

デジタル無線通信

～電波伝搬と変調編～

九州大学大学院 システム情報科学研究院

石田 繁巳 <ishida@f.ait.kyushu-u.ac.jp>

2014/06/12



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

アウトライン

- この講義の目的
- 電波伝搬の基礎
- 変調
- デジタル変調方式
- デジタル無線通信とデジタル信号処理

この講義の目的

- デジタル無線通信について理解する
 - 電波伝搬の概要を知る
 - 変調の概念を理解する
 - 各種デジタル変調方式を知る
 - 無線通信とデジタル信号処理の関係を知る

電波伝搬の基礎

そもそも無線通信とは

■ 電線を介さない通信

- 電波
- 赤外線
- 可視光線
- 超音波

⇒ 「無線通信」と言った場合には多くの場合は電波を用いた通信を指す

電波の使われ方

■ 情報の伝送

- 携帯電話、TV放送、衛星放送・通信、無線LAN

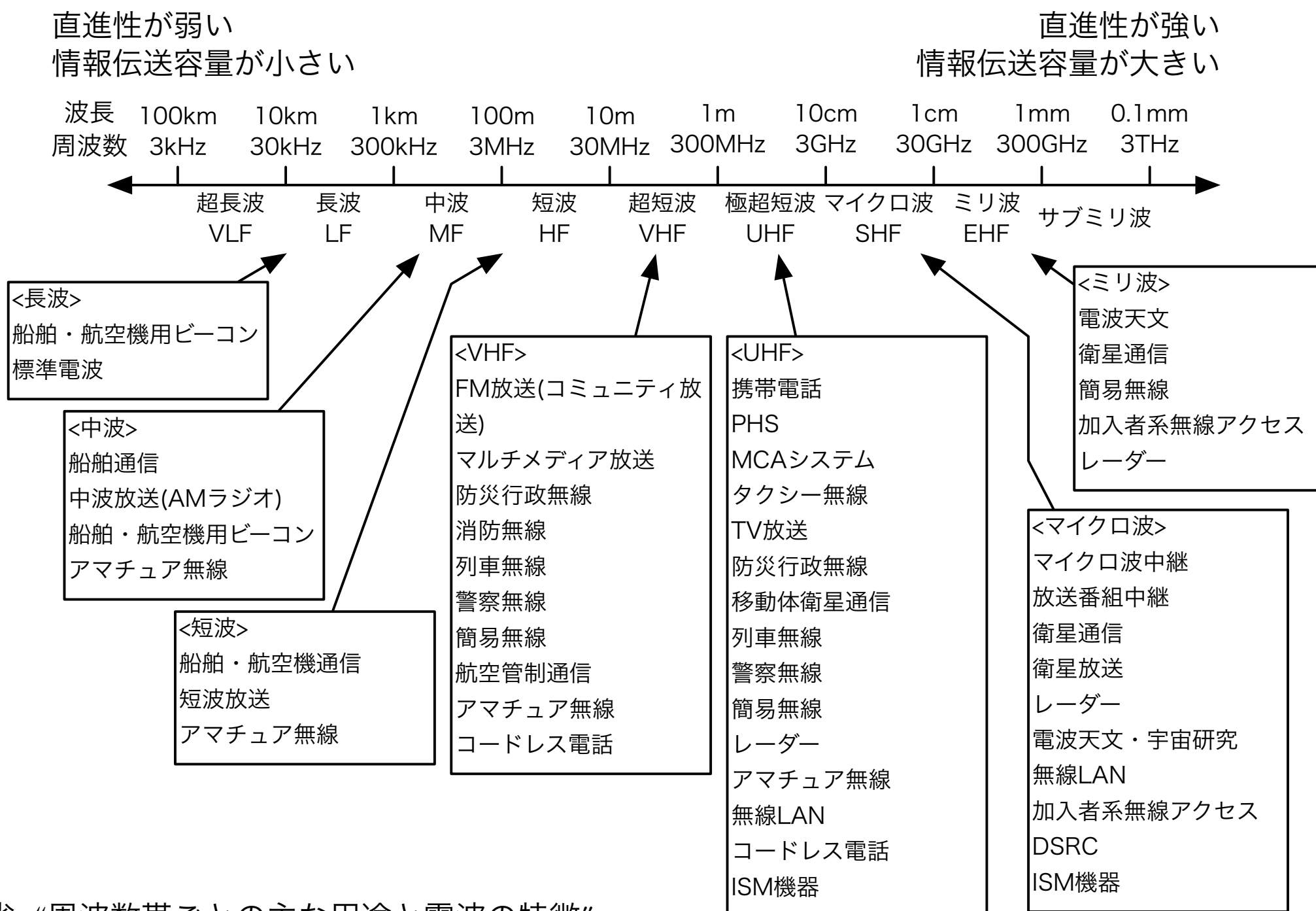
■ センシング

- レーダ、リモートセンシング、電波望遠鏡

■ エネルギーの伝送

- 電子レンジ、電力伝送

電波の周波数と利用用途



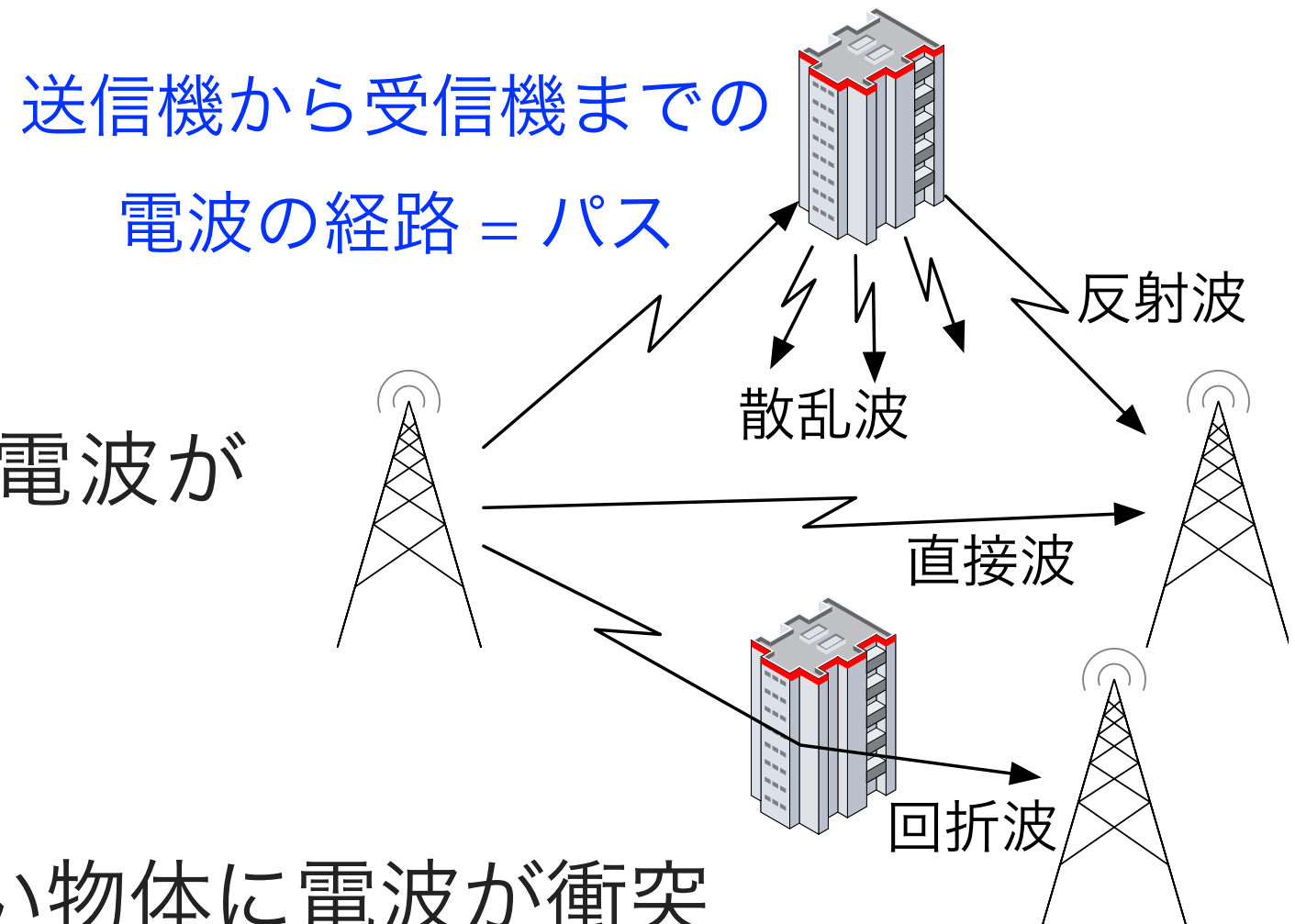
出典: 総務省, “周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴”,

