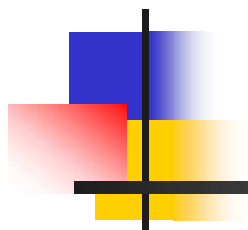


通信システム技術



関西大学特別講義C

2012.12.7

ルネサスエレクトロニクス株式会社

吉田豊彦

通信システム技術の発展

【PC時代からユビキタスネットワーク時代へ】

インターネットの発展

PC時代



ユビキタス
ネットワーク時代

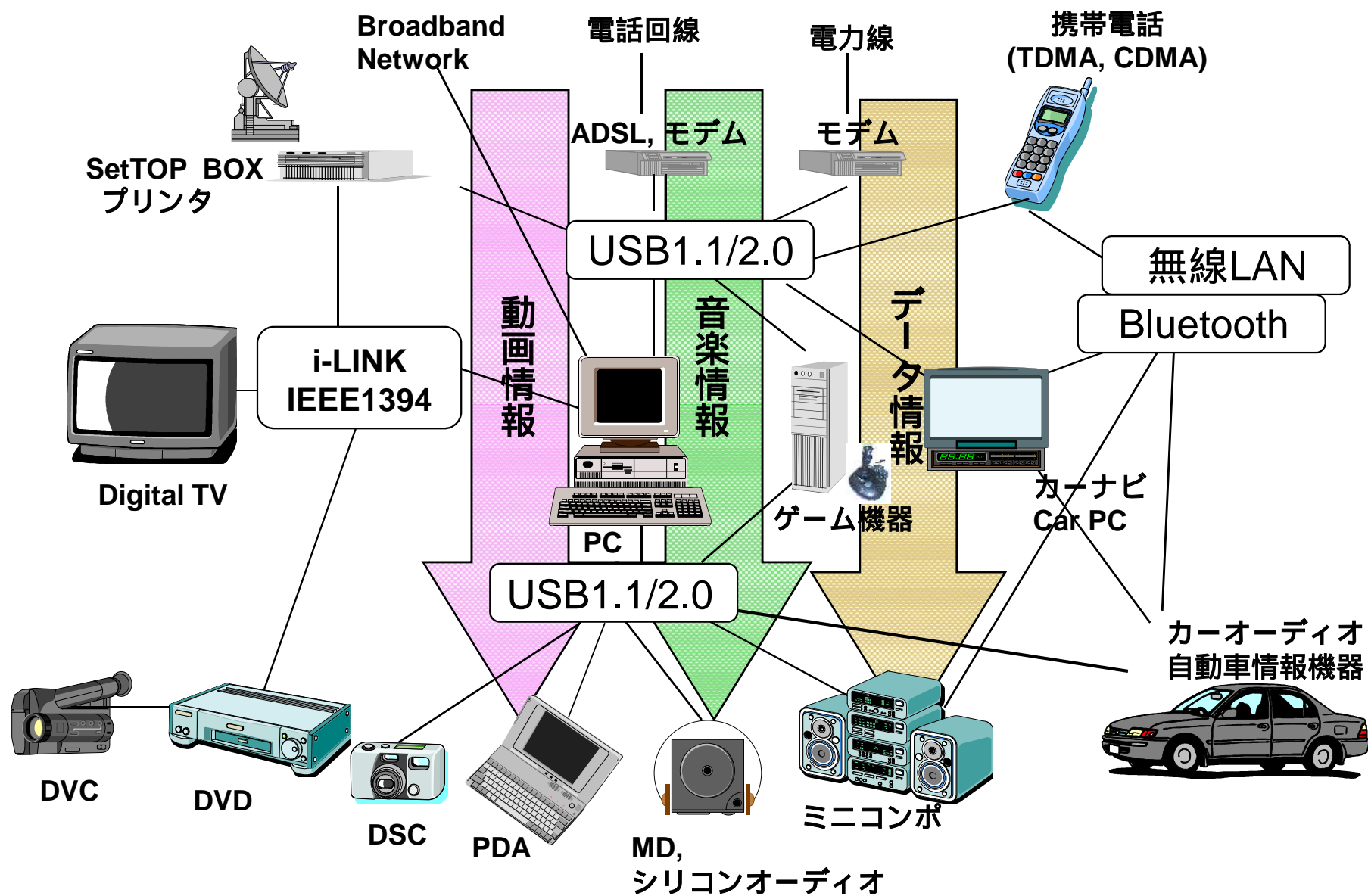
ノートPC、PDA、携帯電話(iモード)

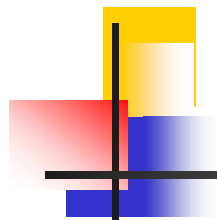
Microsoft OS、
Intel CPU、
メモリ

あらゆる場所にネットワーク端末
高性能MPUを核としたシステムLSI

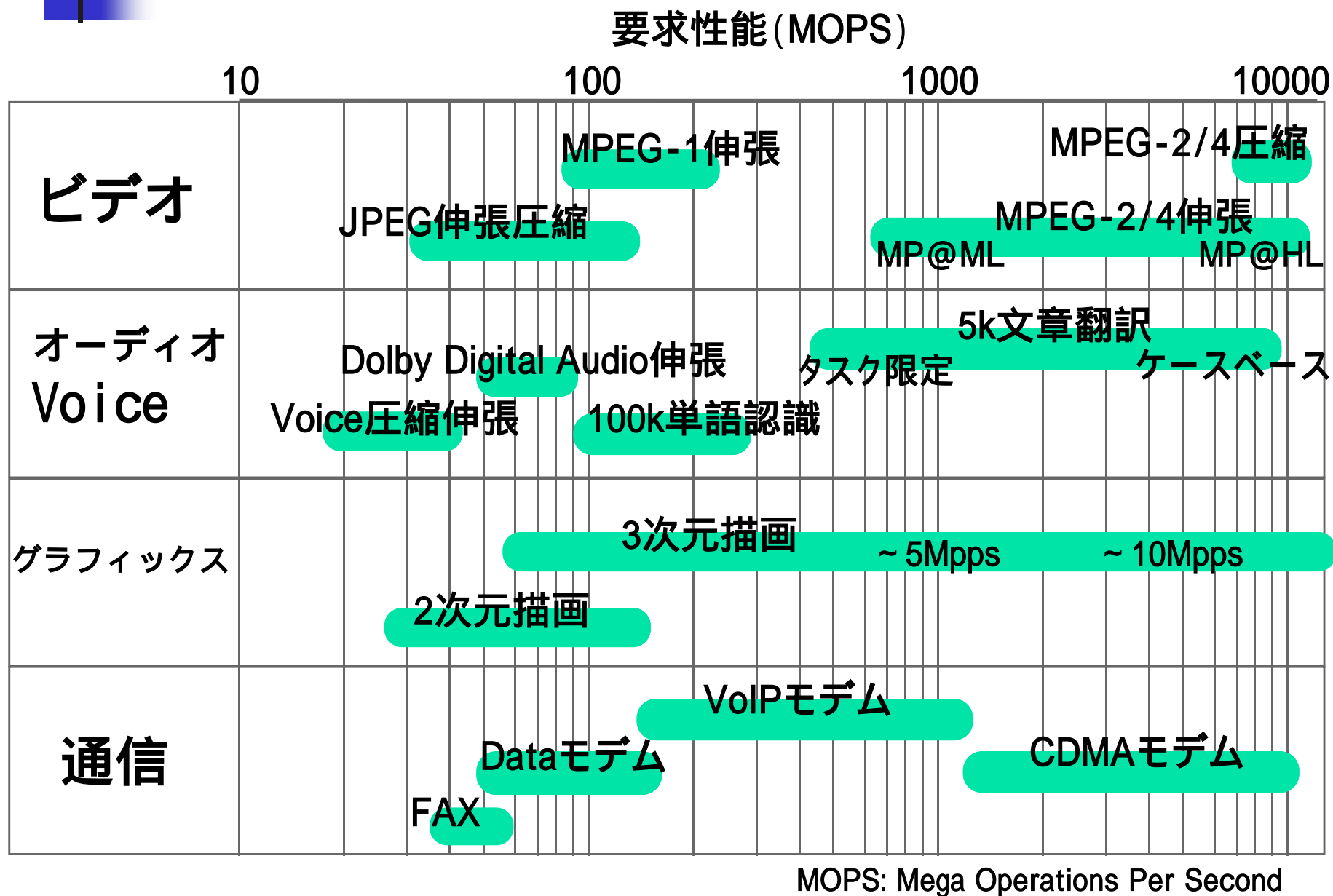
標準OS (Linux, ITRON, WinCE)
MCU, MPU
Core Network (SONET, 10GbE)
Access Network (xDSL, FWA, FTTx)
Home Network (Wireless, PLC)
セキュリティ
グラフィックス、画像処理

