

耐二重選択性無線伝送技術に関する研究成果

立命館大学 理工学部 電子情報工学科
無線信号処理研究室
久保 博嗣

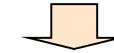
目次

- (1) 研究の背景
- (2) 二重選択性について
- (3) 現在運用中の無線通信システムと二重選択性
- (4) 伝送路予測joint detection (JD) と差動TCM
- (5) 差動マルチキャリア伝送方式
- (6) 差動OFDMのためのSPO

2022年 4月 28日

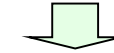


無線信号処理研究室 (WSPL) がターゲットとする評価軸



二重(時間・周波数)選択性耐性の向上

joint detection (JD) + 差動マルチキャリア伝送方式の検討



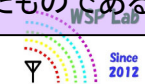
二重選択性耐性の改善手法を検討

差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMの提案



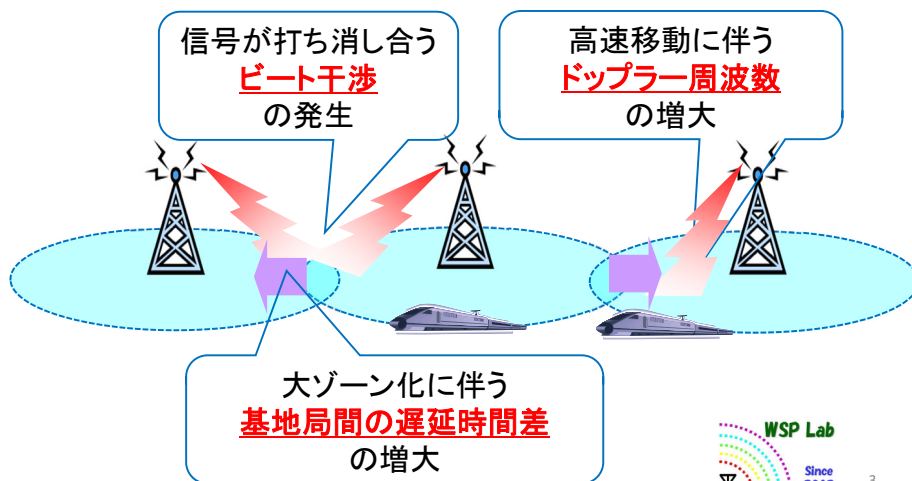
提案方式による二重選択性耐性の向上

本研究はJSPS 科研費JP19K04382 の助成を受けたものである



列車無線

空間波高速鉄道用の列車無線において、移動速度の高速化・大ゾーン化により、二重選択性が大幅に増大



水中音響通信

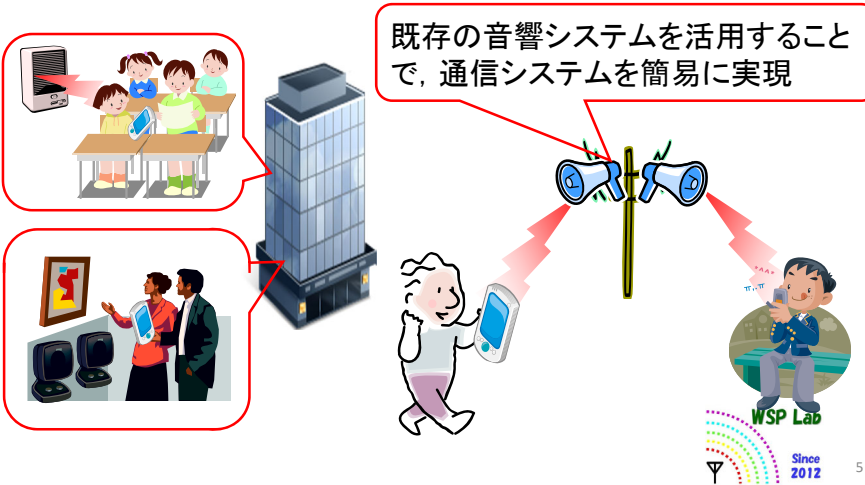
水中では、音速が高速の20万分の1となるため、電波の無線通信方式と比較して、二重選択性が大幅に増大