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/index.htm>

電波伝搬 (1)

■ 電波の伝わり方

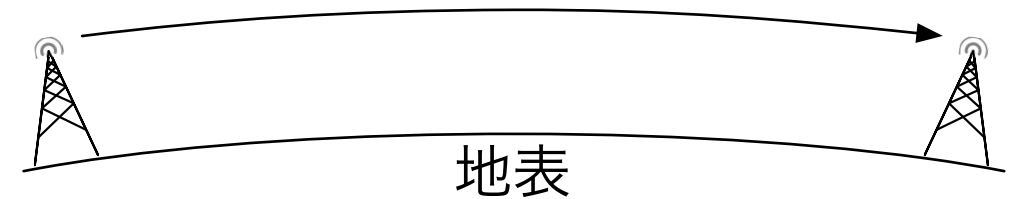
- 直接波
- 回折波
- 障害物の反対側に電波が回り込む
- 反射波
- 波長に比べて大きい物体に電波が衝突
- 散乱波
- 波長に比べて小さい物体に電波が衝突



電波伝搬 (2)

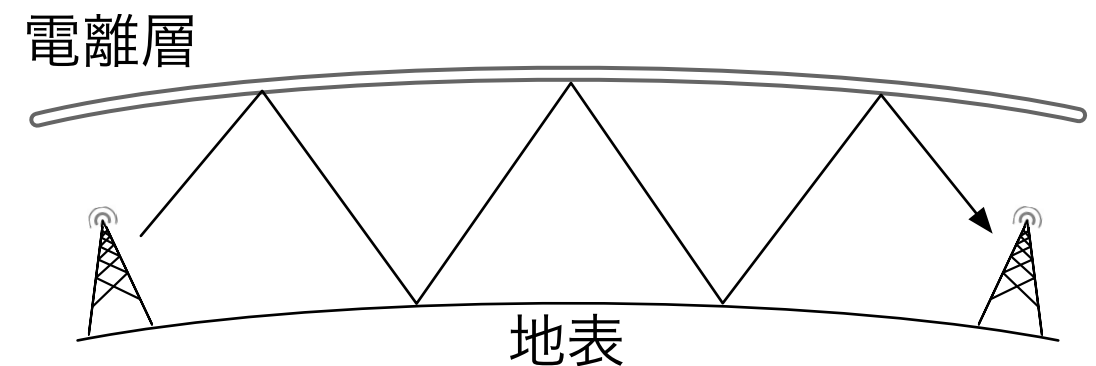
■ 地表波伝搬

- 2MHz以下



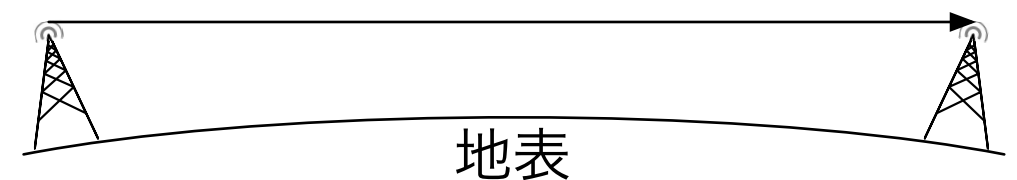
■ 空間波伝搬

- アマチュア無線、CB無線



■ 見通し伝搬 (Line-of-Sight)

- 30MHz以上



見通し伝搬距離

■ 地球は丸い

⇒ 見通し伝搬には限界がある

■ 見通し伝搬距離

$$d = 3.57 \left(\sqrt{K h_1} + \sqrt{K h_2} \right)$$

- d : 2つのアンテナの水平距離 (km)
- K : 回折を考慮した補正係数 (経験的には $K=4/3$)
- h_1 : 送信アンテナの高さ (m)
- h_2 : 受信アンテナの高さ (m)

電波の減衰・信号劣化

- 自由空間伝搬損失
- 雑音
- マルチパス
 - レイリーフェージング
 - シンボル間干渉（エコー）
- シャドーイング
- ドップラー偏移
- ...

自由空間伝搬損失

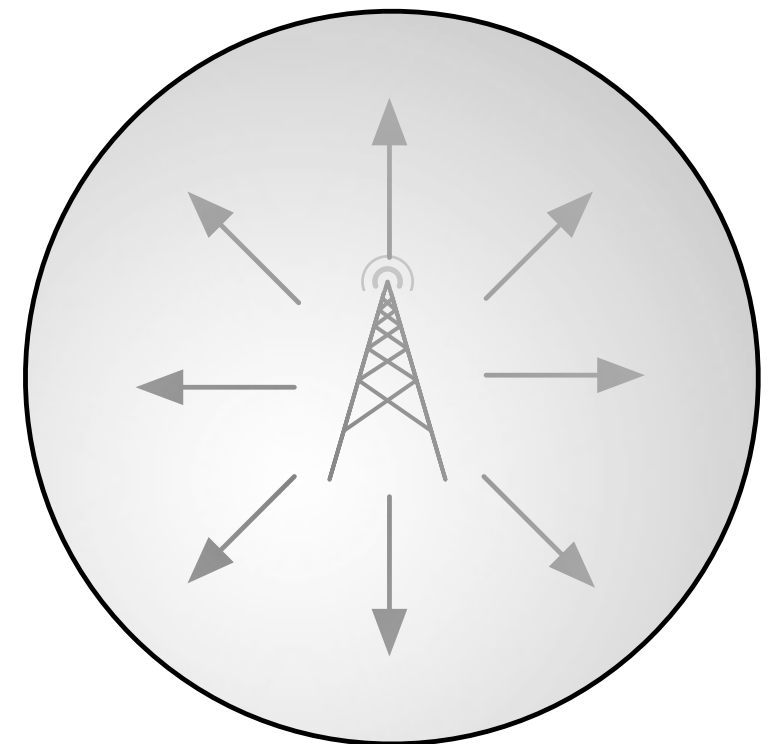
■ 電波はあらゆる方向に出る

- 全方向での受信エネルギーの積分＝送信エネルギー
⇒ 遠いほど単位面積あたりのエネルギーは小さくなる

■ Friisの公式

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t$$

- P_r, P_t : 受信・送信電力
- d : 送受信機間距離
- G_r, G_t : 受信・送信アンテナ利得



雑音

■ 熱雑音 (Thermal noise)

$$N_0 = kT$$

- N_0 : 雑音密度 [W/Hz]
- k : ボルツマン定数 = 1.3803×10^{-23} [J/K]
- T : 絶対温度 [K]

■ 無線回路雑音 (相互変調雑音など)

■ インパルス雑音

■ ...

