

筑波大学
University of Tsukuba

MRIハードウェア：
デジタルトランシーバーの
仕組みと実際

筑波大学数理物質系 物理工学域
巨瀬 勝美

講演の概要

1. はじめに
2. MRIトランシーバーとは？
3. アナログトランシーバーの仕組み
4. デジタルトランシーバーの仕組み
5. 撮像によるトランシーバーの比較
6. むすび

講演の背景:なぜトランシーバー？

MRIハードウェアの発展:1980年代~2010年代

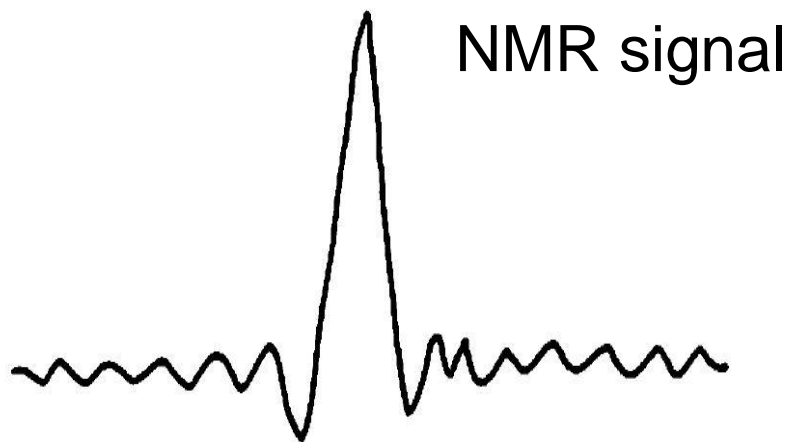
- 磁石 $0.15\text{T} \rightarrow 1.5\text{T} \rightarrow 3\text{T} \rightarrow 7\text{T}?$
- グラジエントコイル $1\text{mT/m} \rightarrow 10\text{ mT/m} \rightarrow \sim 50\text{ mT/m}$
- RFコイル $1\text{CH} \rightarrow 2\text{CH(QD)} \rightarrow 8\text{CH} \rightarrow 32\text{CH}$
- トランシーバー $\text{Analog} \rightarrow \text{Digital (1990年代~)}$

これにより、アナログトランシーバーを前提として書かれているMRIの教科書は、一部書き換える必要性がある。

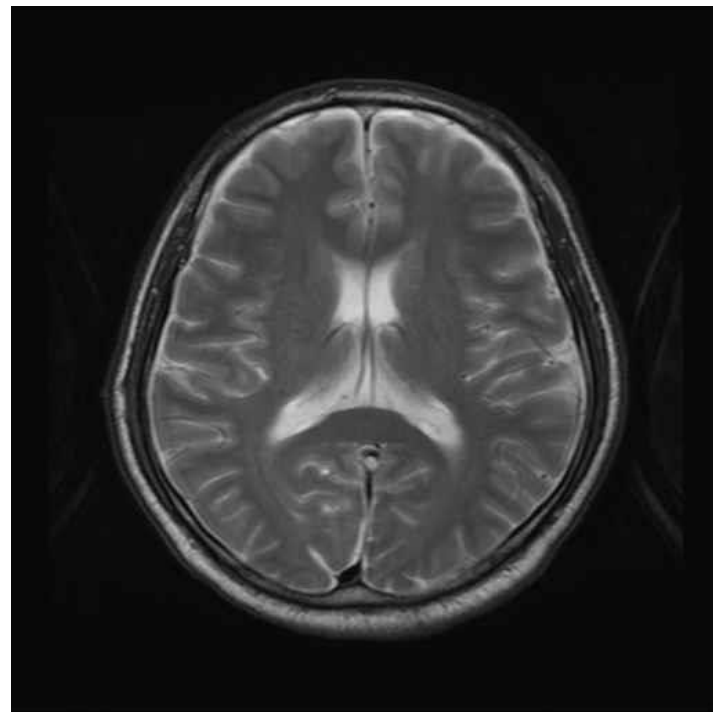
たとえば、リード方向のサンプリング点数は、リード方向の画素数に等しいとされているが、デジタルトランシーバーでは、この議論は通用しない。この事情を解き明かすのが、本講演の目的である。

サンプリング点数=リード方向の画素数？

現在の教科書



FT



N



N

サンプリング点数とリード方向の画素数の関係

講演の概要

1. はじめに
2. MRITランシーバーとは？
3. アナログトランシーバーの仕組み
4. デジタルトランシーバーの仕組み
5. 撮像によるトランシーバーの比較
6. むすび

トランシーバーの基礎的なこと

トランシーバー(**transceiver**)とは、**transmitter**(送信機)と**receiver**(受信機)を合体させたもので、一般には、携帯型の無線通話機として知られている。



一方、MRIでは、**送信機**は、RFパルス信号を**電力増幅**して送信コイルに供給するものを指し、RFパルスを作り出す部分は、送信機とは呼ばれず、**変調器**(modulator)などと呼ばれる。

