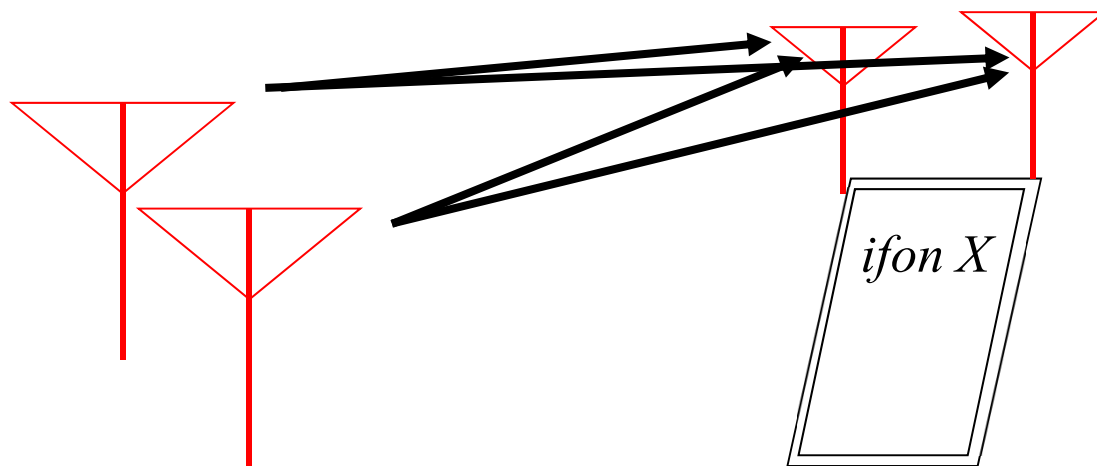
$$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$$

B : 周波数帯域幅



$$C \cong NB \log_2(1 + \text{SNR})$$

N : アンテナ数



Multi-Input
Multi-Output
(MIMO)