マルチパス (Multipath)

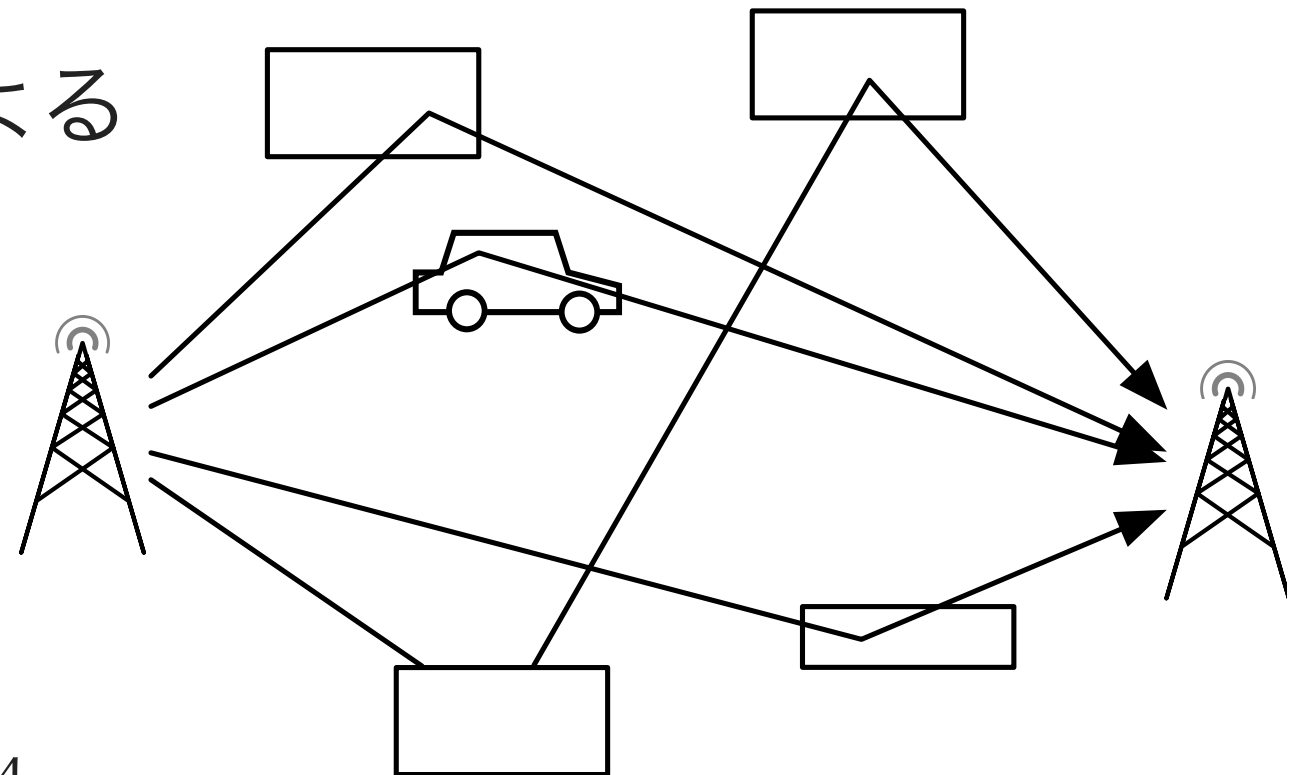
■ 電波はさまざまなモノの影響を受けて伝搬

- cf.) 屋内

- 壁、天井、床、モノ、ヒト、...

⇒ 受信波は全てのパスの電波の合成

- 時々刻々とした変化
- ほんの少しの移動による変化
- 送れて到着する電波との干渉



電波強度の表し方

■ dBmで表記するのが一般的

- dBm: 1mWに対する電力比のdB表記
 - 10mW = 10dBm
 - 100mW = 20dBm
 - 10μW = -20dBm

■ dB

- 比を表すための単位
 - エネルギー比の場合: $E_{dB} [\text{dB}] = 10 \log_{10} E$
 - 電圧・電流等の比の場合: $V_{dB} [\text{dB}] = 20 \log_{10} V$

アンテナ (1)

■ アンテナの2つの機能

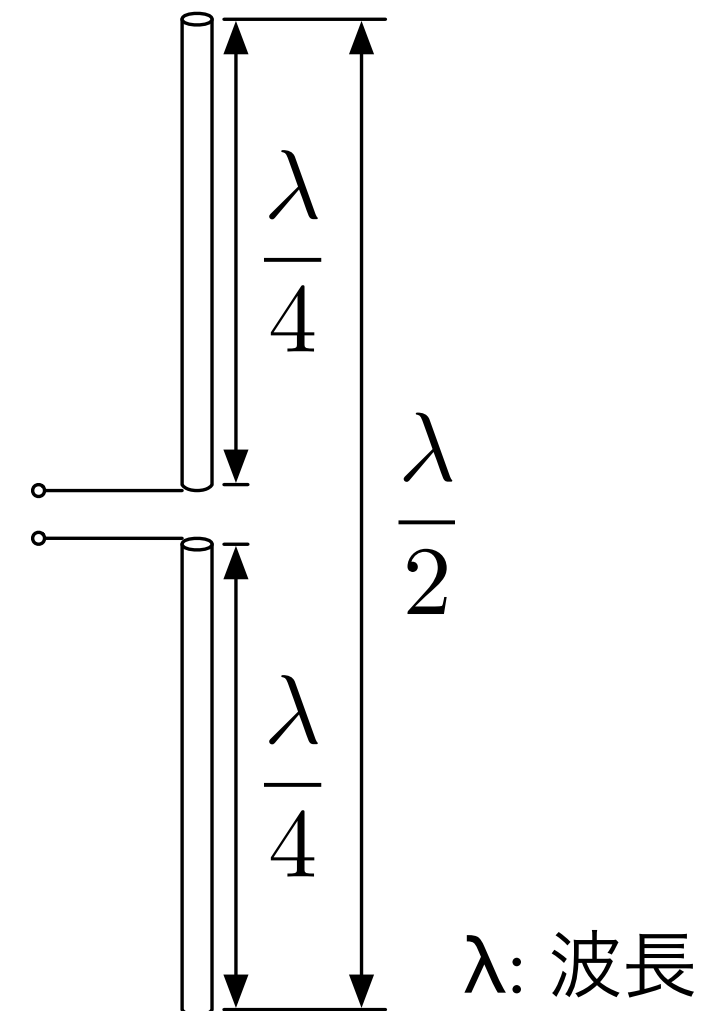
- 入力された電流の変化を電磁波として空中に放出
- 空中の電磁波を電流の変化として出力

■ ダイポールアンテナ

- 基本となるアンテナの1つ
- 平面方向は無指向性

⇒ アンテナのサイズは波長とともに小さくなる

- cf.) 20kHz → $\lambda=15$ [km]



アンテナ (2)

- 中波放送 (AMラジオ)
 - ニッポン放送の場合
 - 搬送波周波数: 1242 kHz
 - 1242 kHz $\rightarrow \lambda/4=60.3$ [m]
 - アンテナ
 - 120m支線式トラス鉄柱
 - サブ60m支線式トラス鉄柱



出典: 放送まにあ, “送信所・局舎めぐり”,
<http://tvdx7.kt.fc2.com/LFkiyokawa.html>

変調

変調

■ 変調 (Modulation)

- 送りたい信号を伝送媒体に合う形に変換する操作
 - 例: 音声信号 20~20kHz、FMラジオは76~90MHz
⇒ 76~90MHzの電波に信号をのせる
 - 「76~90MHzの電波」を**搬送波 (キャリア)** と呼ぶ

■ 変調の操作

$$s(t) = \underbrace{A(t)}_{\text{振幅}} \cos \left\{ \omega_c t + \underbrace{\theta(t)}_{\text{位相}} \right\} \quad \left(\omega_c = 2\pi \underbrace{f_c}_{\text{搬送波周波数}} \right)$$

※ 周波数の操作は位相の変化と等価

変調操作と極座標表示

- アナログ通信では振幅**または**位相を変化させる
 - 観測信号の変化が**振幅の変化によるものか位相の変化によるものを区別できない**ため
- 両方変化させるには？

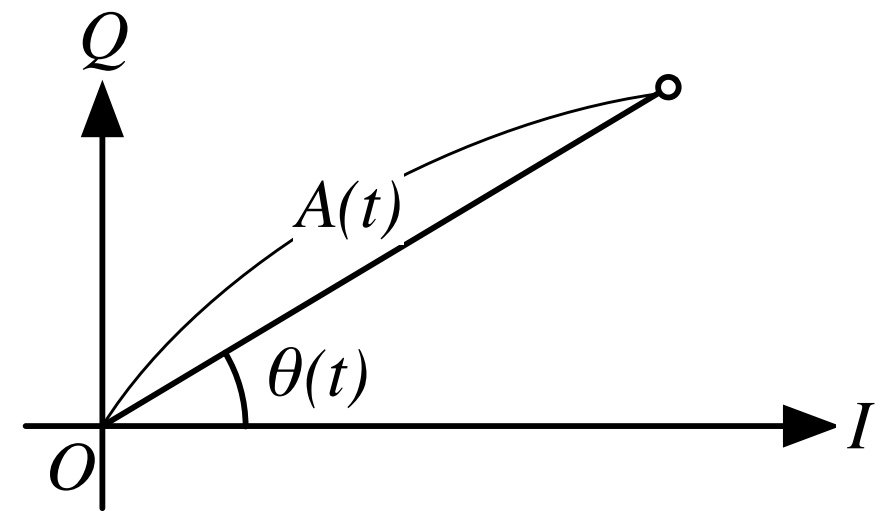
- 準備: 搬送波を基準とする極座標表示

$$s(t) = A(t) \cos \{ \omega_c t + \theta(t) \}$$

- X軸 → In-phase軸
- Y軸 → Quadrature-phase軸

$$I(t) = A(t) \cos \theta(t)$$

$$Q(t) = A(t) \sin \theta(t)$$



QAM: 直交位相振幅変調 (1)

