

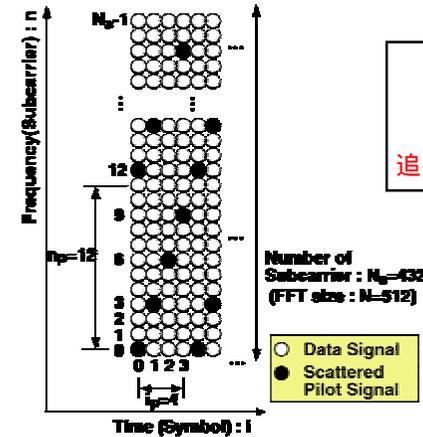
スカッタード・パイロット OFDM 受信機に用いる 繰り返し検出と適応タップ選択チャンネル推定

加藤 勝也, 須山 聡, 鈴木 博, 府川 和彦

東京工業大学

研究背景

スカッタード・パイロット (SP) OFDM の移動受信
SP-OFDMの例: 地上波デジタルTV (ISDB-T)



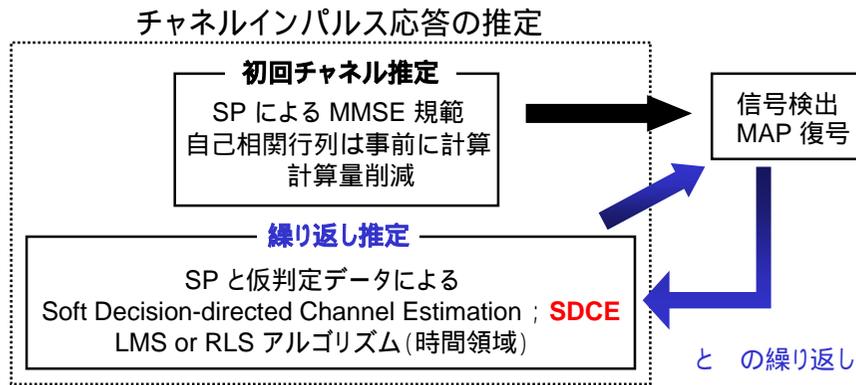
端末の移動によるチャンネル変動
↓
追従性能の優れたチャンネル推定が必要

チャンネル推定手法を提案し,
2種類の方法で信号検出

- 同期検波
- ターボ ICI キャンセラ

SP 方式 (ISDB-T)