通信ネットワークとそれを支えるLSI技術



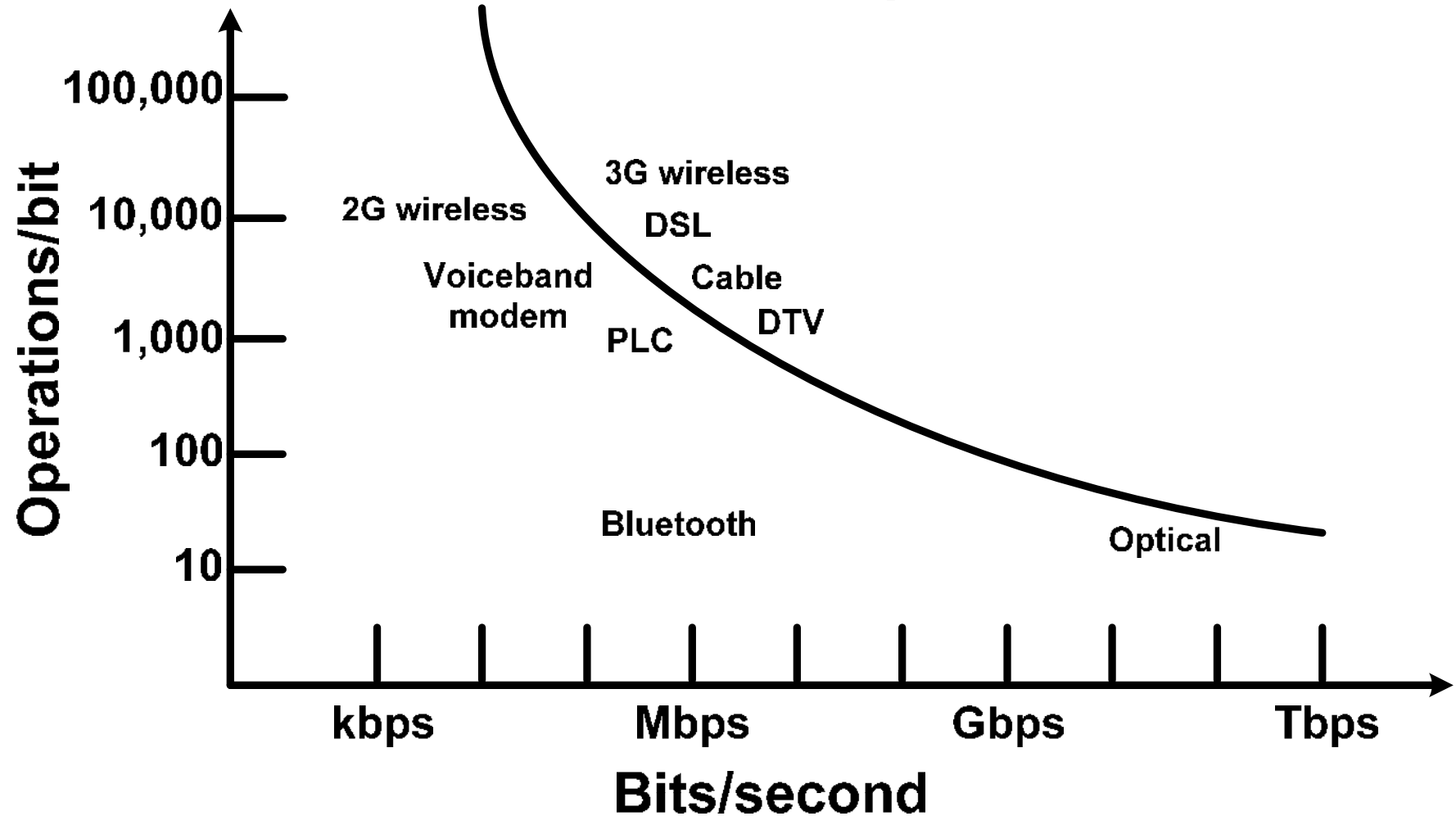


マルチメディア信号処理と要求性能

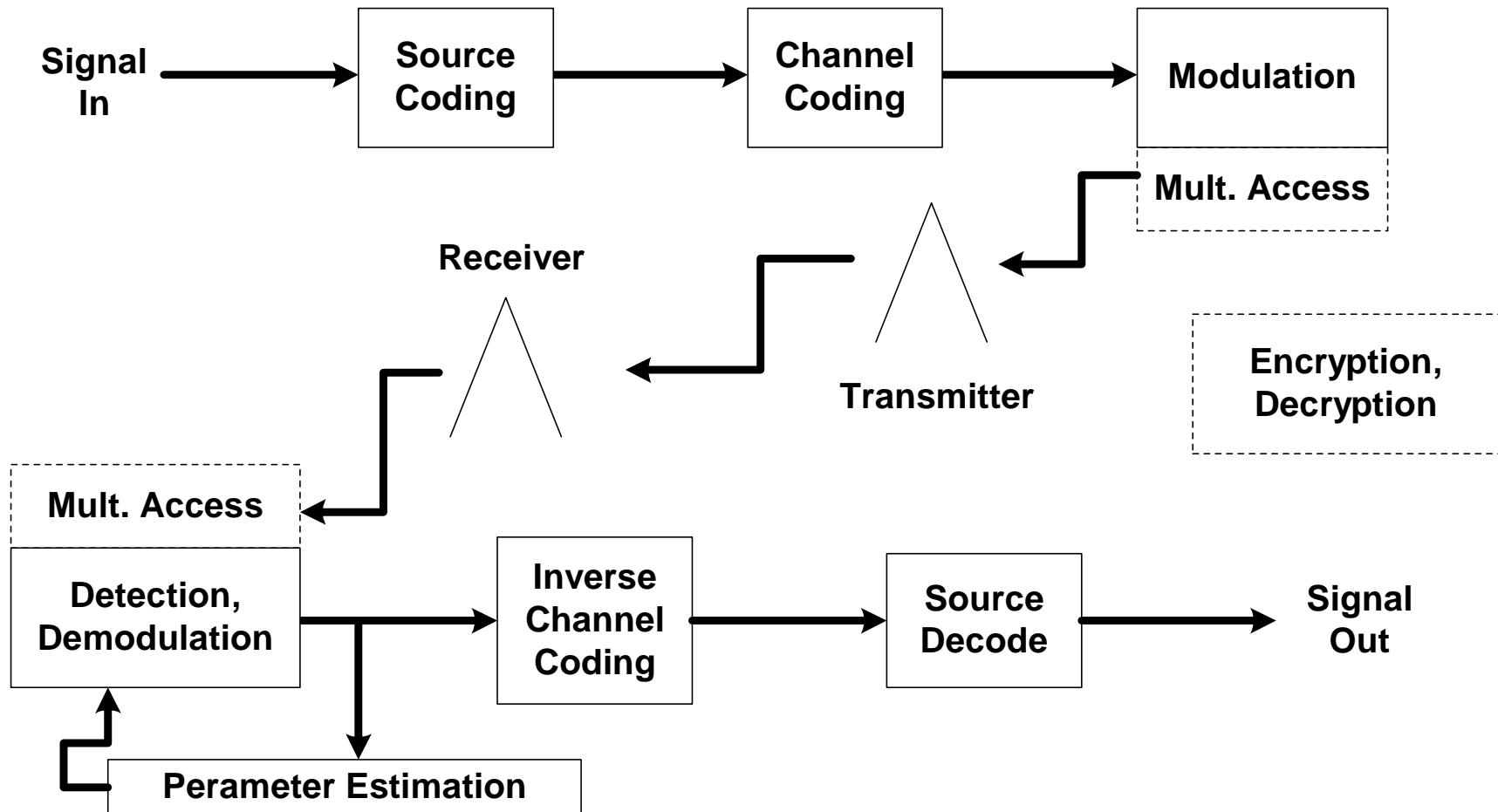




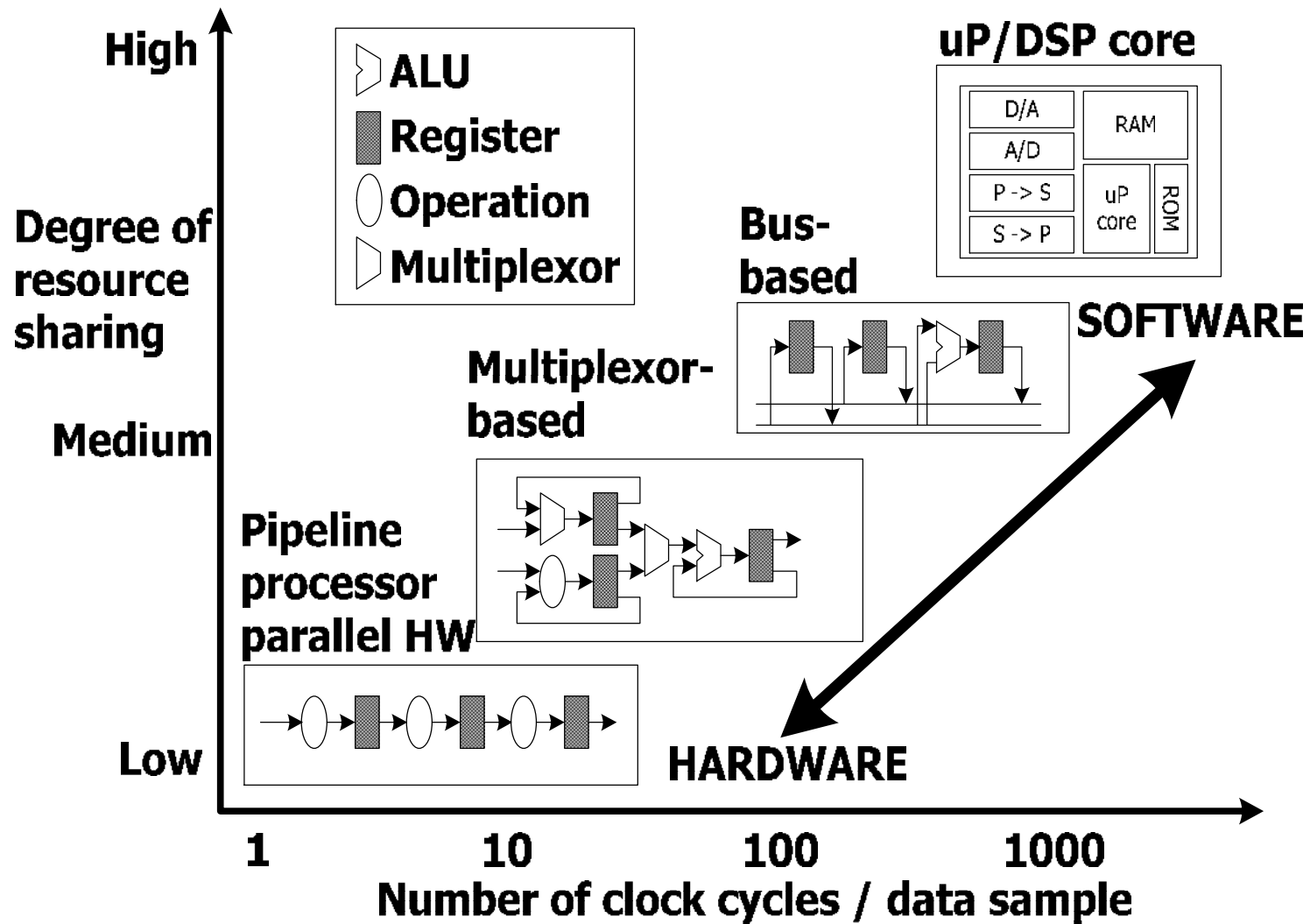
Max Bit Rate vs. Operations/Bit



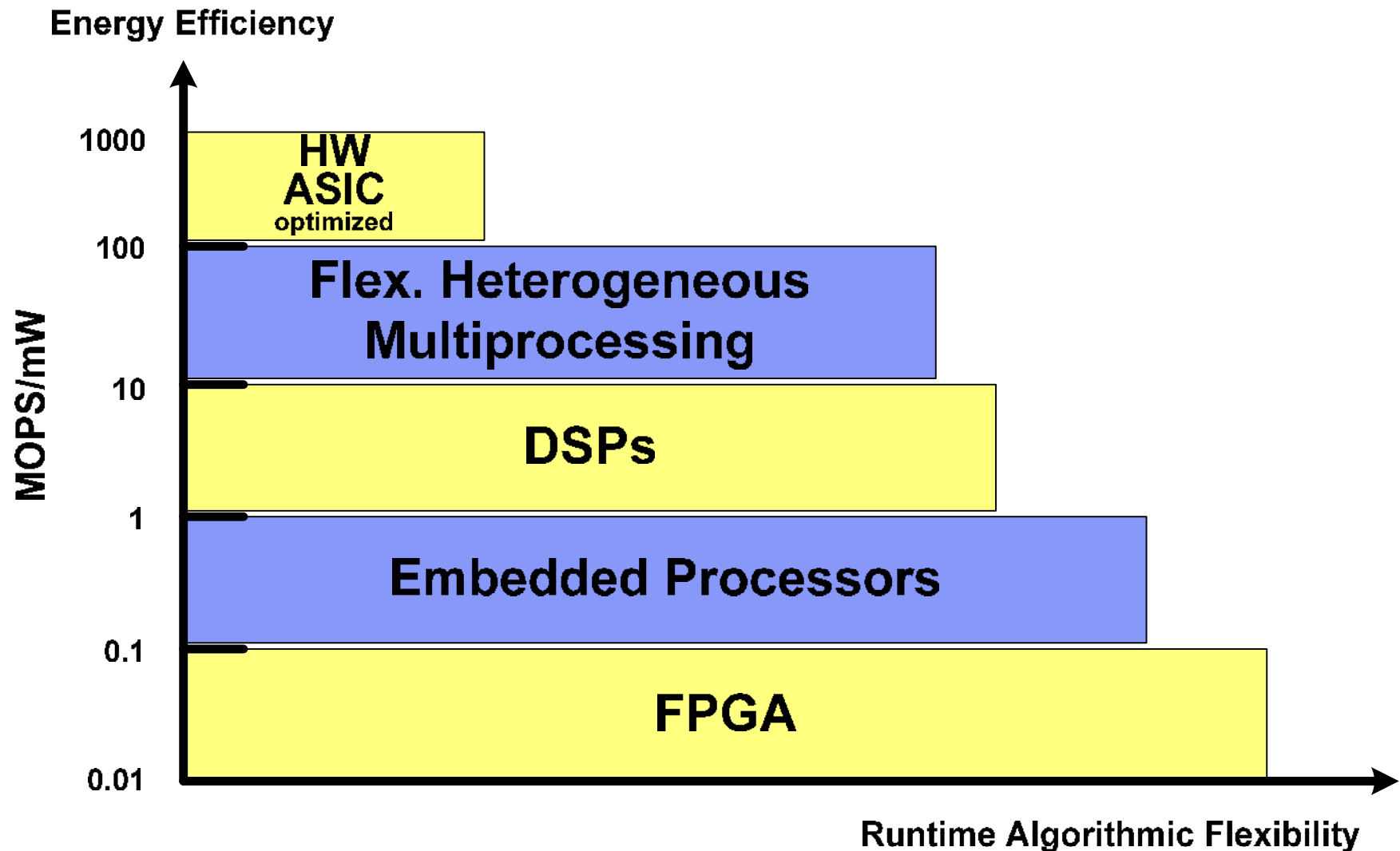
Generalized Comm System



信号処理LSIアーキテクチャ

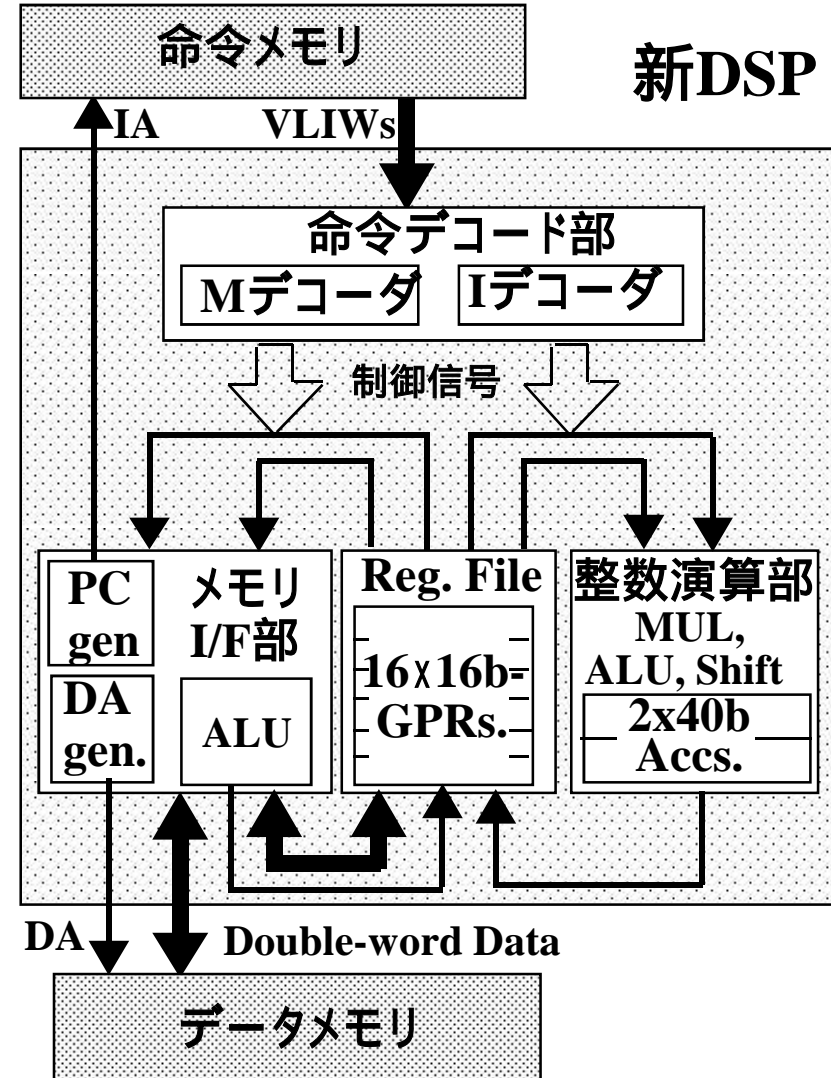
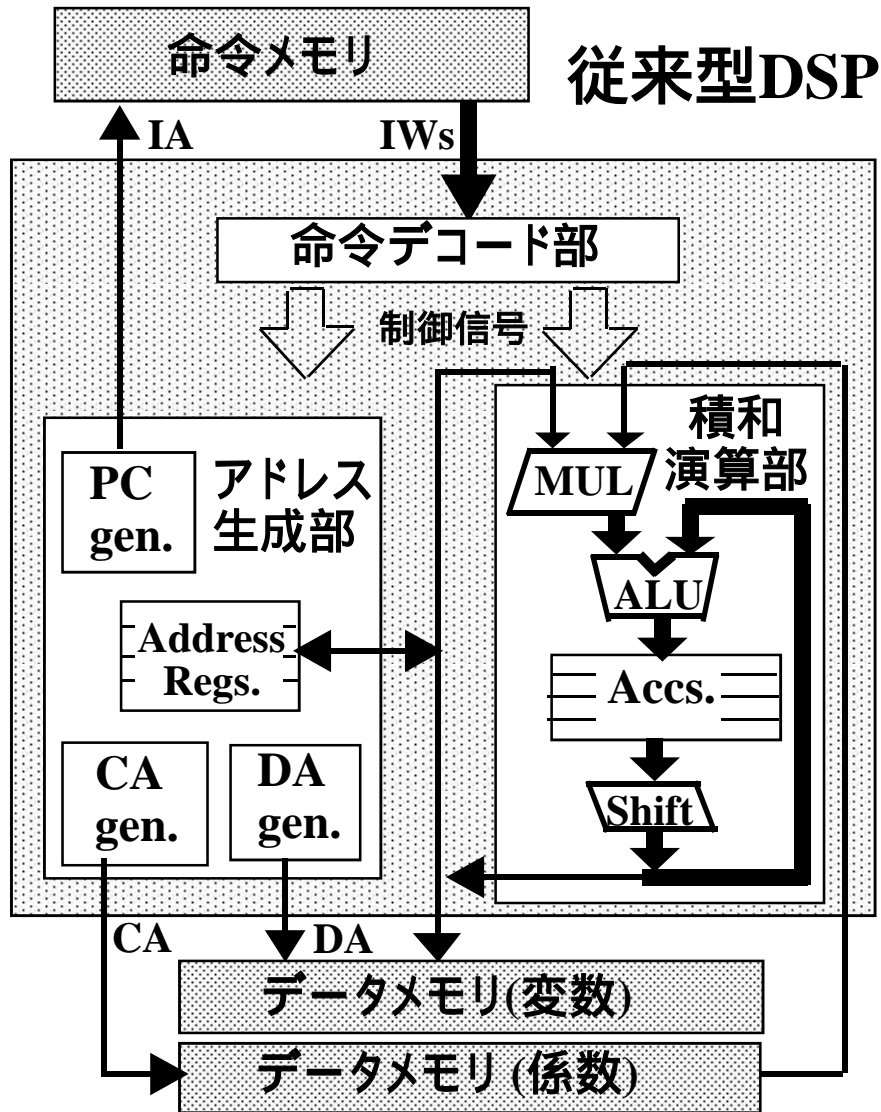


Energy-Flexibility Tradeoff



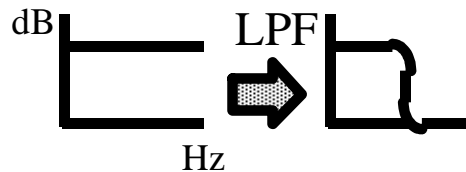
Source : J. Rabaey, UCB

演算用従来型DSP vs. 通信システム用新DSP



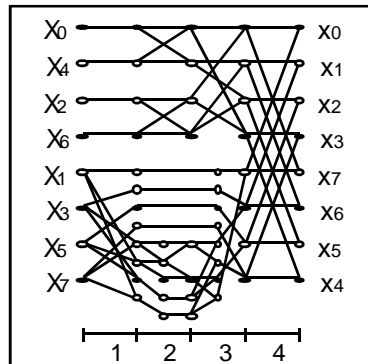
従来型DSPの処理 vs. 新DSPの処理

FIR



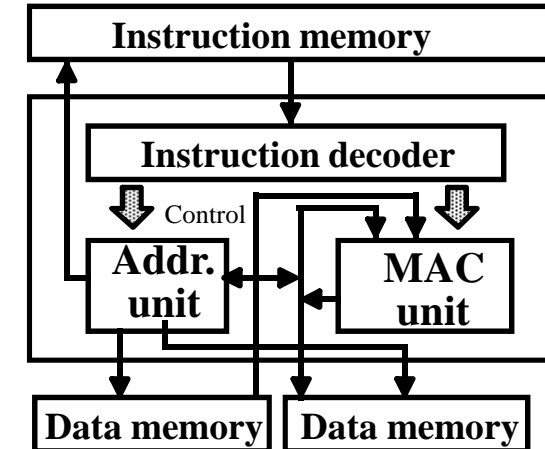
$$Y(n) = \sum A_i X(n-i)$$

Fast IDCT

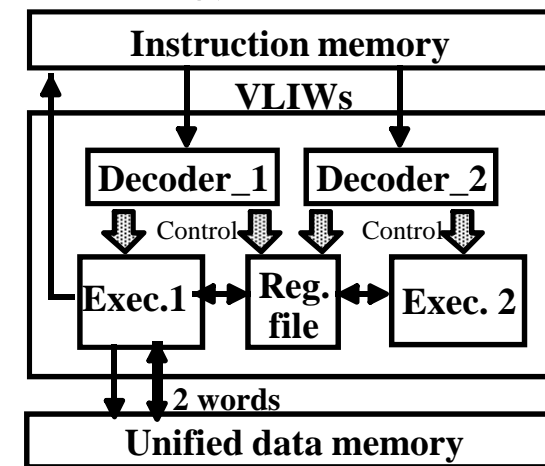


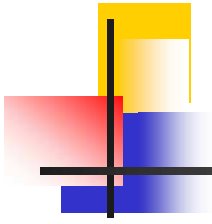
$$x_i = \sqrt{2/N} \sum C(k) X_k * \cos((2x+1)k\pi / 2N)$$

従来型DSP



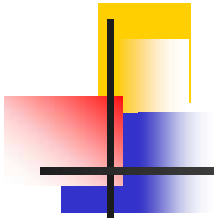
新DSP





通信システム技術の例 1

- MPEG-2 Source Coding -

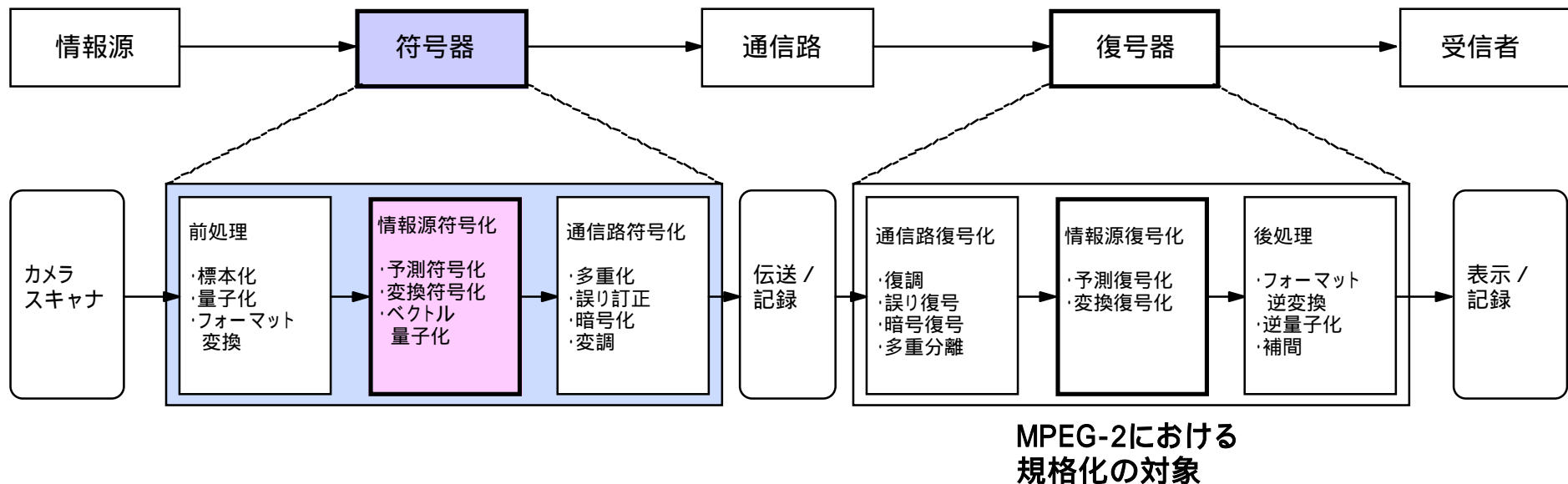


画像通信とは

MPEG-2技術概要

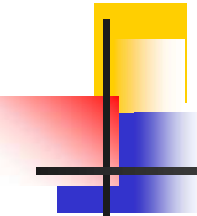
MPEG-2用LSIの歴史

画像通信における基本伝送モデル



MPEG-2 (Moving Picture Experts Group Phase-2)とは:

- ・画像圧縮の国際標準 (1994年規格化)
- ・DVD (Digital Video Disc), デジタル放送に採用



放送・蓄積応用における画像圧縮の必要性

HDTV 1コマ 3.3MB (1920pixel×1156line×1.5(Y/C)=3.3Mpixel, 1pixel=1Byte)
1秒間 30コマ
1秒間のデータ 100MB 約800Mbps

MPEG-2により15Mbps程度まで圧縮可能



(1) デジタル放送応用

地上波デジタル放送: 15-17Mbps

BSデジタル放送: 24Mbps

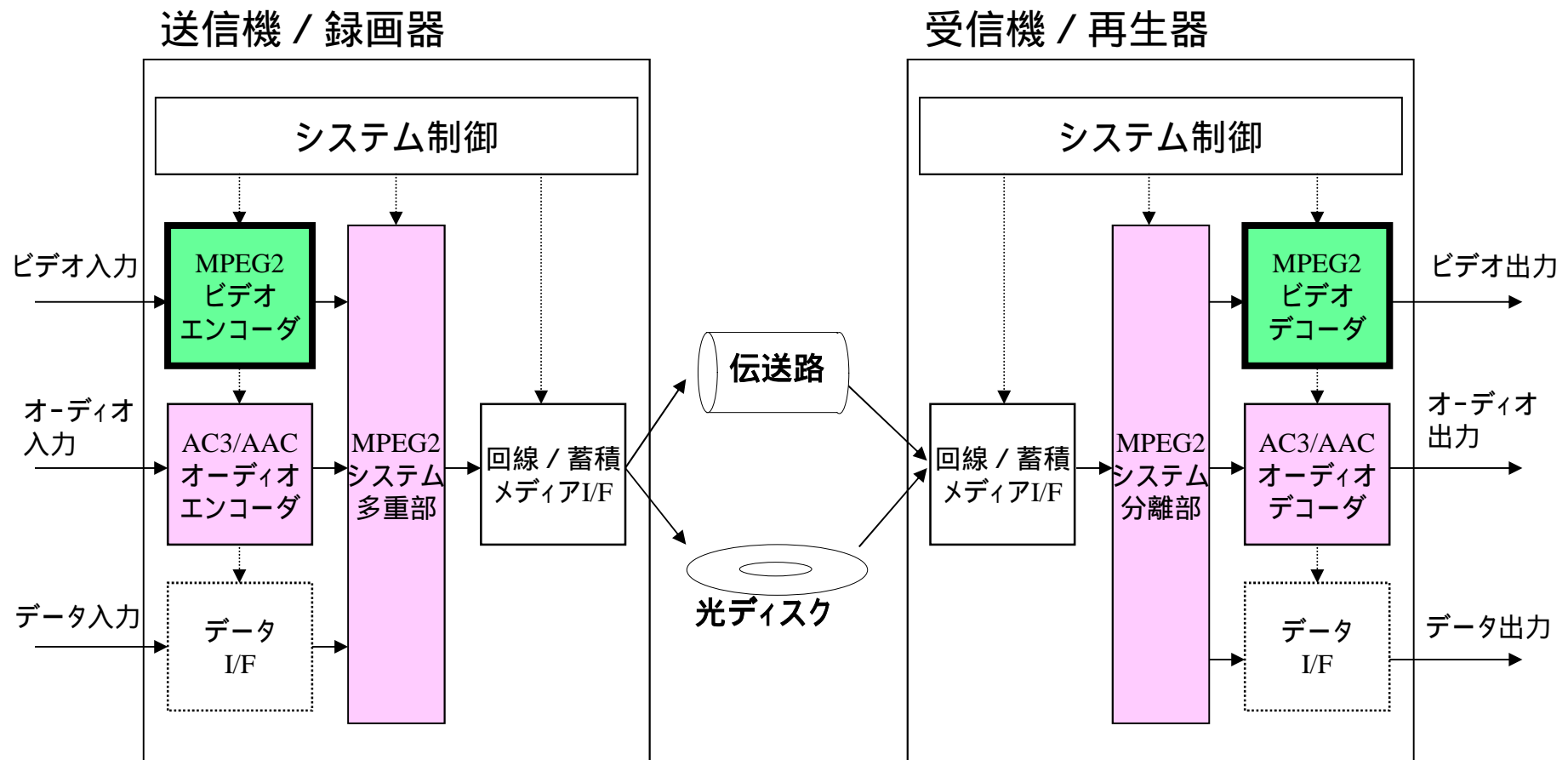
CSデジタル放送: 15-20Mbps

(2) 蓄積メディア応用

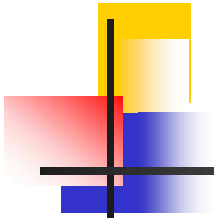
Blue-ray 映画2時間分を1枚の光ディスクに記録

(Blue-ray Discの容量: 25GB)