- 直交位相振幅変調 (Quadrature amplitude modulation)

$$s(t) = I(t) \cos \omega_c t + Q(t) \sin \omega_c t$$

⇒ 2つの信号を同時に送れる

= 振幅、位相を同時に変化させることに相当

- 復調

$$\cos \omega_c t \cdot s(t) = I(t) \cdot \frac{1}{2} (\cos 2\omega_c t + \cos 0) + Q(t) \cdot \frac{1}{2} (\sin 2\omega_c t + \sin 0)$$

$$= \frac{1}{2} \{ I(t) + I(t) \cos 2\omega_c t + Q(t) \sin 2\omega_c t \}$$

$$\sin \omega_c t \cdot s(t) = \frac{1}{2} \{ I(t) \sin 2\omega_c t - Q(t) \cos 2\omega_c t + Q(t) \}$$

LPF (Low pass filter) で除去

QAM: 直交位相振幅変調 (2)



■ 問題

- QAMはなぜアナログではほとんど使われていない？

- ヒント: 搬送波の同期

$$\cos(\omega_c t + \phi) \cdot s(t) = ??$$

$$\Rightarrow \cos(\omega_c t + \phi) \cdot s(t) = \frac{1}{2} \{ I(t) \cos \phi + Q(t) \sin \phi + I(t) \cos 2\omega_c t + Q(t) \sin 2\omega_c t \}$$

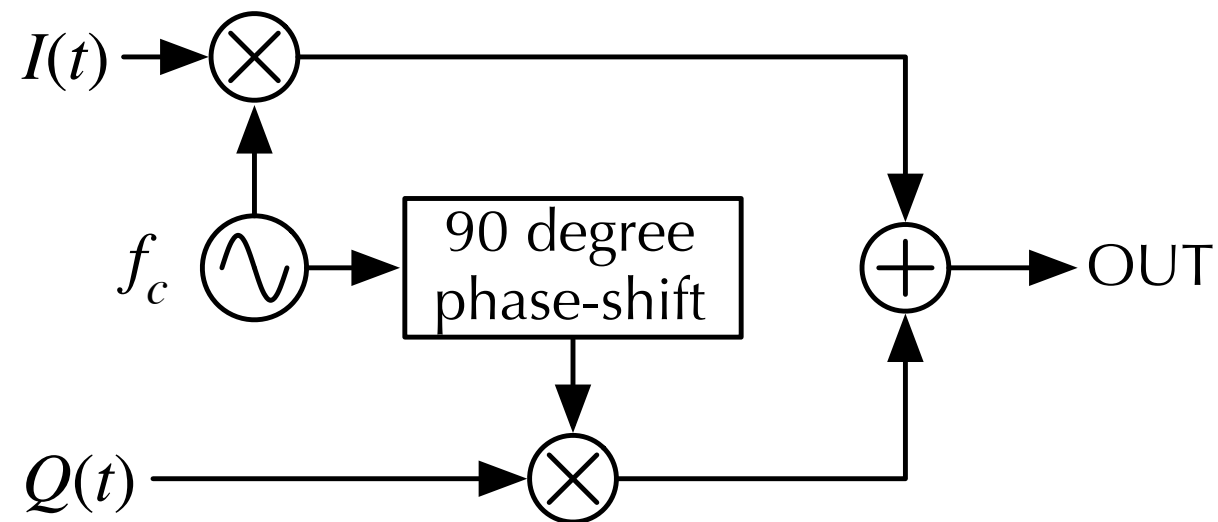
低周波成分に $Q(t)$ が入ってしまう

- 復調には搬送波の同期が必須

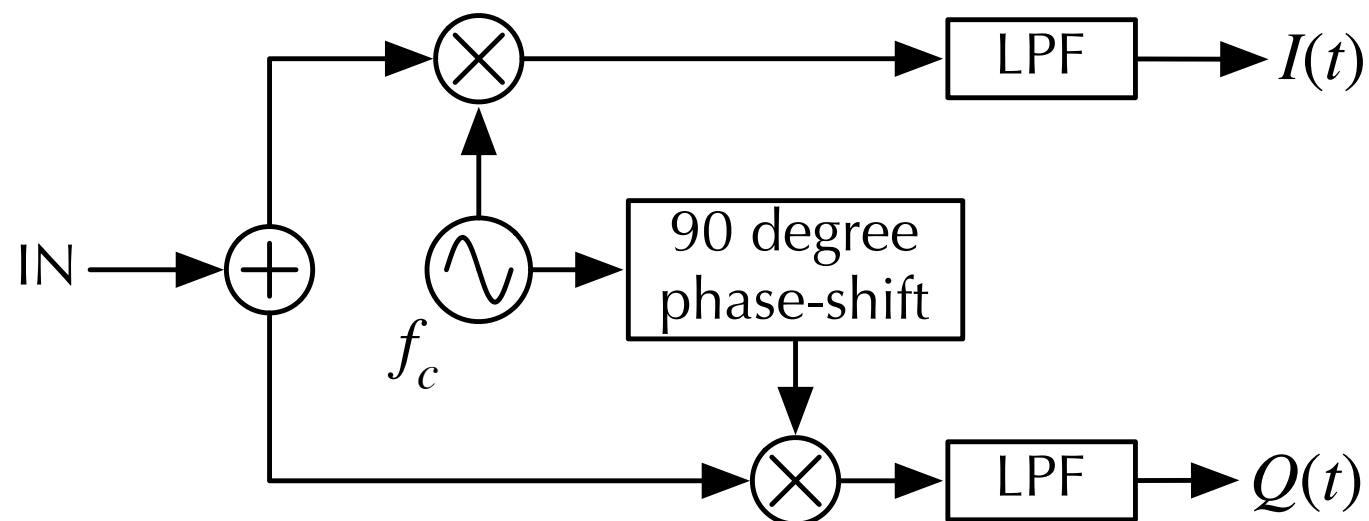
※ デジタル通信では計算で除去する

直交変復調回路

■ 変調回路



■ 復調回路



解析信号、ベースバンド信号

- I, Qを同時に扱うため、複素数を用いる

$$\begin{aligned}\underline{S(t)} &= I(t) \cos \omega_c t + jQ(t) \sin \omega_c t \\ &= A(t) e^{j\{\omega_c t + \theta(t)\}}\end{aligned}$$