そこで、MRIでは、**変調器と検波器**(detector)を合わせたものをトランシーバーと呼んでいる。

トランシーバーの実際



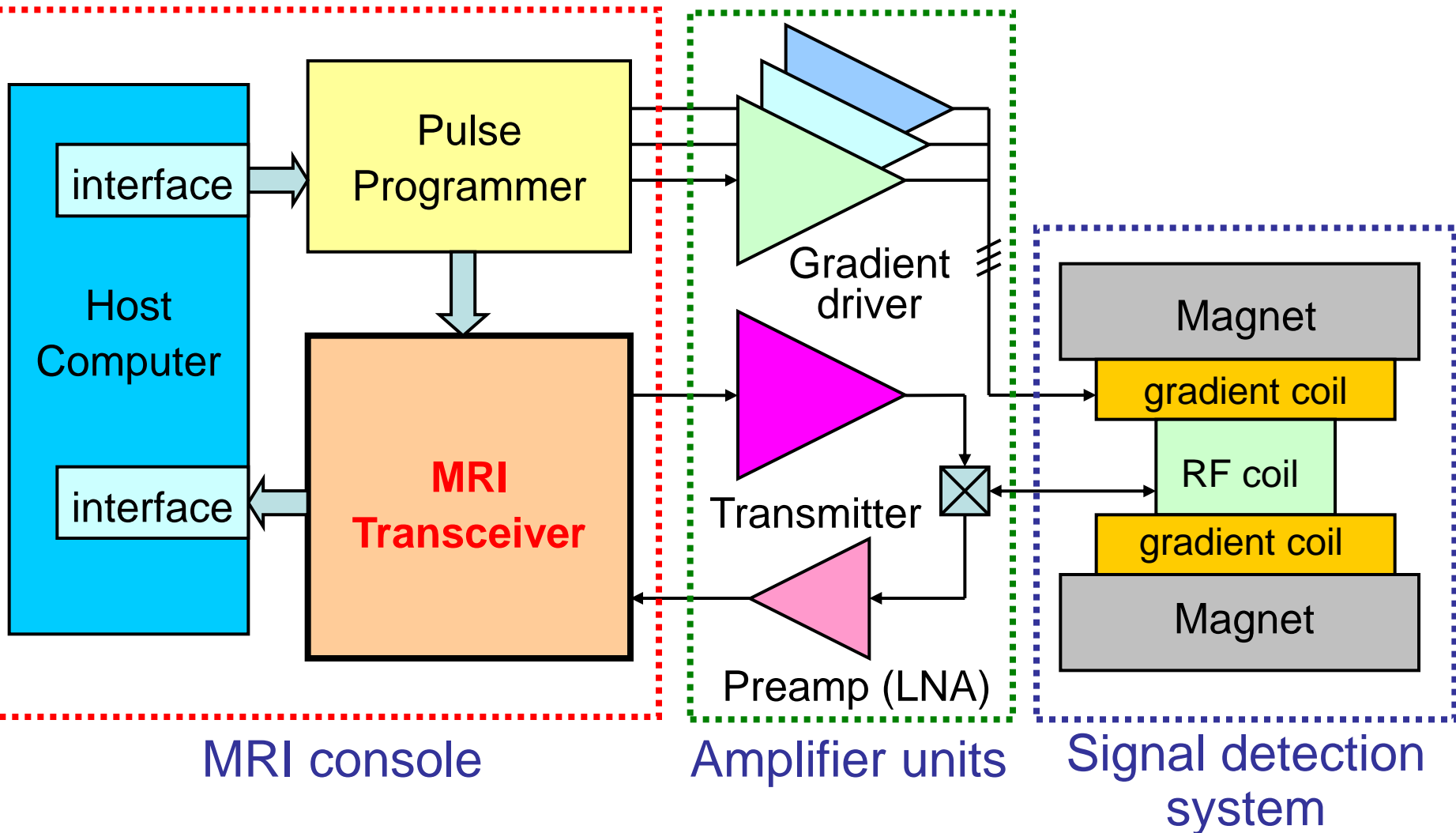
アナログトランシーバー



デジタルトランシーバー

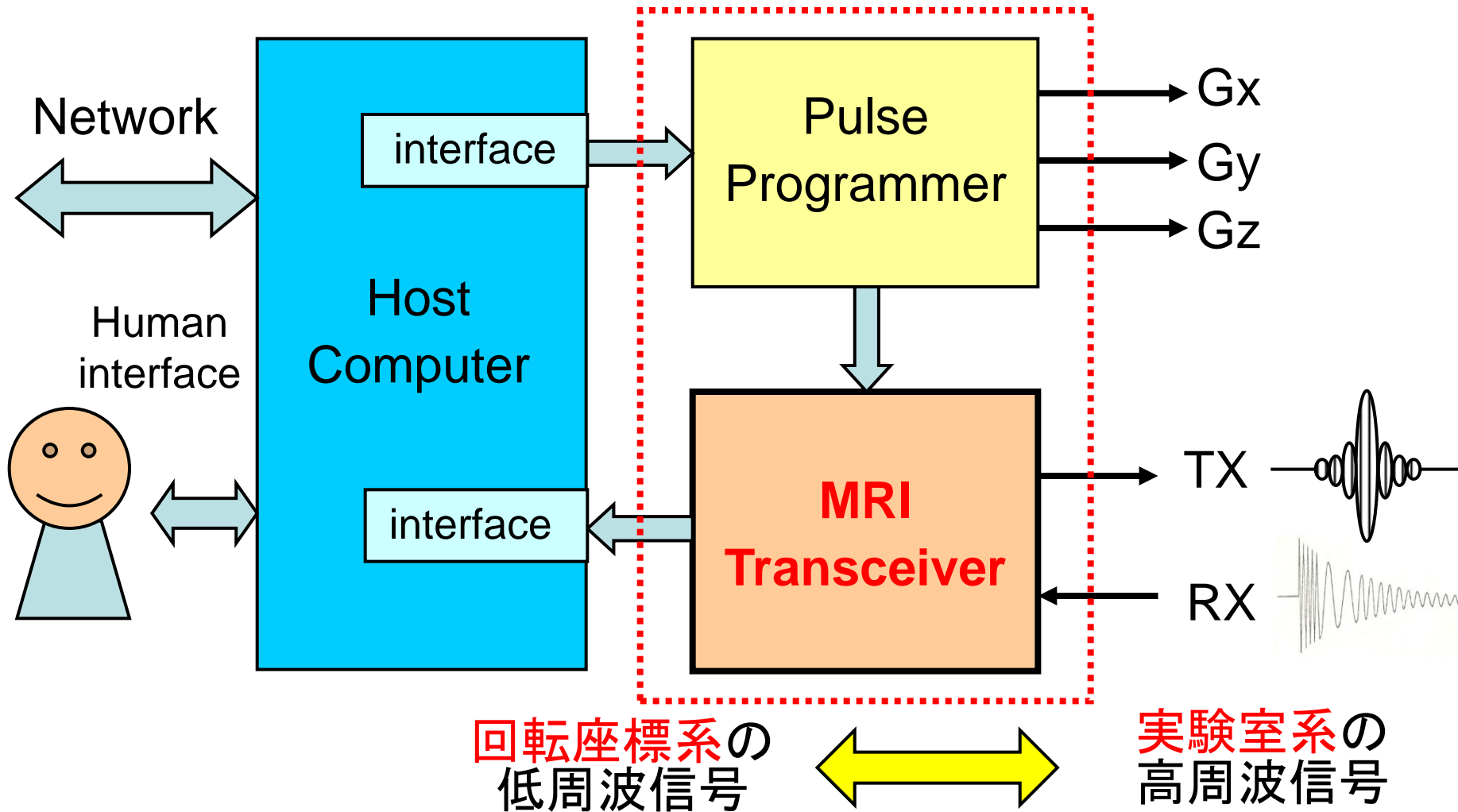
MRIシステムの**一つの重要なユニット**として組み込まれている。

MRIの構成とトランシーバーの位置づけ