放送・蓄積応用における送受信システム



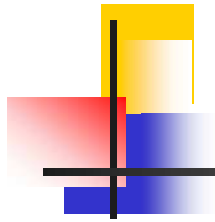
AC3: Dolby Digitalの略称
AAC: Advanced Audio Coding



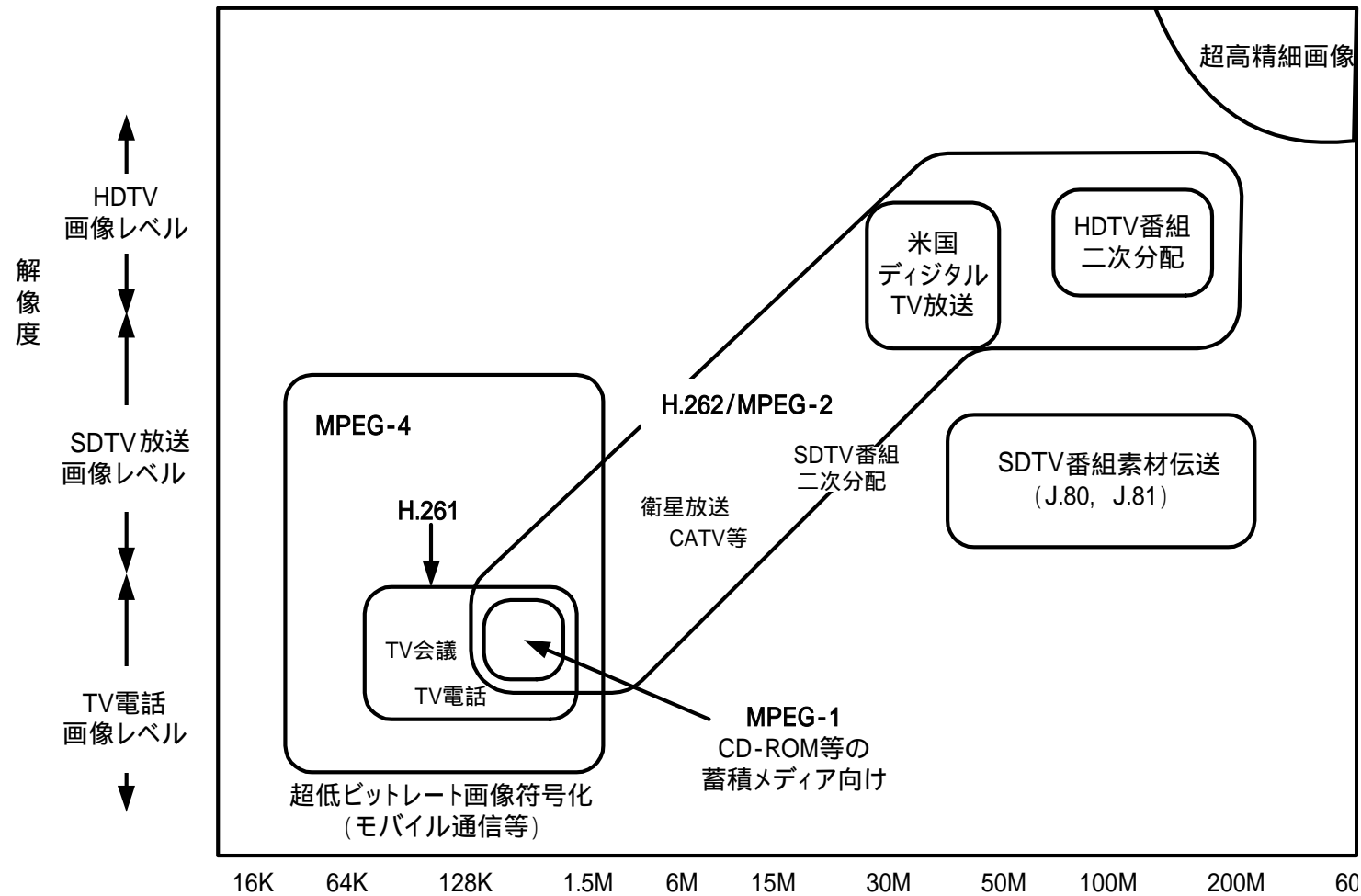
画像通信とは

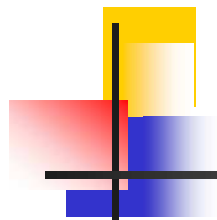
MPEG-2技術概要

MPEG-2用LSIの歴史



MPEG-2の適用範囲





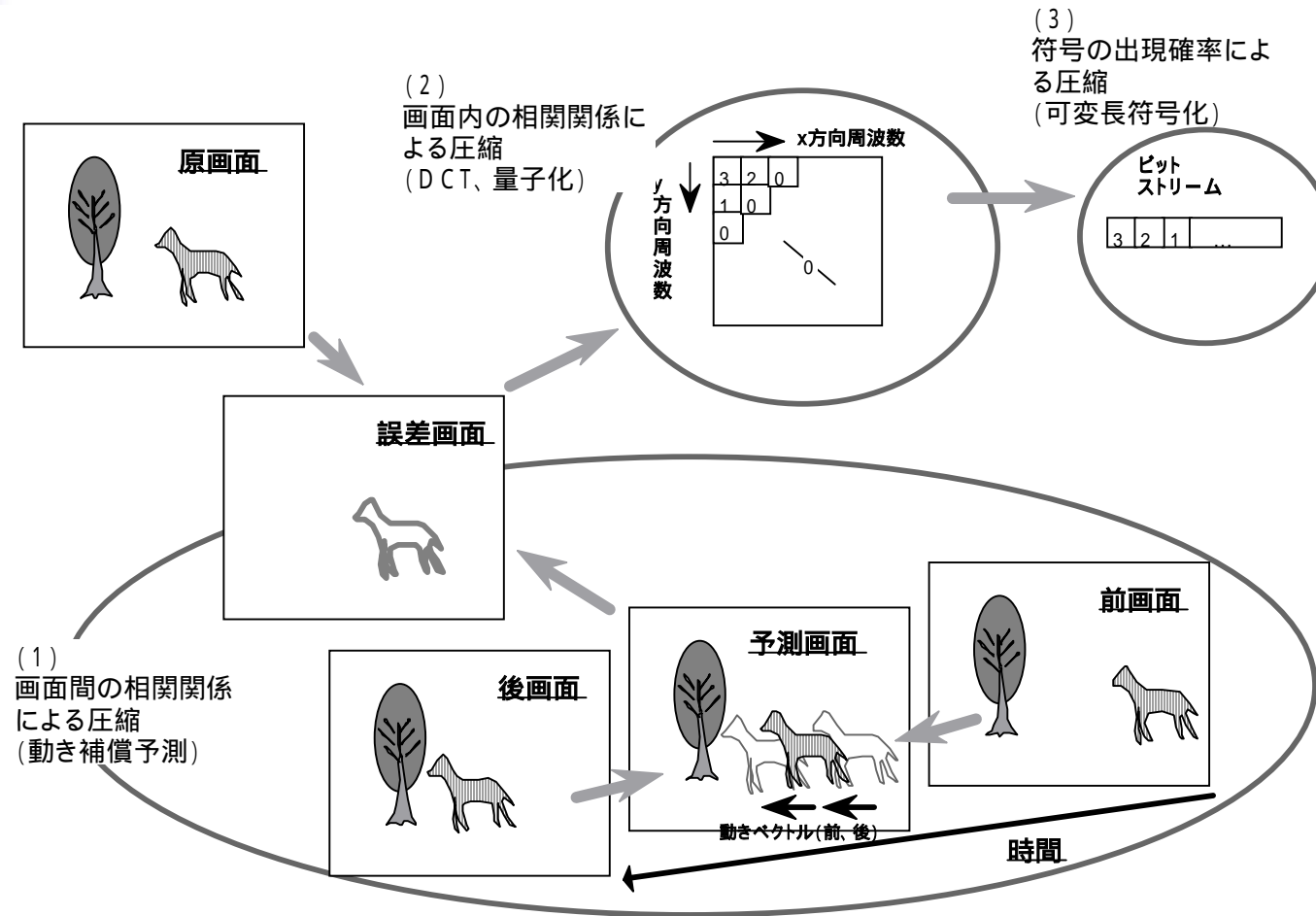
MPEG-2 におけるProfile とLevel

Profile Level	Simple (片方向予測)	Main (両方向予測)	SNR (異なる符号化雑 音の画像が対象)	Spatial (異なる解像度の 画像が対象)	High (スタジオ規格)
High (1920x1152)		MP@HL HDTV (日米)			HP@HL HDTV (日米)
High-1440 (1440x1152)		MP@HL HDTV (欧州)		SSP@ML HDTV (欧州)	HP@HL HDTV (欧州)
Main (720x480)	SP@ML SDTV	MP@ML SDTV (デジタル放送, DVD)	SNRP@ML SDTV		HP@ML SDTV
Low (360x240)		MP@SL 1/4TV	SNRP@ML 1/4TV		

Profile : 符号化の仕様を規定

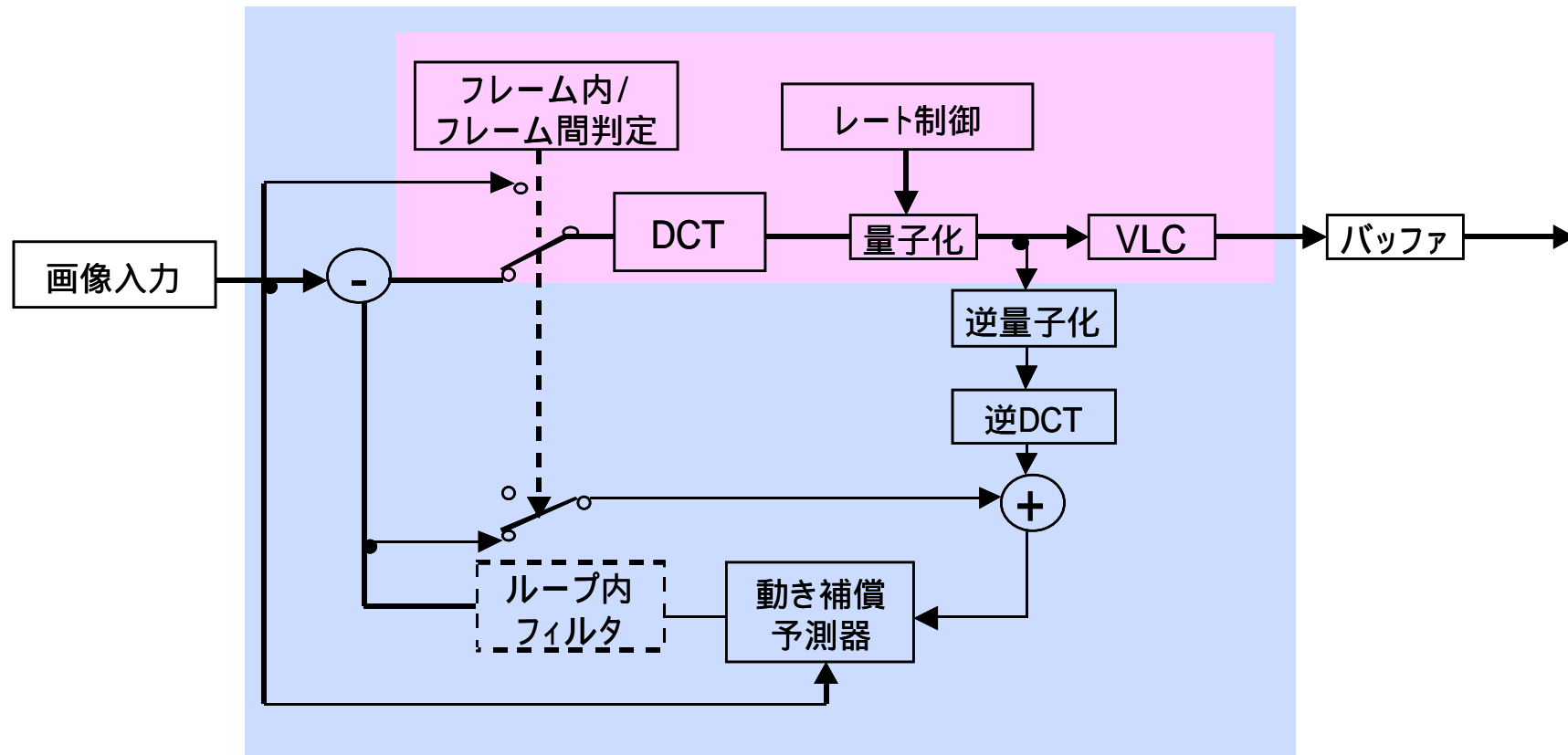
Level : 解像度を規定

MPEG-2基本アルゴリズムの考え方



変換符号化 : 画面内での符号化処理 空間冗長さの削減 (DCT/量子化)
 予測符号化 : 画面内での符号化処理 時間冗長さの削減 (動き予測)
 エントロピー符号化 : 符号の出現確率を用いたデータ量の削減 (ハフマン符号化)

MPEG-2ビデオ信号符号化アルゴリズム

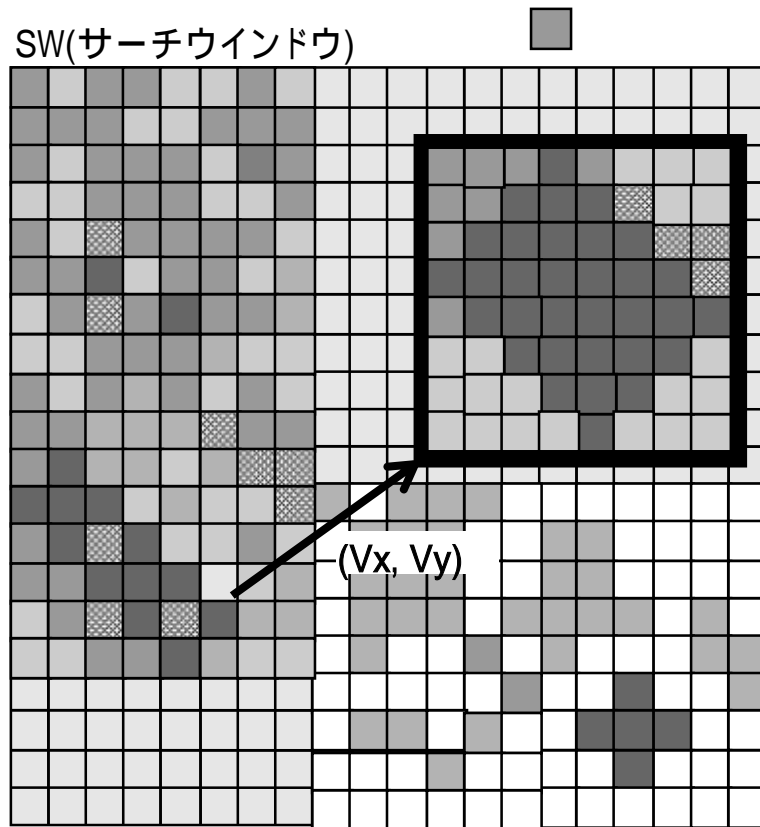


DCT: Discrete Cosine Transform
VLC: Variable Length Coding (可変長符号化)

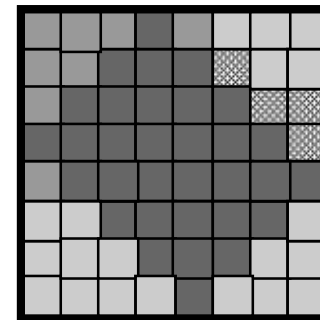
イントラ(画面内)符号化

インター(画面間)符号化

動き予測符号化のアルゴリズム



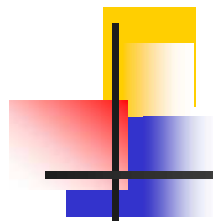
TB
(テンプレートブロック)



最適動きベクトル(Vx,Vy) 符号は
以下の差分絶対値和計算により求められる

$$F = \min \sum_i \sum_j |TB(i, j) - SW(\underline{i + V_x}, \underline{j + V_y})|$$

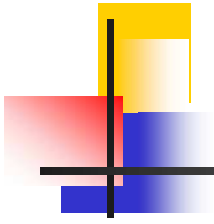
i,j: テンプレートブロックの画素位置を示す



MPEG-2(MP@ML)符号化・復号化処理の演算量

[Operation/Sec.]		
処理項目	符号化処理量	復号化処理量
DCT/IDCT	1 G	5 0 0 M
Q/IQ	3 1 0 M	1 5 5 M
可変長符号化・復号化	1 0 0 M	5 0 M
符号化制御	5 0 M	
符号化モード判定	1 5 0 M	
動き予測(全探索)*	1 8 0 G	
動き予測(階層探索)*	1 1 G	
合計	1 3 G / 1 8 2 G	8 1 4 M

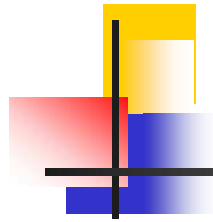
符号化処理演算量は復号化処理演算量に比べて2桁多い
符号化処理演算量の大部分(90%以上)を動き予測が占める



