

# 直交成分補間バンドパス・サンプリングによる 移動無線用ダウンコンバージョン方式

佐藤憲洋, 鈴木 博, 須山 聡, 府川和彦  
東京工業大学

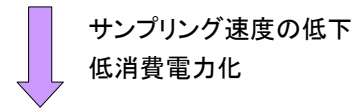
## 研究背景

無線通信システムの多種多様化  
ソフトウェア無線(SDR)の必要性

- プログラマブルなデバイスで構成
- 多くの無線システムに対応可能

現状のデバイスに適合したSDR

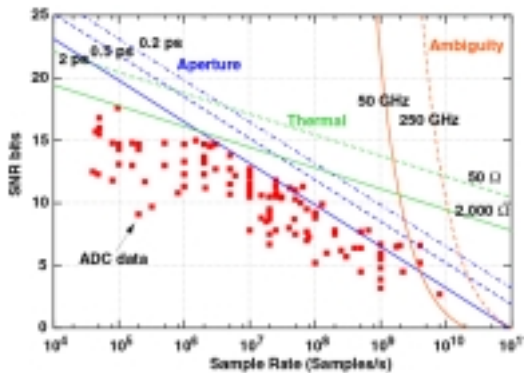
- IF帯でA/D変換



バンドパスサンプリング(BPS)  
⇒ キャリア周波数以下でサンプリング



## A/D変換器(ADC)の特性

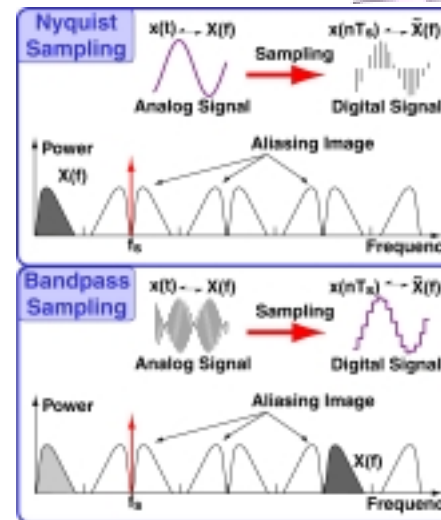


実質的な分解能  
 $SNR \text{ bits} = (SNR - 1.76) / 2$

- ADCの性能を制限する要因
- 量子化雑音
  - アパーチャジッタによる雑音
  - 回路の熱雑音
  - 比較器の不確かさによる雑音

サンプルレートを上げると実質的な分解能が下がる  
⇒ 現状のデバイスではIF帯でサンプリングするのが現実的

## BPSの原理



離散化した信号スペクトル  
$$\tilde{X}(f) = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s)$$

↓ エイリアシングの原理を利用

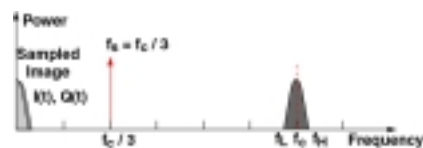
- バンドパスサンプリング(BPS)
- 低周波数でサンプリングできる
  - サンプリングと同時に周波数変換

# BPSの比較

## 従来方式



(a) オフセット周波数・実数方式



(b) 中心周波数・複素数方式

## 提案方式



(c) オフセット周波数・複素数方式

- 複素数処理を行うため、検波過程でエイリアスの問題が生じない
- サンプリング・クロックの高調波が入力に混入することによるDCオフセットが生じない

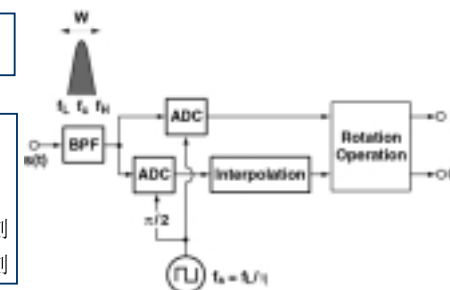
# オフセット周波数・複素数 BPS(1)

## 受信信号

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

## バンドパスサンプリング

- $f_s = f_L / \eta$  サンプリング周波数
- $\tau = 1/f_s$  サンプリング間隔
- $t_i = n\tau$  同相成分のサンプリング時刻
- $t_q = t_i - \tau/4$  直交成分のサンプリング時刻