⇒ 解析信号と呼ぶ

- 複素数で表記した仮想的な信号

- 計算を簡単化するため、周波数変換しておく

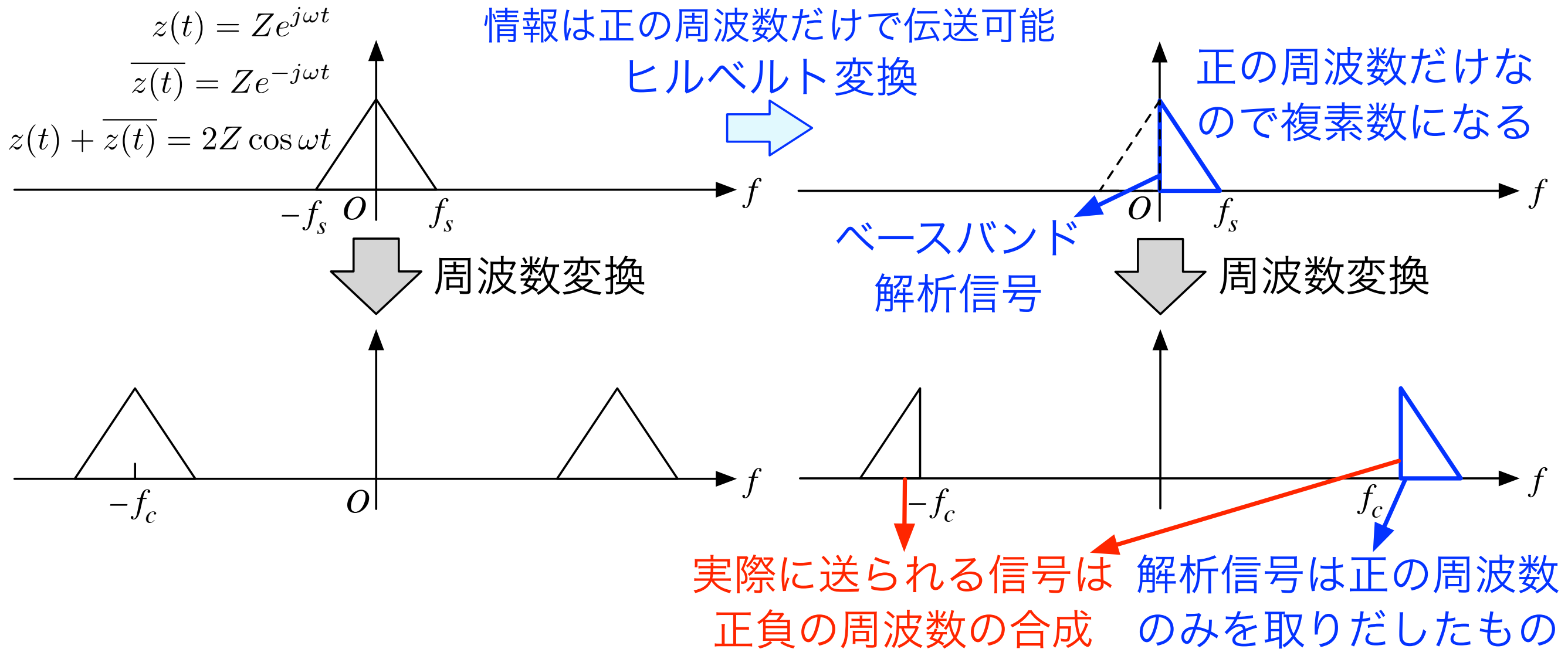
$$\underline{E(t)} = e^{-j\omega_c t} S(t) = A(t) e^{j\theta(t)}$$

⇒ ベースバンド信号と呼ぶ

※ 以降はベースバンド信号 $E(t)$ だけを考える

変調と複素フーリエ変換

■ 実信号 = 正負の周波数の信号の合成



※ キーワード: ヒルベルト変換、直交変調・直交検波

デジタル変調方式

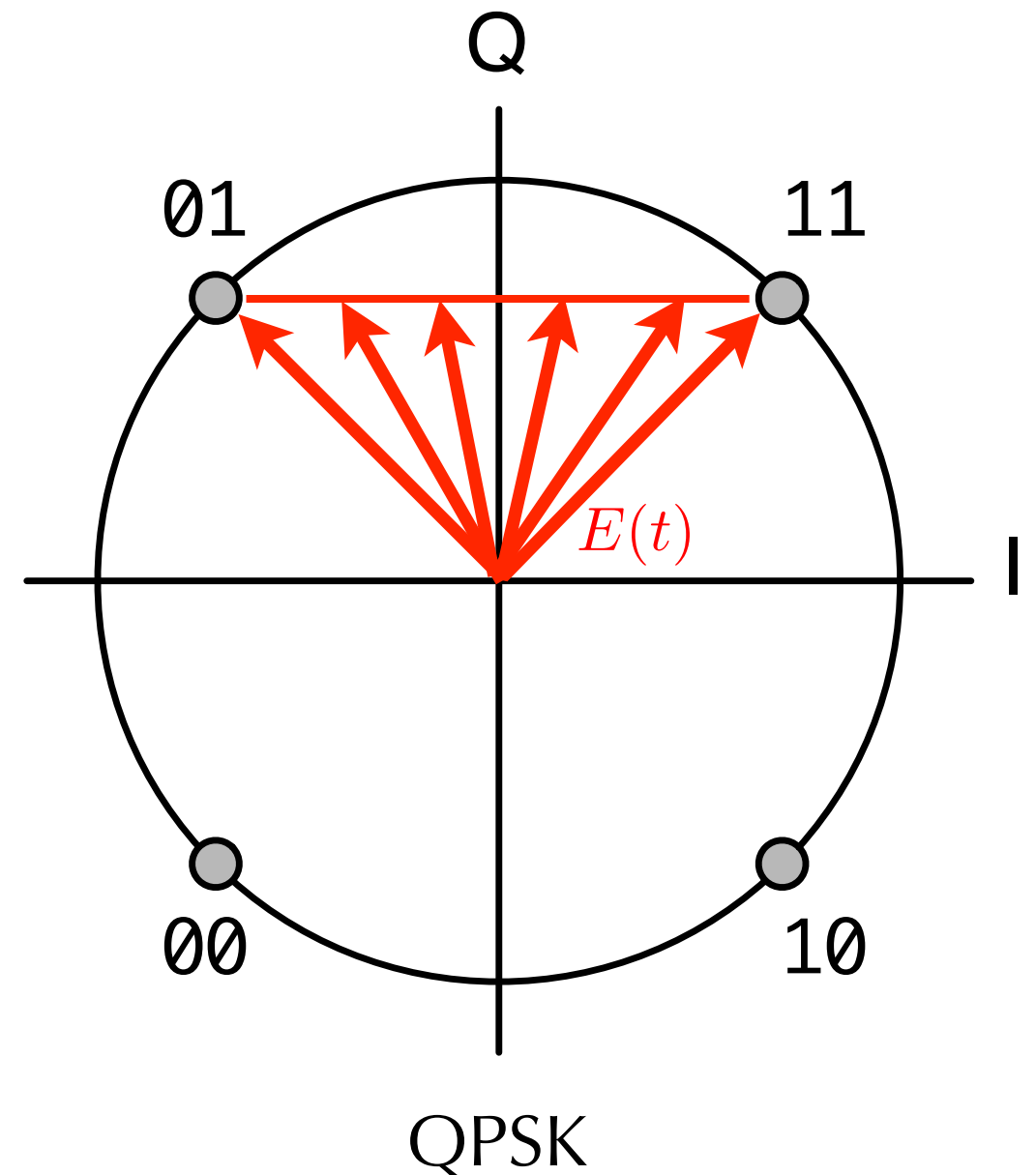
デジタル変調

■ デジタル変調

- 一定時間毎の $E(t)$ の位置等でデジタル値を表現

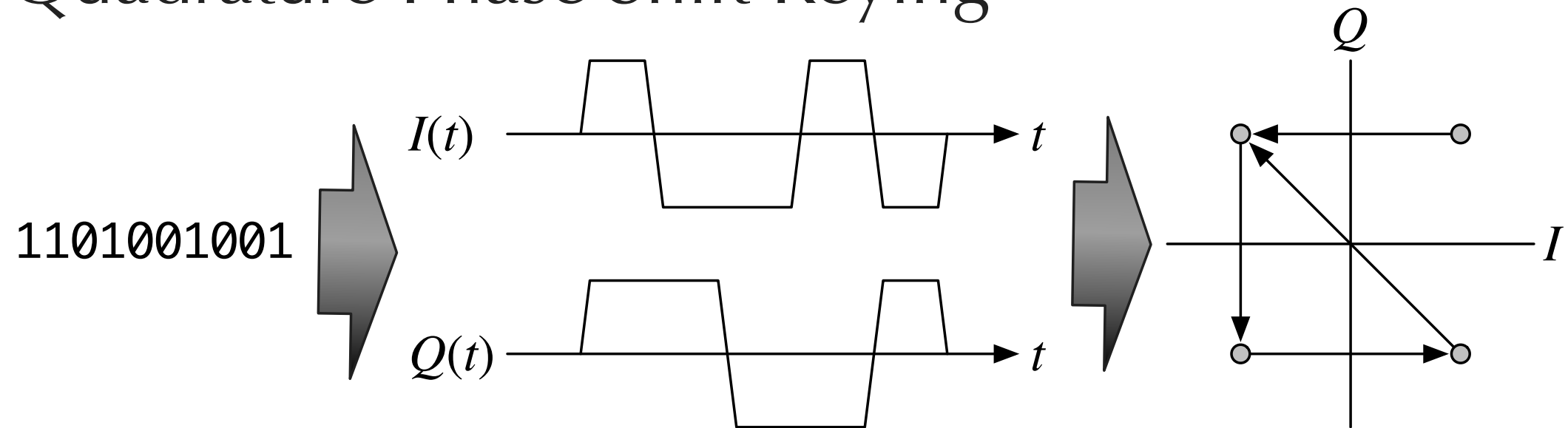
■ 名称の定義

- マッピングされた位置
= シンボル (信号点)
- シンボルの配置図
= コンステレーション
(Constellation)