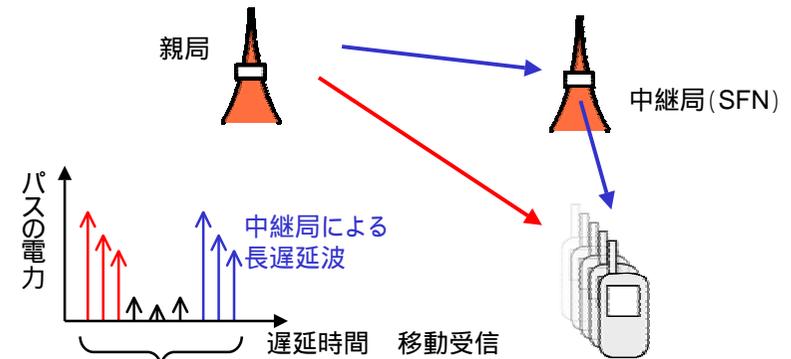
従来方式



問題点

- 高速なチャンネル変動
 - 大きい遅延波
- 同時に対応できない

長遅延波環境での移動受信

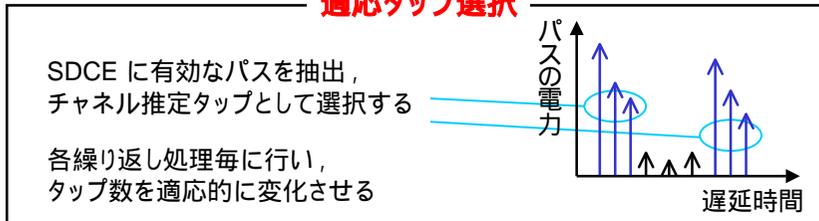


ISDB-T モード3のように
サブキャリア数が多いと,
推定タップ数が増大
SDCE における誤差が増大
チャンネル推定精度が低下

- 高速なチャンネル変動に追従
 - 大きい遅延に対応
- これらを満たす推定方法が必要

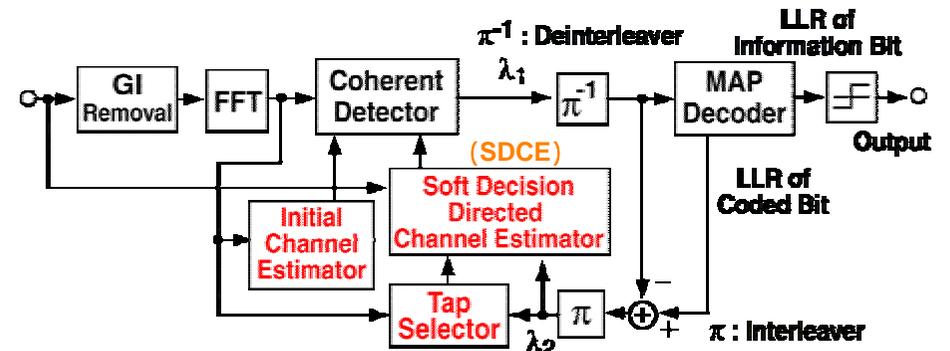
提案するタップ選択チャンネル推定

適応タップ選択



これらの処理を繰り返すことにより、
ガード・インターバル(GI)程度の遅延波が存在する
高速フェージング環境においても良好な伝送特性を実現できる

受信機構成



繰り返し処理

タップ選択, SDCE, 同期検波, MAP 復号から成る. タップ選択, SDCEは
符号化ビットのLLR λ_2 より求まる変調信号の期待値を用いて行う

初回チャンネル推定

SP による MMSE 規範チャンネル推定

$$\mathbf{w}_i = (\hat{h}_{i,0} \ \hat{h}_{i,1} \ \dots \ \hat{h}_{i,L-1})^H = \mathbf{R}_{i,xx}^{-1} \mathbf{r}_{i,xd}$$

自己相関行列の逆行列 相互相関ベクトル

$$\mathbf{R}_{i,xx} = \sum_{i'=i-I_F}^{i+I_F} \lambda^{|i-i'|} \sum_{n \in \mathcal{P}_i} \mathbf{a}_n \mathbf{a}_n^H$$

$$\mathbf{r}_{i,xd} = \sum_{i'=i-I_F}^{i+I_F} \lambda^{|i-i'|} \sum_{n \in \mathcal{P}_i} R_{i',n}^* z_{i',n}^p \mathbf{a}_n$$

スムージング

パイロットサブキャリア

$$\mathbf{a}_n = \left[1 \ \exp\left(j\frac{2\pi n}{N}\right) \ \dots \ \exp\left(j\frac{2\pi n(L-1)}{N}\right) \right]^H$$

\mathbf{w}_i : 第 i シンボルの
タップ数 L のタップベクトル

$\hat{h}_{i,l}$: l パスの推定複素振幅

\mathbf{a}_n : フーリエ変換ベクトル

λ : 忘却係数

I_P, I_F : 参照する
過去と未来の
シンボル数

$R_{i,n}$: 第 n サブキャリア
受信信号

$z_{i,n}^p$: SP 信号

適応タップ選択

周波数応答を推定 $\hat{H}_{i,n} = R_{i,n} / \hat{z}_{i,n}$
IFFT 変調信号の期待値

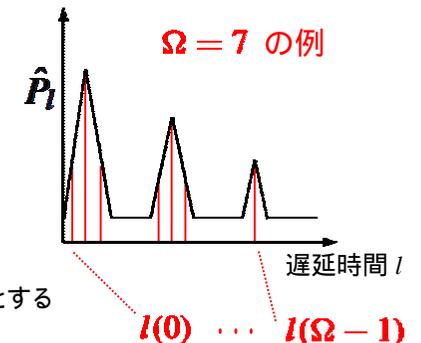
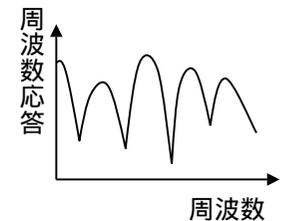
$\hat{h}'_{i,l}$ 計算量削減も兼ねて,
チャンネルインパルス応答を近似的に推定

数シンボルで平均化

$$\hat{P}_l = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} |\hat{h}'_{i,l}|^2$$