## サンプル値

$$r_i(t_i) = s(t_i) = I(t_i) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_i - Q(t_i) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_i \quad \text{同相サンプル値}$$

$$r_q(t_q) = s(t_q) = I(t_q) \cos \left( 2\pi \tilde{f}_c t_q - \frac{\eta\pi}{2} \right) - Q(t_q) \sin \left( 2\pi \tilde{f}_c t_q - \frac{\eta\pi}{2} \right) \quad \text{直交サンプル値}$$

$$\tilde{f}_c = f_c - f_L = f_c - \eta f_s \quad \text{オフセット周波数}$$

# オフセット周波数・複素数 BPS(2)

## 同相成分サンプル値

$$r_i(t_i) = I(t_i) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_i - Q(t_i) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_i$$

## 直交成分サンプル値

$$r_q(t_q) = \begin{cases} I(t_q) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_q - Q(t_q) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_q = r_i(t_q), & \eta = 0 \pmod{4} \\ I(t_q) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_q + Q(t_q) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_q, & \eta = 1 \pmod{4} \\ -I(t_q) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_q + Q(t_q) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_q = -r_i(t_q), & \eta = 2 \pmod{4} \\ -I(t_q) \sin 2\pi \tilde{f}_c t_q - Q(t_q) \cos 2\pi \tilde{f}_c t_q, & \eta = 3 \pmod{4} \end{cases}$$

- 分周数  $\eta$  が奇数のとき直交成分となる
- $\eta = 3 \pmod{4}$  では、符号が反転する

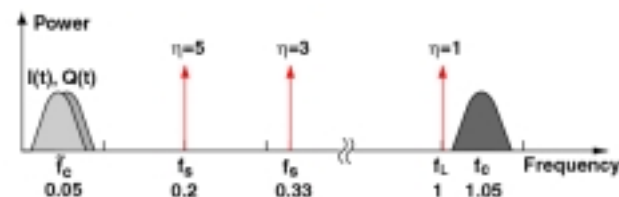
## 回転演算

$$I(t_i) + jQ(t_i) = [r_i(t_i) + jr_q(t_i)] \exp(-j2\pi \tilde{f}_c t_i)$$

# シミュレーション条件

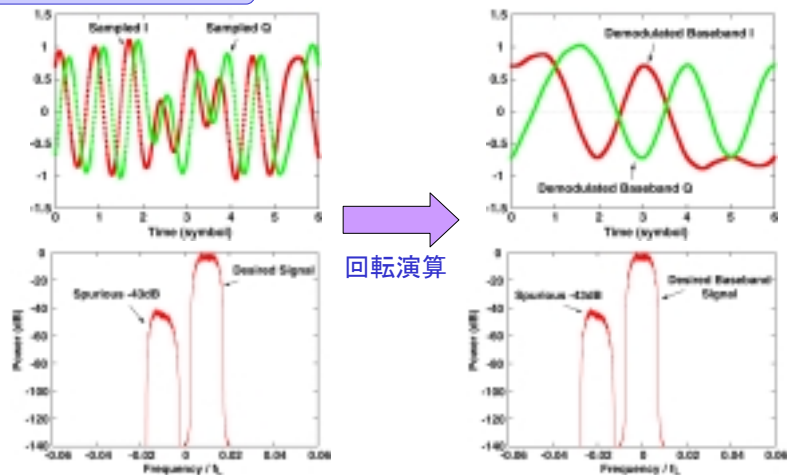
項目	狭帯域信号	広帯域信号
サンプリング周波数 $f_s/f_L$		$1/\eta$
搬送波周波数 $f_c/f_L$	1.01	1.05
シンボルレート $f_b/f_L$	0.01	0.05
変調方式		QPSK
波形整形		Raised cosine
ロールオフ・ファクタ		0.5