陸上音響通信

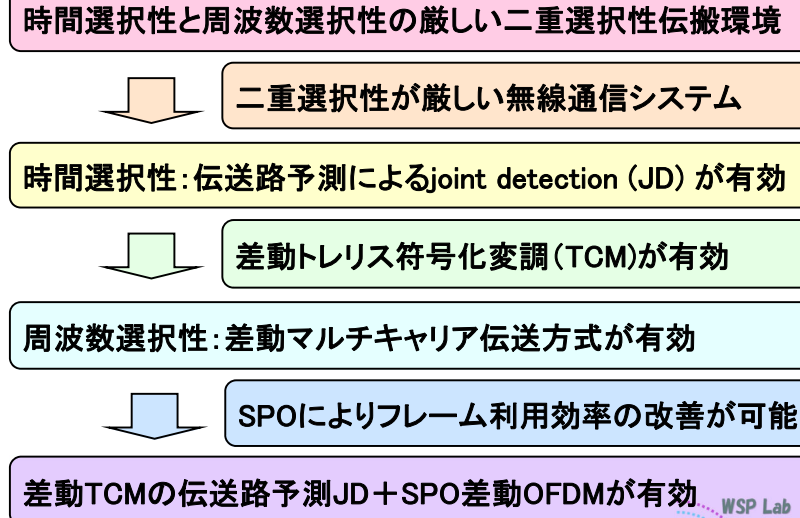


陸上では、音速が高速の100万分の1となるため、電波の無線通信方式と比較して、二重選択性が大幅に増大



5

資料の概要



TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset

6

資料の概要



時間選択性と周波数選択性の厳しい二重選択性伝搬環境

二重選択性が厳しい無線通信システム

時間選択性: 伝送路予測によるjoint detection (JD) が有効

差動トレリス符号化変調(TCM)が有効

周波数選択性: 差動マルチキャリア伝送方式が有効

SPOによりフレーム利用効率の改善が可能

差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMが有効

WSP Lab

TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset

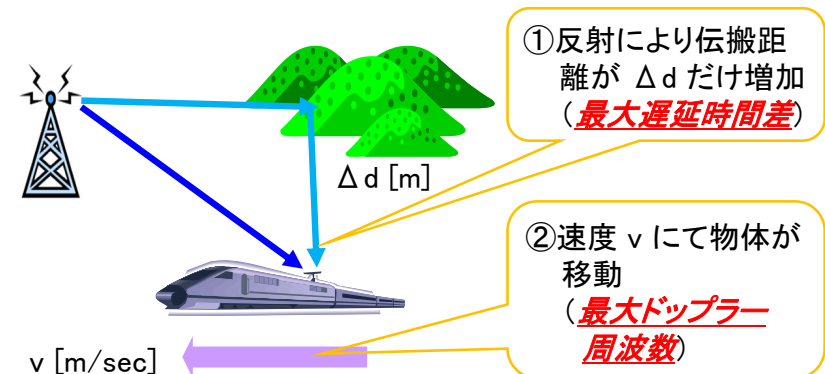
7

二重選択性伝搬環境のパラメータ



移動体通信は **二重選択性** という伝搬環境が課題

- ① **周波数選択性** (大きな周波数歪) : 最大遅延時間差
- ② **時間選択性** (高速な時間変動) : 最大ドップラー周波数



WSP Lab

Since 2012

8

最大遅延時間と最大ドップラー周波数



最大遅延時間差と最大ドップラー周波数は、伝搬速度が規定

最大遅延時間差 τ_D (sec)

$$\tau_D = \frac{\Delta d}{c}$$

最大距離差 Δd
媒体の伝搬速度 c

媒体の伝搬速度
光速: $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$
音速(空間): 340m/s
音速(水中): 1500m/s

最大ドップラー周波数 f_D (Hz)

$$f_D = \frac{v}{c} f_c$$

移動速度 v
搬送波周波数 f_c
媒体の伝搬速度 c



モデムの観点からの二重選択性



二重選択性はシンボル周期 T にて**トレードオフ**を制御可能

- ①周波数選択性(耐遅延波特性):
シンボル周期正規化最大遅延時間差 (τ_D/T)
- ②時間選択性(耐伝送路変動特性):
シンボルレート正規化最大ドップラー周波数 ($f_D T$)

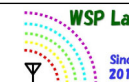
二重選択性の厳しさを規定する spread factor

= 時間選択性 × 周波数選択性

$$f_D \tau_D = (f_D T) \times (\tau_D / T)$$

マルチキャリア (MC) 伝送方式は便利!

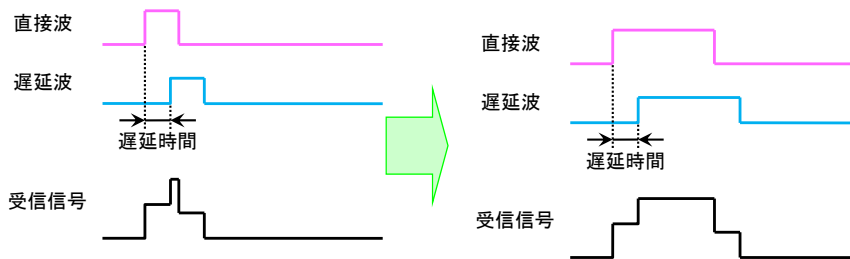
spread factor の配分比をシンボル周期 T で制御可能



シンボル周期正規化最大遅延時間差



遅延時間が増加すると信号歪が増大
⇒シンボル周期を増大させ、耐遅延波特性を改善



【シンボル周期:小】
遅延波の影響:大

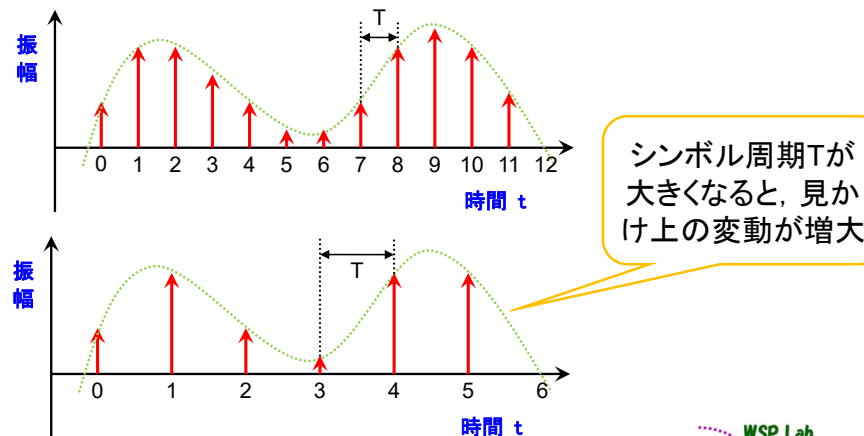
【シンボル周期:大】
遅延波の影響:小



シンボルレート正規化最大ドップラー周波数



シンボル周期の増大
⇒シンボルレート正規化最大ドップラー周波数($f_D T$)の増大



二重選択性の厳しさ $f_D \tau_D$



二重選択性はシンボル周期 T に関してトレードオフが存在

($f_D \tau_D$ がトレードオフを規定する二重選択性のパラメータ)

- ①周波数選択性(耐遅延波特性): τ_D/T
- ②時間選択性(耐伝送路変動特性): $f_D T$

$$f_D \tau_D = (f_D T) \times (\tau_D / T)$$

音響通信では
この数字が大!