トランシーバーは、MRIコンソールの中核的位置を占める。

トランシーバーの位置づけと役割

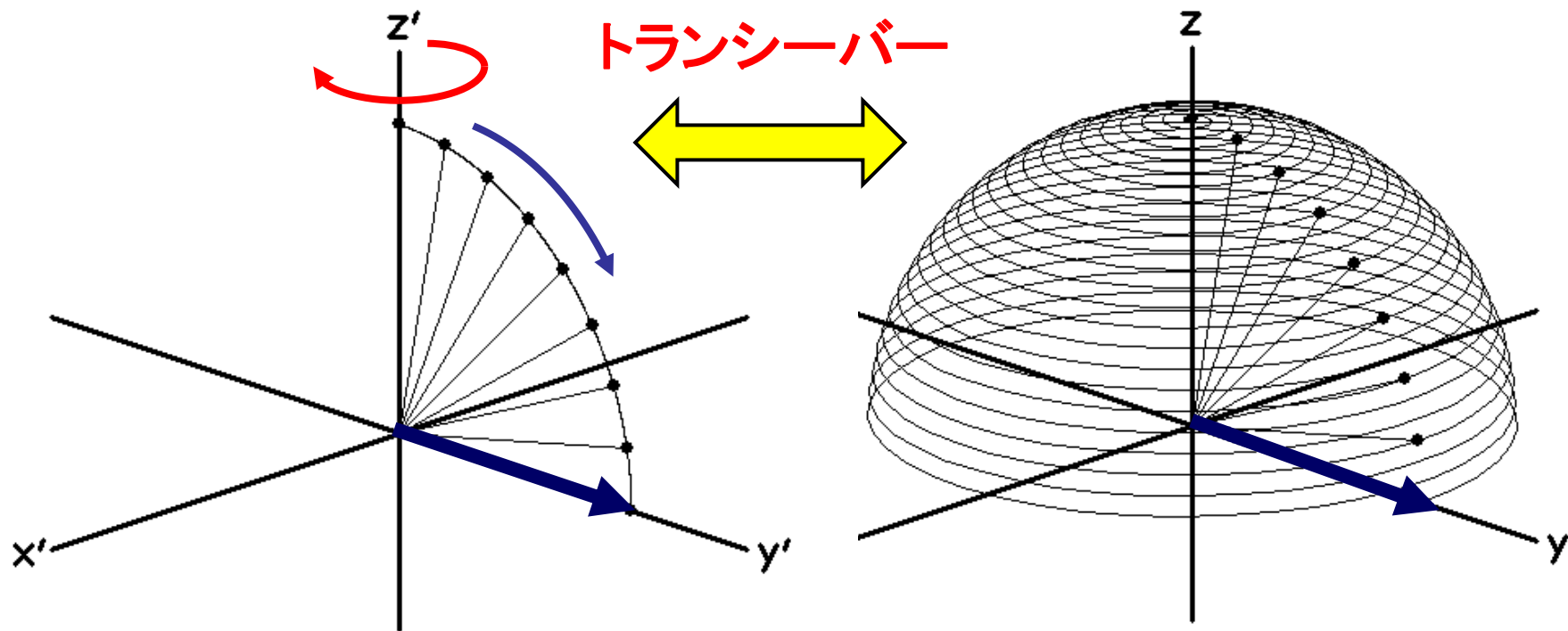


トランシーバーは、**実験室系のアナログ信号** (ラーモア周波数の信号) を、**回転座標系における(デジタル)信号** に変換する役割を担っている。

トランシーバーの役割：回転系 ↔ 実験室系

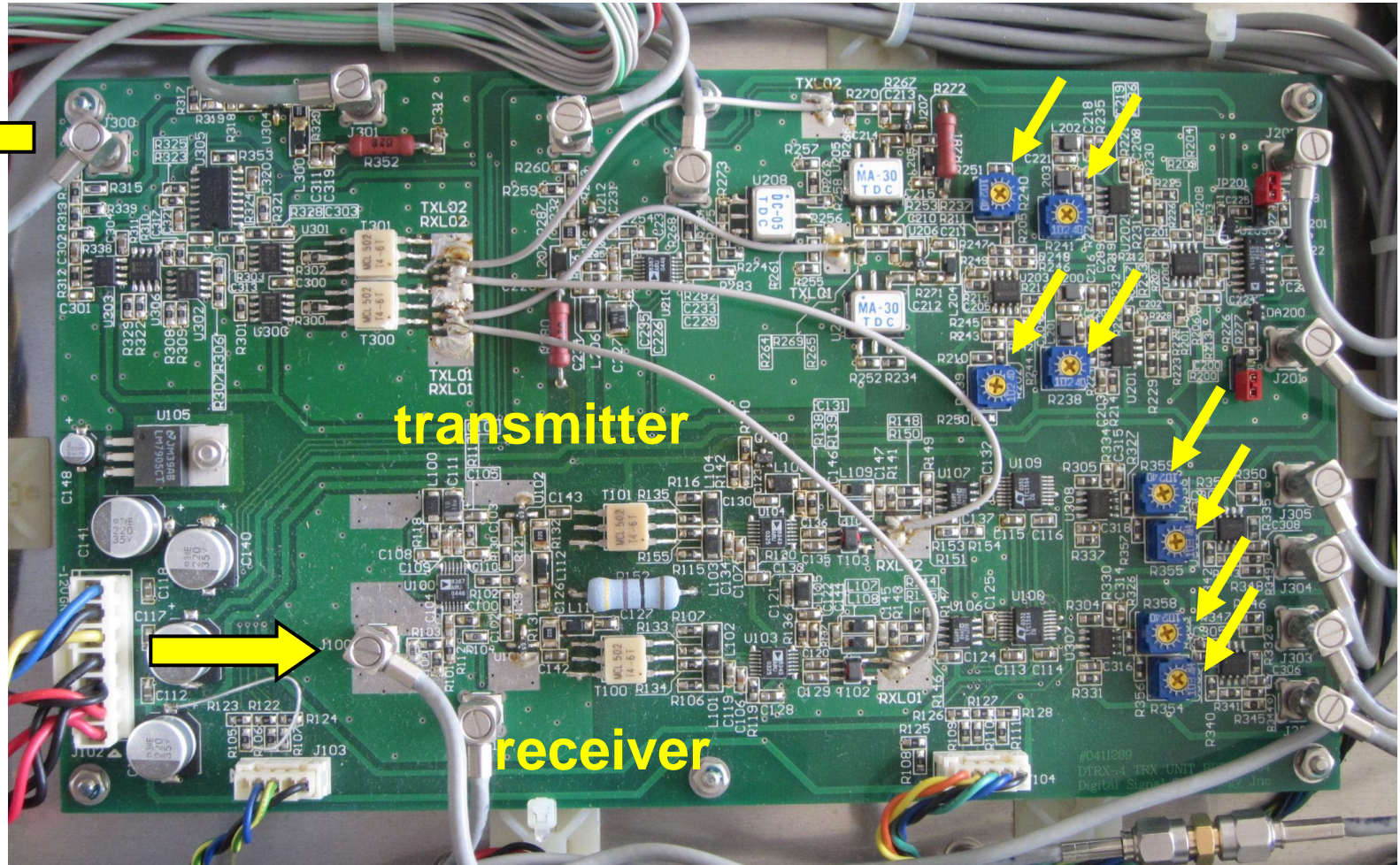
回転座標系 (低周波)

実験室系 (RF)



