

# デジタル移動無線の 基礎

東北大学大学院工学研究科  
電気・通信工学専攻  
通信システム工学講座  
コミュニケーション工学  
安達研究室

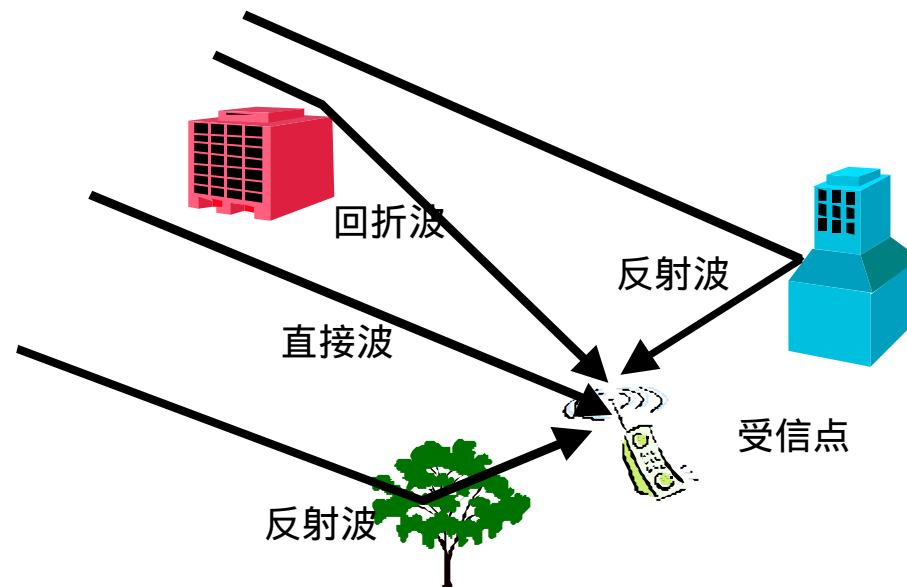
# はじめに

- 移動通信では，電波は様々な方向から受信アンテナに到達する．このため，移動しながら送受信すると電波が互いに干渉し，受信電力が時間的に大きく変動する．これはフェージング現象と呼ばれており，送信したデジタル信号に誤りを発生させる原因になっている．移動通信における電波伝搬からデジタル信号伝送の基礎を学ぶ．
  - 電波伝搬とマルチパスフェージング
  - フェージングチャネルのモデル化
  - デジタル伝送
  - フェージング対策

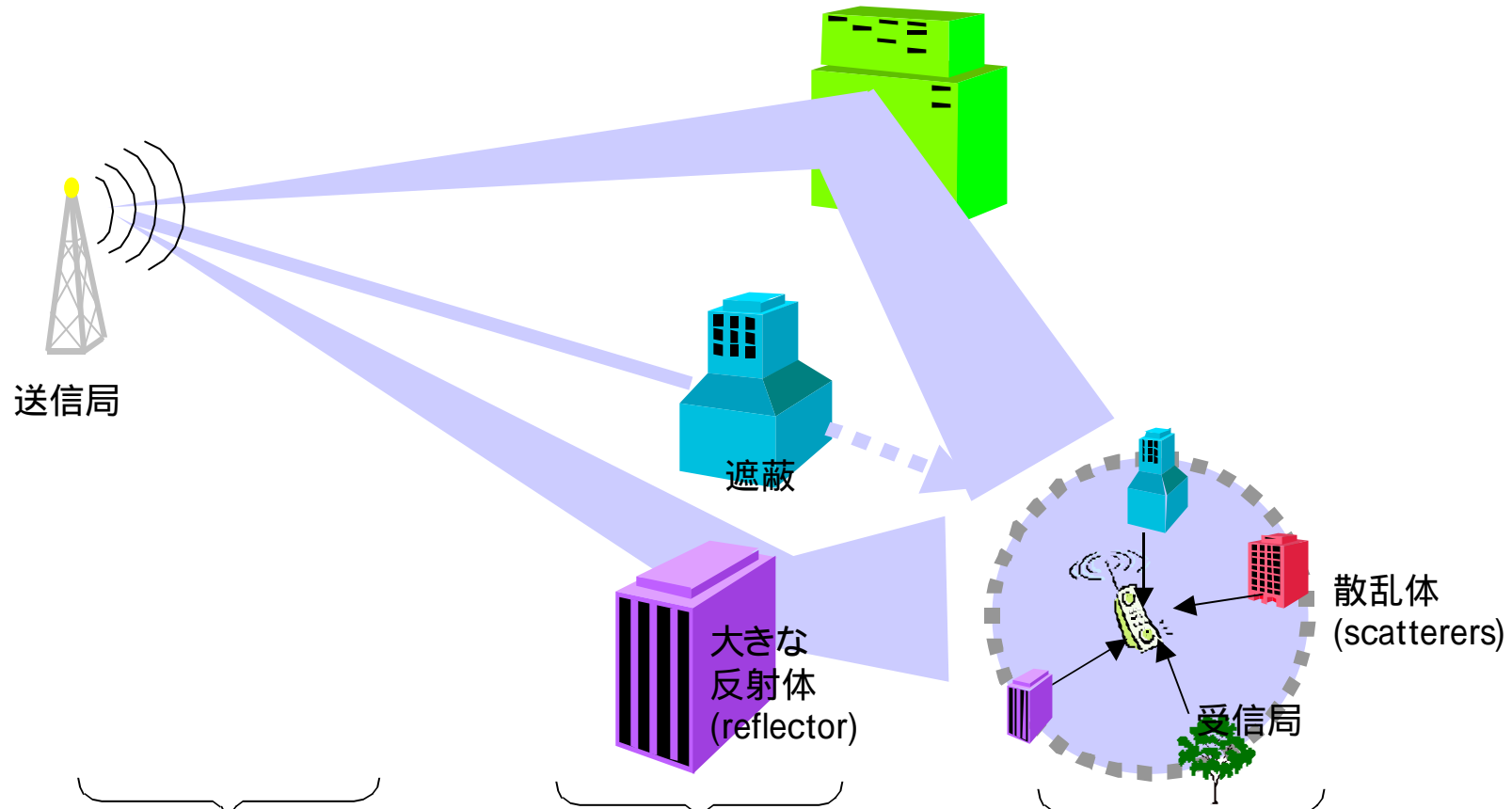
# 電波伝搬の特徴

移動通信を正しく理解するためには、まず電波伝搬の特徴を知ることが重要である。

- 建造物、電柱、樹木や車さえも電波を反射する。これらが多重伝搬路（マルチパス）を形成する。受信波は直接波、回折波と反射波の3種類に分けられる。



# 模式的的理解



移動局が基地局から離れるにつれて電波が減衰する。

送信電波は大きな建造物や地形の起伏によって遮られることがある。基地局・移動局間にある建造物などによる電波の遮蔽・反射によって移動局周辺への電波エネルギー到達量が緩慢に変動する。