画像通信とは

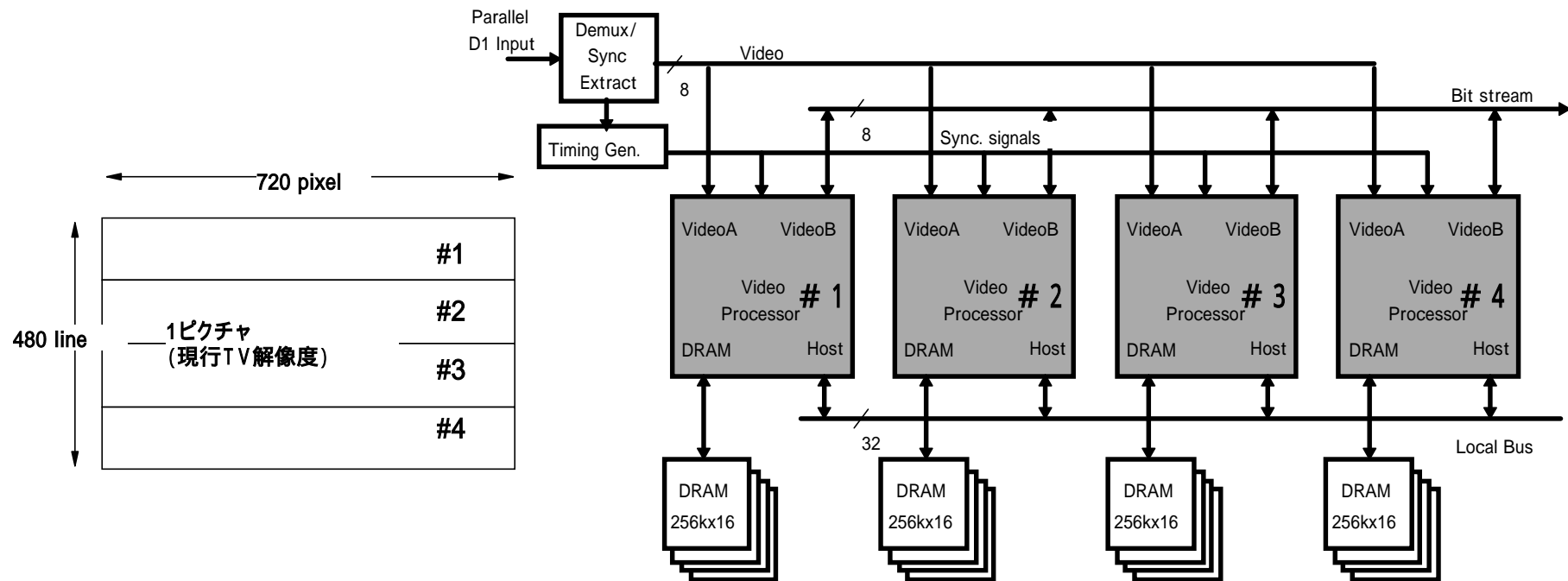
MPEG-2技術概要

MPEG-2用LSIの歴史



MPEG-2 インプリメンテーション技術

- 画面分割型構成 -

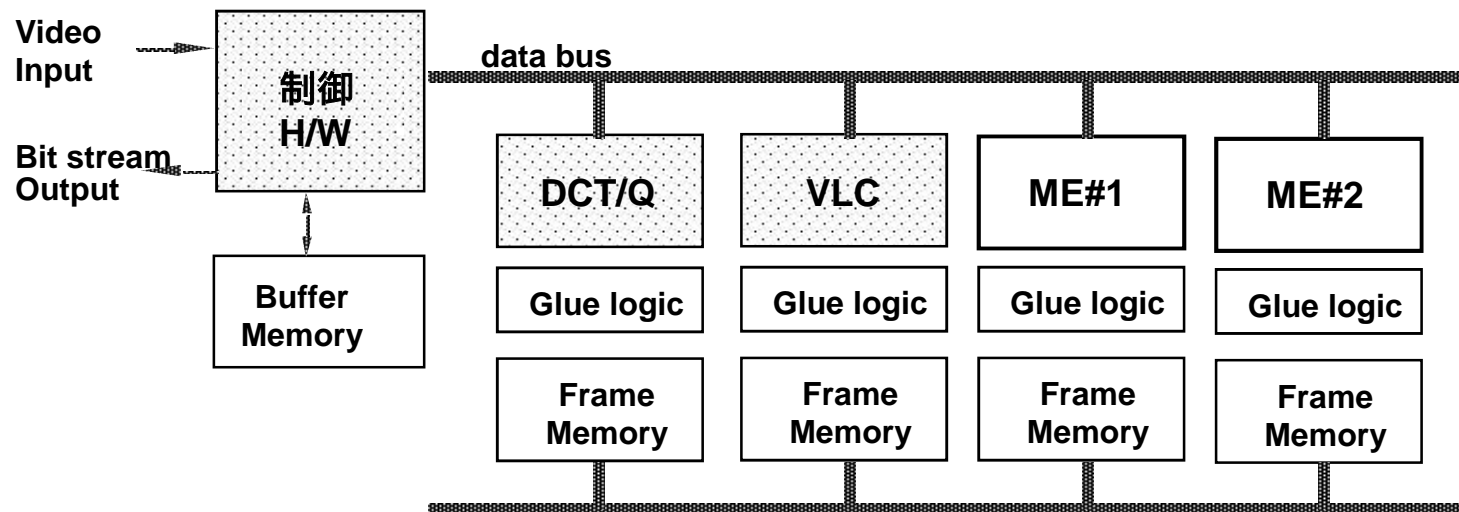


各ビデオ符号化モジュールが画面の一部の処理を担当 (C - Cube社:1993)
(符号化モジュールは、すべての演算処理機能を包含)

- ・解像度 (画面サイズ) に対して拡張性が高い
- ・機能拡張性 ×

MPEG-2 インプリメンテーション技術

- 機能分割型構成 -

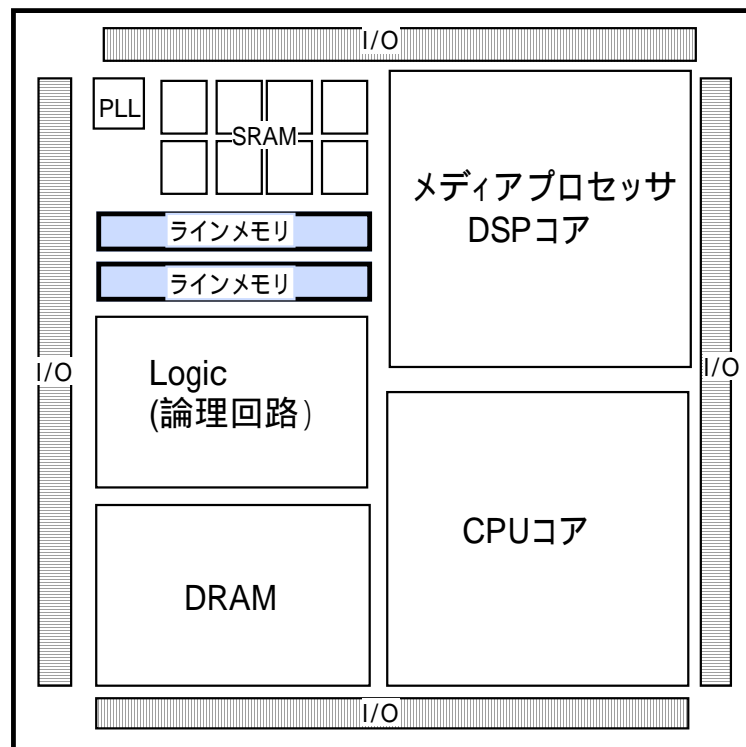


各単一機能処理ハードウェア(DCT, etc)が画面内の処理を担当
(機能処理ブロックは, 単一の種類の演算処理を実行可能)

- ・ハードウェア規模の最小化が可能.
- ・解像度(画面サイズ)に対する拡張性 ×
- ・周辺ロジック規模大

ビデオ符号化システムLSIの高集積化

映像符号化用システムLSI



高集積化の鍵は？

LSIアーキテクチャ設計手法

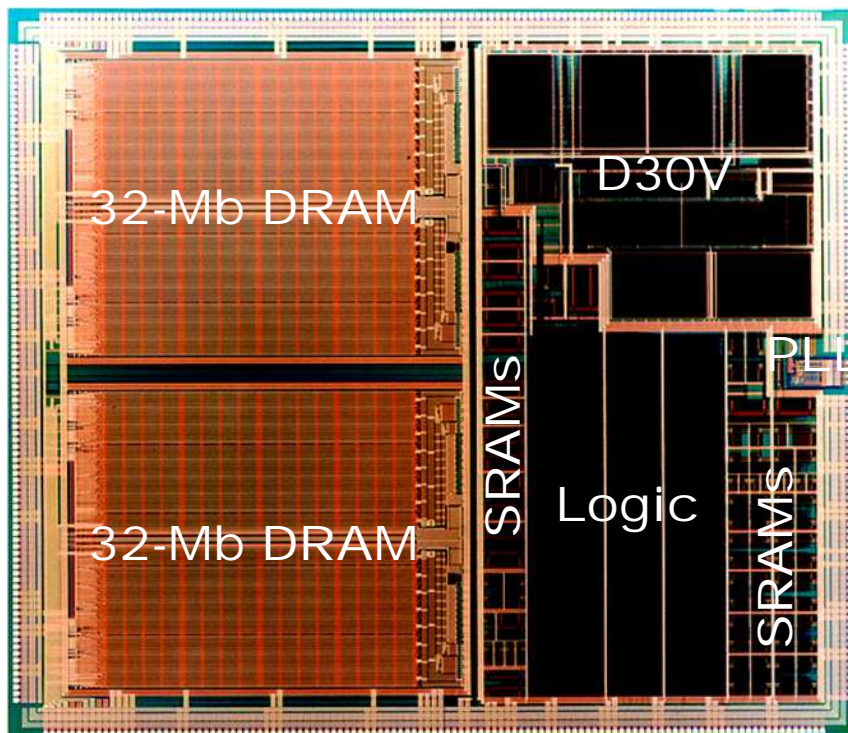
- 演算処理性能
- データハンドリング能力
- プロセッサによる適応処理

マクロセル・コアセルの高集積化

- 再構成容易性
- 形状自由度

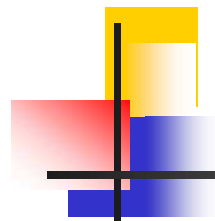
DRAM内蔵デジタル動画Encoder LSI例

- Single Chip MPEG-2 Video/Audio/System Encoder -



写真提供: ルネサスエレクトロニクス(株)

- Technology
 - 0.13 μ m CMOS 4-copper layer
- Chip size
 - 10.71mm x 9.26mm
- Number of Transistors
 - 12 million and 64Mbit DRAM
- Power supply
 - 1.5V(Internal), 3.3V(I/O)
- Clock Frequency
 - 27/54/81/162MHz
- Power consumption
 - 0.7W
- Package
 - 256-pin BGA



DRAM内蔵デジタル動画Encoder LSI例

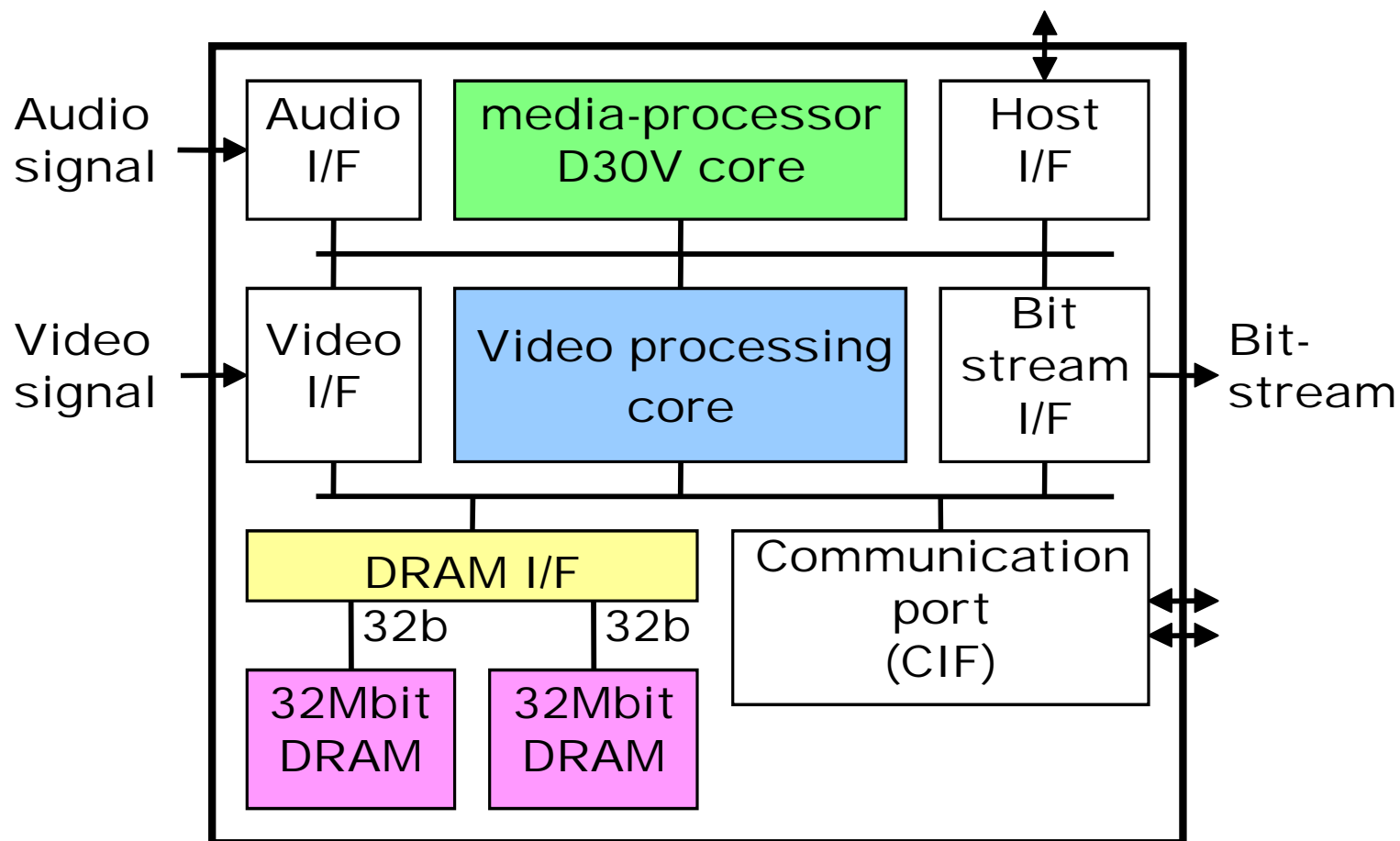
Encoder LSI Functional Features

Algorithm	Video	MPEG-2 422P / MP / SP@ML 422P@HL(Multi-chip config.)
	Audio	Dolby Digital* (2-ch) MPEG-1 layer2 (2-ch) Linear PCM (2-ch)
Resolution		Single-chip : NTSC / PAL Multi-chip : 480P / 720P / 1080I
Output format		Transport Stream (A/V mux.) Program Stream (A/V mux.) Video PES / ES(for Multi-chip config.)

* Dolby Digital is a trademark of Dolby Laboratories.

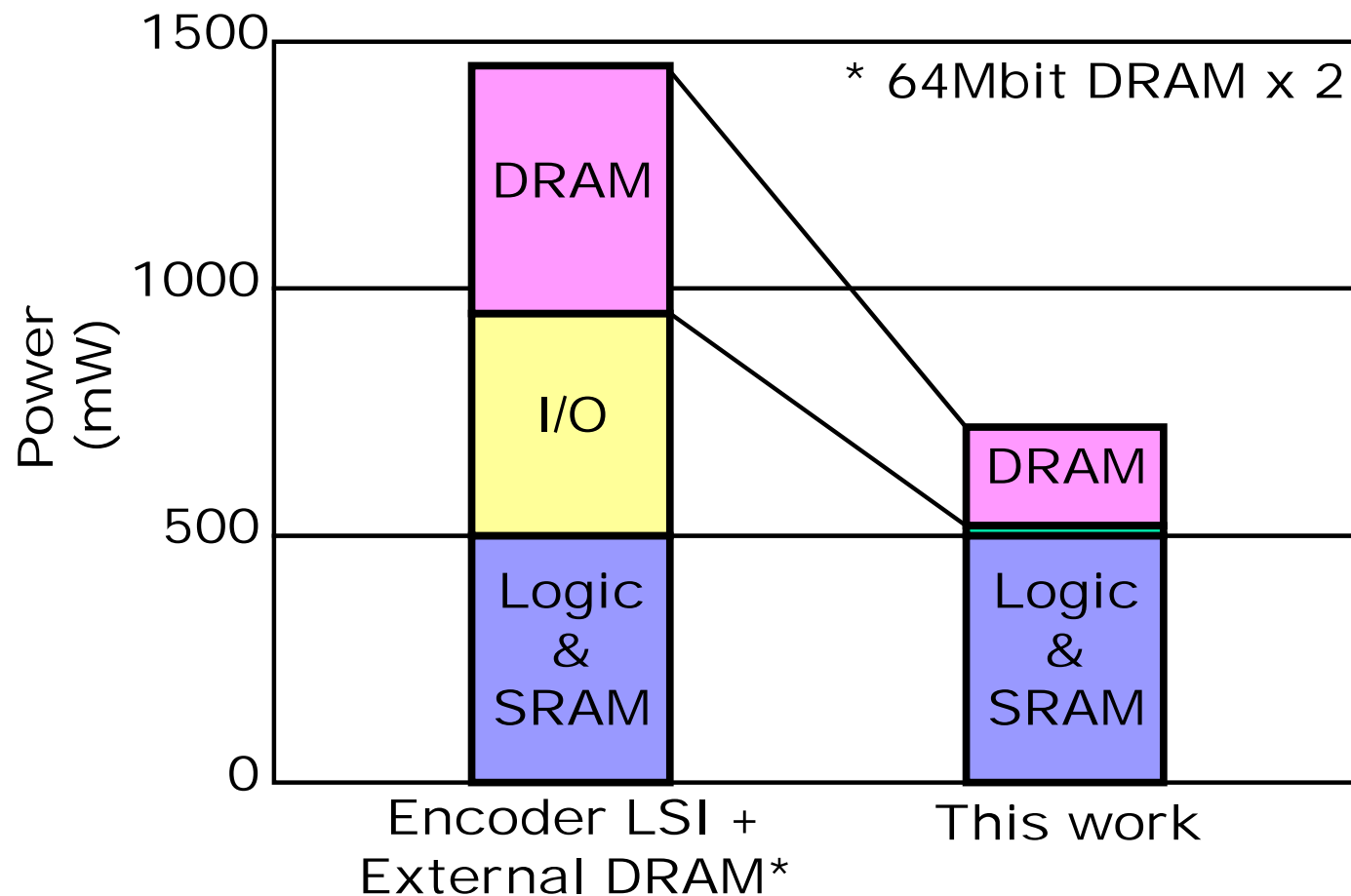
DRAM内蔵デジタル動画Encoder LSI例

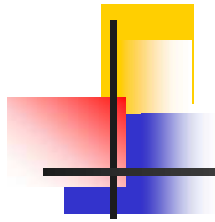
Block Diagram of Encoder LSI



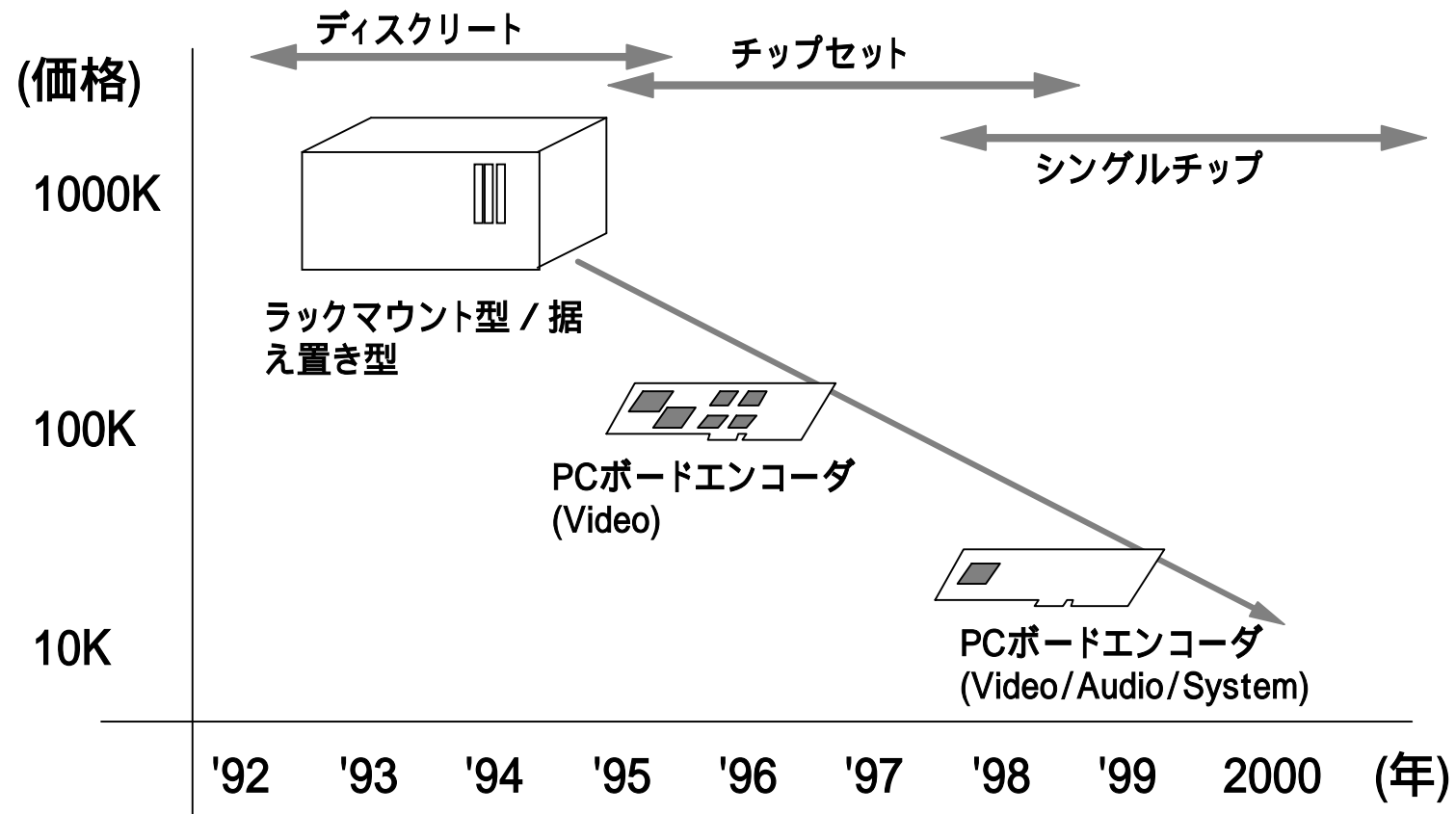
DRAM内蔵デジタル動画Encoder LSI例

DRAM内蔵による消費電力削減





MPEG-2 符号化システムの動向



通信システム技術の例 2

- OFDM入門* -



(*) 琉球大学工学部情報工学科
和田知久教授 (wada@ie.u-ryukyu.ac.jp) の資料より



OFDMとは

- OFDM
=Orthogonal Frequency Division Multiplexing
(直交周波数分割多重)
- 多数の直交するキャリア信号を多重化する
デジタル変調
 - * 直交するキャリアとは何か？
 - * 多重化するデジタル変調とは何か？
 - * どういうメリットがあるの？
 - * アプリケーションは？