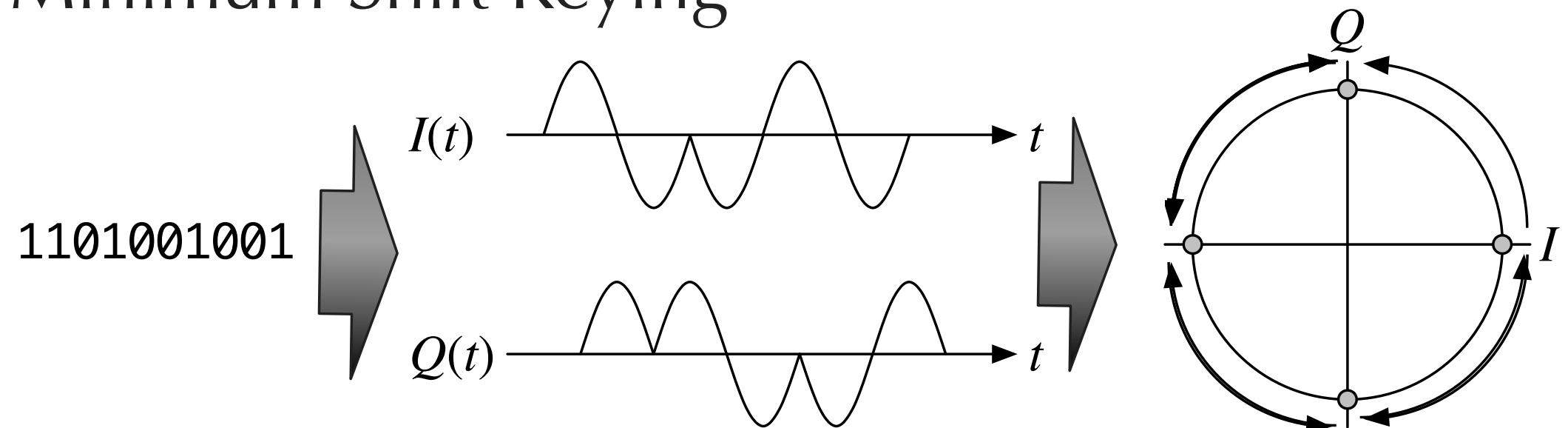


例: QPSK, MSK

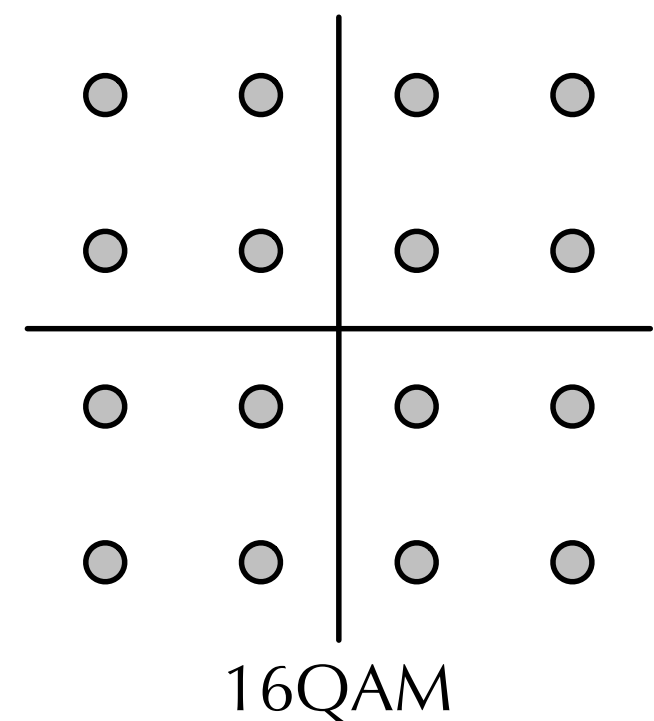
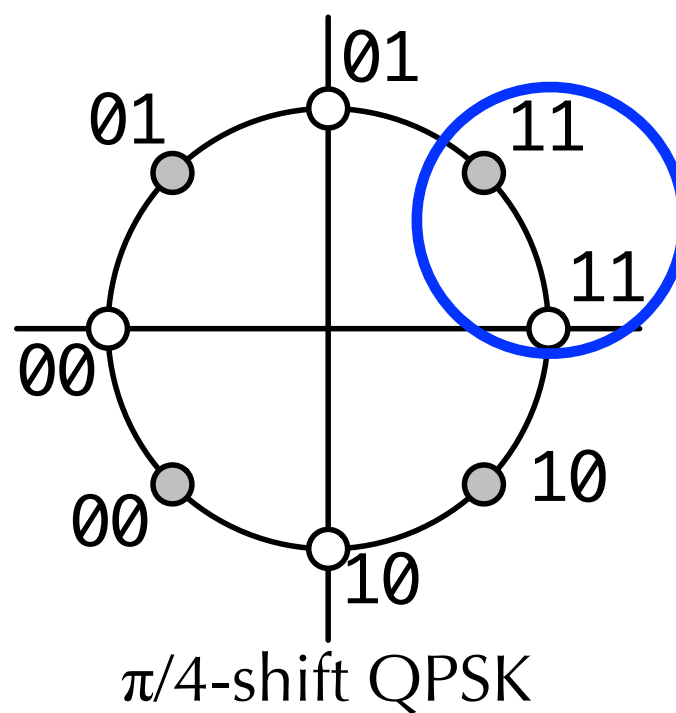
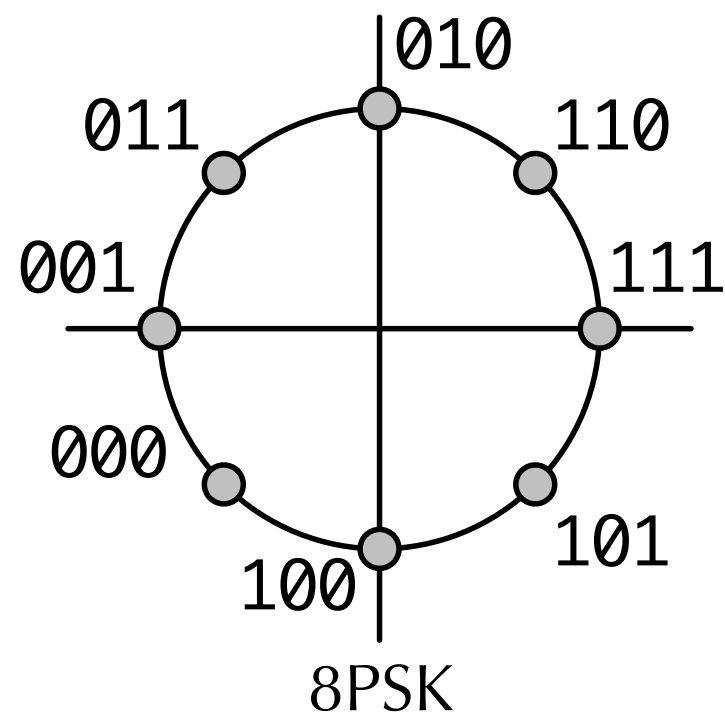
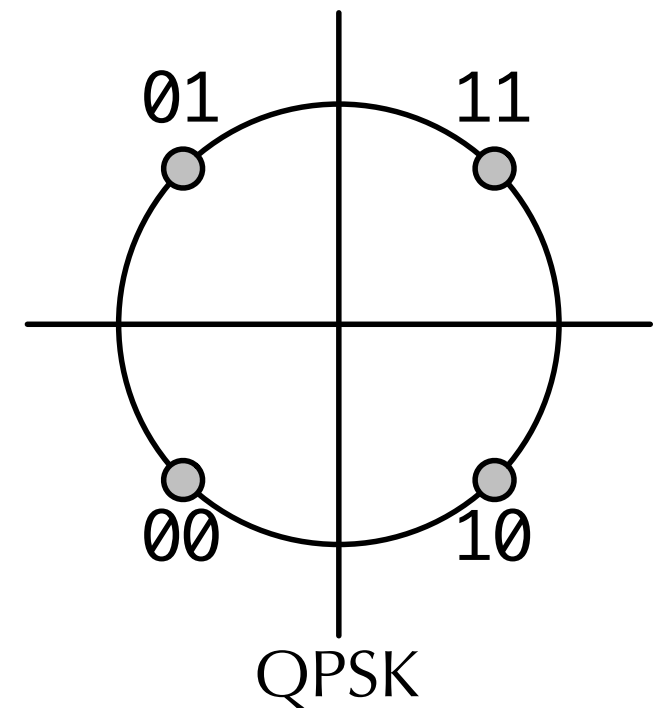
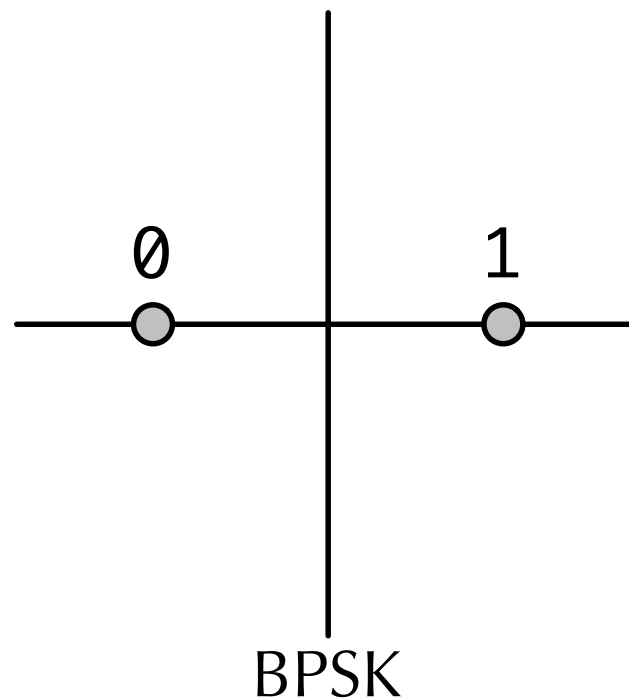
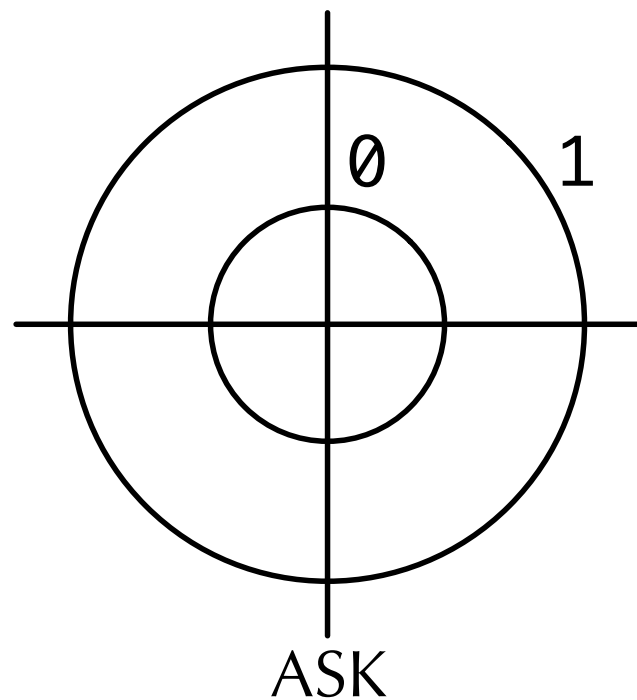
■ Quadrature Phase Shift Keying