トランシーバーは、回転座標系の信号と実験室系の信号を変換する

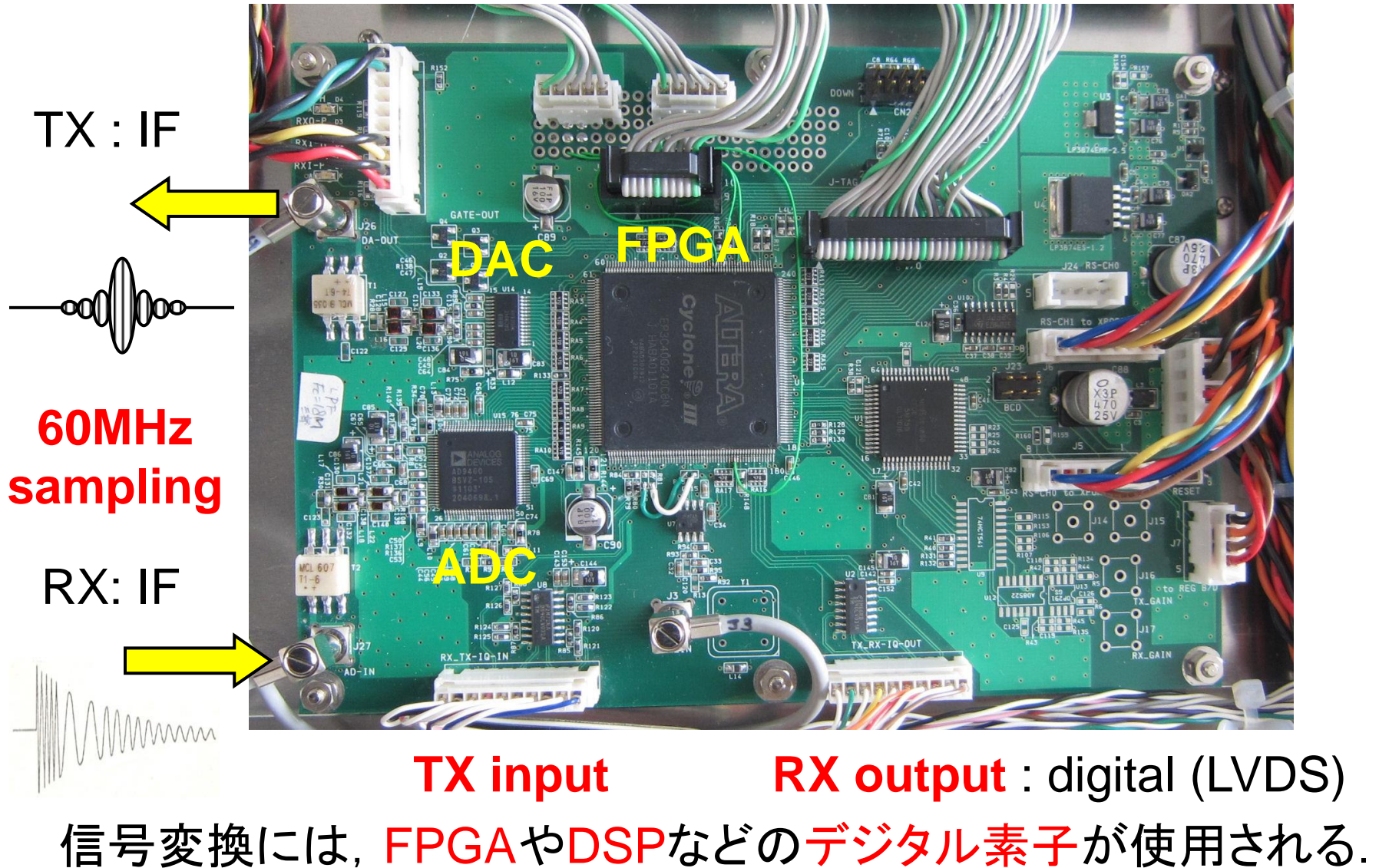
アナログトランシーバー



IQ アナログ入力
アナログ出力

アナログ素子を用いて信号変換を行う. IとQのチャンネル(回転座標系のxとy)間のバランスを確保するために, 微調整が必要.

デジタルトランシーバー



デジタルトランシーバーとは？

デジタルトランシーバーは、アナログトランシーバーにおいてアナログ素子で行われている①変調, ②検波, ③フィルタリングなどの操作を, デジタル回路(演算)で行う.
(デジタル回路:FPGA, デジタル演算:DSP)

このため,

○デジタルトランシーバーでは, 高周波信号をデジタル化するのに対し,

○アナログトランシーバーでは, 検波とフィルタリングを行った後の, 低周波信号をデジタル化する.

デジタルトランシーバーの優位性

デジタルトランシーバーの優位性:

- (1) IとQの(回転座標系のxとy)チャンネル間の**振幅のバランスと直交性**が原理的に完全に達成できる.
- (2) 低周波($1/f$)ノイズや**DCオフセット**の影響がない.
- (3) **ダイナミックレンジ**が広い(サンプリング周波数比の平方根に比例して量子化ノイズが減少)
- (4) **アナログ回路の不完全性**(非線形性, ドリフト)の影響が少ない(全くないわけではない)

アナログトランシーバーでも, うまく作れば, デジタルトランシーバーと同等の性能を実現することができる.

デジタルトランシーバーの欠点？

デジタルトランシーバーの欠点：

- (1) デジタル処理が**ブラックボックス**になっており、ユーザーからの理解等が困難.
- (2) 処理すべき**データ量が膨大**(アナログトランシーバーの**1000倍のオーダー**)となるため、その対策(decimationなど)が必要.