移動速度

伝搬距離差

搬送波周波数

$$f_D \tau_D = \frac{vdf_c}{c^2}$$

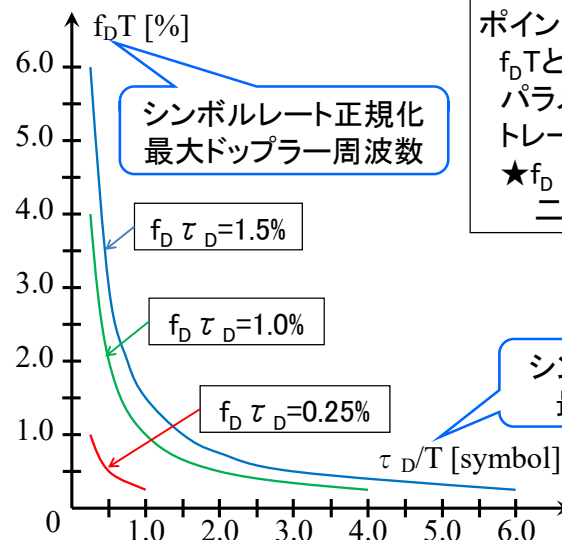
伝送媒体の速度

光速: $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$
音速(陸上): 340m/s
音速(水中): 1500m/s



13

二重選択性の配分に関するトレードオフ



ポイント:

$f_D T$ と τ_D/T は、 $f_D \tau_D$ を
パラメータとして
トレードオフの関係
★ $f_D \tau_D$ が大きい程、
二重選択性が厳しい

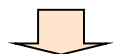


14

資料の概要



時間選択性と周波数選択性の厳しい二重選択性伝搬環境



二重選択性が厳しい無線通信システム

時間選択性: 伝送路予測によるjoint detection (JD) が有効



差動トレリス符号化変調(TCM)が有効

周波数選択性: 差動マルチキャリア伝送方式が有効



SPOによりフレーム利用効率の改善が可能

差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMが有効



15

TCM: trellis coded modulation, OFDM: orthogonal frequency-division multiplexing,
SPO: sub-carrier phase offset

現在運用中の通信システムの $f_D \tau_D$



現状運用されている通信システムで対応すべき $f_D \tau_D$ は?
0.2%から0.5%以下(実際は**0.2%程度以下**)

パラメータ	空間波 列車無線	LTE	地上波 デジタル
最大距離差: Δd	10km	(2.88km)	(37.8km)
移動速度: v	150km/h =41.7m/s	350km/h =97.2m/s	100km/h =27.8m/s
キャリア周波数: f_c	400MHz	2.1GHz	710MHz
最大遅延時間差: τ_D	33.3 μs	9.6 μs	126 μs
ドップラー周波数: f_D	55.6Hz	681Hz	65.7Hz
$f_D \tau_D$	0.185%	0.653%	0.828%



16

LTE: long term evolution

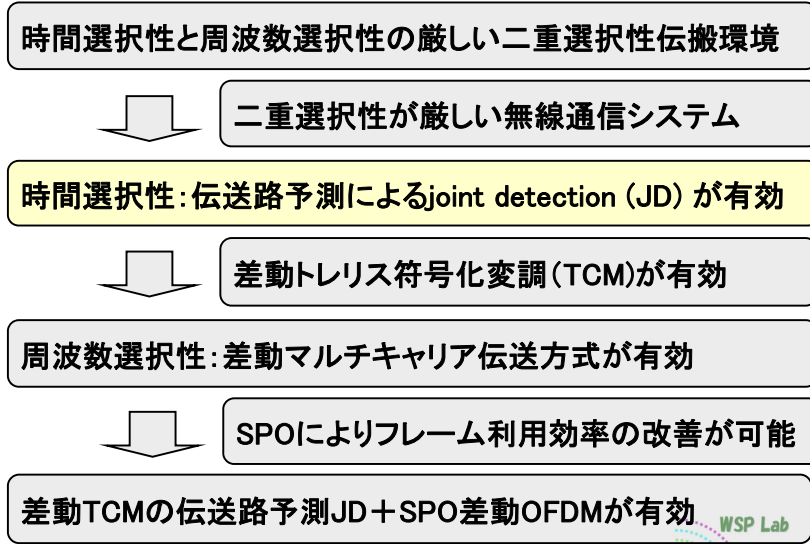
二重選択性が厳しい通信システムの $f_D \tau_D$



今後検討する可能性のある $f_D \tau_D$ はどの程度か？
音響通信では**5%程度**への対応が必要

パラメータ	高速鉄道 列車無線	水中音響 通信の一例	陸上音響 通信の一例
最大距離差: Δd	60km	3m	1m
移動速度: v	500km/h =139m/s	3kt =1.54m/s	0.25m/s
キャリア周波数: f_c	400MHz	30kHz	25kHz
最大遅延時間差: τ_D	200 μ s	2ms	2.94ms
ドップラー周波数: f_D	185Hz	30.8Hz	18.4Hz
$f_D \tau_D$	3.70%	6.16%	5.41%

資料の概要



TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset

blind startup (BSU) と joint detection (JD)



【用語の定義】
 ①blind startup (BSU): パイロット信号や同期語 (SW) 等の既知系列を前もって検出することなく、判定値を出力可能な復調器
 ②同期検波 (CD): 別途推定した伝送路特性を用いてデータ判定を実施する復調器
 ③joint detection (JD): 伝送路推定とデータ判定を同時に実施するもので、別途伝送路推定を行う必要がない復調器