\hat{P}_l の大きい順に Ω 個選択

それぞれ, $l(0), l(1), \dots, l(\Omega-1)$ とする

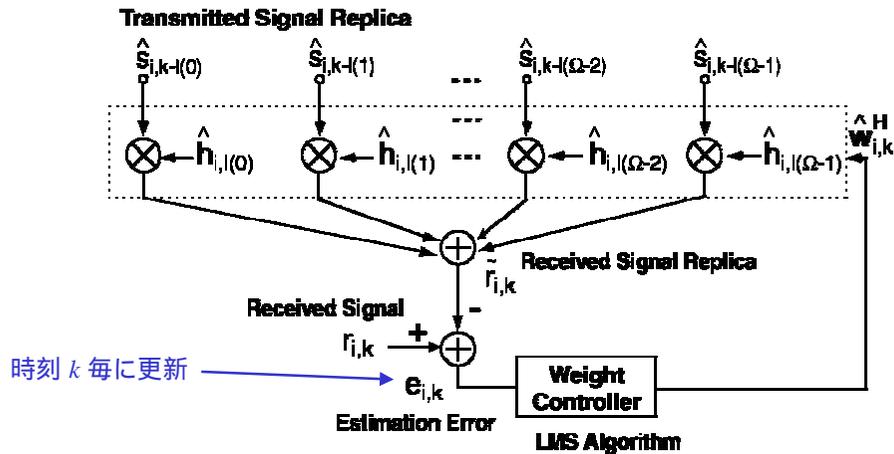


ソフト判定指向形チャネル推定 (SDCE)

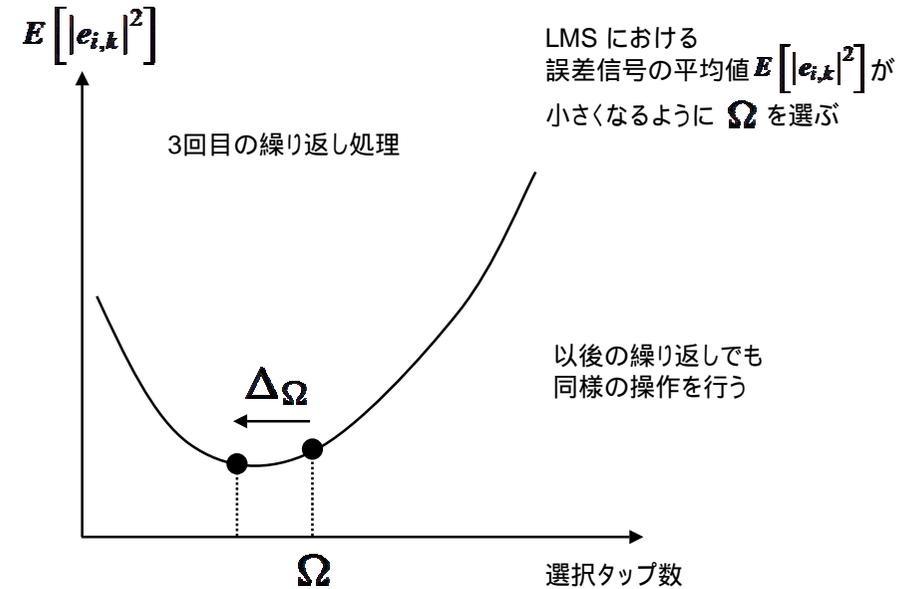
i シンボル, 離散時刻 k の OFDM シンボルレプリカ

$$\hat{s}_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\pi=0}^{N-1} \hat{z}_{i,\pi} \exp\left(j \frac{2\pi n}{N} (k - G)\right) \quad 0 \leq k < N + G$$