アウトライン

- 背景、歴史、アプリケーション
- デジタル変調の復習
- FDMAとマルチキャリア変調
- OFDMの原理
- マルチパス
- まとめ



OFDMは何故注目されている？

- BIGなデジタル通信アプリケーションに採用
 - ー 日本・欧州の地上波デジタルTV放送
 - ー ADSL等の超高速MODEM
 - ー IEEE 802.11 wireless LAN
- 微細化の進展でLSI化が可能



日本の地上波デジタル放送

- 2003年12月から日本の地上波デジタル放送が開始された。
- MPEG2と組み合わせられ、従来の1チャンネル帯域にHDTV1チャンネル、SDTVなら2チャンネルの放送が可能。
- その他のセグメントをオーディオやデータ放送に活用できる。
- 米国のアナログ放送は2009年6月に終了した。
- 日本のアナログ放送は2011年7月24日に終了した。

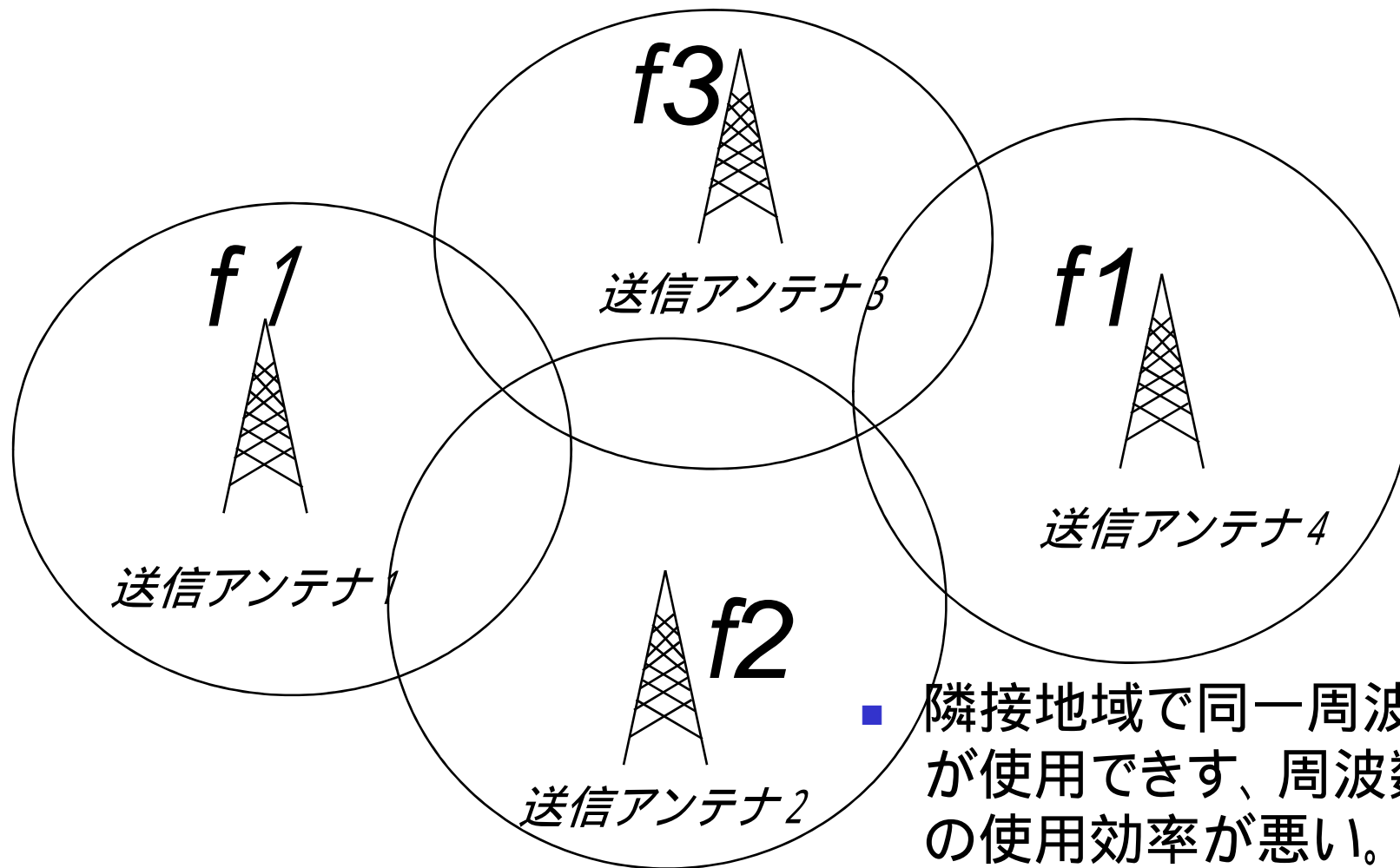


アナログテレビ放送 (VHF) の問題 (1)

チャンネル	周波数 (MHz)
1	90 - 96
2	96 - 102
3	102 - 108
4	170 - 176
5	176 - 182
6	182 - 188
7	188 - 194
8	192 - 198
9	198 - 204
10	204 - 210
11	210 - 216
12	216 - 222

- 隣接チャンネル間で干渉が発生。(現行TVは占有帯域幅が大きい)
- 同一電波を時間差ありで受信するとゴーストが発生する。
- 以上の問題をデジタル化解決する。

現行テレビ放送 (VHF) の問題 (2)





OFDMの歴史

- 最初の提案は1950年代
- 1960年代には理論的に完成
- 1970年代にDFTを適用した実装が提案
- 1987年にデジタル音声方法へ採用(欧州)
- 最近になって
 - ー デジタル地上波TV放送(欧州、日本)
 - ー ADSL



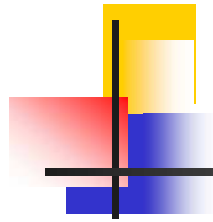
デジタル変調の復習(1)

- 異なったデジタル情報の各々に対して、異なる信号波形を割り当てて伝送する。
- 現実的には正弦波を基準として、正弦波のパラメータをデジタル変調する。

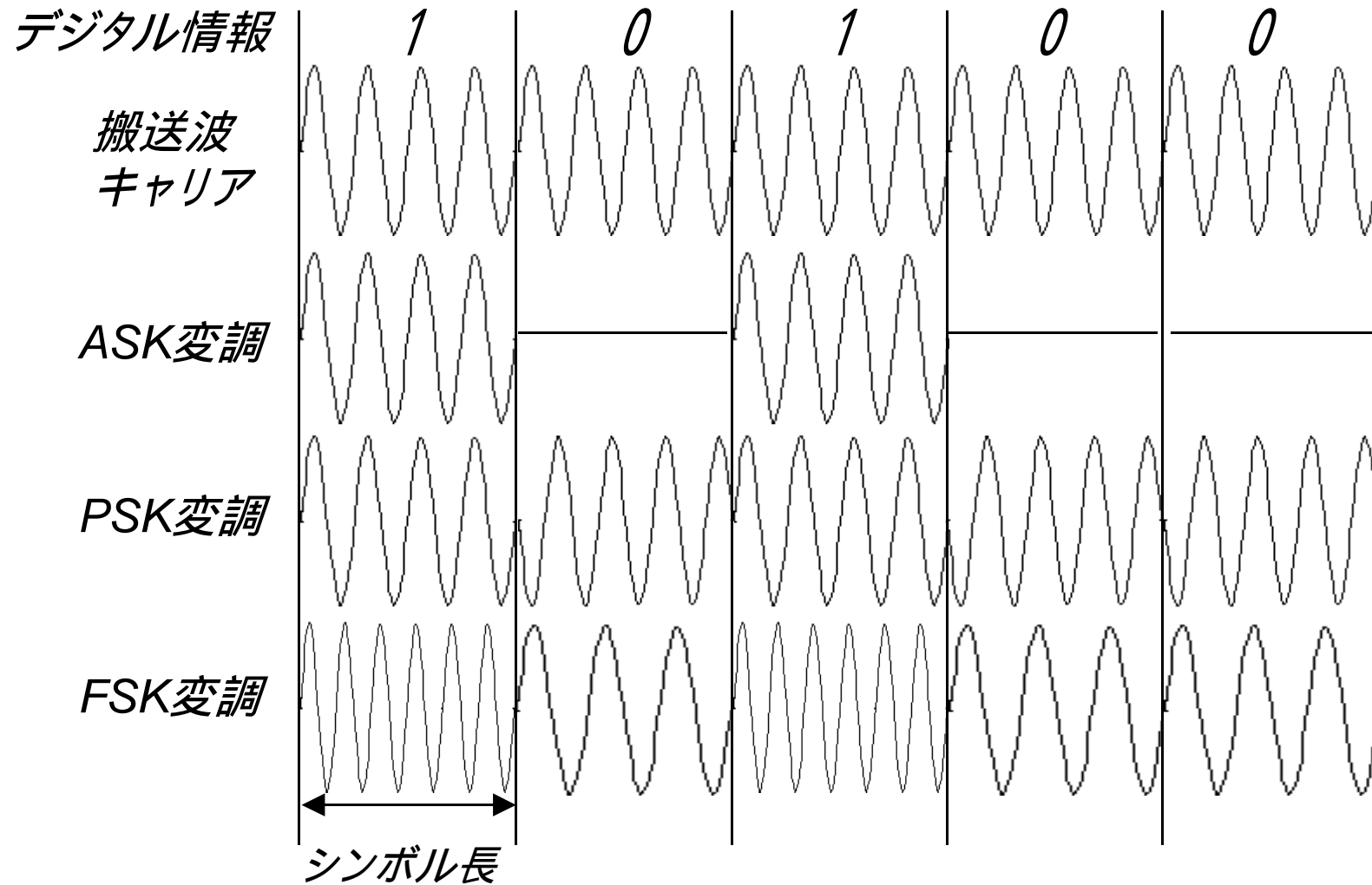
$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \theta_k)$$

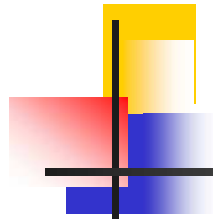
ー振幅シフトキーイング	ASK
ー位相シフトキーイング	PSK
ー周波数シフトキーイング	FSK

OFDMではASKとPSKを基本とした変調を用いる。

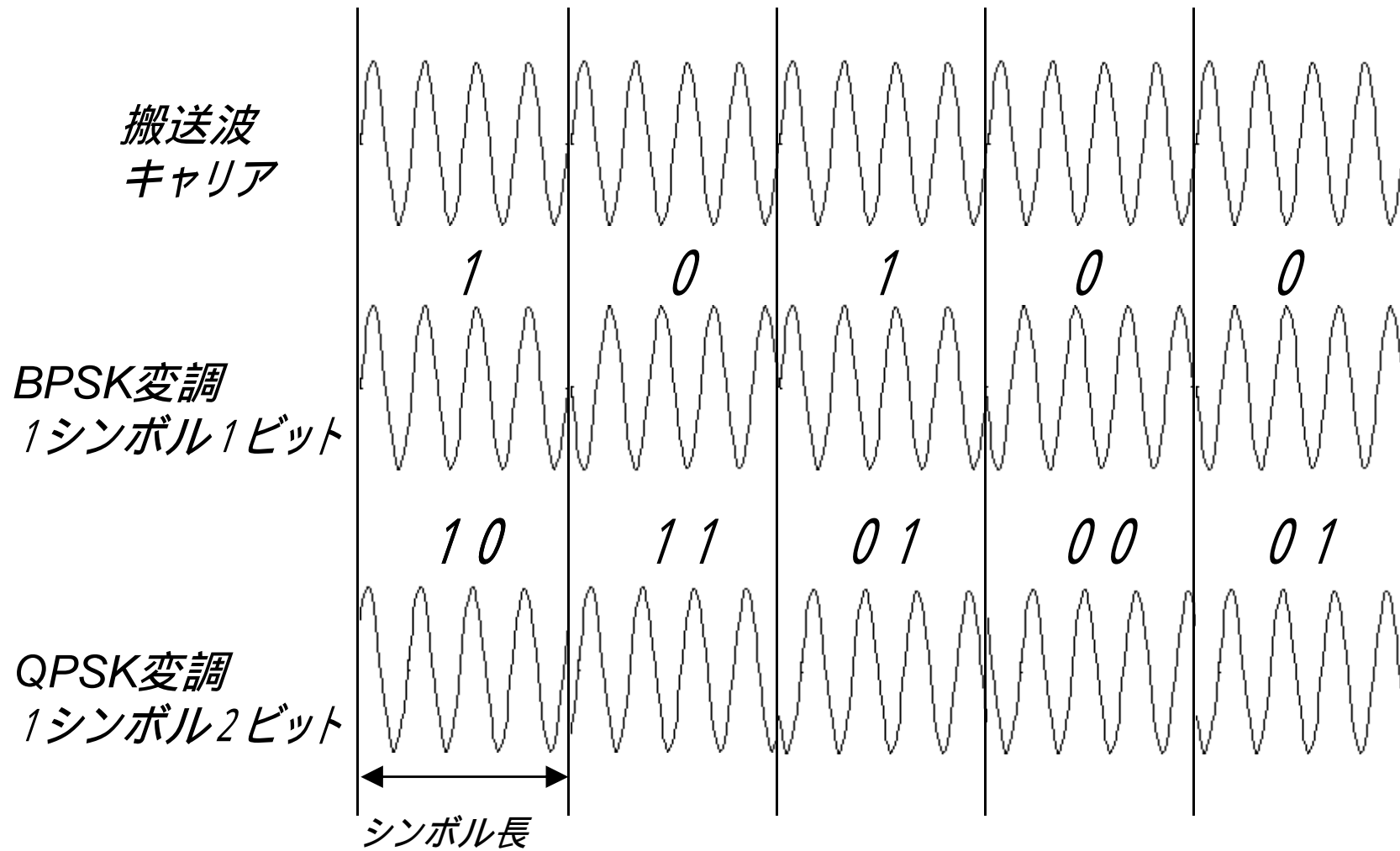


デジタル変調の復習(2)





多値変調





デジタル変調の表現方法

- 例として以下の多値PSKを考える。

$$s(t) = \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \theta_k)$$

$$= \cos \theta_k \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) - \sin \theta_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t)$$

$$a_k = \cos \theta_k, \quad b_k = \sin \theta_k \text{ とすると、}$$

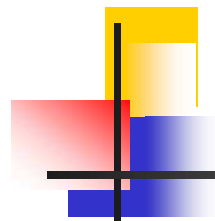
$$s(t) = \text{Re}[(a_k + jb_k)e^{j2\pi f_c t}]$$

- 送信信号 $s(t)$ は複素信号 $(a_k + jb_k)e^{j2\pi f_c t}$ で表せれる。

$$e^{j2\pi f_c t} \quad : \text{搬送波(キャリア)成分}$$

$$(a_k + jb_k) \quad : \text{デジタル変調成分}$$

デジタル変調は複素数で表すことができる。

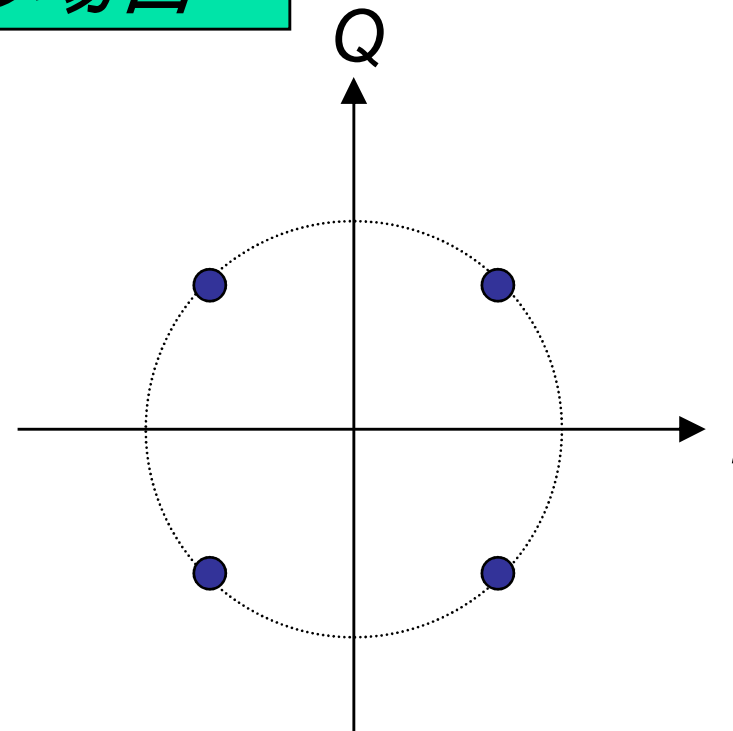


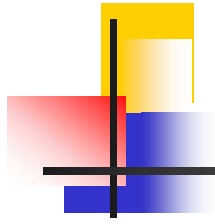
コンステレーション・マップ

- $(a_k + jb_k)$ を複素平面にプロットしたもの

QPSKの場合

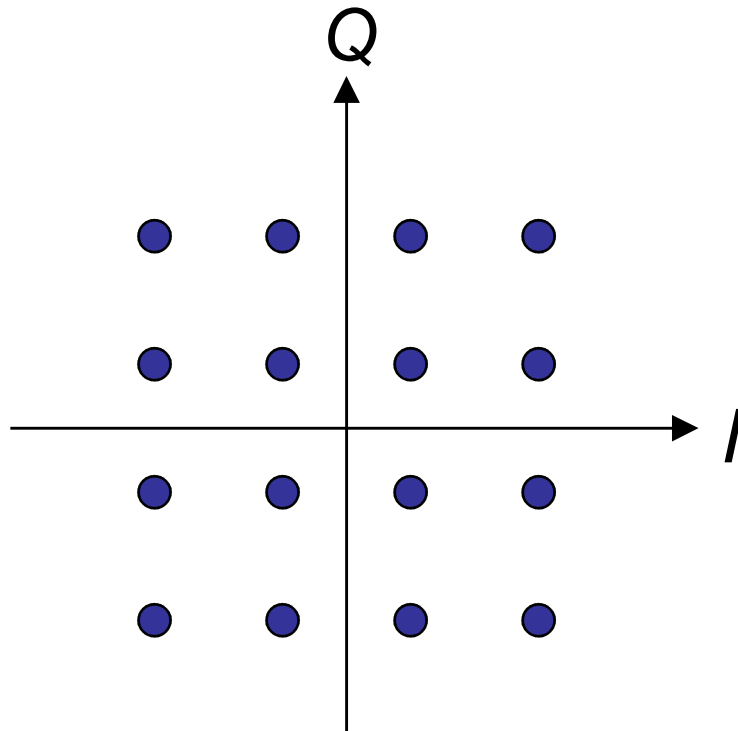
データ	Θ_k	a_k	b_k
00	$\pi/4$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
01	$3\pi/4$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
11	$5\pi/4$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
10	$7\pi/4$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$