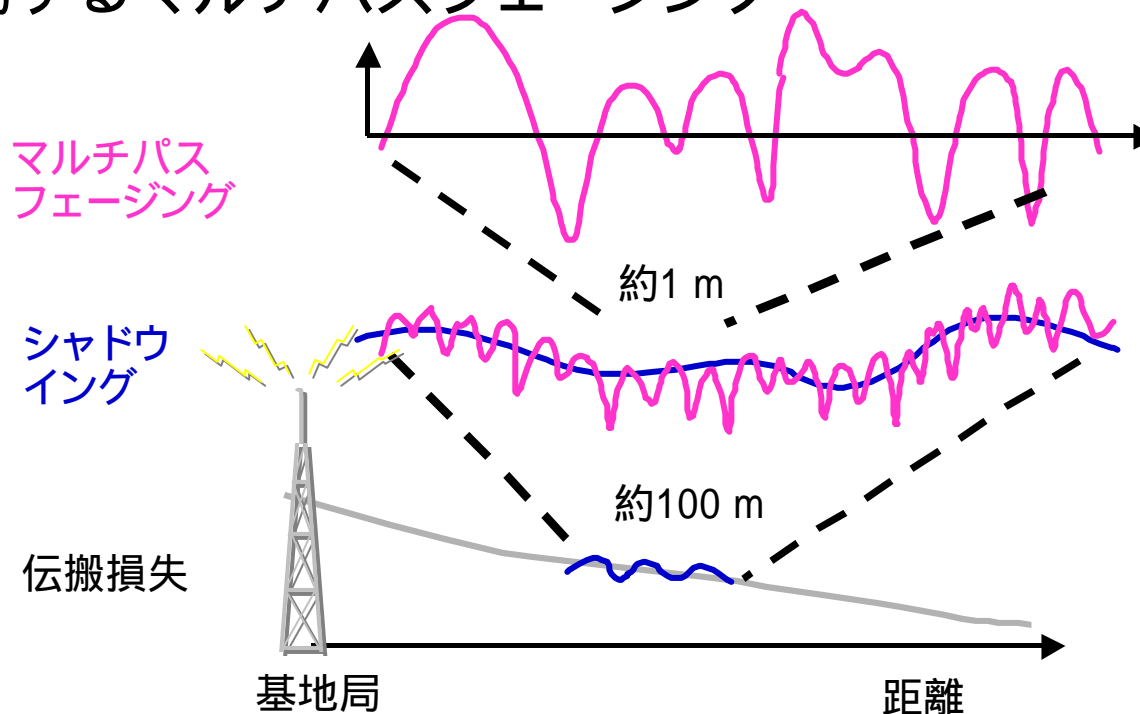
移動局周辺まで到達した電波が近傍の散乱物（建造物や樹木など）によって反射・回折され、それらが干渉しあって受信電力が瞬時変動する。

不規則変動

# モデル化

3つの要因に分解できる。

- 送信点からの距離に依存する伝搬損失
- 数十から数百メートルの周期で不規則に伝搬損失が変動するシャドウイング
- 搬送波波長の半分程度の周期で不規則に受信電力が変動するマルチパスフェージング



# 受信信号電力の数式表現

## ■ 3つの項の乗積

伝播損失      シャドウイング      マルチパスフェージング

↓                      ↓                      ↓

$$r^2(t) \propto \frac{1}{d^a} \times 10^{-\frac{d(t)}{10}} \times R^2(t)$$

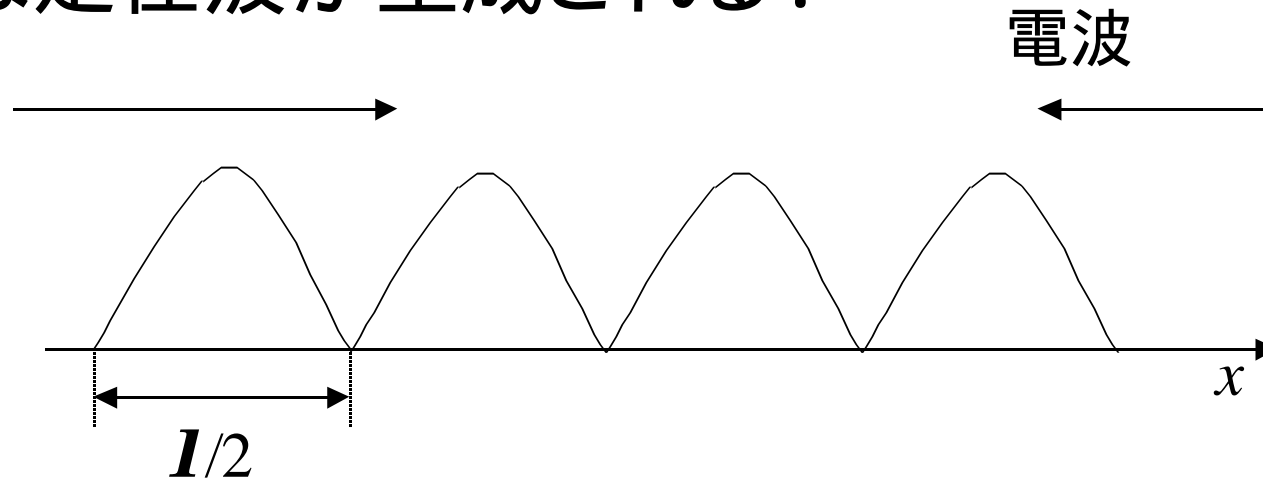
ただし  $d$  は距離,  $E[R^2(t)] = 1$

# 伝搬損失，シャドウイング，マルチパスフェージングの発生原因

- 送信点からの距離に依存した伝搬損失  
電波が広がりながら伝播するためであり，移動局が基地局から離れるにつれて電波強さが減衰すること．
- シャドウイング  
基地局と移動局との間にある大きな建造物などによる電波の遮蔽・反射によって移動局周辺への電波エネルギー到達量が緩慢に変動するために発生する現象のこと．平均受信電力がおおむね，数十から数百メートルの周期で不規則に変動する．変動幅の大きさは基地局・移動局間の地形地物のマクロ構造に依存する．
- マルチパスフェージング  
移動局周辺まで到達した電波が近傍の反射物（建造物や樹木など）で反射・回折され，それらが干渉しあうことによって発生する受信電力の瞬時変動現象のこと．搬送波波長の半分程度の周期で受信信号の振幅が不規則に変動する．

# マルチパスフェージング

- 電波が前方と後方から到来しているときには定在波が生成される。



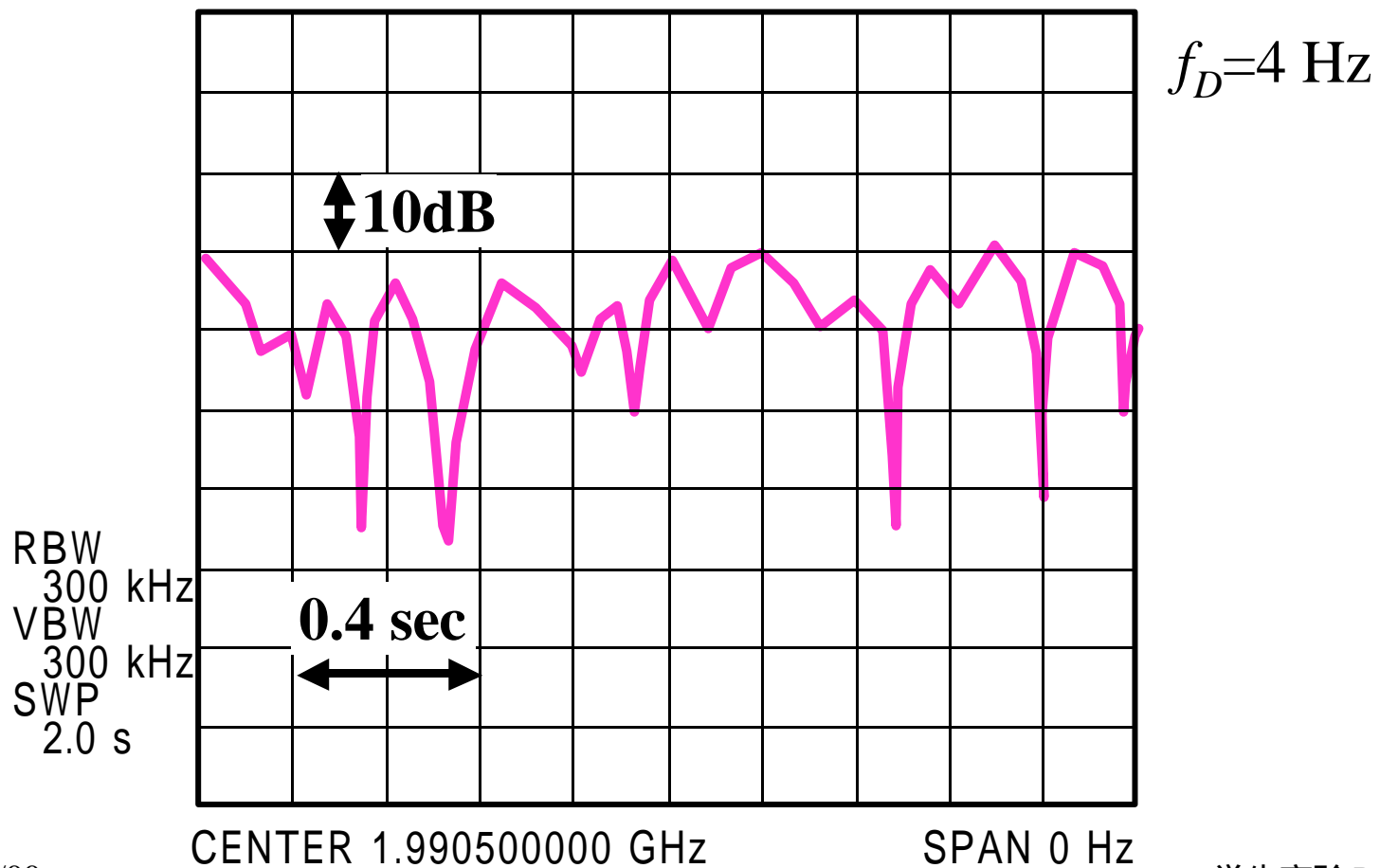
- アンテナが移動すると受信信号の大きさが変動する
- 実際にはもっと複雑 統計的取り扱い