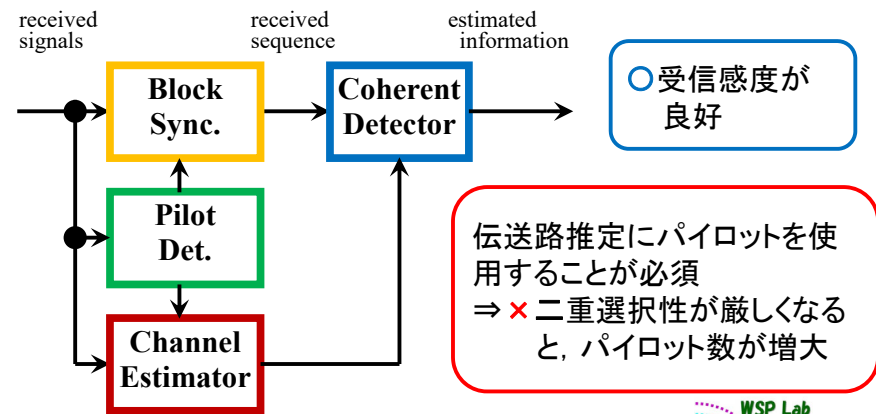
分類	BSU可否	JD/CD	対応するMC伝送方式
受信機構成A	不可能	CD	同期検波OFDM
受信機構成B	不可能	JD	差動OFDM
受信機構成C	可能	JD	差動MSC伝送方式

BSU : blind startup, CD : coherent detection, JD : joint detection, MC : multi-carrier, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, MSC : multiple single carrier,

同期検波OFDM



分類	BSU可否	JD/CD	対応するMC伝送方式
受信機構成A	不可能	CD	同期検波OFDM

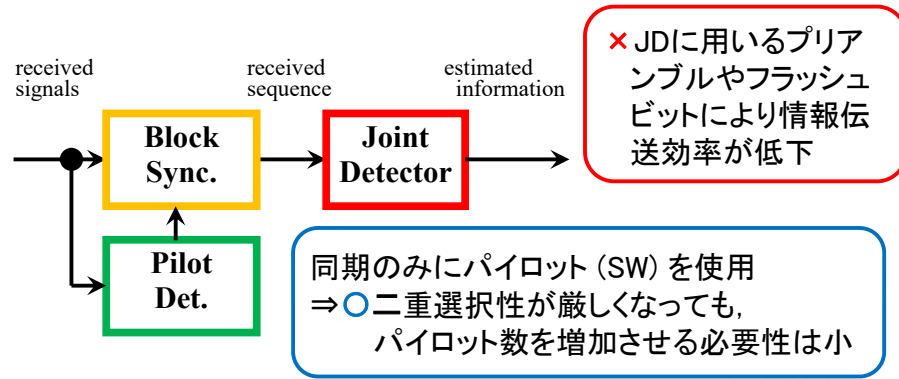


BSU : blind startup, CD : coherent detection, JD : joint detection, MC : multi-carrier, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing

差動OFDM



分類	BSU可否	JD/CD	対応するMC伝送方式
受信機構成B	不可能	JD	差動OFDM



BSU : blind startup, CD : coherent detection, JD : joint detection,
MC : multi-carrier, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing,
SW : synchronization word

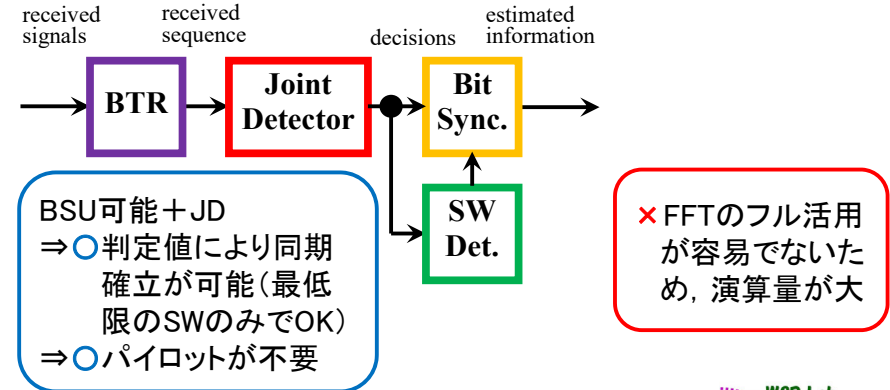


21

差動MSC伝送方式



分類	BSU可否	JD/CD	対応するMC伝送方式
受信機構成C	可能	JD	差動MSC伝送方式



BSU : blind startup, CD : coherent detection, JD : joint detection,
MC : multi-carrier, MSC : multiple single carrier,

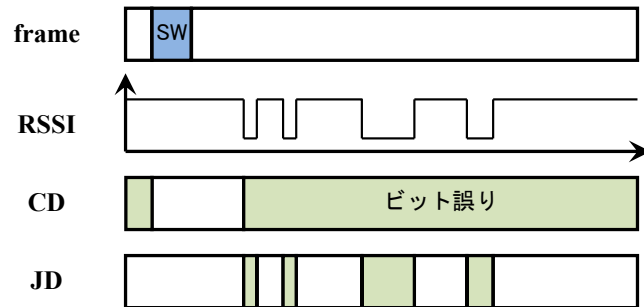


22

同期検波 (CD) と joint detection (JD)



同期検波 (CD) : 同期語 (SW) を用いて伝送路推定を実施. 受信電界 (RSSI) が低下したら以降は誤りが連続
joint detection (JD) : SWなくデータ判定が可能. RSSIが回復すると再度正しくデータ判定が可能 (高速な伝送路変動に追随するためには, **伝送路予測**が必要となる)



CD : coherent detection, JD : joint detection,
RSSI : received signal strength indicator, SW : synchronization word