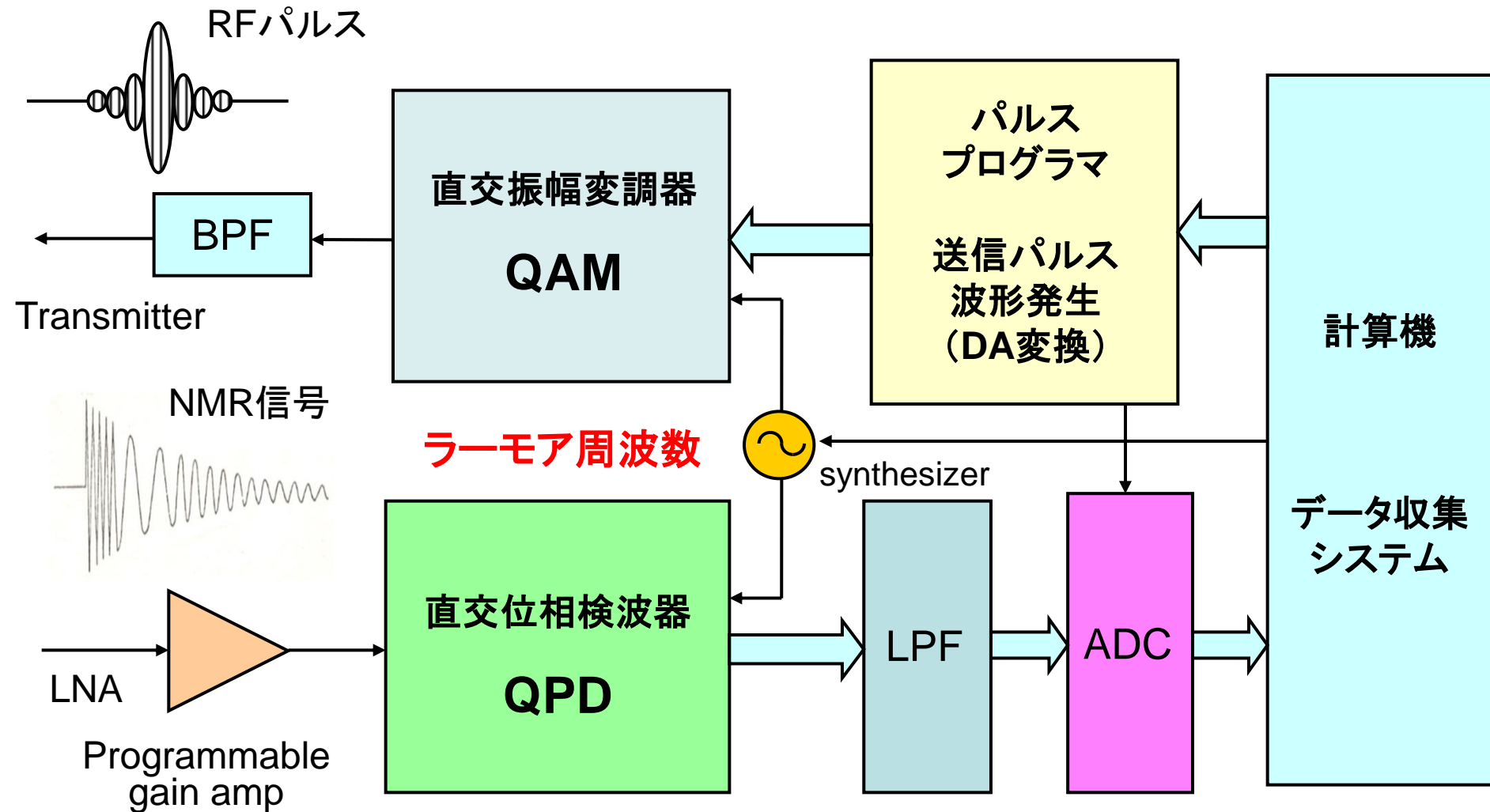
この章の要約

1. トランシーバーは、**実験室系の高周波信号**と、**回転座標系の低周波信号**との間を変換する役割をもつ。
2. デジタルトランシーバーは、アナログ素子の役割を、デジタル回路(演算)で実現する。
3. デジタルトランシーバーでは、**高周波でAD/DA変換**が行われ、アナログトランシーバーでは、**低周波でAD/DA変換**が行われる。このため**取得されるデータ量は、1000倍以上異なる**。
4. デジタルトランシーバーは、アナログトランシーバーに対して、**多くの優位性**を持つ。

講演の概要

1. はじめに
2. MRITランシーバーとは？
3. アナログトランシーバーの仕組み
4. デジタルトランシーバーの仕組み
5. 撮像によるトランシーバーの比較
6. むすび