# マルチパスフェージングの観測

## ■ 受信電力の瞬時時間変動

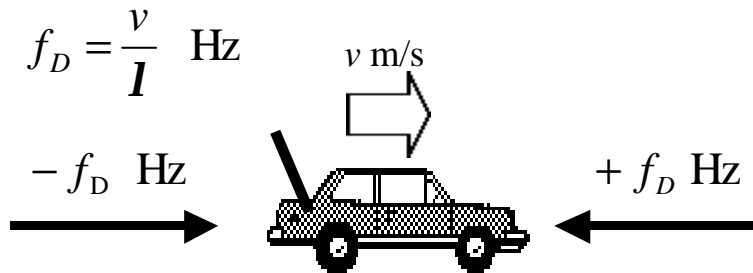
■ 周波数: 800MHz, 移動速度: 5.4km/h



# マルチパスフェージングの速さ

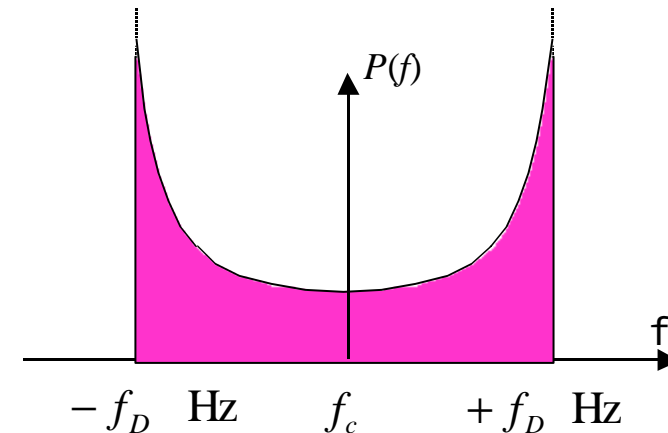
- アンテナが移動していると、ドップラー効果により電波の周波数が変化する。
- 最大の周波数シフトを最大ドップラー周波数  $f_D$  といふ。

例) 時速200 kmで走行しながらデジタル携帯電話(800MHzの搬送波周波数)を使っているとき、最大ドップラー周波数は  $f_D = 148$  Hzにも達する。



## パワースペクトル

$$P(f) \propto \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_D}\right)^2}}$$



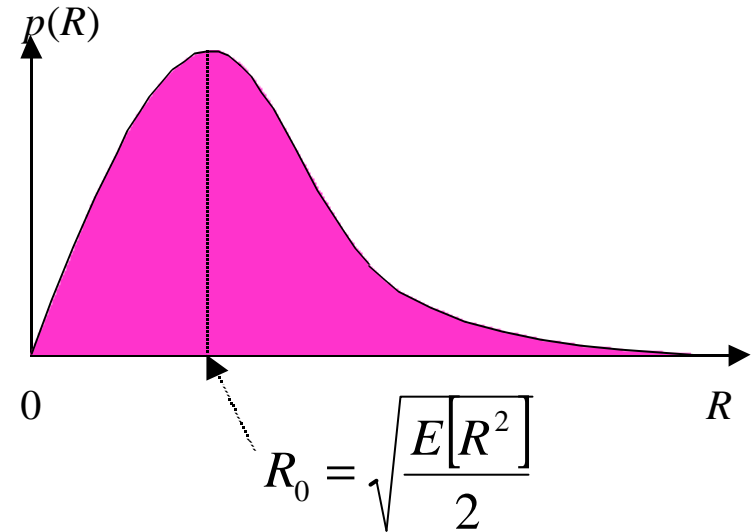
# 統計的性質

- 距離に依存した伝搬損失  
送信点からの距離を $d$ とすると, 信号振幅の2乗(電力のこと)は $d^a$ に反比例して減衰する.  $a$ はおよそ3から4の間の値をとることが知られている.
- シャドウイング  
損失をデシベルで表したときの値を $d(t)$ で表すものとする  
と,  $d(t)$ は標準偏差 $s$ が6から10程度の正規確率過程(ガウス確率過程)に従って変動することが知られている.
- マルチパスフェージング  
都市内では, 受信信号の振幅 $R(t)$ はレイリー分布を有する確率過程でモデル化できることが知られている.