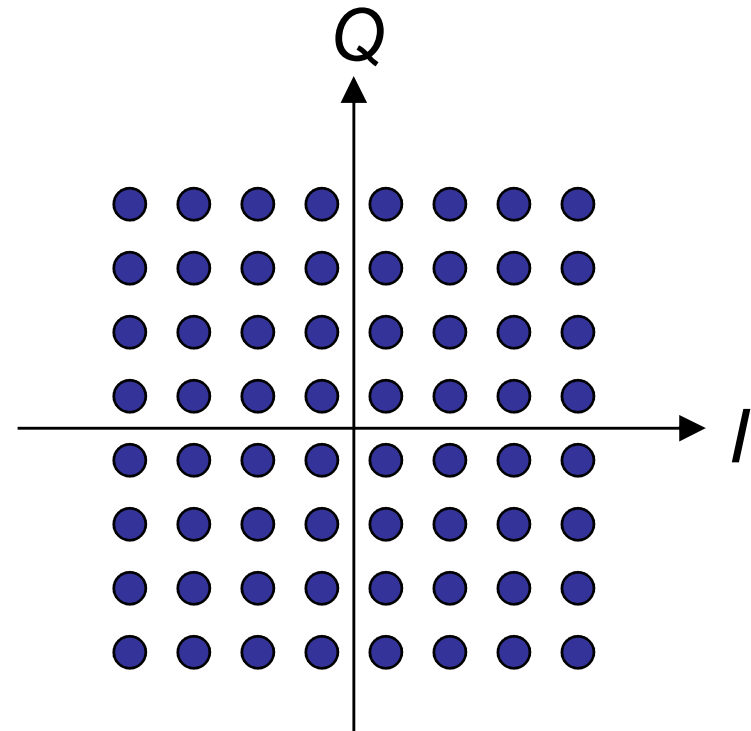


Quadrature Amplitude Modulation(QAM)

16QAM



64QAM

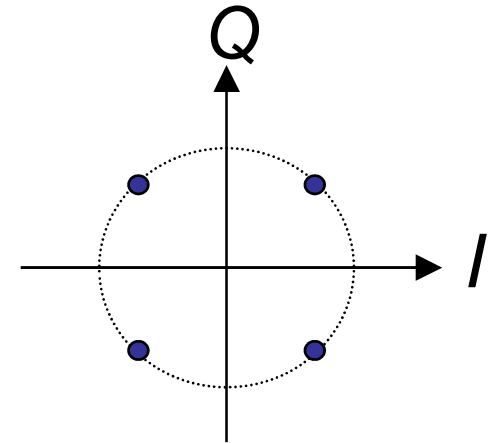


デジタル変調の復習のまとめ

- デジタル変調にはASK,PSK,FSK,QAM等あり。
- OFDMではASK,PSK,QAM等が使用される。
- デジタル変調は複素送信信号の複素係数

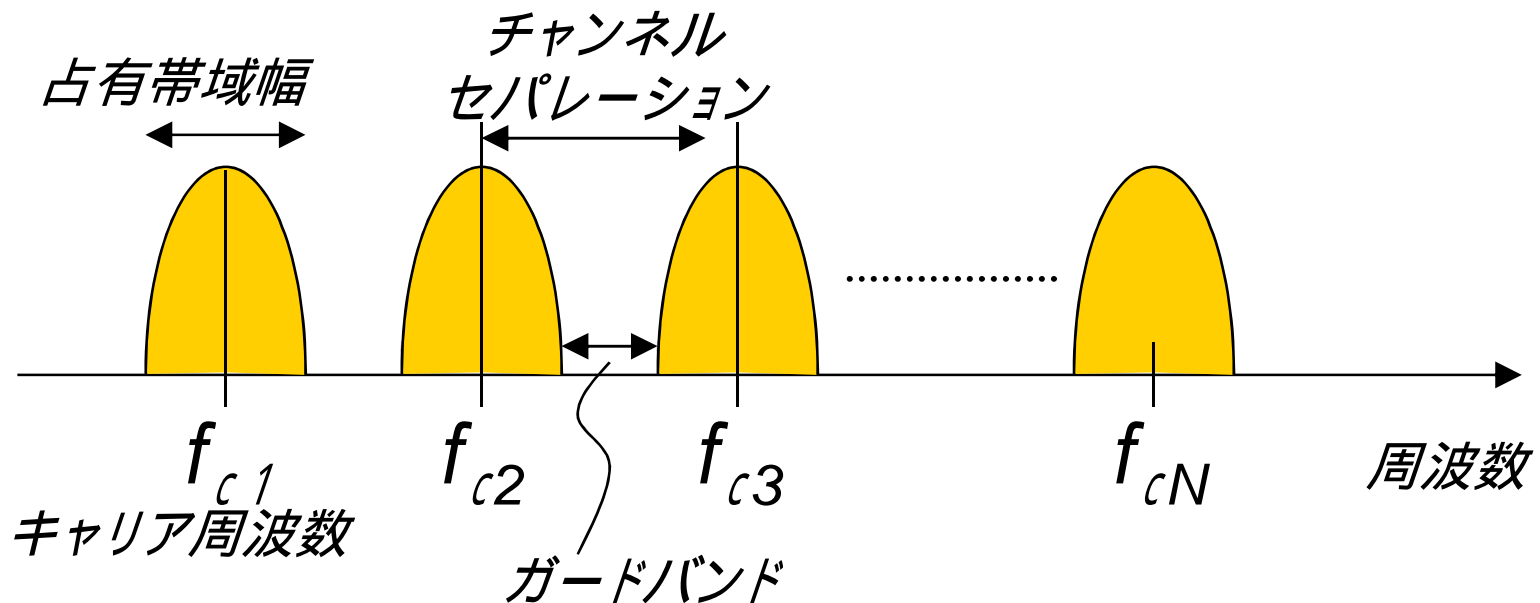
で表される。 $(a_k + jb_k)$

- これを複素平面にプロットするとコンステレーションマップとなる。



周波数分割多重 (FDMA)

- 変調の際にキャリア周波数を通信ごとに变えることで、周波数軸上で異なる通信を同時に行う方法。
(古くから用いられている方法、TV等)





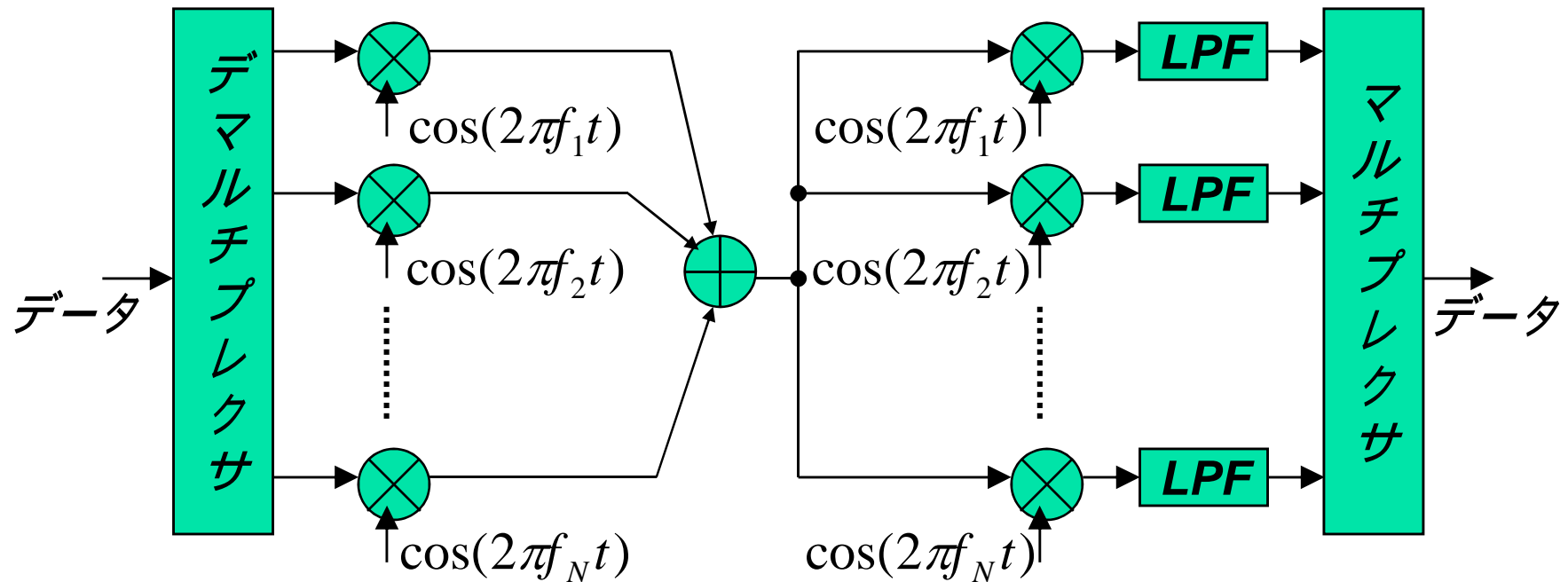
アナログテレビ放送 (VHF) の場合

チャンネル	周波数 (MHz)
1	90 - 96
2	96 - 102
3	102 - 108
4	170 - 176
5	176 - 182
6	182 - 188
7	188 - 194
8	192 - 198
9	198 - 204
10	204 - 210
11	210 - 216
12	216 - 222

- チャンネルセパレーションは6MHz
- 隣接チャンネルに干渉。

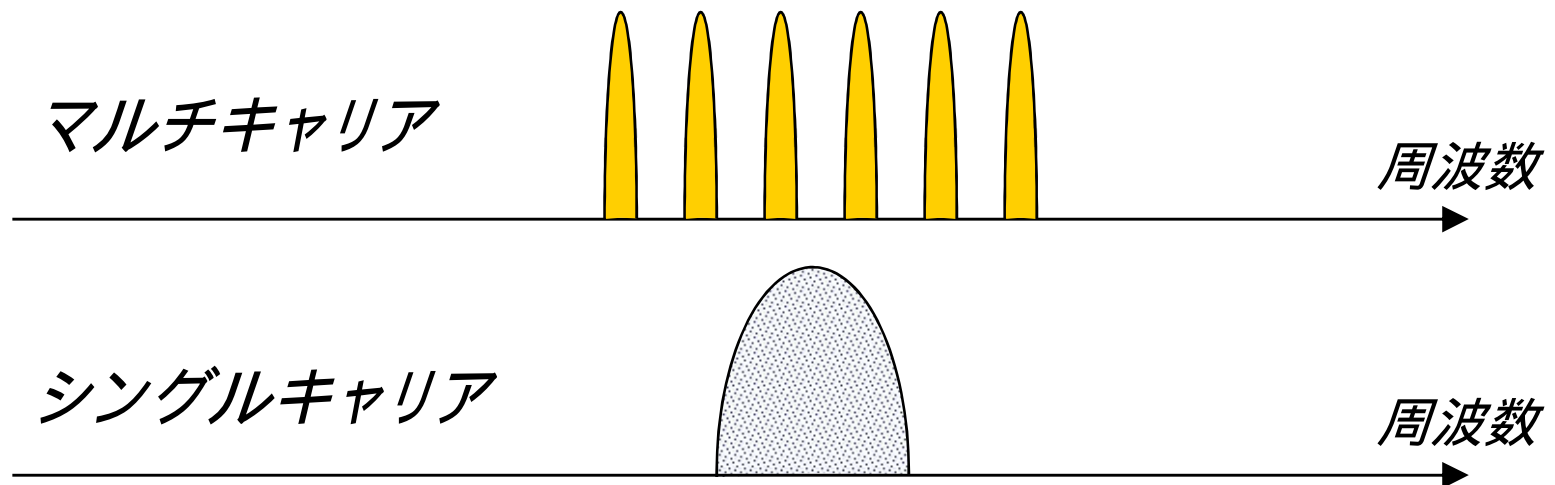
マルチキャリア変調

- 1つのデータを複数のキャリアに分散させて変調する。



マルチキャリアの周波数スペクトル

同じデータを送信した場合の比較



- マルチキャリアでは占有周波数幅はシングルと同じであるが、ガードバンドのための占有幅が大きくなる。
- スペクトルを重ねながら、キャリアを分離する方式がOFDMである。

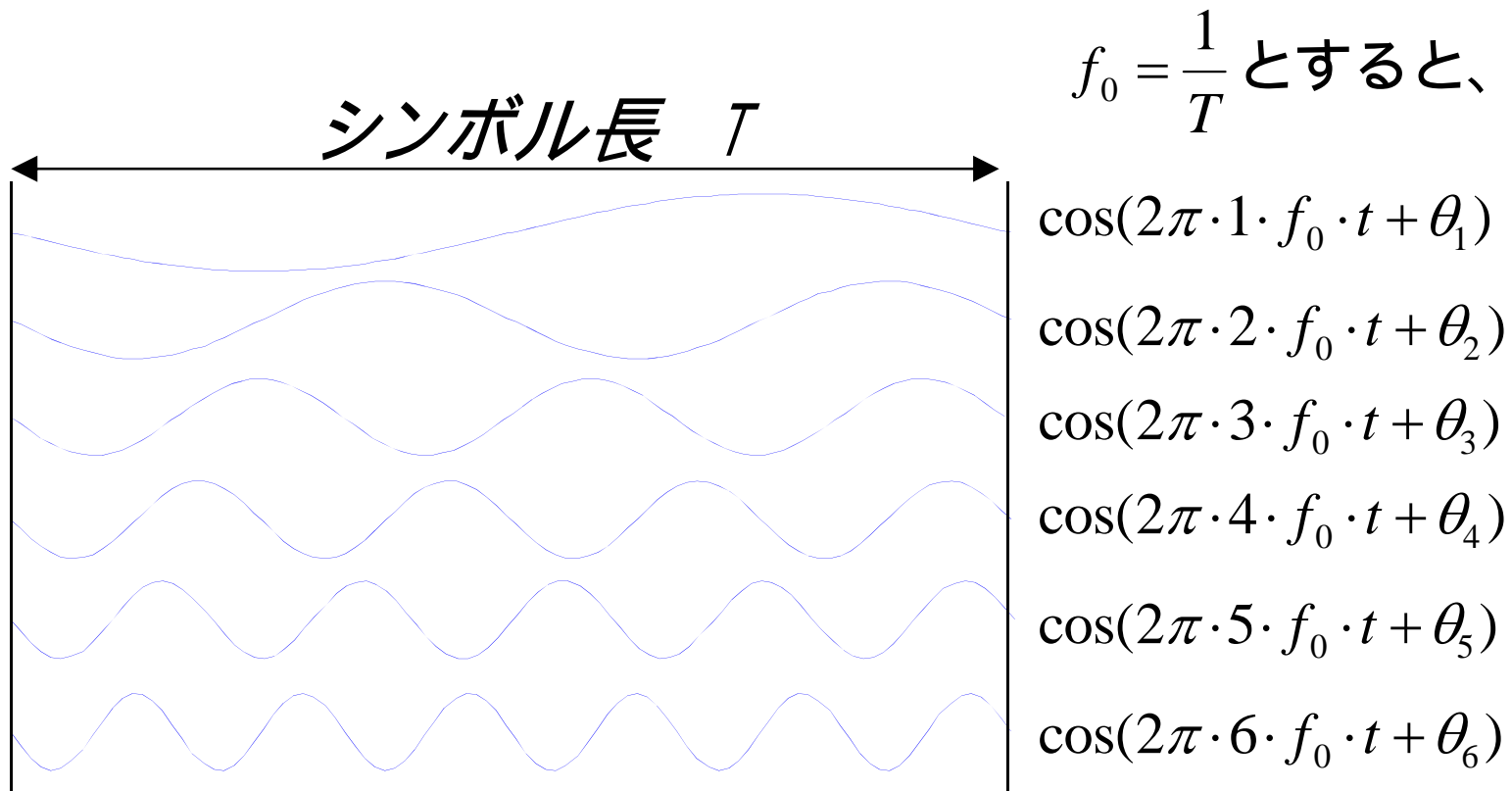


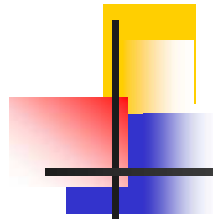
ここまでをまとめると

- OFDMはマルチキャリア変調のスペクトルをオーバーラップさせる方式。
- オーバーラップしても分離できるように、各キャリアに直交な関係を持たせる。
(直交に関してはこれから説明する。)
- 各々のキャリアはPSK,ASK,QAM等でデジタル変調される。
- しつこいが、デジタル変調とは正弦波のパラメータをデジタル値により変える変調。

OFDMの各キャリア

- シンボル長 T 区間で整数周期数の正弦波を考えると、周波数 nf_0 の正弦波ができ、これがOFDMのキャリアとなる。





正弦波の直交関係

- m, n は整数、 $T = 1/f_0$ の元で、以下のように正弦波の直交関係が成立する。

$$\int_0^T \cos(2\pi m f_0 t) \cdot \cos(2\pi n f_0 t) dt = \begin{cases} \frac{T}{2} & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

$$\int_0^T \sin(2\pi m f_0 t) \cdot \sin(2\pi n f_0 t) dt = \begin{cases} \frac{T}{2} & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

$$\int_0^T \cos(2\pi m f_0 t) \cdot \sin(2\pi n f_0 t) dt = 0$$

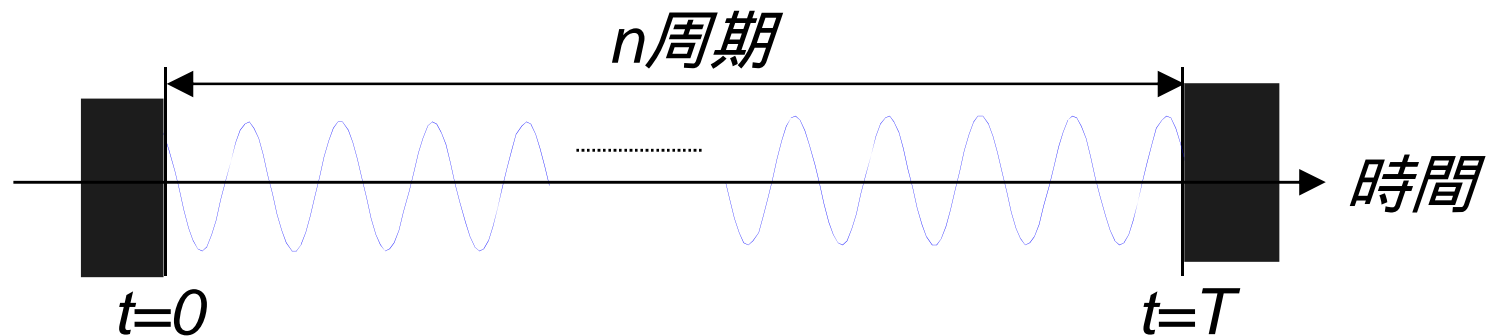
OFDM信号の基本波形

- キャリア周波数 nf_0 、シンボル長 $T=1/f_0$ の OFDM の基本構成要素は。

$$a_n \cdot \cos(2\pi nf_0 t) - b_n \cdot \sin(2\pi nf_0 t)$$

$$= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(2\pi nf_0 t + \phi_n), \quad \phi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$$