アナログトランシーバーの原理

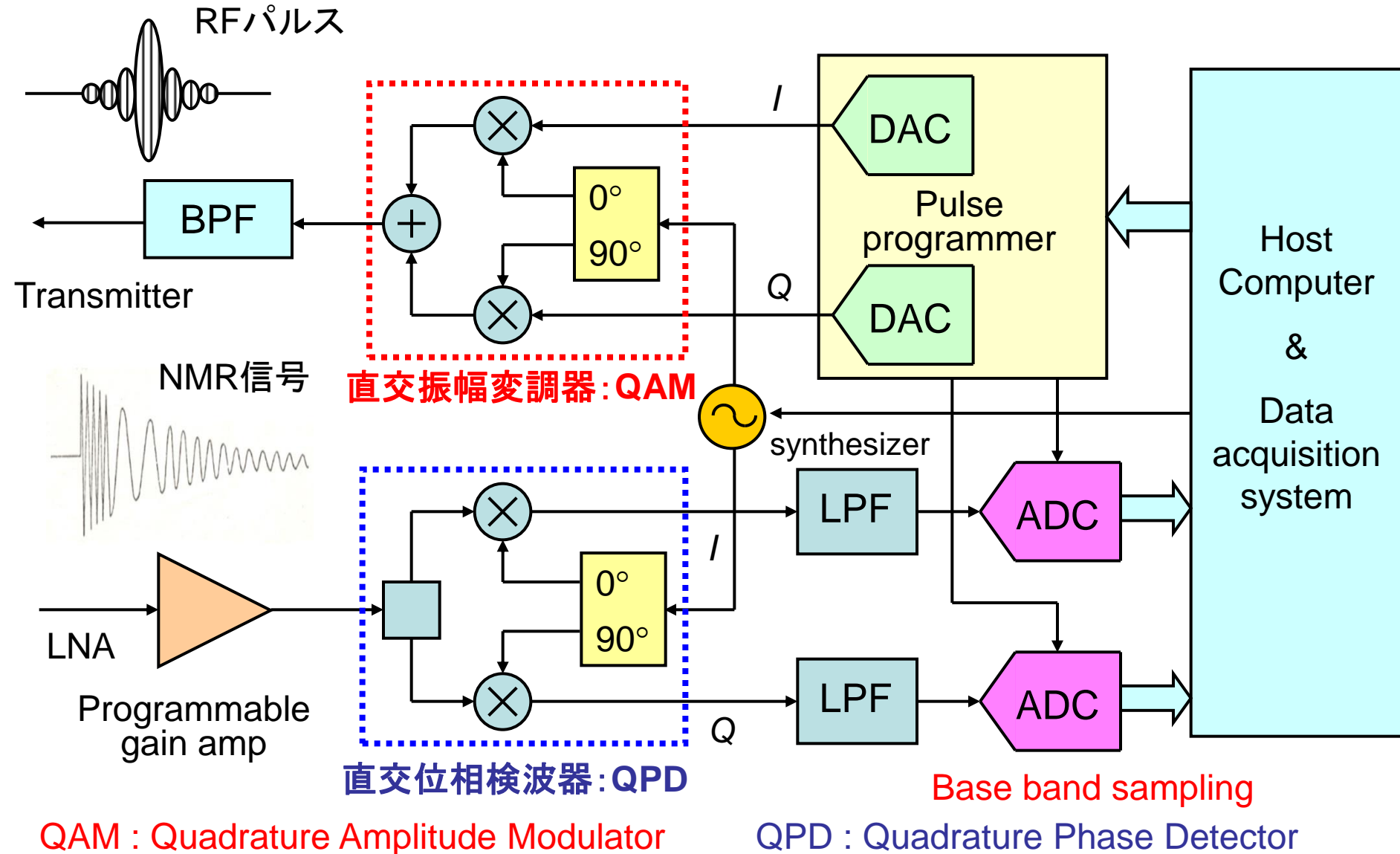


QAM : Quadrature Amplitude Modulator

QPD : Quadrature Phase Detector

Base band sampling

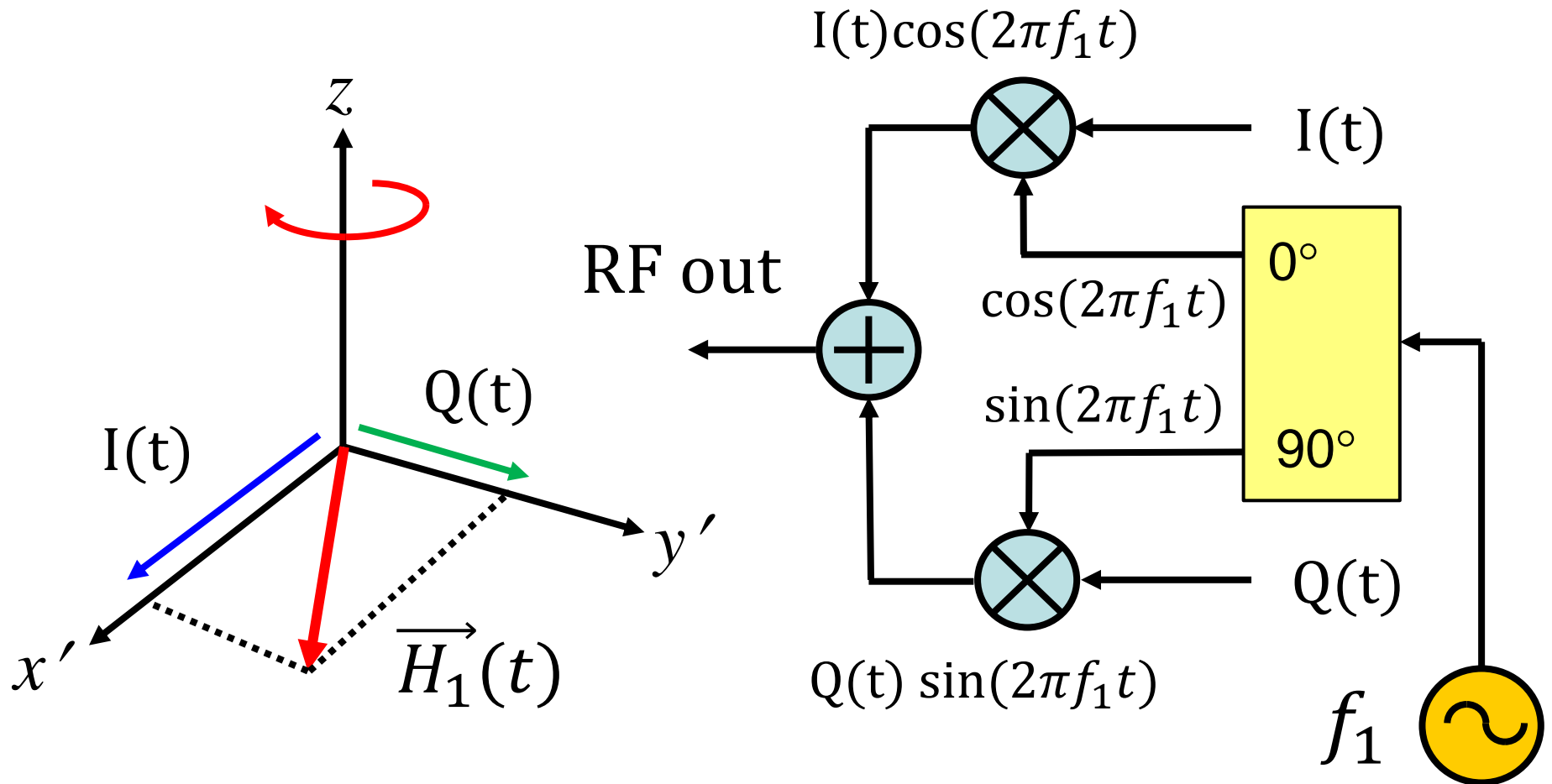
アナログトランシーバーの構成



QAM : Quadrature Amplitude Modulator

QPD : Quadrature Phase Detector

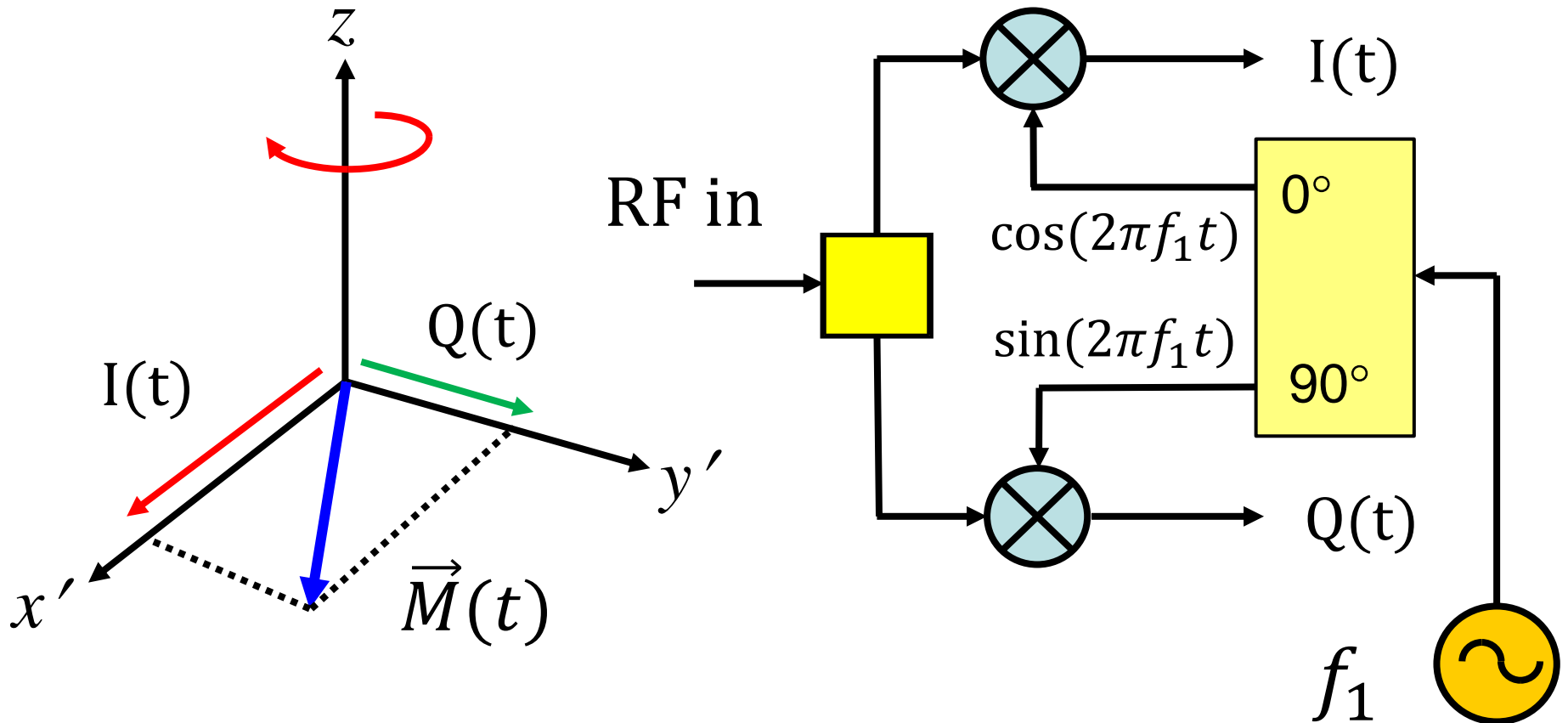
直交振幅変調器: QAM



$$\text{RF out} = I(t)\cos(2\pi f_1 t) + Q(t)\sin(2\pi f_1 t)$$

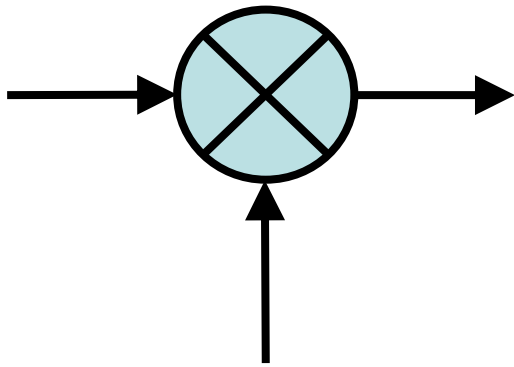
回転座標系における $\vec{H}_1(t)$ を生成する. 任意の励起が可能.