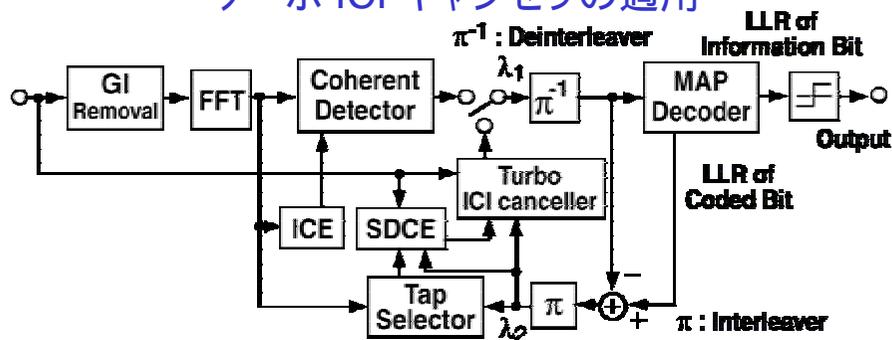
G : GI 長



選択タップ数の調整



ターボ ICI キャンセラの適用



より変動が激しいと, シンボル内のチャネル変動を無視できず,
キャリア間干渉 (ICI) が発生し, 特性が劣化する

繰り返し処理の信号検出器として, ターボ ICI キャンセラ (Turbo-IC) を用いる

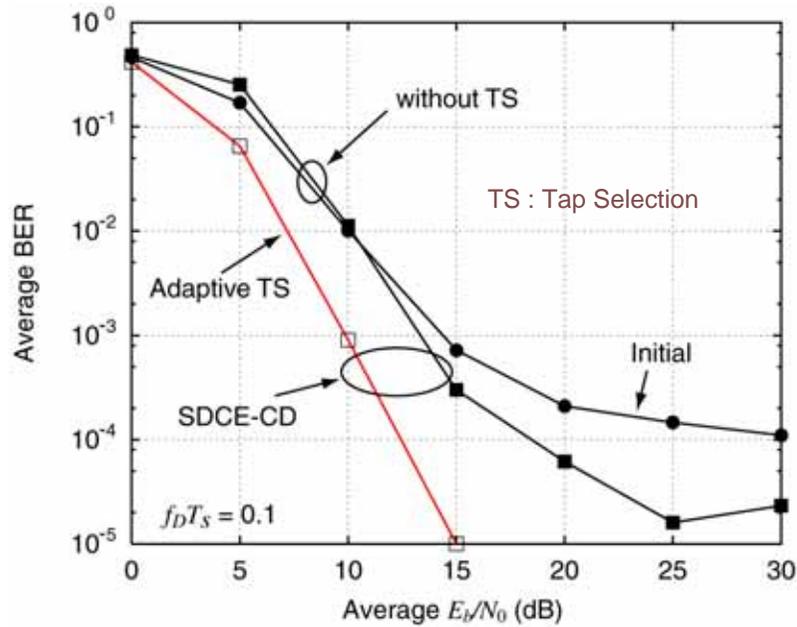
Turbo-IC の動作

ICI のレプリカを受信信号より減算, 時間変動しているチャネルの
整合フィルタ受信, ICI 除去後の残差の抑圧, 及びフーリエ変換

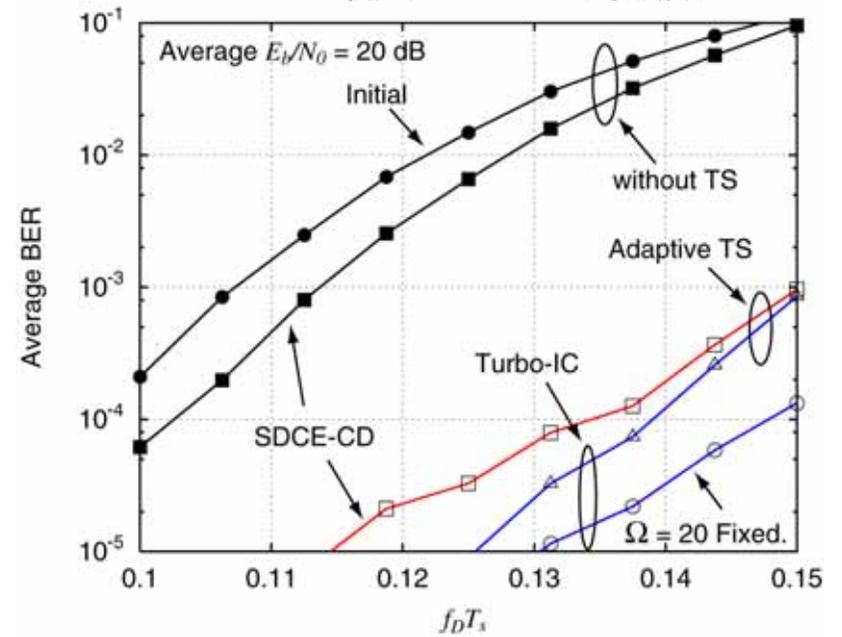
シミュレーション条件

変調方式	QPSK
FFT ポイント数 N	512
有効キャリア数 N_a	432
キャリア間隔 Δ_f	1 kHz
GI 長 G	128 pt
シンボル長 N_s	640 pt ($T_s = 1.25$ ms)
誤り訂正符号	畳み込み符号 ($R = 1/2, K = 7$)
インターリーブ	ビット・インターリーブ キャリア・インターリーブ
MAP 復号	Max-Log-MAP
チャネル・モデル	16 パス指数減衰モデル
最大遅延時間 D	127 pt
各パスの遅延時間	D を超えない範囲でランダム
最大遅延波との電力比 ρ_D	20 dB
ICE のタップ数 L	128
Ω, Δ_Ω の初期値	35, 10
処理の繰り返し数	4

平均ビット誤り率 (BER) 特性



BER vs. 最大ドップラー周波数



まとめ

●適応タップ選択により、チャネル推定精度と追従性能を向上させた スキャタード・パイロット OFDM 受信

- 初回処理:
MMSE 規範チャネル推定 + スムージング
- 繰り返し処理:
適応タップ選択 (遅延時間の適応とタップ数制御), SDCE
- 検波器:
(同期検波 or ターボ ICI キャンセラ) + MAP復号

●計算機シミュレーション (地上波デジタル TV 放送)

- 平均 BER = 10^{-4} を維持できる $f_D T_s$
同期検波 : 0.135 (216 km/h) まで
ターボ ICI キャンセラ : 0.148 (236 km/h) まで