# レイリー分布

## ■ $R$ の確率密度関数

$$p(R) = \frac{2R}{E[R^2]} \exp\left[-\frac{R^2}{E[R^2]}\right]$$



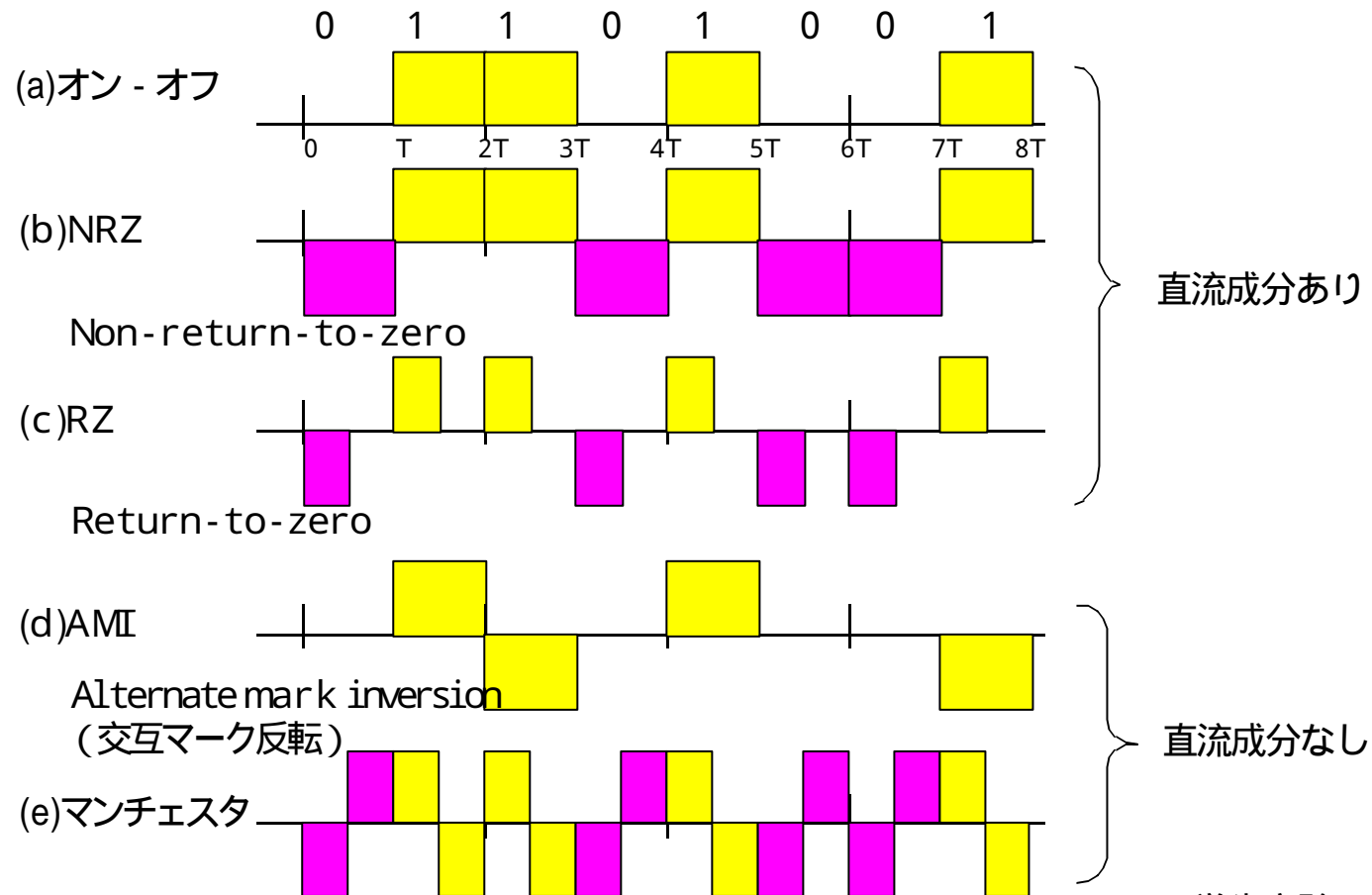
## ■ $R$ の累積分布

$$P(R) = \int_0^R p(R) dR = 1 - \exp\left[-\frac{R^2}{E[R^2]}\right]$$

# デジタル伝送

## ■ 基底帯域 (ベースバンド) 伝送

デジタル情報の0, 1に対応したパルスを送送する. いくつかのパルス波形がある. 通信路符号 (Line code)とも言われる.



# 変調

- ベースバンド伝送の信号波形は零周波数付近のスペクトルを持っている。しかし、現実の大部分の通信路は零周波数付近を殆ど伝送することができない帯域通信路とみなされる。無線通信路はまさにそういう通信路である。ベースバンドデータ信号を通信路に最適な周波数帯域へ移す技術が変調である。
- 変調信号の表現

$$\begin{aligned} s_T(t) &= A(t) \cos(2\mathbf{p}f_c t + \mathbf{f}(t)) = A(t) \cdot \operatorname{Re}[\exp j(2\mathbf{p}f_c t + \mathbf{f}(t))] \\ &= \operatorname{Re}[\{A(t) \exp j\mathbf{f}(t)\} \exp j2\mathbf{p}f_c t] \end{aligned}$$

または

$$\begin{aligned} s_T(t) &= I(t) \cos 2\mathbf{p}f_c t - Q(t) \sin 2\mathbf{p}f_c t = \operatorname{Re}[s(t)] \\ s(t) &= \{I(t) + jQ(t)\} \exp j2\mathbf{p}f_c t \end{aligned}$$

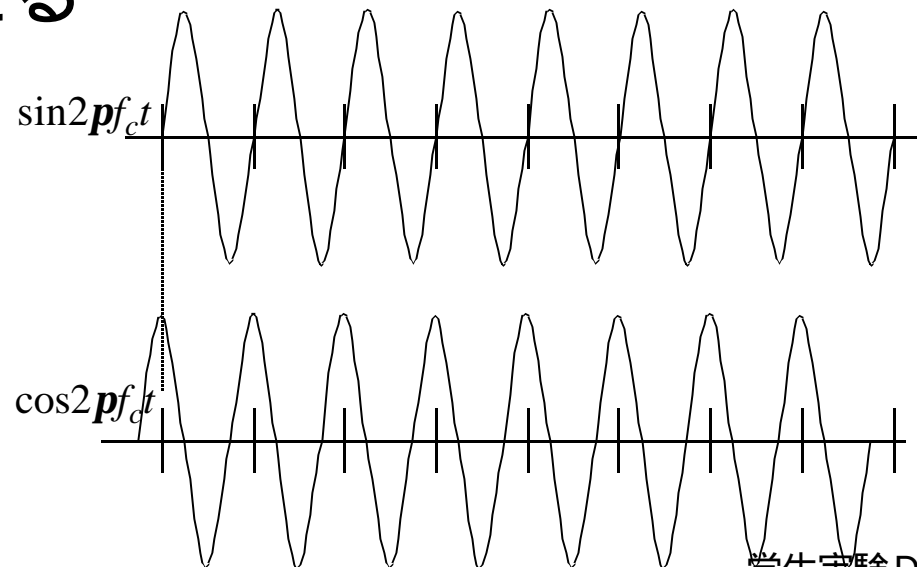
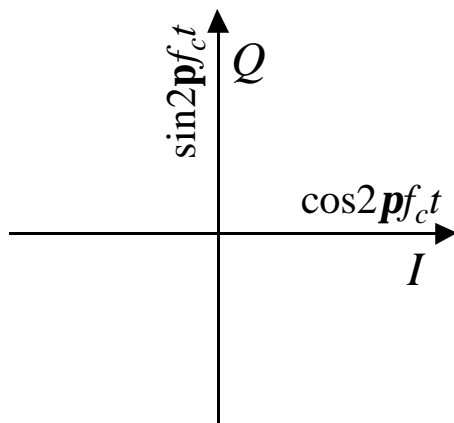
- 複素数として扱った方が便利なので、通常、

$$A(t)\exp j\mathbf{f}(t)$$

$$I(t)+jQ(t)$$

で表わされる表現を用いる。

- 送信するデータに応じて、 $A(t)$  と  $f(t)$ 、または  $I(t)$  と  $Q(t)$  を変化させる



# デジタル変調の種類

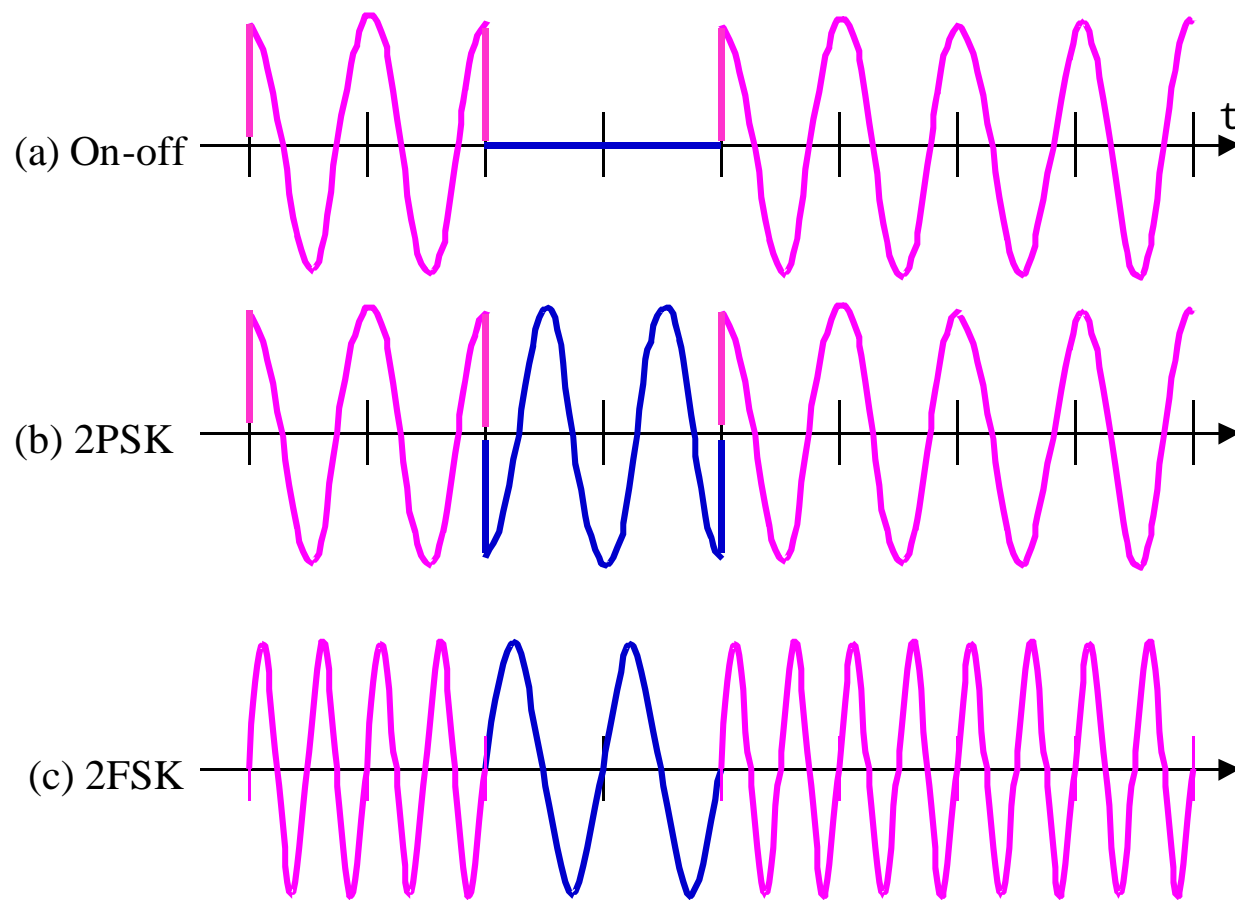
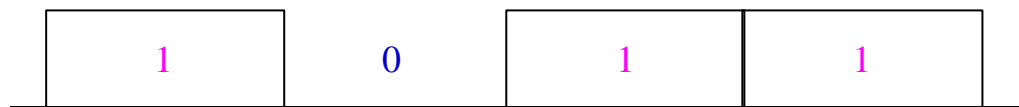
- 振幅，位相，または周波数，すなわち $A(t)$ ， $f(t)$ ，または $d f(t)/dt$ を変化させる3つの方法がある．
- $I(t)$ と $Q(t)$ を変化させても良い．