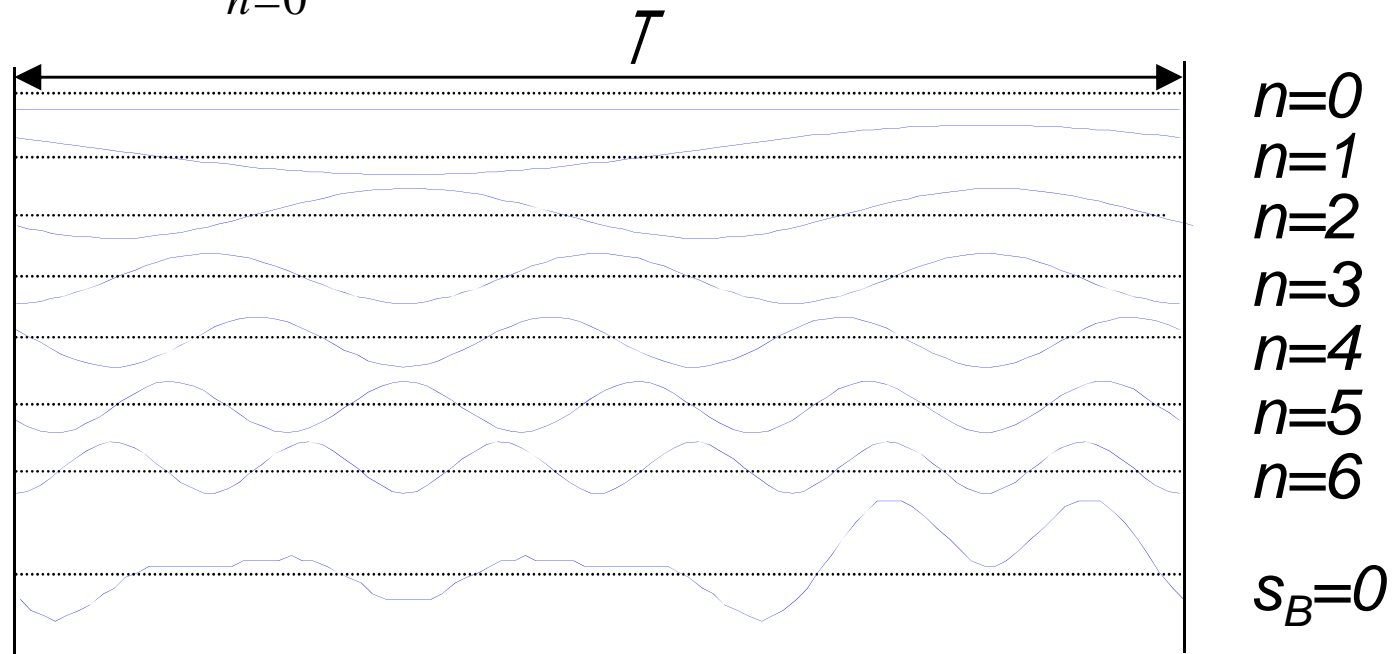
- 振幅および位相はデータにより変調される。

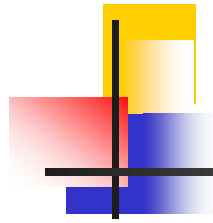


ベースバンドOFDM信号

- 基本要素の n の値を変えて、同じタイミングで N 個加えたものがベースバンドOFDM信号となる。

$$s_B(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \cos(2\pi n f_0 t) - b_n \sin(2\pi n f_0 t)\}$$

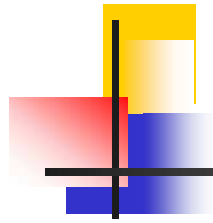




$s_B(t)$ からシンボル情報 a_n, b_n を得る

$$\begin{aligned} & \int_0^T s_B(t) \cdot \cos(2\pi k f_0 t) dt \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ a_n \int_0^T \cos(2\pi n f_0 t) \cos(2\pi k f_0 t) dt - b_n \int_0^T \sin(2\pi n f_0 t) \cos(2\pi k f_0 t) dt \right\} \\ &= \frac{T}{2} a_k \\ & \int_0^T s_B(t) \{-\sin(2\pi k f_0 t)\} dt = \frac{T}{2} b_k \end{aligned}$$

- 以上のように正弦波の直交性で a_n, b_n を得ることができる。
- 実際にはDFTを用いて効率的に計算する。
- N はLANなどでは ~ 64 、TV放送では数千



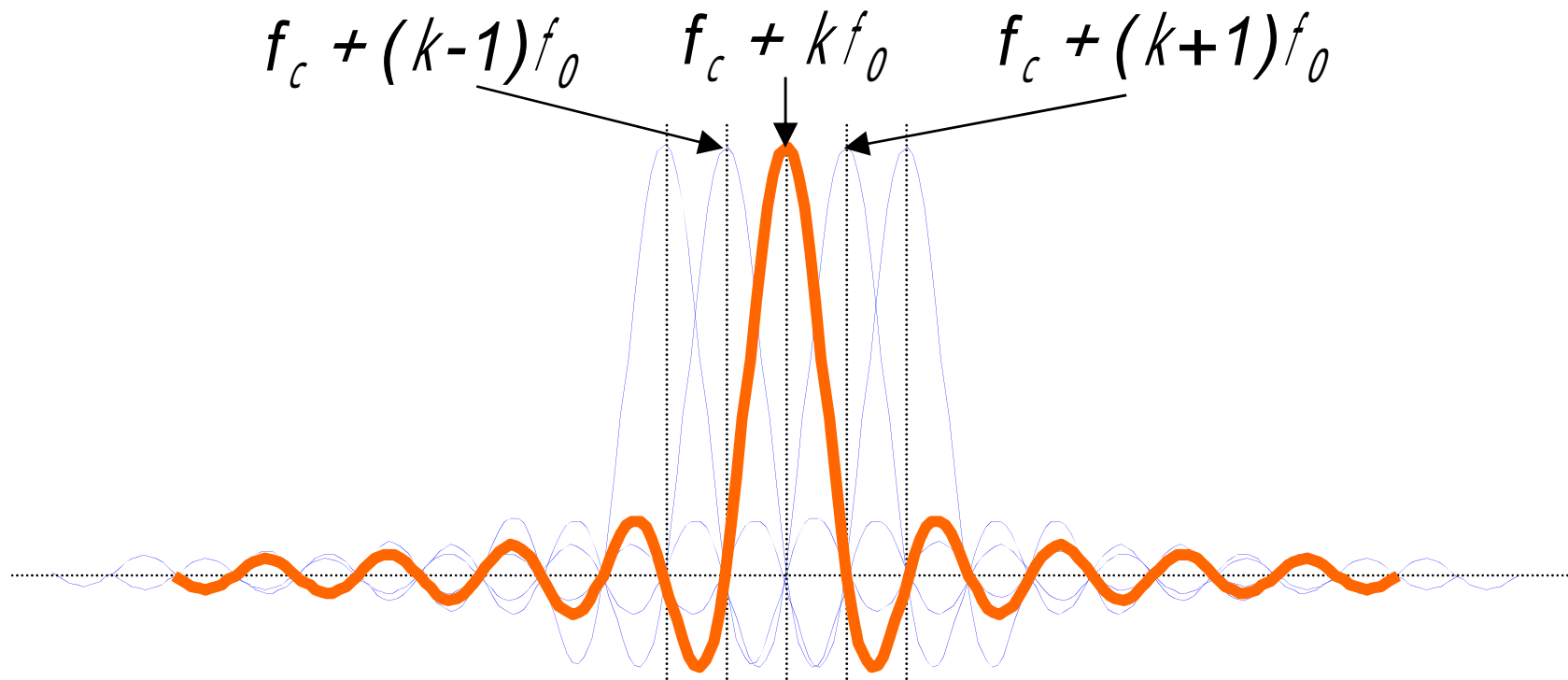
パスバンドOFDM信号

- 実際にOFDMは周波数変換されて搬送波帯域で伝送され、以下のように表される。

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[a_n \cos\{2\pi(f_c + nf_0)t\} - b_n \sin\{2\pi(f_c + nf_0)t\} \right]$$

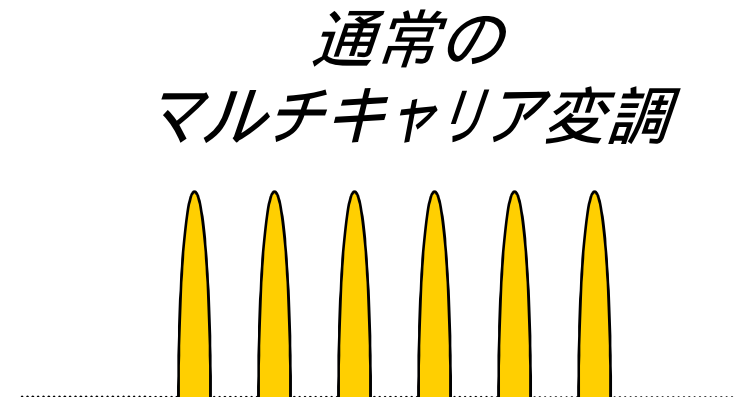
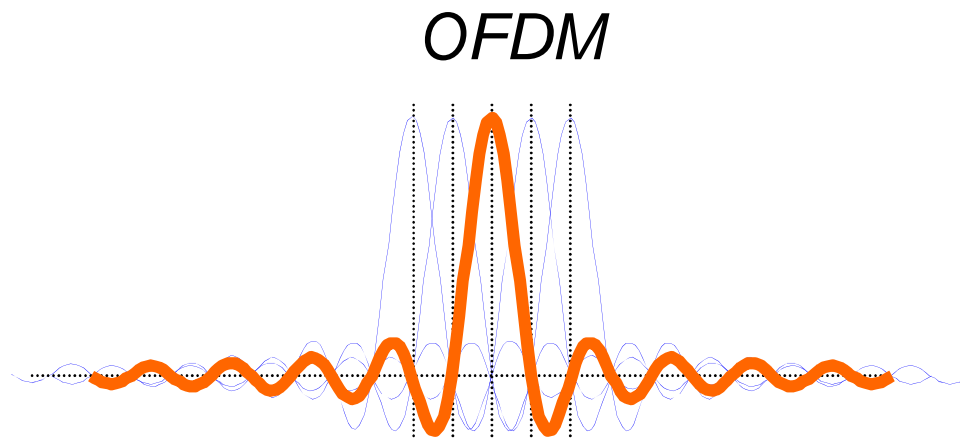
OFDMのスペクトル

- 各キャリアは区間 $T (=1/f_0)$ の周波数 $(f_c + kf_0)$ 正弦波で、スペクトルは間隔 f_0 で振動し、他のキャリア周波数で大きさは零となる。



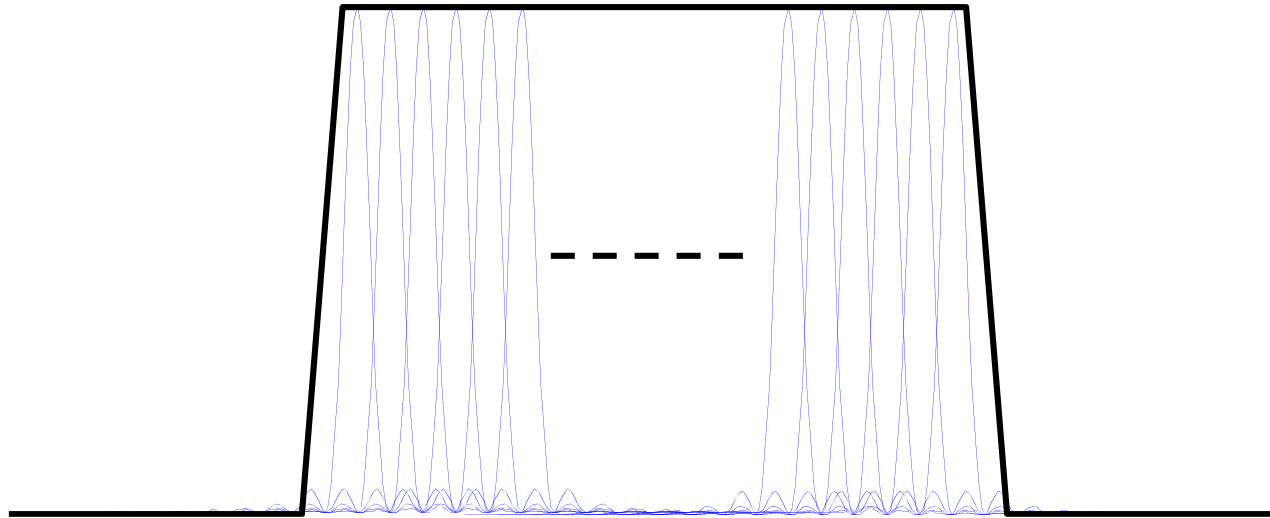
スペクトルの比較

- OFDMではスペクトルは互いに重なっており、通常のマルチキャリア変調方式とは異なっている。
- 周波数帯域の有効利用が可能。



OFDMの電力スペクトル

- 実際のOFDM電力スペクトルはすべてのキャリアを並べたものになり、矩形に近く周波数の有効利用が可能。





OFDM信号の生成

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[a_n \cos\{2\pi(f_c + nf_0)t\} - b_n \sin\{2\pi(f_c + nf_0)t\} \right]$$

- 上記信号を直接的に生成するには、
N個のデジタル変調器と
N個の正確なキャリア波形生成器が必要で
非現実的。
- 1971年に離散フーリエ変換DFTを用いる方法
が提案され、現実的になった。



OFDM信号の生成(2)

- 以下のように複素等価ベースバンド信号 $u(t)$ を定義する。

$$s_B(t) = \text{Re}[u(t)]$$

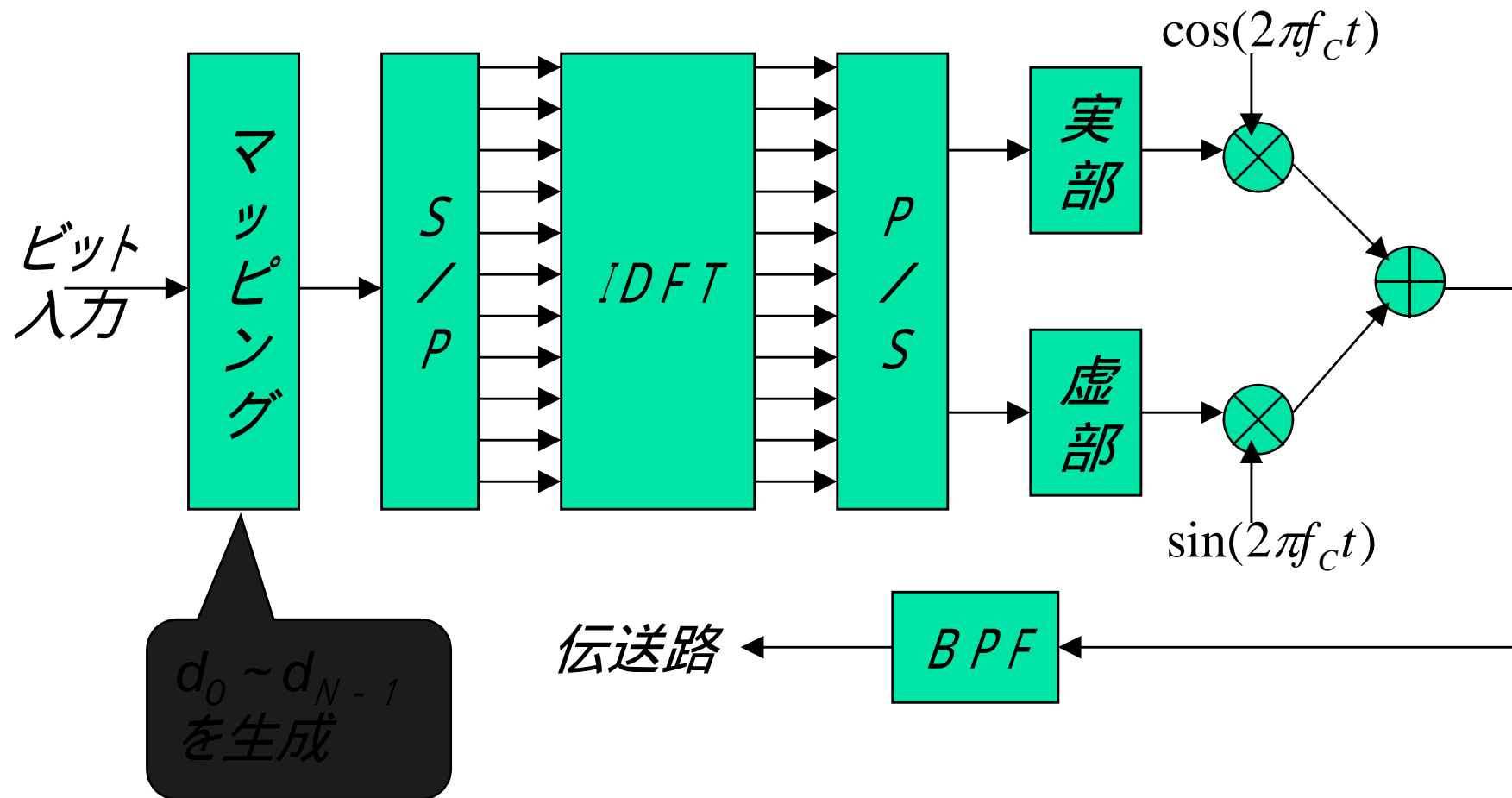
$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d_n \cdot e^{j2\pi n f_0 t}, \quad d_n = a_n + j b_n$$

- これをシンボル区間 T で N 点のサンプリングを行う。

$$\begin{aligned} u\left(\frac{k}{Nf_0}\right) &= \sum_{n=0}^{N-1} d_n \cdot e^{j2\pi n f_0 \frac{k}{Nf_0}} = \sum_{n=0}^{N-1} d_n \cdot e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} d_n \cdot \left(e^{j\frac{2\pi}{N}}\right)^{nk} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \end{aligned}$$

N 個の複素データシンボル d_n を逆離散フーリエ変換し、連続信号にすれば $u(t)$ を生成できる。

OFDM変調器の構成





OFDMの復調

- 搬送波帯信号 $s(t)$ に $\cos(2\pi f_c t)$ を掛けて、LPFを通すと、以下のようにOFDMベースバンド信号が得られる。

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [a_n \cos\{2\pi(f_c + nf_0)t\} - b_n \sin\{2\pi(f_c + nf_0)t\}]$$

$$s(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \cos(2\pi n f_0 t) - b_n \sin(2\pi n f_0 t)\} = \frac{1}{2} s_I(t)$$

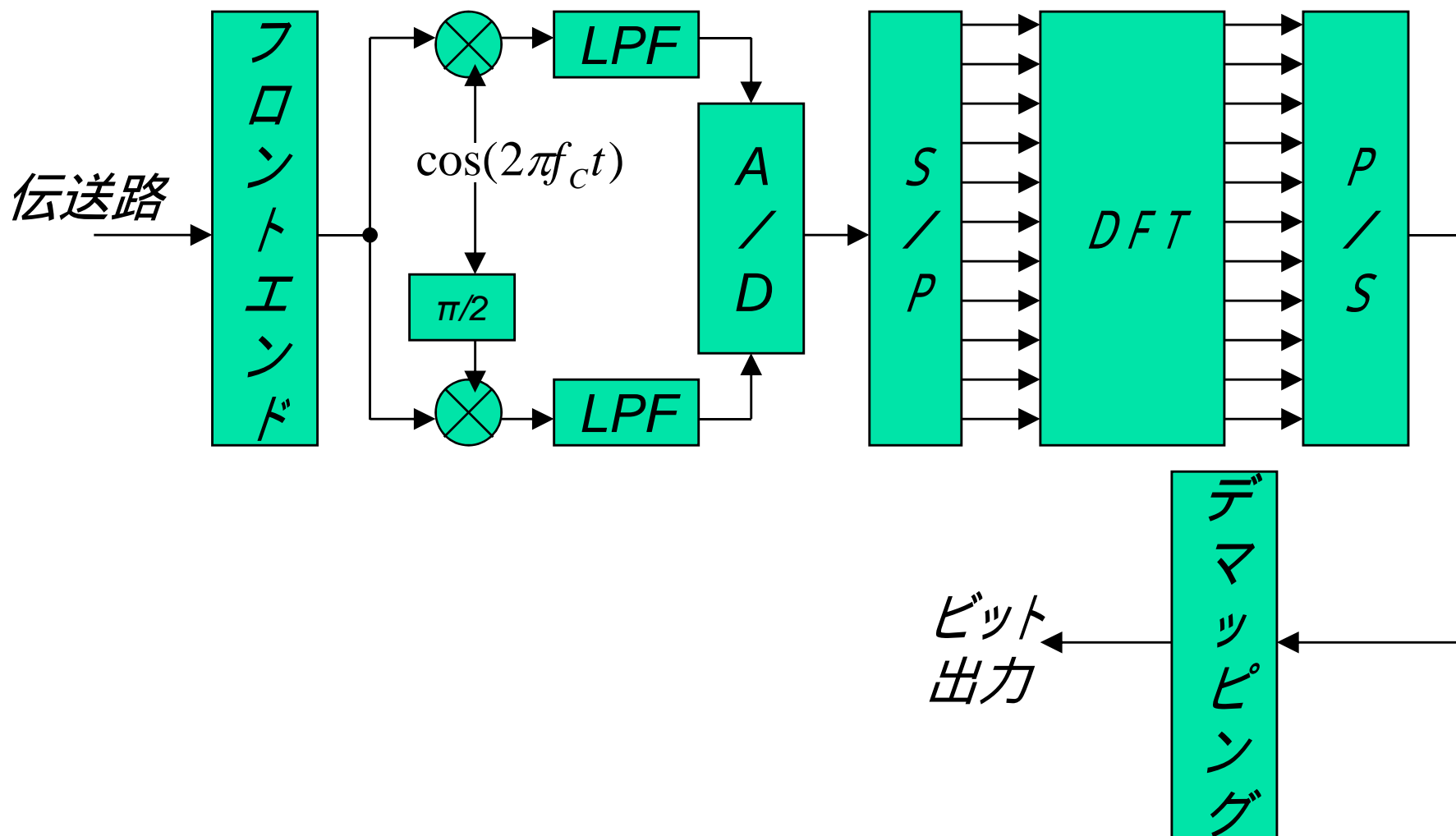
- 復調でもDFT処理を行うために、以下のような計算もする。

$$s(t) \cdot \{-\sin(2\pi f_c t)\} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \sin(2\pi n f_0 t) + b_n \cos(2\pi n f_0 t)\} = \frac{1}{2} s_Q(t)$$