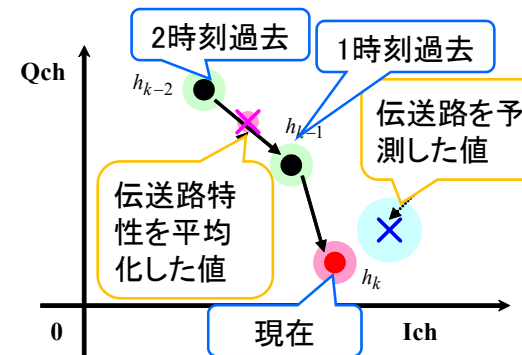


23

伝送路予測形JD



- ① **JD**は, 例えば, ビタビアルゴリズムにて動作する **PSP-MDD**にて実現可能である.
- ② 伝送路予測は, **複数時刻過去の受信信号**を活用することで実現できる.
- ③ 上記②のためには, **プリアンブル数を増加**させる必要がある

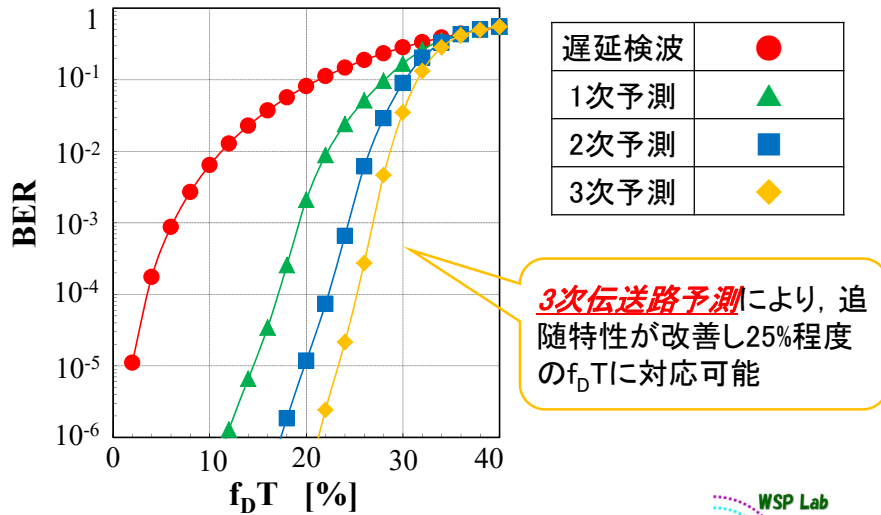


JD : joint detection,
PSP : per-survivor processing,
MDD : multiple differential detection



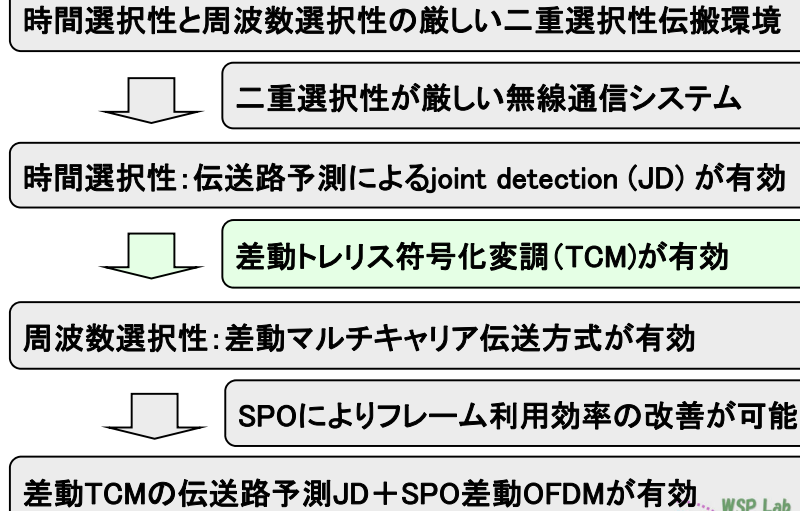
24

伝送路予測形JDの特性 ($N_R=2$)