$$s(t) = A(t) \exp jf(t) = I(t) + jQ(t)$$

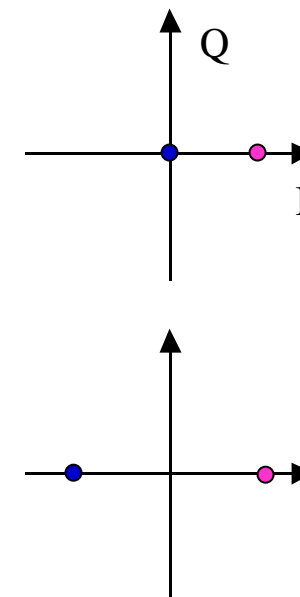
	デジタル	アナログ
振幅変調	On-Off ASK(Amplitude shift keying)	AM
位相変調	PSK (Phase shift keying)	PM
周波数変調	FSK (Frequency shift keying)	FM



送信  
データ



$$A(t) \exp jf(t) = I(t) + jQ(t)$$

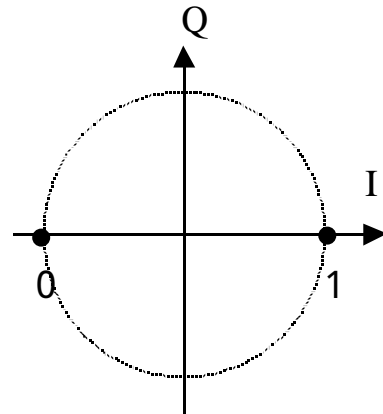


$$\frac{1}{2p} \frac{df(t)}{dt}$$

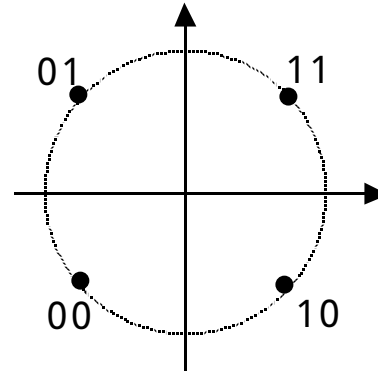
# 信号点配置

## ■ 多值PSK

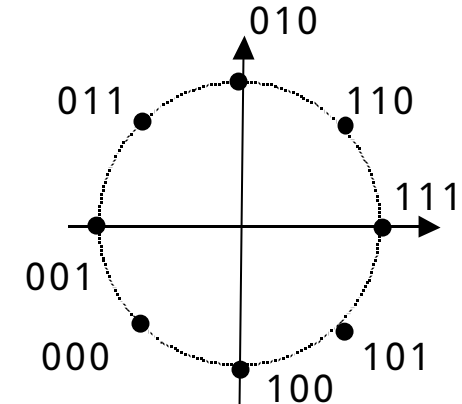
$$A(t) \exp jf(t) = I(t) + jQ(t)$$



(a) 2PSK

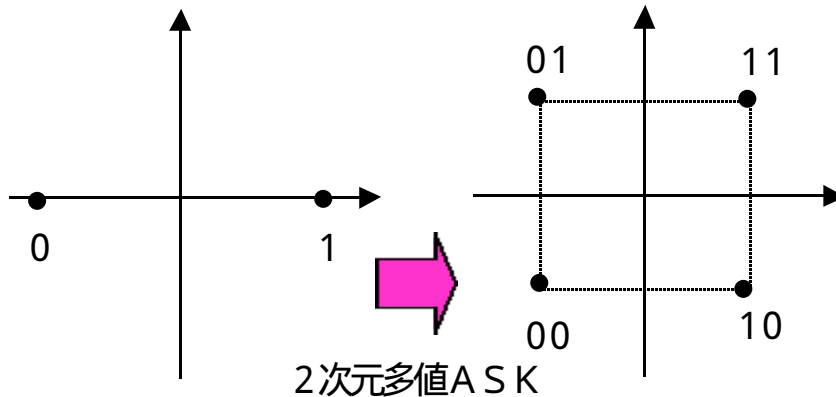


(b) 4PSK



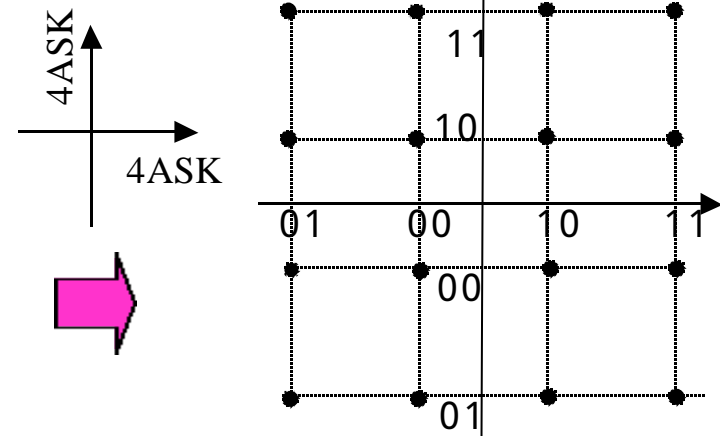
(c) 8PSK

## ■ QAM



(d) 2ASK

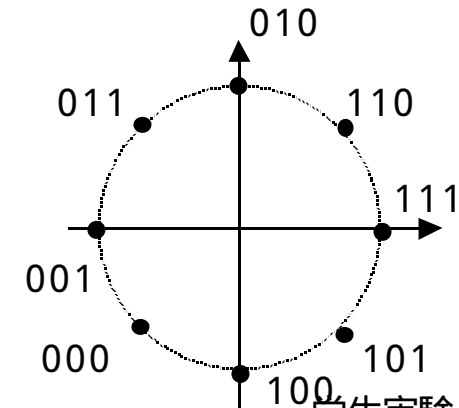
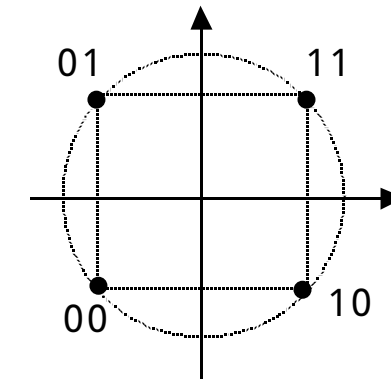
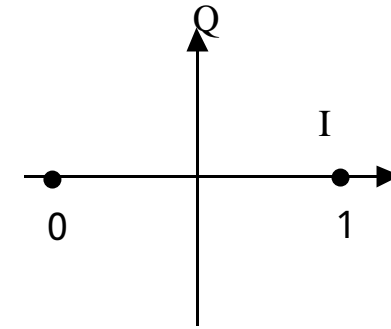
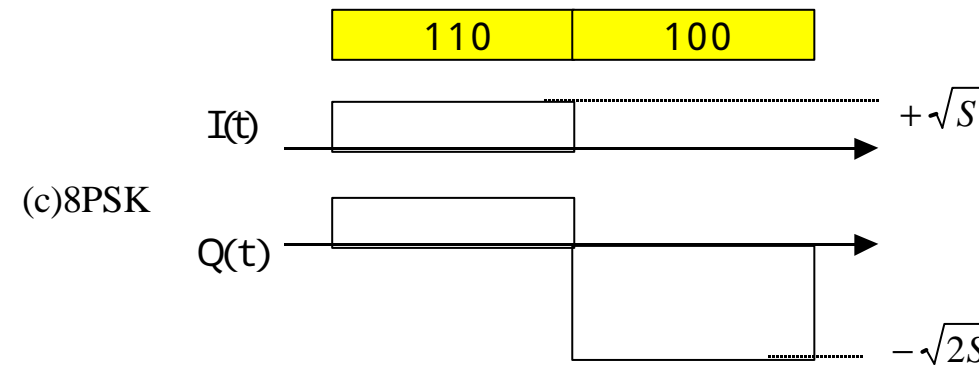