直交位相検波: QPD

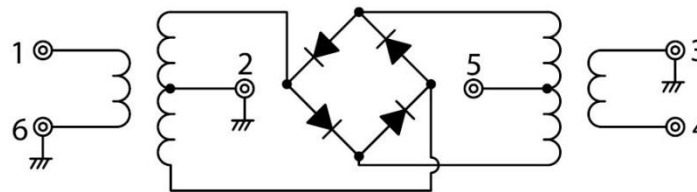


回転座標系における核磁化 $\vec{M}(t)$ の座標成分を検出する。
RF信号に, キャリア周波数のcosineとsineを乗じる。

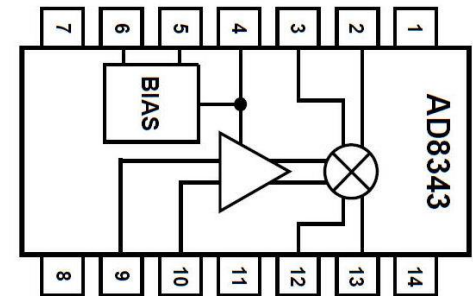
アナログ乗算器(ミキサー)



回路記号



Double balanced mixer



Active mixer

DBMやActive Mixerで行われる乗算をデジタル回路で実施

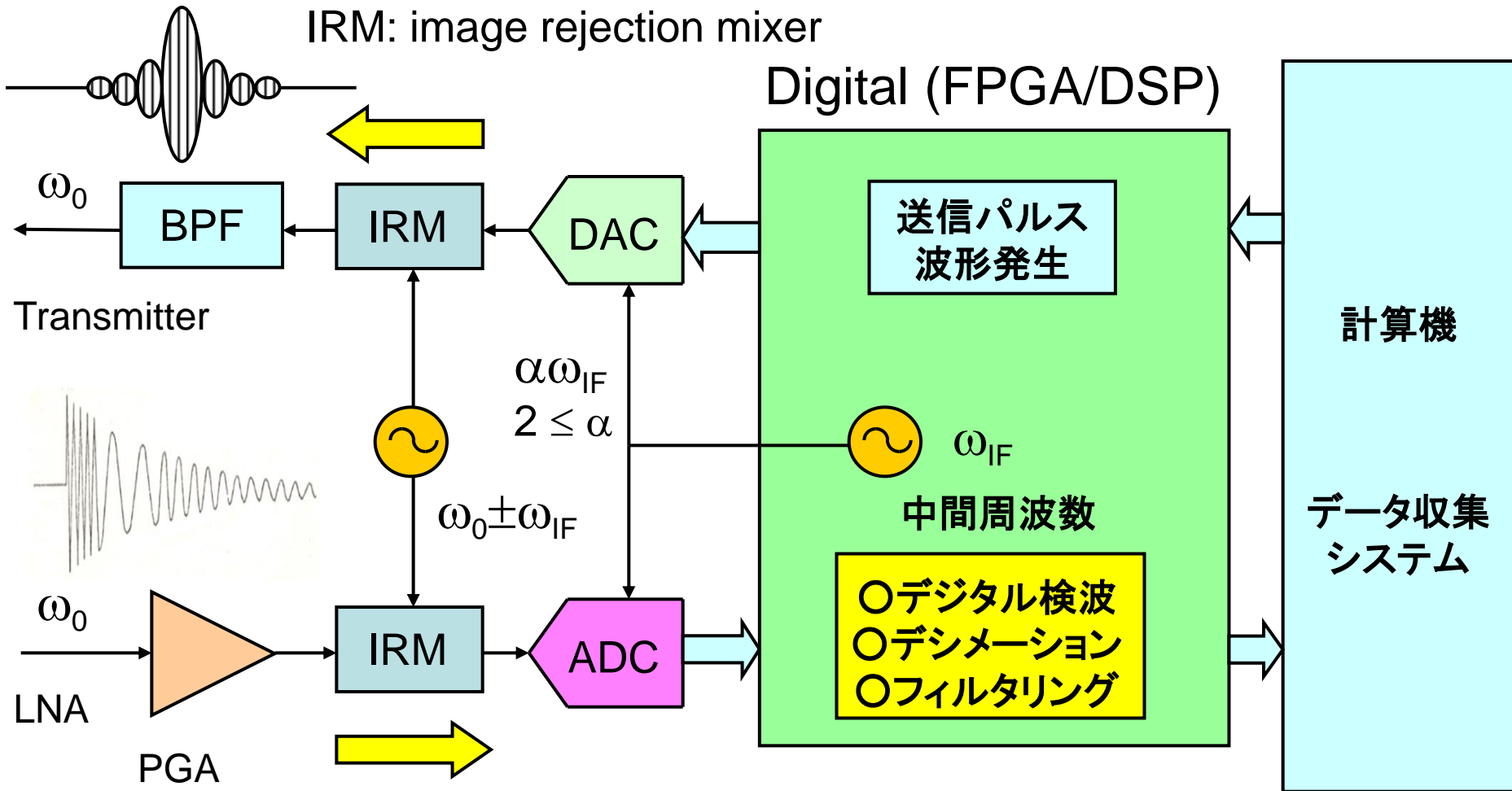
この章の要約

1. アナログトランシーバーでは、**直交振幅変調器 (QAM)** と、**直交位相検波器 (QPD)** が重要な役割を果たす.
2. QAMとQPDでは、**アナログ乗算器 (ミキサー)** が、重要なユニットである.
3. QAMとQPDにおける I (in phase) チャンネルと Q (quadrature phase) チャンネルは、回転座標系の x 座標と y 座標に対応する.

講演の概要

1. はじめに
2. MRIトランシーバーとは？
3. アナログトランシーバーの仕組み
4. デジタルトランシーバーの仕組み
5. 撮像によるトランシーバーの比較
6. むすび