## 広帯域信号



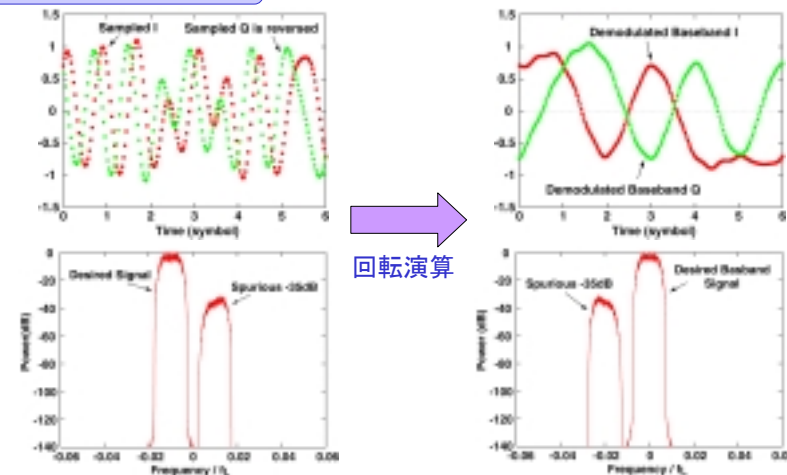
## 基本動作 (1)

狭帯域信号,  $\eta=1$



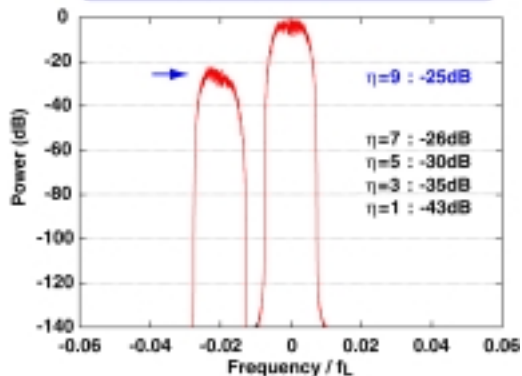
## 基本動作 (2)