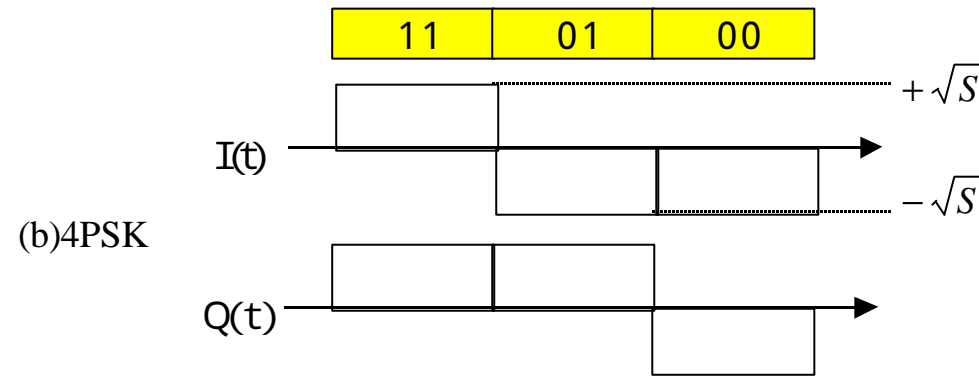
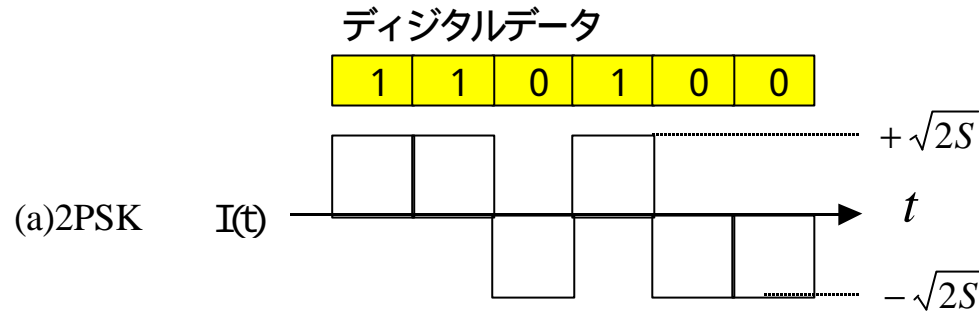
(d) 4QAM



(e) 16QAM

# $I(t)$ と $Q(t)$ の波形

$$A(t) \exp jf(t) = I(t) + jQ(t)$$

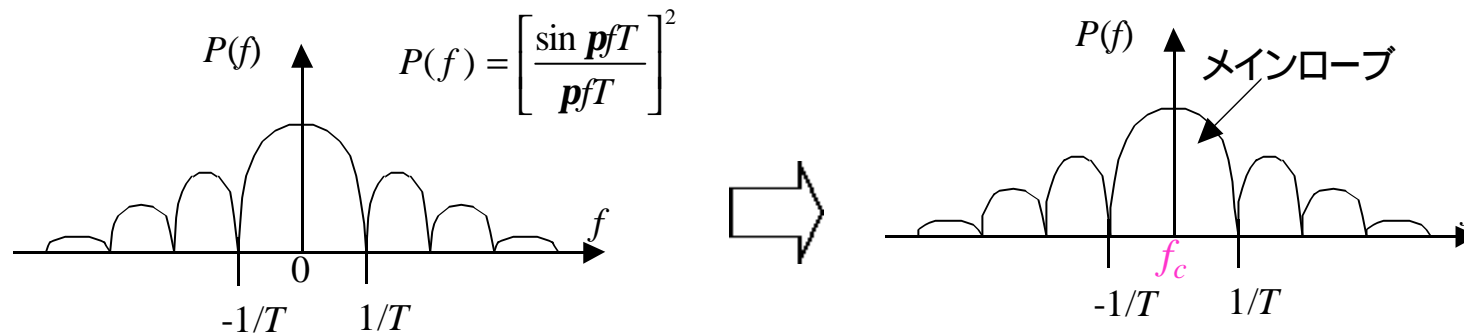
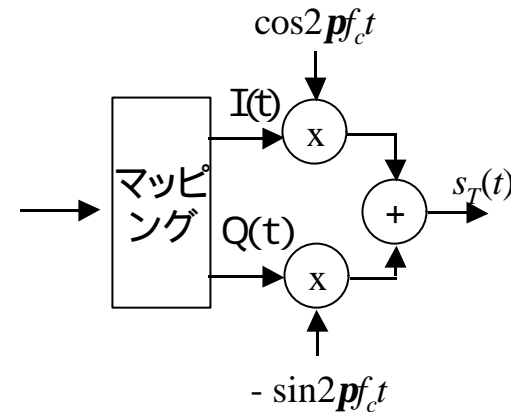


# 変調器の構成

- ベースバンド波形のスペクトルが，そのまま搬送周波数帯にシフトする

$$s_T(t) = A(t) \cos\{2\pi f_c t + \mathbf{f}(t)\}$$

$$= I(t) \cos 2\pi f_c t - Q(t) \sin 2\pi f_c t$$

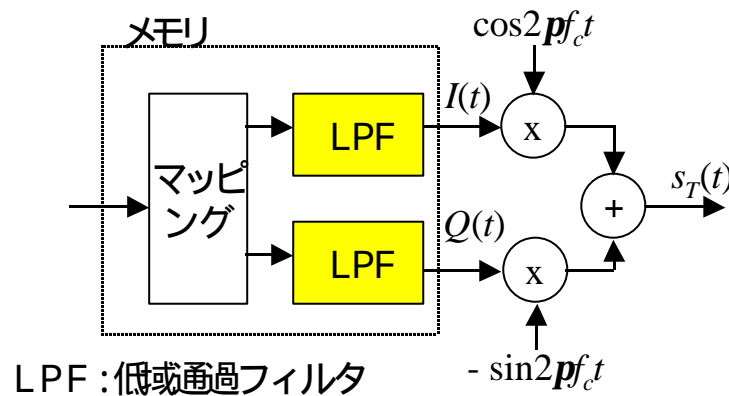


- 帯域制限なしでは高調波成分がある  
無線通信では他チャンネルへ干渉を与える

# 帯域制限フィルタの導入

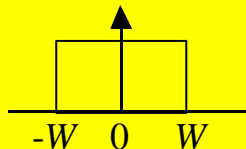
## ■ ナイキストフィルタ

$T$ 秒ごとに標本化された標本をフィルタを通したとき，出力波形の $T$ 秒ごとの標本値が元の値と完全に等しくなるようなフィルタをナイキストフィルタとらう。



### 標本化定理

- $[-W, W]$ に帯域制限された信号波形を $T_s=1/(2W)$ 秒間隔で標本化すればもとの波形を完全に復元できる
- このときのフィルタは矩形フィルタで、フィルタのインパルス応答は $h(t)$