25

資料の概要

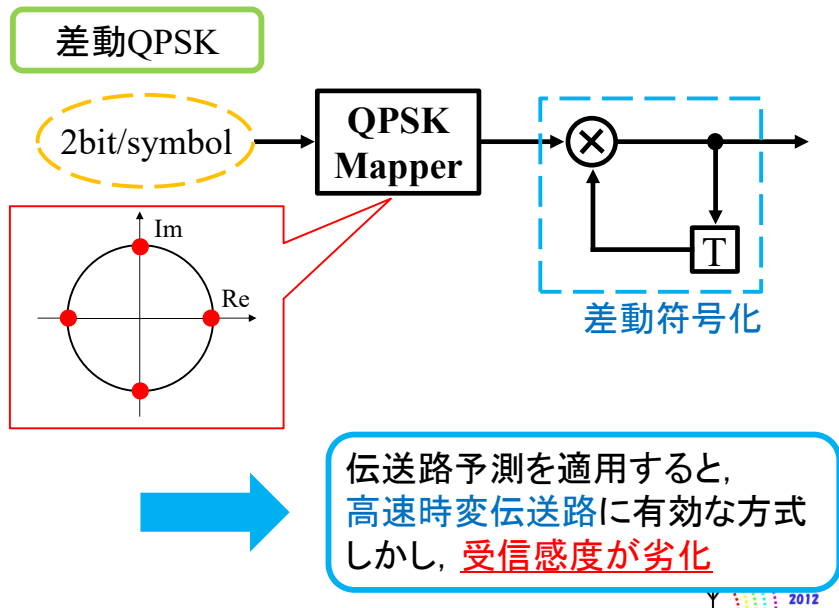


TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset



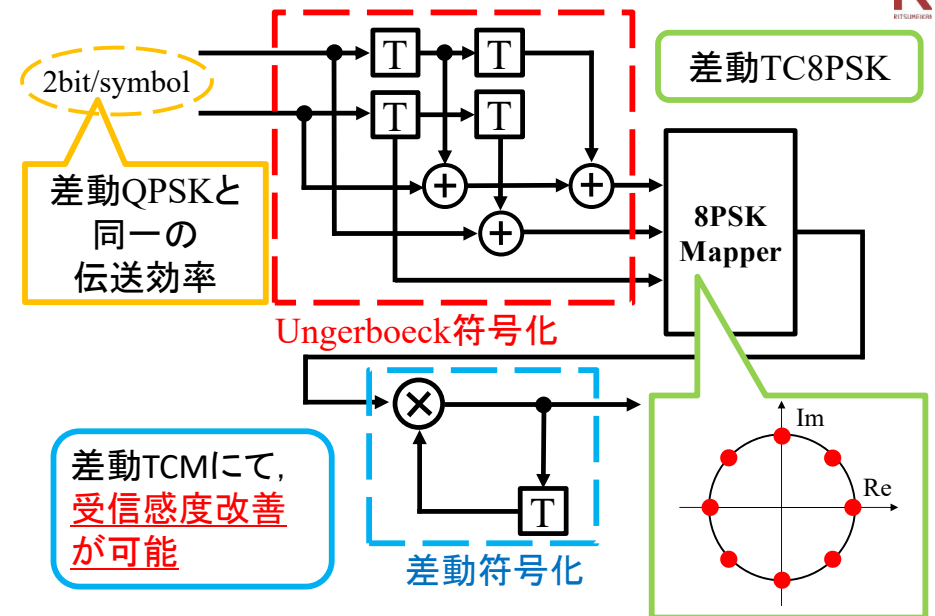
26

差動符号化QPSK (DQPSK)



27

差動トレリス符号化8PSK (DTC8PSK)



資料の概要



時間選択性と周波数選択性の厳しい二重選択性伝搬環境



二重選択性が厳しい無線通信システム

時間選択性: 伝送路予測によるjoint detection (JD) が有効



差動トレリス符号化変調(TCM)が有効

周波数選択性: 差動マルチキャリア伝送方式が有効

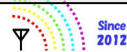


SPOによりフレーム利用効率の改善が可能

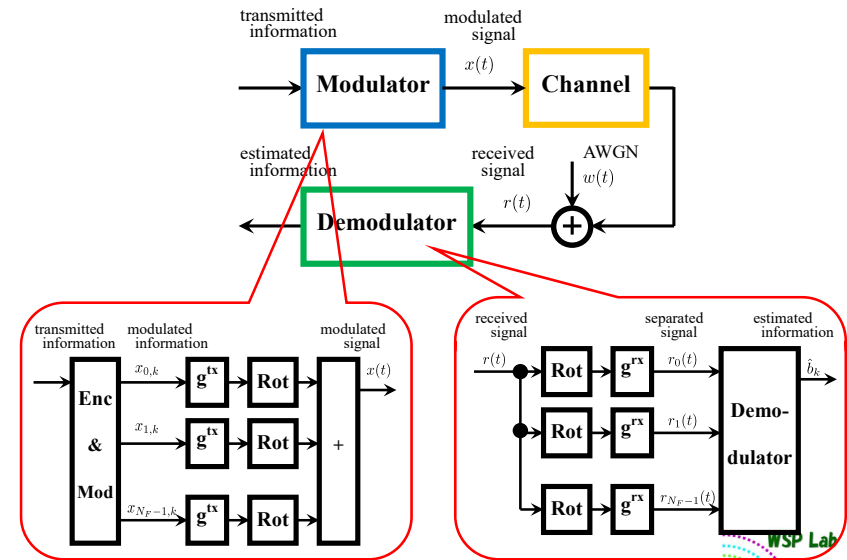
差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMが有効

WSP Lab

TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset



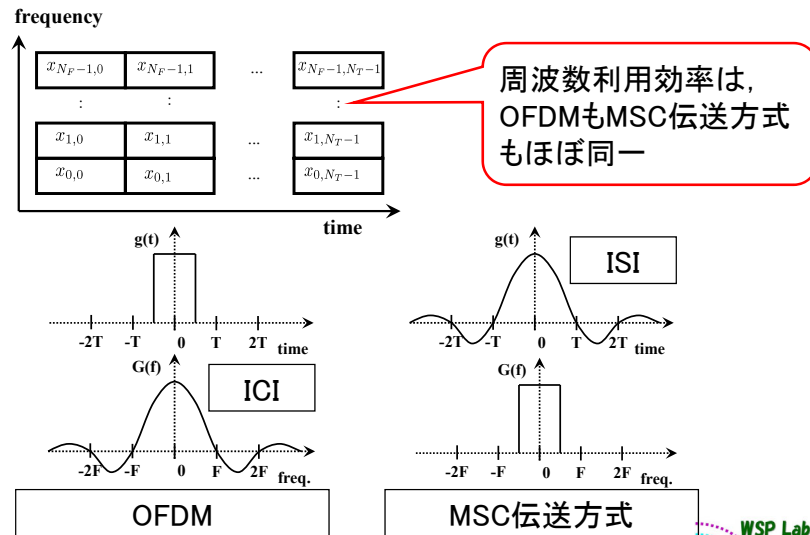
フィルタバンク (FB) MC伝送方式



FB : filter bank, MC : multi-carrier



フィルタ形状とMC伝送方式



OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, MSC : multiple single carrier, ICI : inter-carrier interference, ISI : inter-symbol interference, MC : multi-carrier