■ Minimum Shift Keying



様々なデジタル変調方式



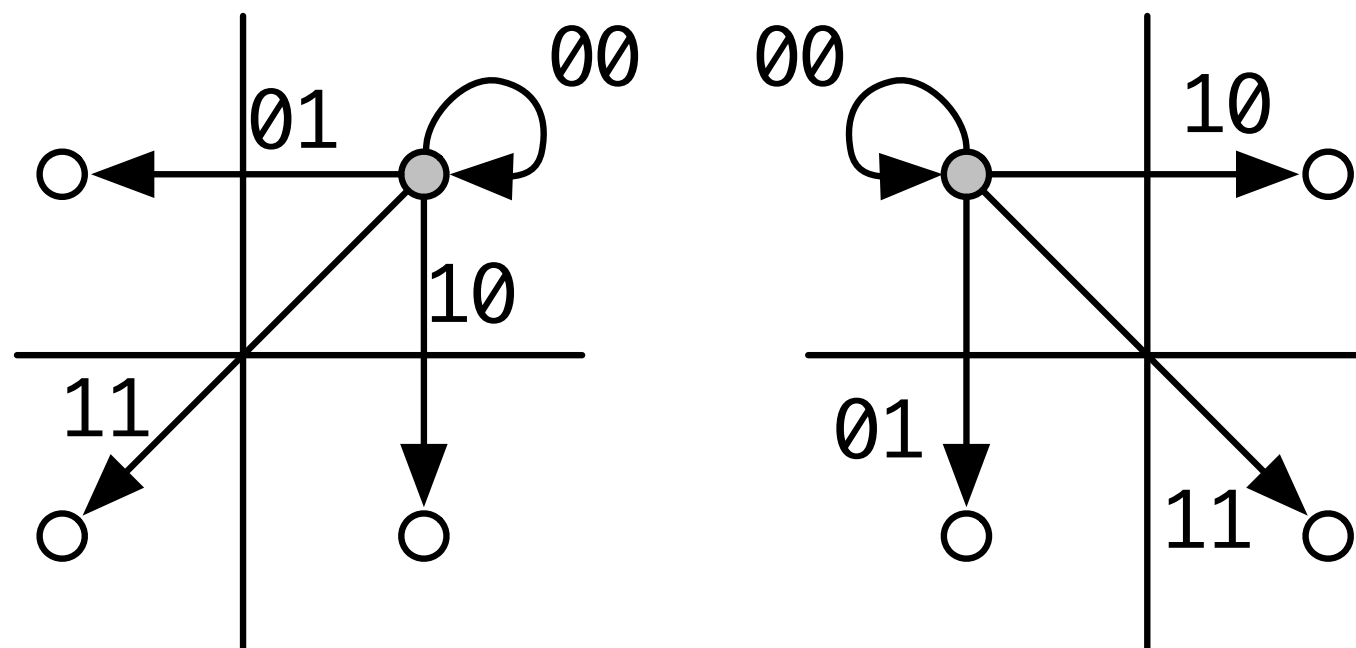
$\pi/4$ -shift QPSK

■ $\pi/4$ -shiftした信号点を交互に使ったDQPSK

⇒ 信号点間の移動で中心を通らないので、振幅の変化が小さくなる

■ DPSK (Differential PSK)

- 前回との信号点の「差」でデジタル値を表現



その他の変調方式

- OOK (=100% ASK)
- FSK
- O-QPSK
- MSK
- GMSK
- PWM
- PPM
- OFDM
- ...