$$h(t) = \frac{\sin pf_s t}{pf_s t}$$

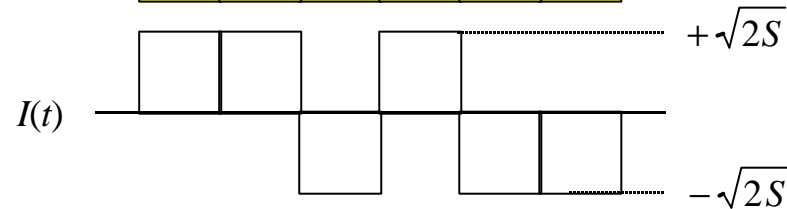
# ナイキストフィルタの応答

## ■ 2PSKの例

### ■ 帯域制限フィルタなし

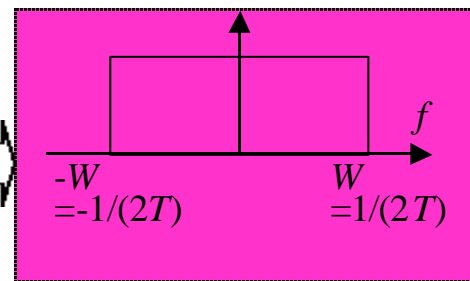
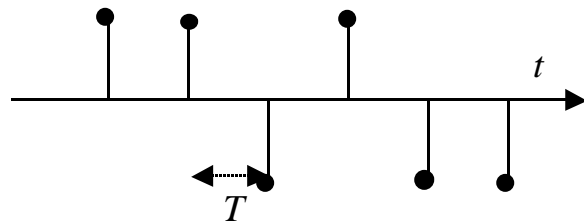
送信データ

1 1 0 1 0 0



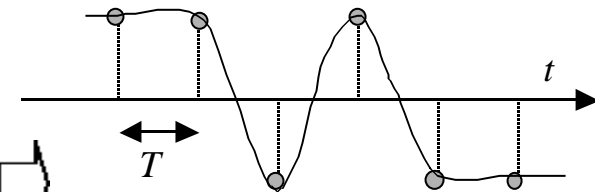
### ■ 帯域制限フィルタあり

フィルタ入力



理想フィルタ

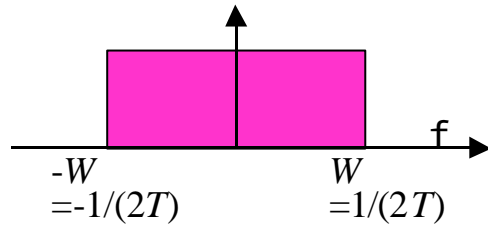
フィルタ出力



標本時点の出力値は入力と同じ値が保存される

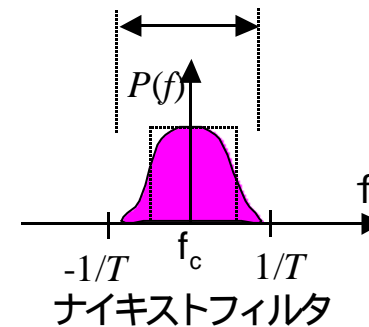
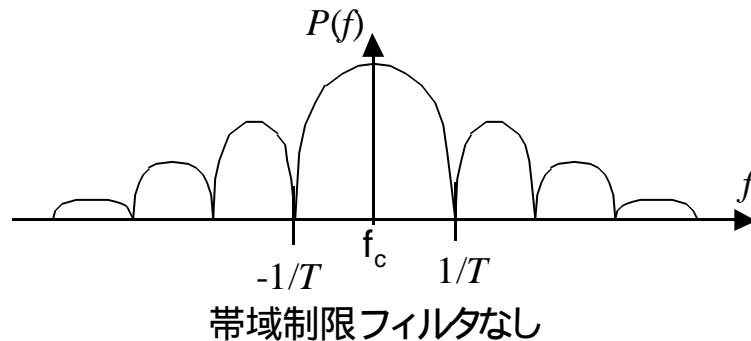
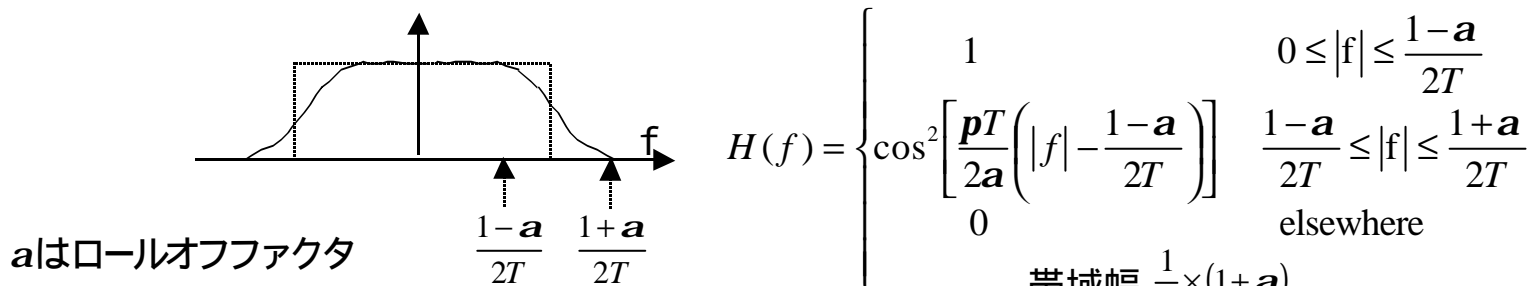
# ナイキストフィルタの周波数応答

## 理想フィルタは作りにくい



$$H(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq 1/2T \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

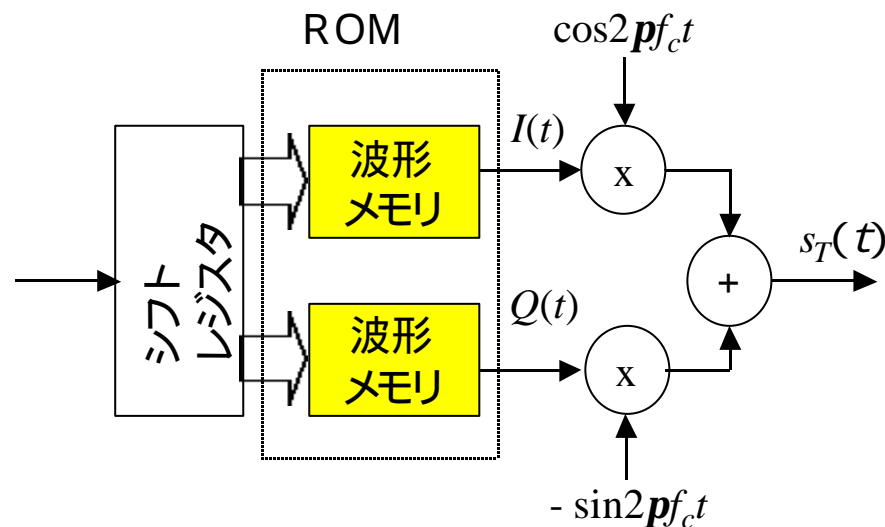
## ナイキスト 2 乗余弦フィルタが良く用いられる



# デジタル型変調器

- メモリに記憶させたフィルタ出力波形を読み出す

$$\begin{aligned} s_T(t) &= A(t) \cos\{2pf_c t + f(t)\} \\ &= I(t) \cos 2pf_c t - Q(t) \sin 2pf_c t \end{aligned}$$