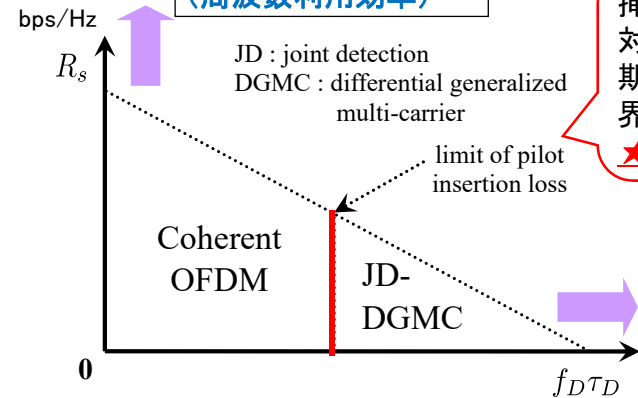


二重選択性とMC伝送方式



$f_D \tau_D$ がある一定値を超えると、パイロットを用いて伝送路推定する同期検波OFDMは適用が困難

現在の研究のトレンド (周波数利用効率)



挿入するパイロットに対する制約から、同期検波OFDMには限界が存在
★数%の $f_D \tau_D$?

本発表のテーマ (二重選択性の厳しさ)

MC : multi-carrier, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing



マルチキャリア伝送方式の比較



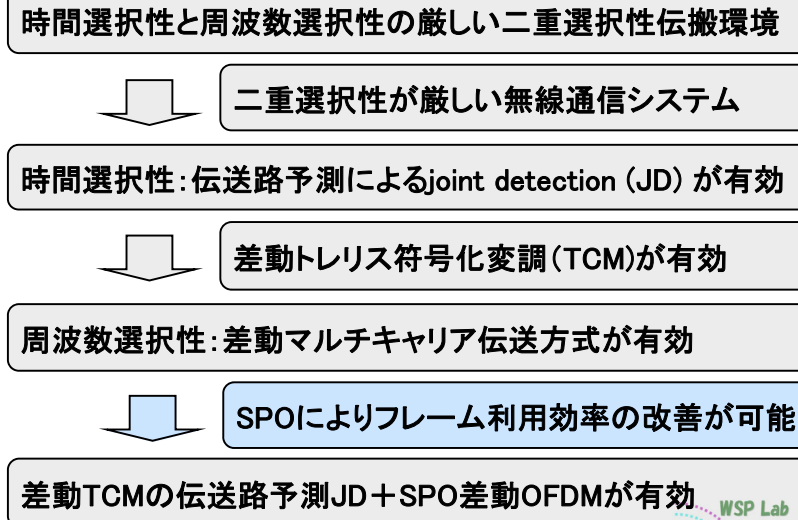
差動OFDMと差動MSC伝送方式は、二重選択性に比較的有効であるが、それぞれ得失がある。

MC伝送方式	長所	短所
同期検波 OFDM	受信感度が良好	パイロット挿入頻度が高くなるため、厳しい二重選択性伝送路には余り適さない
差動OFDM	演算量が比較的少ない	JDを用いると、通常のフレーム構成では、情報伝送効率が低下する
差動MSC伝送方式	判定値を用いて同期確立が可能なため、情報伝送効率が高い	演算量が非常に大きい

JD : joint detection, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, MSC : multiple single carrier



資料の概要



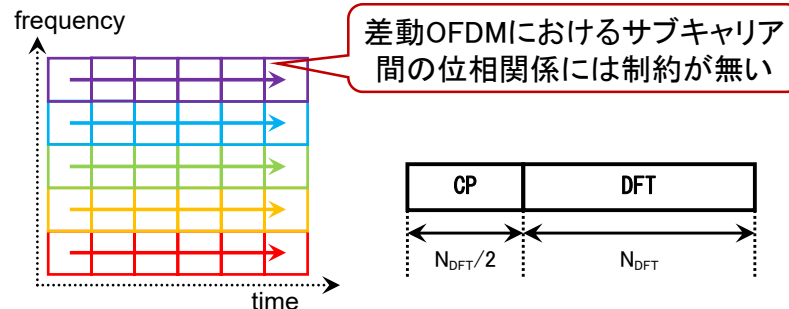
TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SPO : sub-carrier phase offset



差動OFDM



- ①耐時間選択性: 各サブキャリアに対して、時間方向のみに差動符号化+サブキャリア毎に伝送路予測JD
- ②耐周波数選択性: CPをDFTサイズの1/2と大きな値として大きな時間遅延広がりに対応



①耐時間選択性

②耐周波数選択性

OFDM : orthogonal frequency division multiplexing, JD : joint detection, CP : cyclic prefix



従来の差動OFDMのフレーム構成

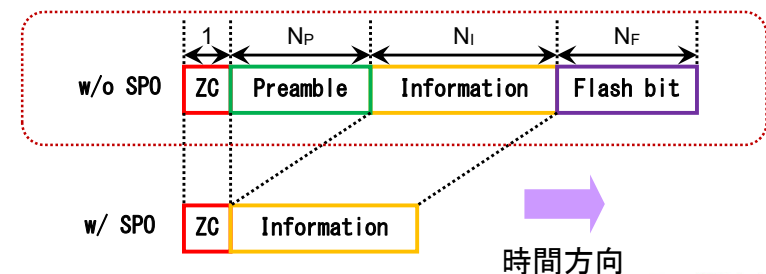


JDは、スタートアップシンボル(プリアンブル)と終端シンボル(フラッシュビット)が必須となる。それゆえ、SWとしてZC系列を強制挿入すると、フレーム内に、プリアンブルとフラッシュビットが必須