- ※ I、Qを使わなくても簡単に処理できるものもある
 - e.g.) ASK (OOK), PWM, PPM

デジタル無線通信と デジタル信号処理

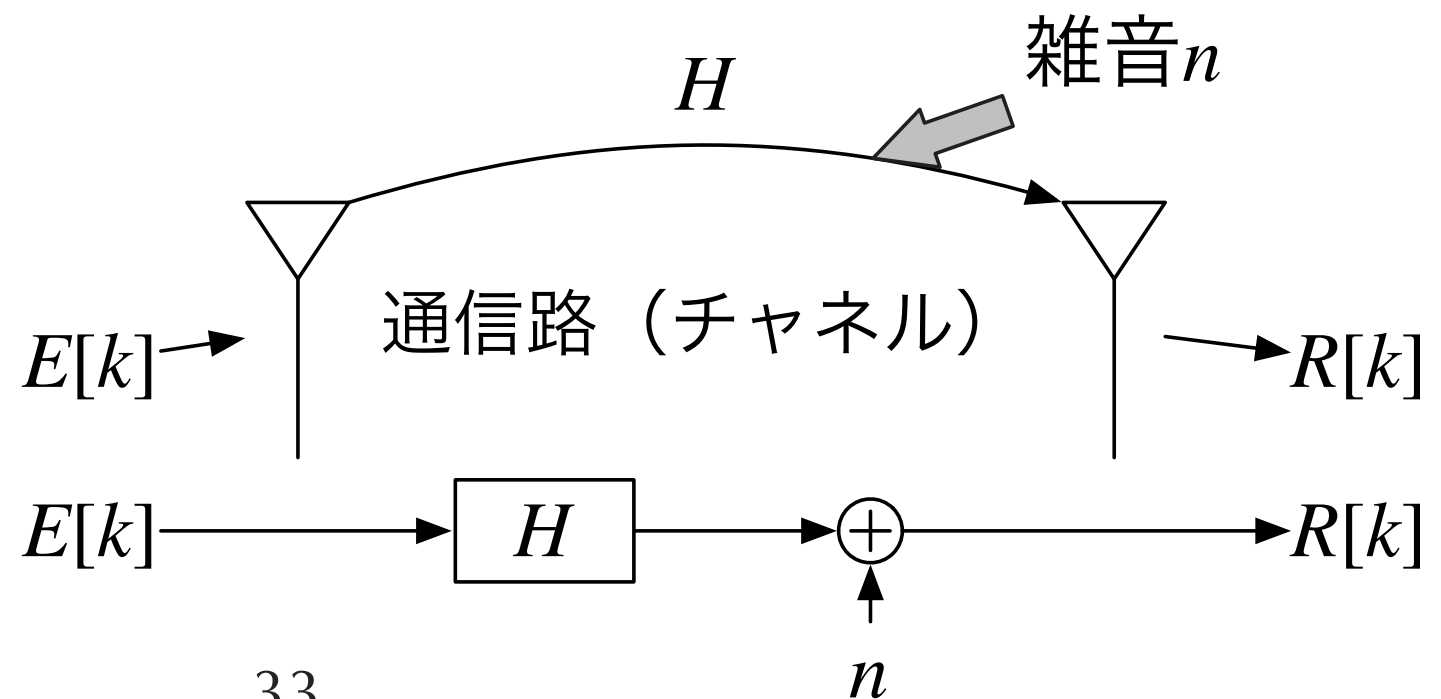
無線通信とデジタル信号処理 (1)

■ 受信信号

- 送信信号に減衰やマルチパスの影響を加えたもの

$$R[k] = HE[k] + n$$

- $R[k]$: 受信シンボル
- $E[k]$: 送信シンボル
- H : 減衰やマルチパスの影響を表す複素行列
- n : 雑音



無線通信とデジタル信号処理 (2)

■ 受信信号の表現例

- 理想チャネル
 $R = HE, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$

- キャリア周波数オフセットあり

$$R = e^{j\phi}(HE + n)$$

- シンボル間干渉あり

$$R = HE + n, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0.2 & 1 & 0 & \cdots \\ 0.1 & 0.2 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

H の逆行列を求めることができれば、送信信号 E を復元できる

チャネル等化

■ チャネル等化

- H の逆行列を求めること
 - 送信信号に既知の信号を含めることで実現できる

■ 具体的なやり方は省略

- 割と難しいです
- 実際にはCyclic Prefixと呼ばれるものなどを用いない限り無雑音でも完全な等化は実現できないです

■ 要するに...

- デジタル無線通信の本質はデジタル信号処理

Software Defined Radio

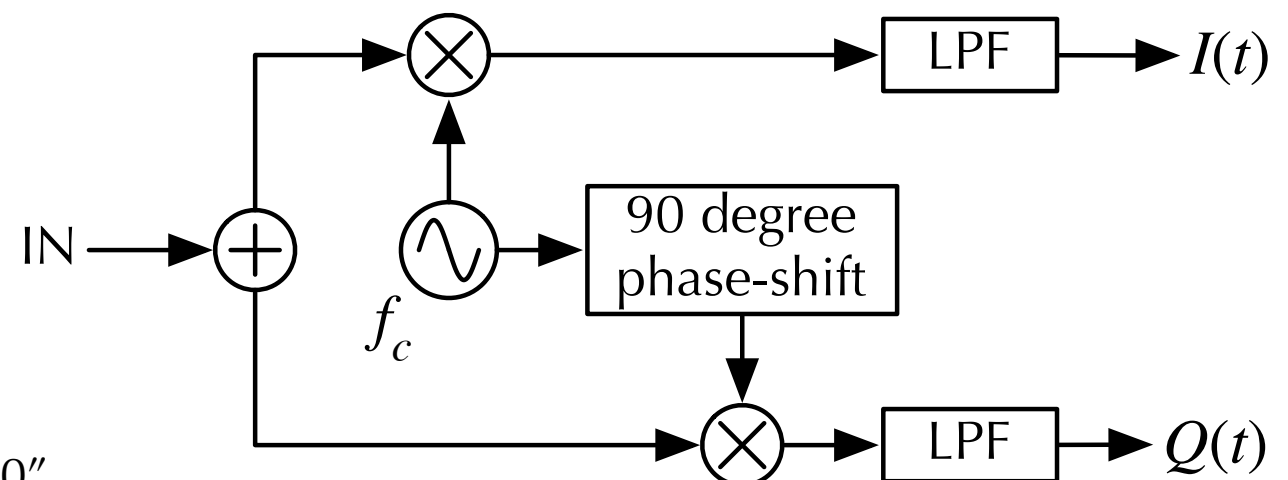
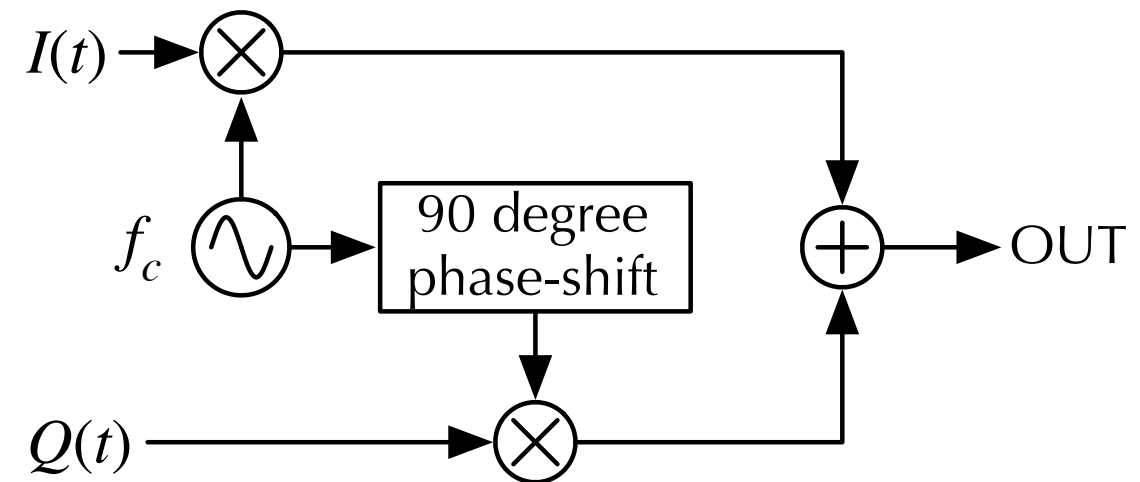
■ I, Q信号の生成・解読をソフトウェアで行う無線機

- いかなる波形のI, Qも生成できる
- いかなる信号処理も実現できる

⇒ どんな無線方式でも実現できる



出典: Ettus Research, "USRP N200",
<https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>



雑音環境下での通信容量の限界

■ シャノンの定理

- 白色雑音環境下においては、 信号帯域幅 B [Hz]と信号帯域内でのS/N比（信号対雑音電力比）を用いて定まる通信容量 C [bit/s]以下の速度で通信する限り、伝送誤りを任意に小さくできる符号化方式が存在する

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

⇒ エラーなく通信できる限界の通信速度は信号帯域幅で決まってしまう

まとめ

まとめ

■ 電波伝搬

- 伝搬する間に様々な影響を受ける

■ デジタル変調

- I, Q信号を用いた直交変調
- 複素平面上の“シンボル”でデジタル値を表現

■ シャノン限界

- 通信容量の限界は信号帯域幅で決まる

■ デジタル通信は高度な信号処理で実現されている