# 伝送誤りの発生原因

## ■ 受信信号の振幅と位相が変化する

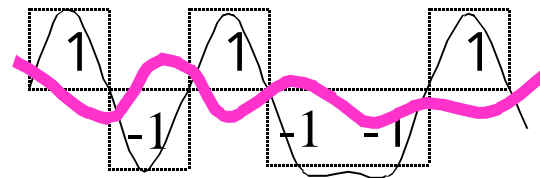
受信信号の  
振幅と位相が  
変化する

熱雑音による誤り

位相回転による誤り

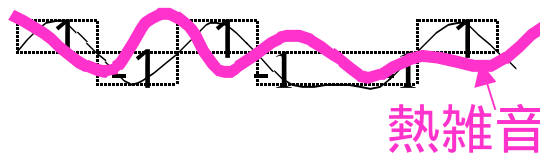
## ■ 伝送誤りの例

信号振幅が大  
きいとき



受信データは正しく受  
信される

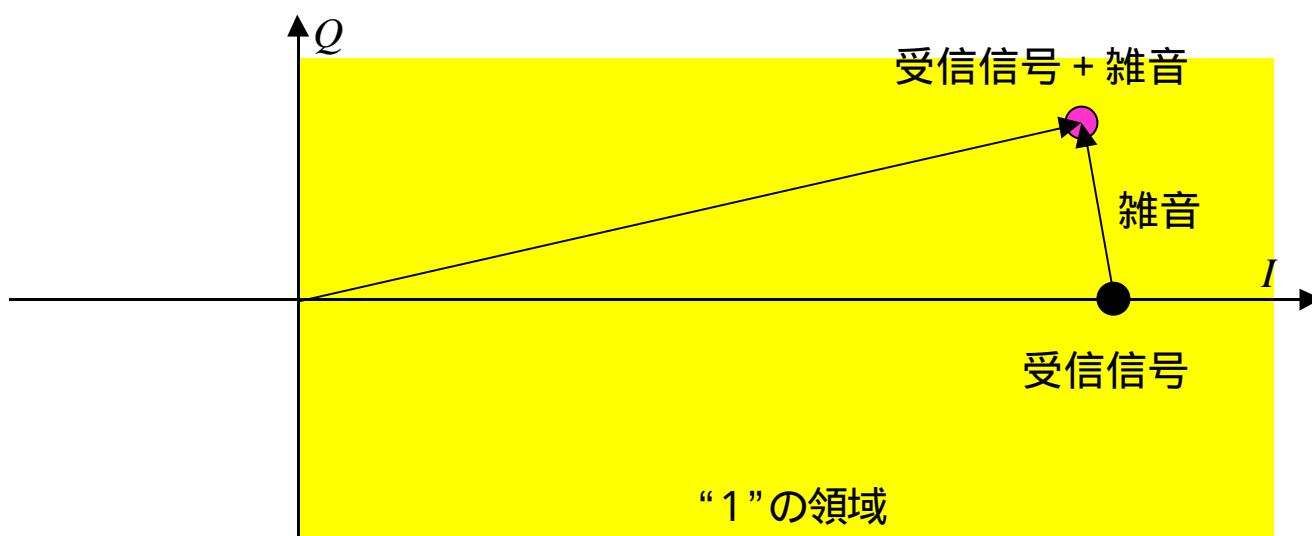
信号振幅が小  
さくなったとき



受信データに誤りが生  
ずる

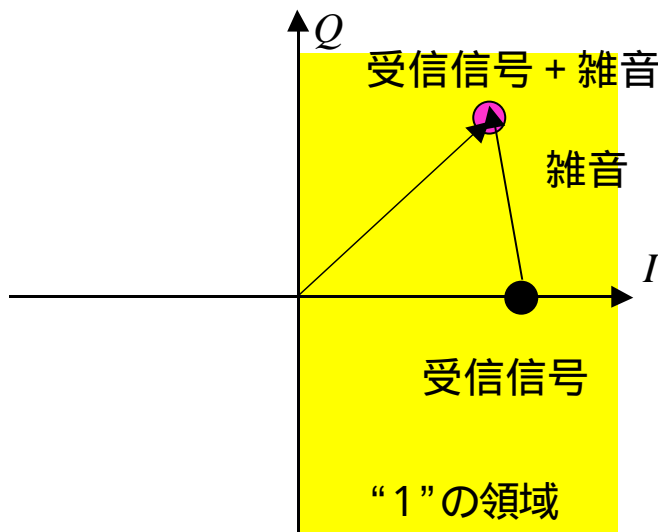
# 2PSKのときの誤り発生機構

- 信号電力が大きいとき(同期検波出力)

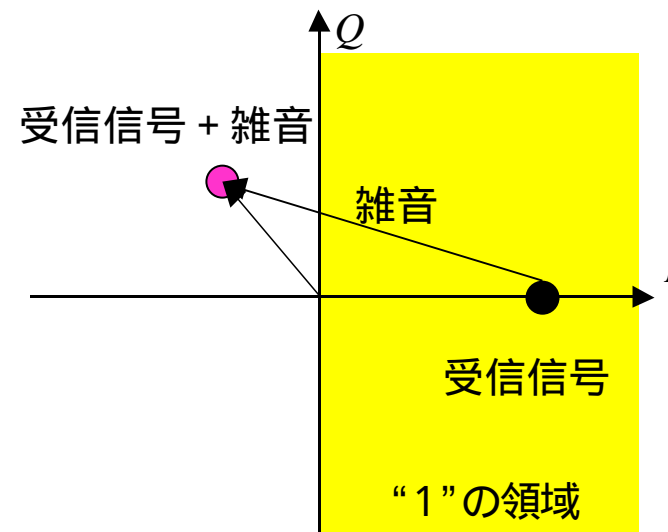


誤りなし

## ■ 信号電力が小さいとき(同期検波出力)



誤りなし

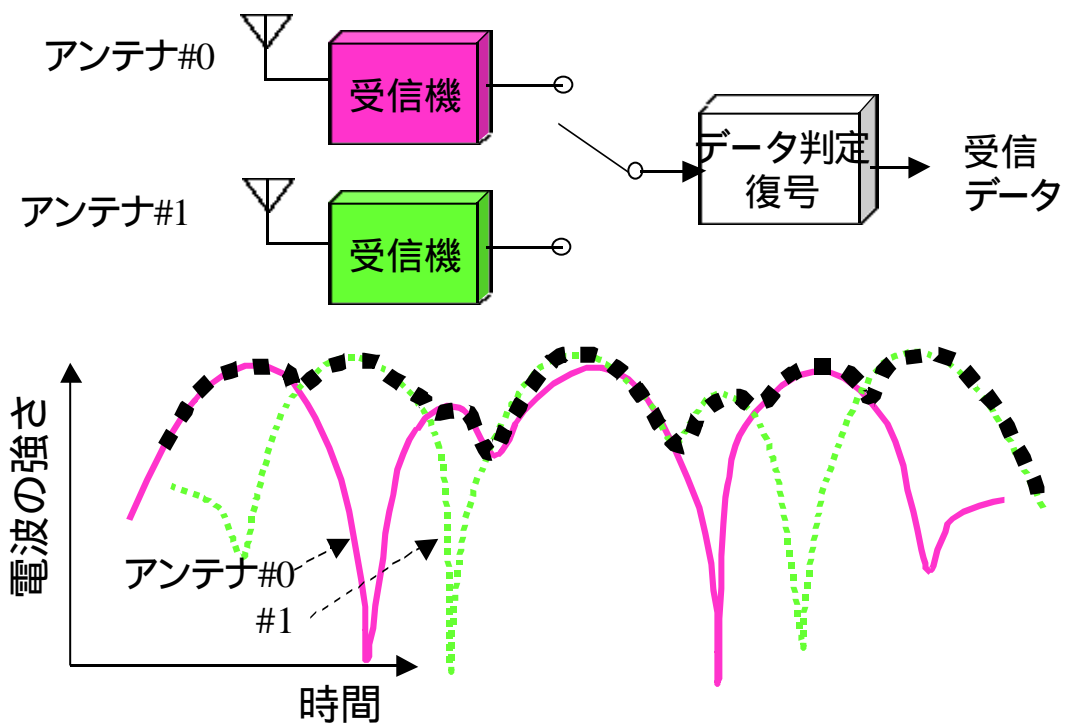


誤り発生

# アンテナダイバーシチ受信

- ダイバーシチ受信とは，お互いに離して設置した複数のアンテナで受信した信号を合成することによりフェージングの影響を軽減する技術である．異なるアンテナで受信した信号に現れるフェージングが同じではない，ということを利用している．
- 選択合成ダイバーシチ  
最も構成が簡単なダイバーシチ受信が選択合成である．

## ■ 選択ダイバーシチ



# おわりに

- 電波伝搬路は複雑です．フェージングが発生するため，確率的通信路として特徴付けられます．確率的通信路でのデジタル信号伝送はかなり困難なので，高度な無線通信技術が要求されています．ダイバーシチ受信はそのうちのひとつです．
- 最近，数Mbpsオーダーのデジタル信号伝送が要求されており，より高度な無線技術の研究を進めています．