- 以上より $u(t)$ が求まり、サンプリング後DFTで d_n が求まる。

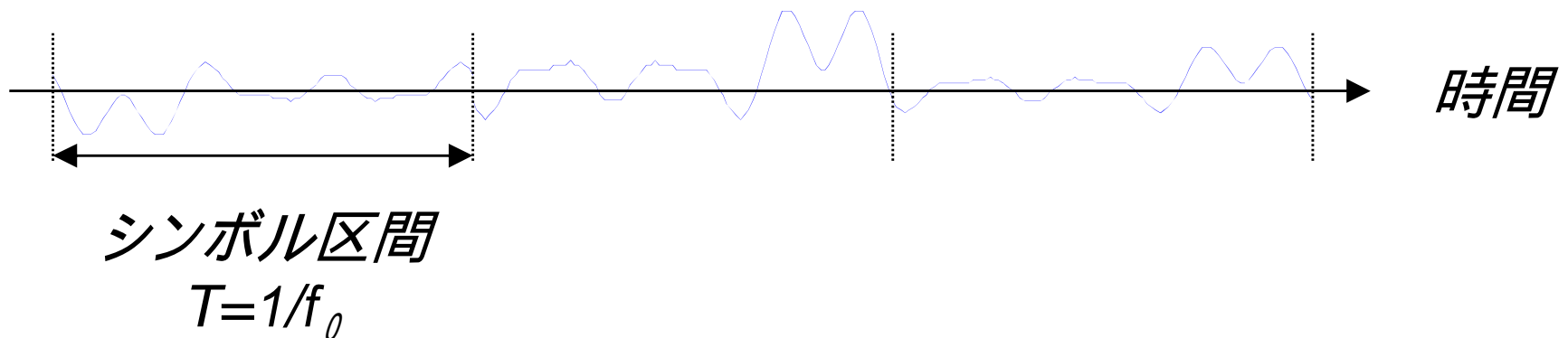
$$u(t) = s_I(t) + js_Q(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d_n \cdot e^{j2\pi n f_0 t}$$

OFDM復調器の構成



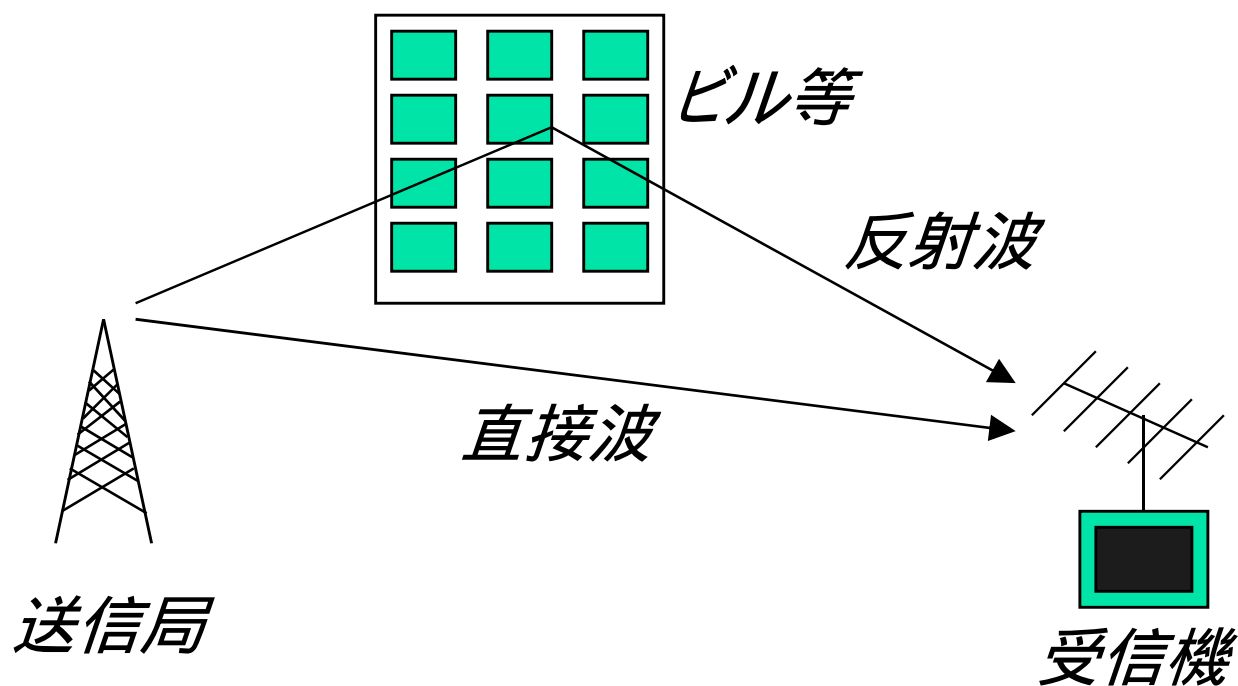
ここまでのOFDM信号のまとめ

- シンボル区間ごとにある波形を送る。
- この波形は多数の直交する正弦波の和。
- 各正弦波はQAM、PSK等で変調される。
- 多数の直交する正弦波の生成にIDFT,受信にDFTを用いる。

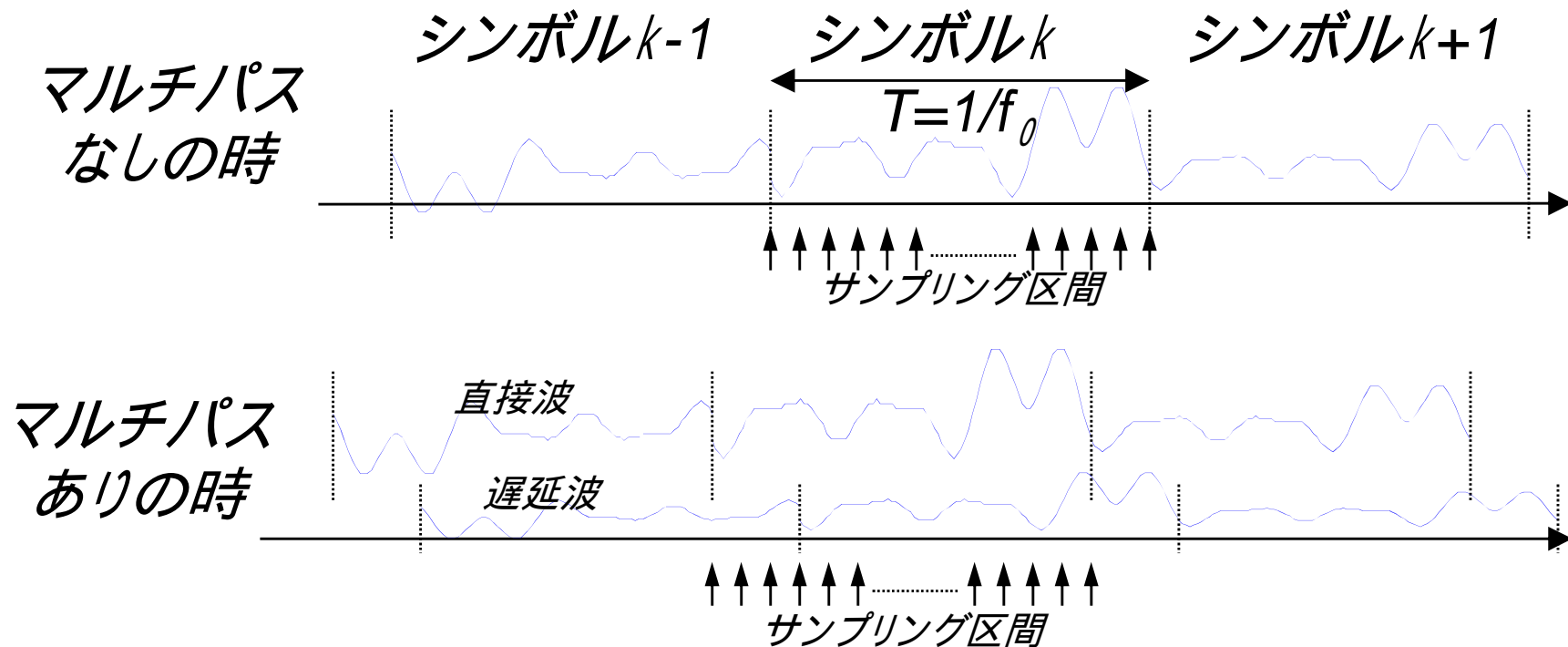


マルチパス

- 現実には無線伝送ではひずみが発生する。
その典型的なのがマルチパスひずみである。
(アナログTV方法でのゴースト)

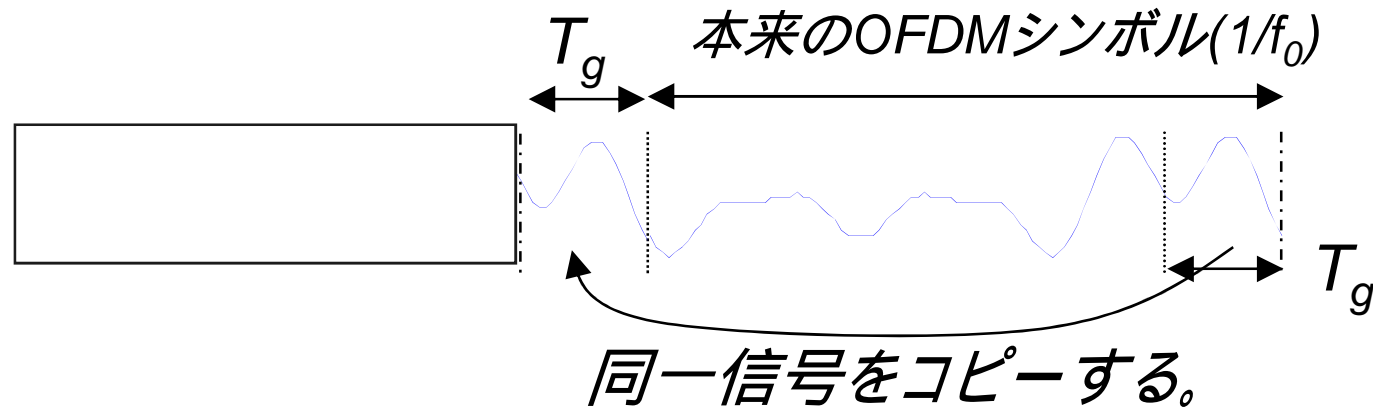


マルチパスによる悪影響

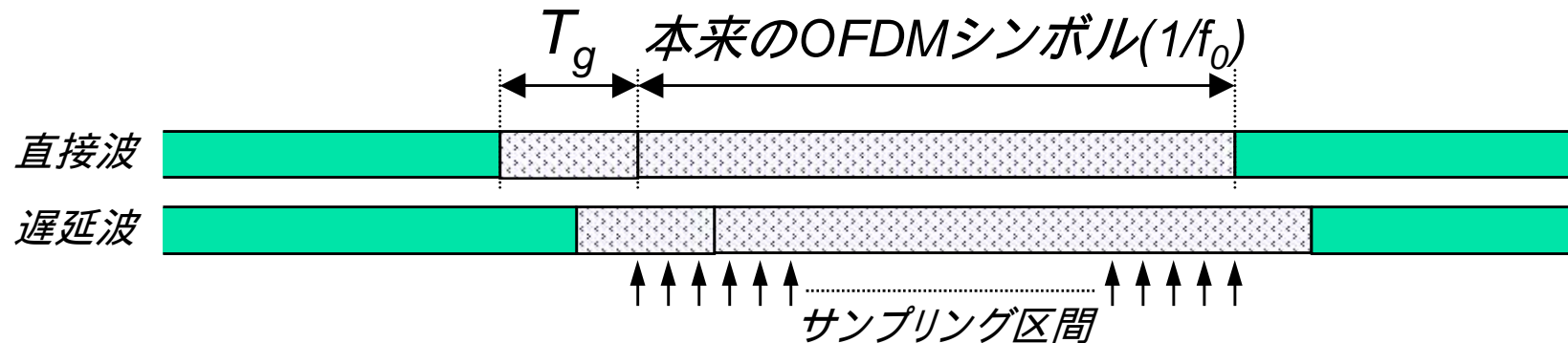


- 遅延波の部分は $k - 1$ シンボルの影響を受け、シンボル長で直交するOFDMの条件がくずれる。

ガードインターバルの付加

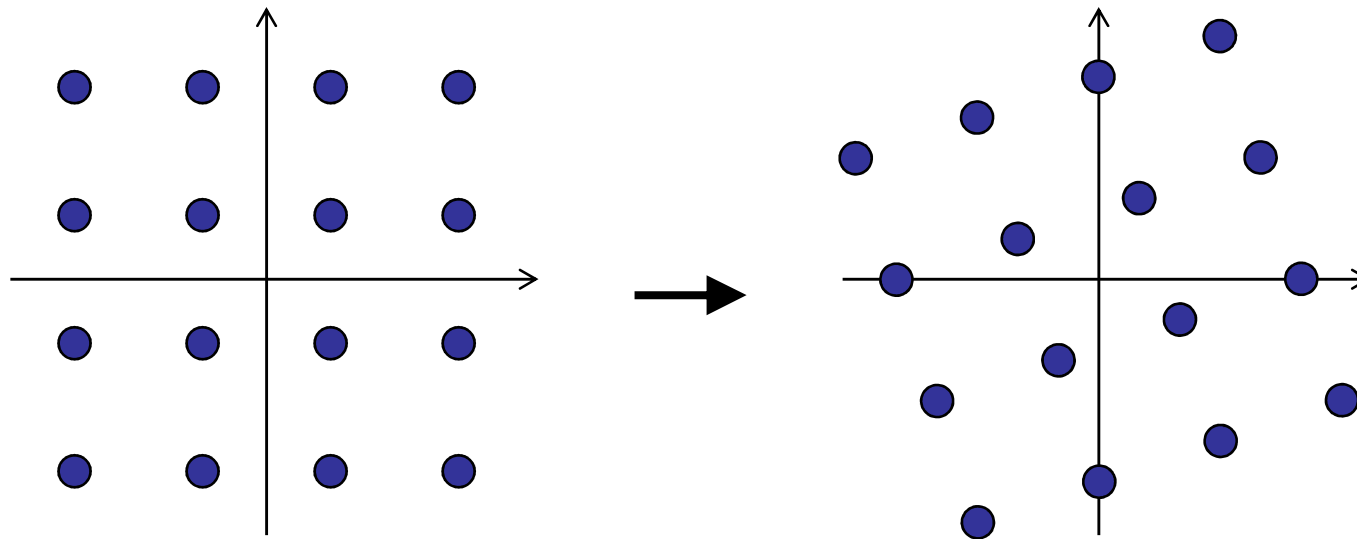


- $1/f_0$ の何分の一かのガードインターバルを付加することで、 T_g 以下の遅延での直交性を保つ。

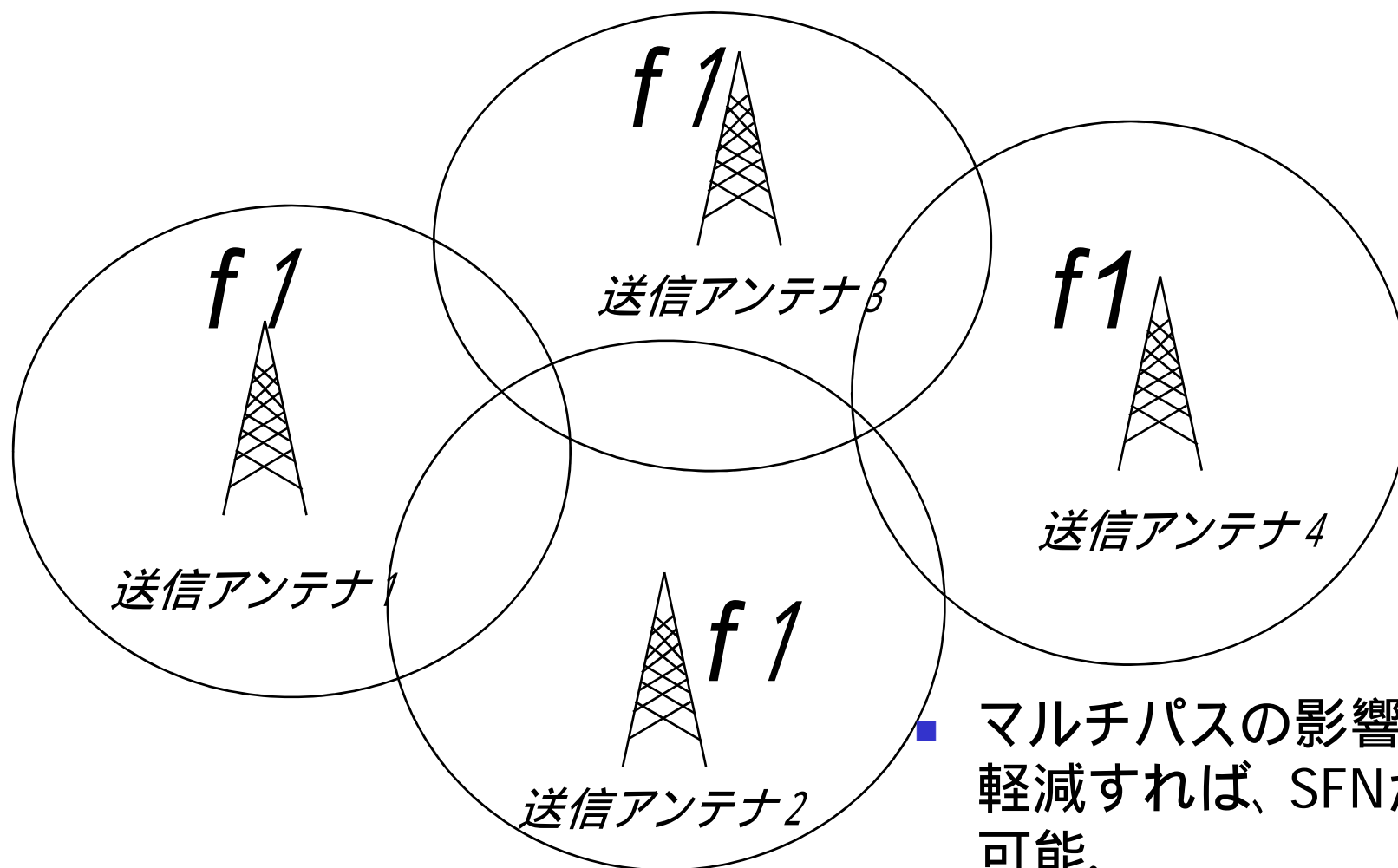


マルチパスのシンボルへの影響

- ガードインターバルによって、前時間のシンボルからの干渉は除け、直交性を保てるが、シンボルの振幅と位相ひずみは存在する。
- このひずみは等価処理により修正が必要である。



単一周波数ネットワークSFN



■ マルチパスの影響を軽減すれば、SFNが可能。



OFDMまとめ

- デジタル変調から、OFDMの概要を解説した。
- OFDMの特徴
 - * スペクトルが矩形に近く、周波数の有効利用
 - * ガードインターバルの併用で耐マルチパス
 - * キャリアが多重であり、データの階層化容易
 - * SFNが実現できる
 - * 装置は複雑でLSIのがんばりが必要
- 実際のシステム設計にはエラー訂正、同期、等価等もっと複雑な内容が必要である。