狭帯域信号,  $\eta=3$



## 歪スペクトル・レベル

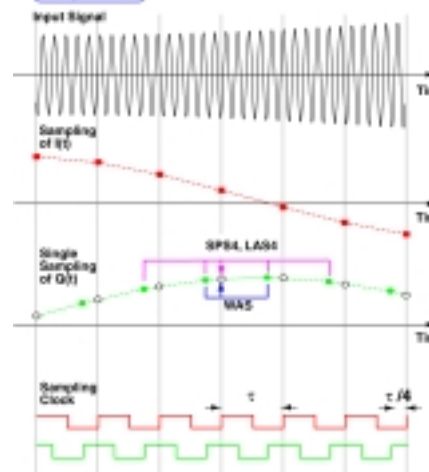
狭帯域信号,  $\eta = 9$



- I, Q サンプル・タイミングの時間差により歪スペクトルが生じる
- 分周数  $\eta$  を大きくすると歪スペクトル・レベルも増大する

## 直交成分の シングル・サンプリング補間

$\eta = 5$

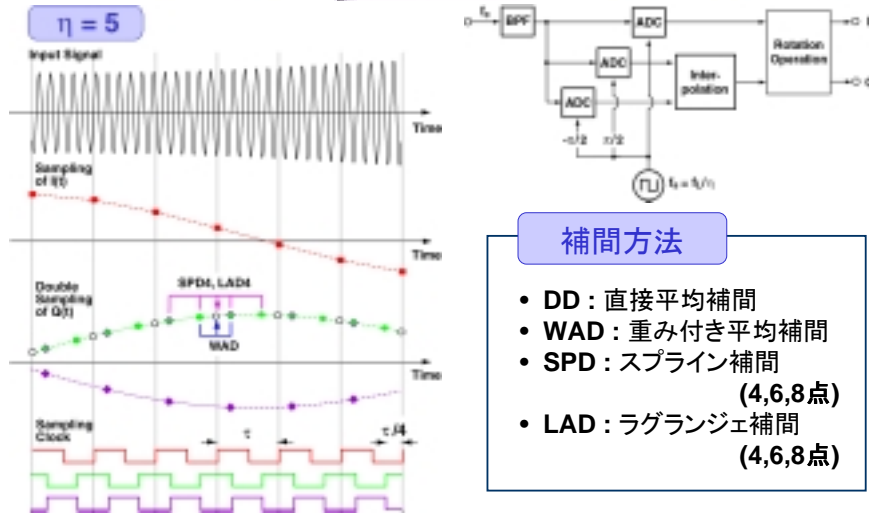


補間による推定を行い, I, Q サンプル  
タイミングの時間差を補正し, 歪スペクトル  
を抑圧する

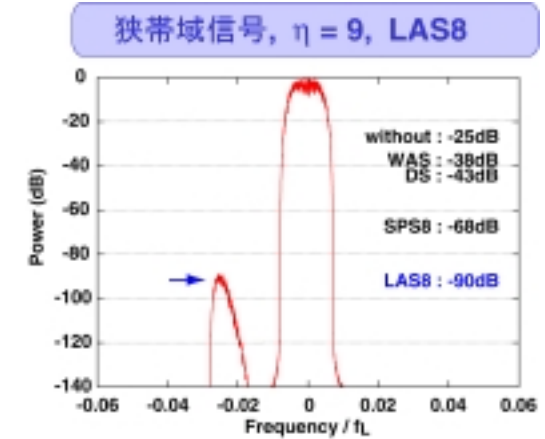
補間方法

- DS : 直接(近似)
- WAS : 重み付き平均補間
- SPS : スプライン補間  
(4,6,8点)
- LAS : ラグランジェ補間  
(4,6,8点)

# 直交成分の ダブル・サンプリング補間



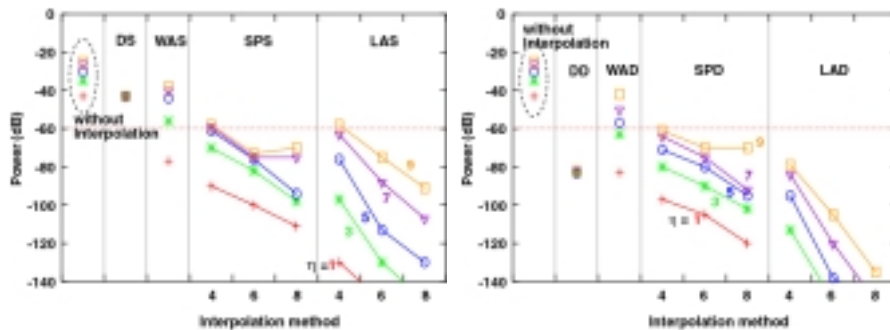
# シングル・サンプリング 補間の効果



補間により、歪スペクトルを抑圧することができる

# 補間方法の比較 (1)

狭帯域信号



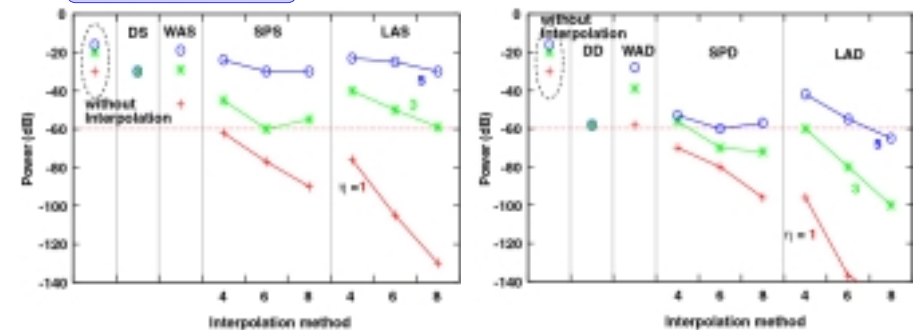
(a) 直交成分シングル・サンプリング

(b) 直交成分ダブル・サンプリング

- 容易に-60dB以下に歪スペクトルを抑えることができる
- ラグランジェ補間が最も有効的である

# 補間方法の比較 (2)

広帯域信号



(a) 直交成分シングル・サンプリング

(b) 直交成分ダブル・サンプリング

- ダブル・サンプリングの8点ラグランジェ補間により、 $\eta=5$ において、歪スペクトルを-60dB以下にできる

# まとめ

## オフセット周波数・複素数BPSを提案

- サンプルング・クロックの混入によるDCオフセットなし
- 複素数処理を行うため、検波過程でエイリアス問題が生じない

## 提案方式の理論解析

- 奇数分周が必要
- $3 \bmod 4$ の分周数では直交成分を反転することが必要
- サンプルング時刻差による歪を軽減するために、補間による推定が必要
- 直交成分をダブル・サンプルングすることにより、精度の高い推定が可能

## 計算機シミュレーション

- 補間による推定の有効性
- 直交成分ダブル・サンプルング, 8点のラグランジェ補間法の適用により, 広帯域信号でも, 5分周において-60dB以下に抑えられる