【情報伝送効率】

低下する可能性大

$$\frac{Q - N_P - N_F - 1}{Q}$$



時間方向

JD : joint detection, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing, SW : synchronization word, ZC : Zadoff-Chu, SPO : subcarrier phase offset



SPO差動OFDMの構成方法

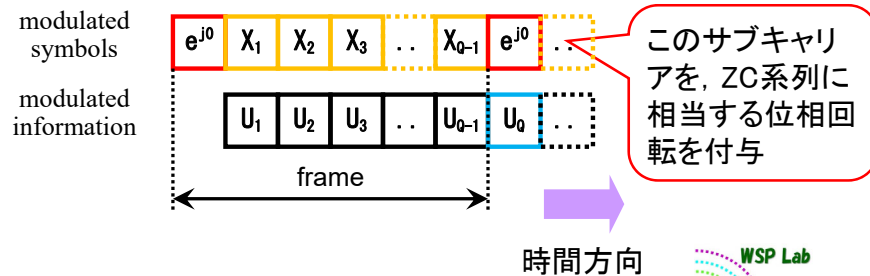


【SPOの概念】

- ①各サブキャリアのフレーム先頭シンボルを $e^{j0}=1$ と設定する。
そのために必要な条件は？

$$X_k = U_k X_{k-1} \quad U_Q = X_{Q-1}^*$$

- ②各サブキャリア毎に, ZC系列に相当する位相回転を付与
③これらのサブキャリアをOFDM化



SPO : subcarrier phase offset, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing,
ZC : Zadoff-Chu,



37

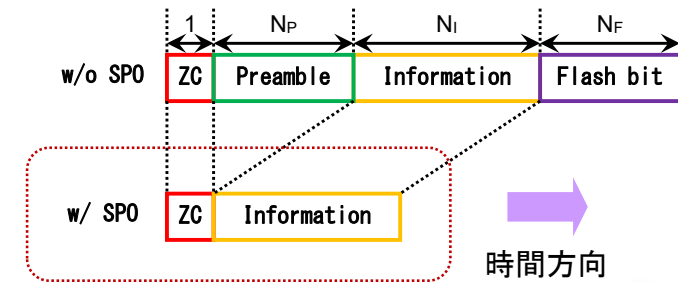
SPOを用いた差動OFDMのフレーム構成



SCPCと同様, 連続的に差動信号が送信された場合, フレーム内に, JDのためのスタートアップシンボル(プリアンブル)と終端シンボル(フラッシュビット)が不要となる。

【情報伝送効率】

$$\text{通常のDMPSK} \quad \frac{Q-1}{Q} \quad \text{差動TCM} \quad \frac{Q-2}{Q}$$



SPO : subcarrier phase offset, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing,
SCPC : single channel per carrier, JD : joint detection, ZC : Zadoff-Chu,



38

資料の概要



時間選択性と周波数選択性の厳しい二重選択性伝搬環境



二重選択性が厳しい無線通信システム

時間選択性: 伝送路予測によるjoint detection (JD) が有効



差動トレリス符号化変調(TCM)が有効

周波数選択性: 差動マルチキャリア伝送方式が有効



SPOによりフレーム利用効率の改善が可能

差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMが有効



39

TCM : trellis coded modulation, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing,
SPO : sub-carrier phase offset

まとめ



時間選択性と周波数選択性の厳しい二重選択性伝搬環境



二重(時間・周波数)選択性耐性の改善

joint detection (JD) + 差動マルチキャリア伝送方式の検討



二重選択性耐性の改善手法を検討

差動TCMの伝送路予測JD+SPO差動OFDMの提案



提案方式の有効性を確認

本研究はJSPS 科研費JP19K04382 の助成を受けたものである



40

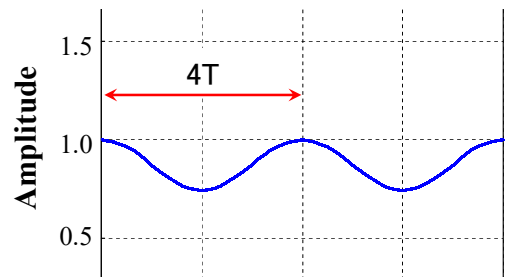
MC : multi-carrier, OFDM : orthogonal frequency-division multiplexing,
MSC : multiple single carrier,

付録:パイロット挿入に関する限界 (1)



$\tau_D/T=1/4$ の例を考えてみる!

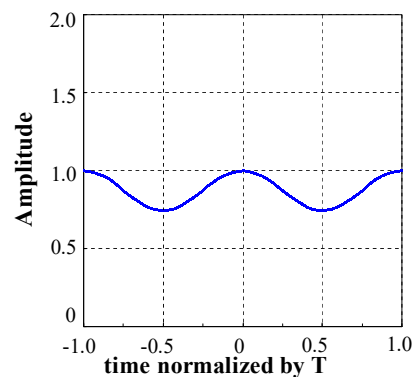
- ①変動周期は $4T$ となる.
- ②4倍オーバーサンプルでパイロットを入れると, シンボル周期でパイロットが挿入される. \Rightarrow 全てがパイロットとなる



付録:パイロット挿入に関する限界 (2)



伝送路変動の条件から, パイロット挿入条件に対する制約が発生
 \Rightarrow 伝送路変動が高速になると, 高いパイロット挿入頻度が必須



- ①パイロット挿入頻度:
100%(通信不能)
 $f_D T \times \tau_D/T = 1/4 \times 1/4 = 6.25\%$
- ②パイロット挿入頻度:
50%(スループット半減)
 $f_D T \times \tau_D/T = 1/8 \times 1/8 = 1.5625\%$
- ★同期検波OFDMの限界:
 $f_D \tau_D$ が数%?

通倍タンク法の動作例