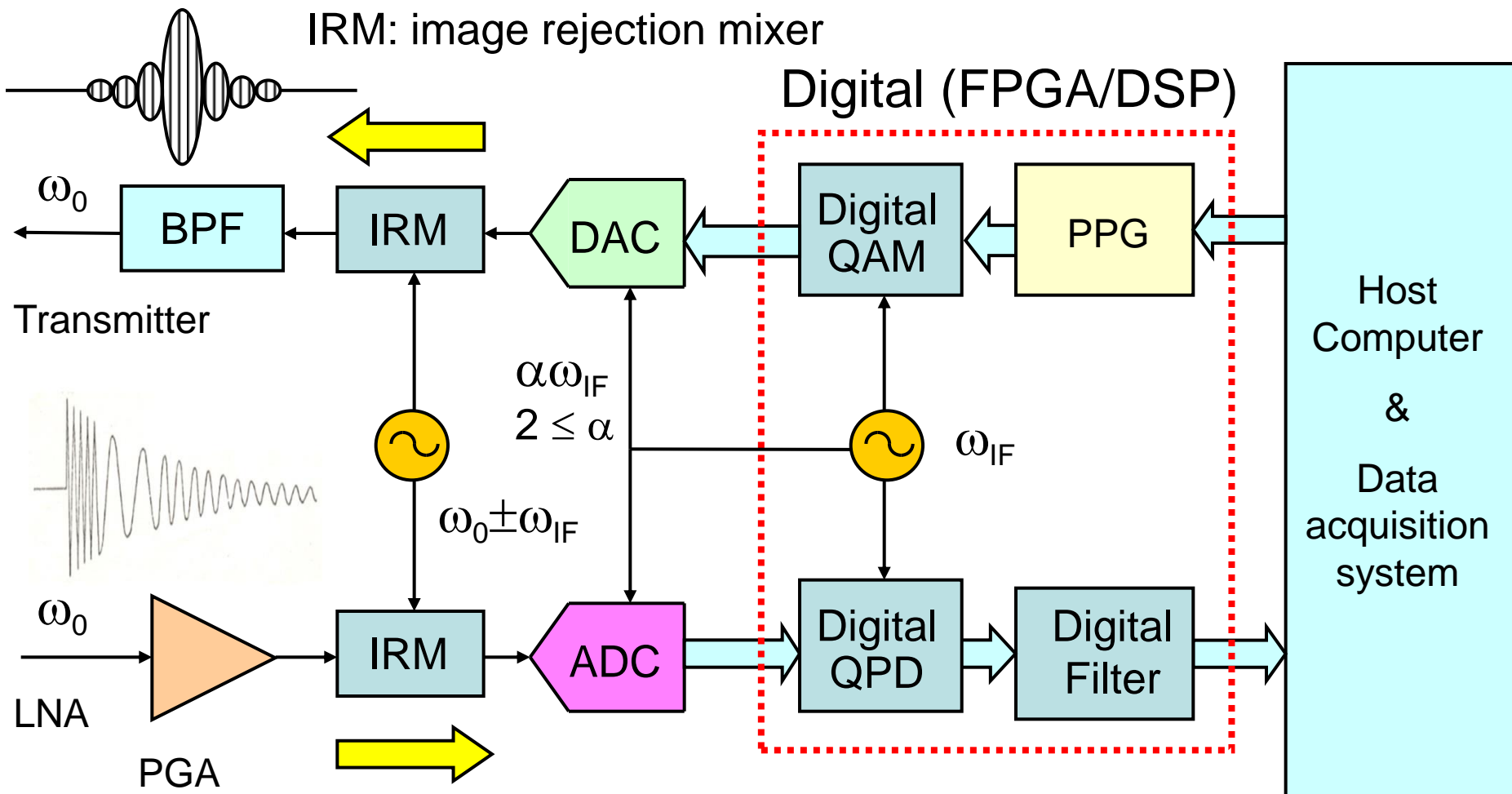
デジタルトランシーバーの原理



ω_0 : Larmor frequency

ω_{IF} : intermediate frequency

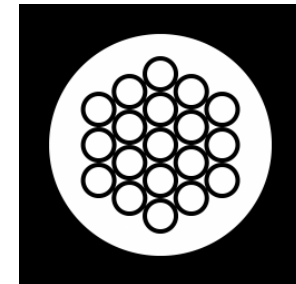
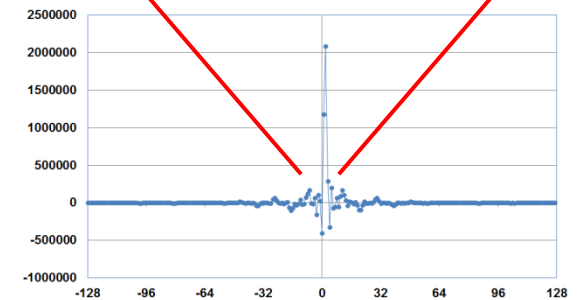
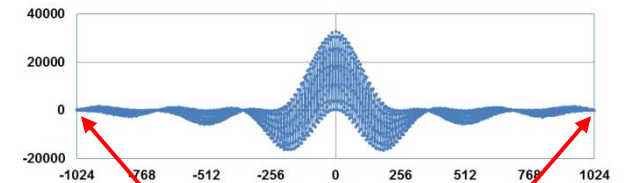
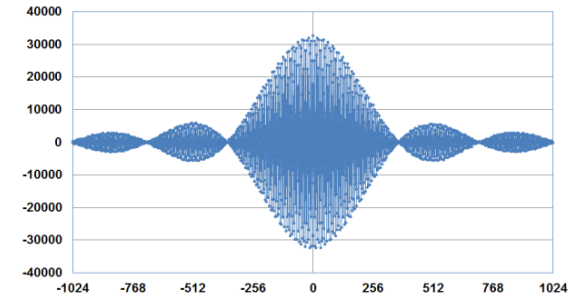
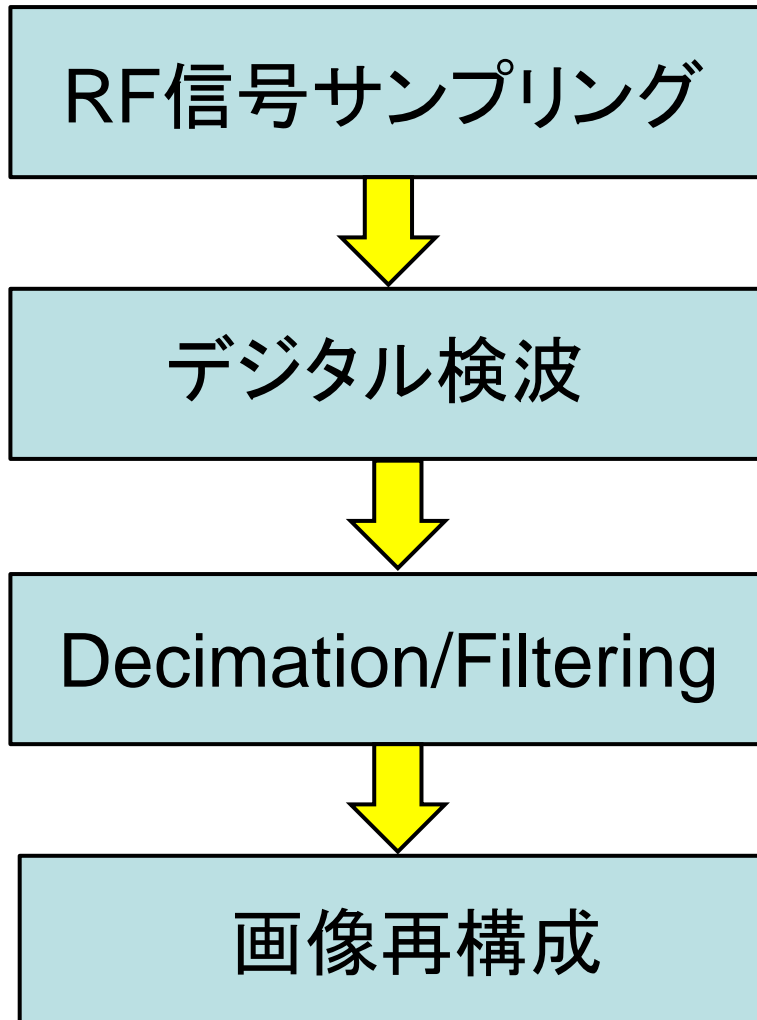
デジタルトランシーバーの構成



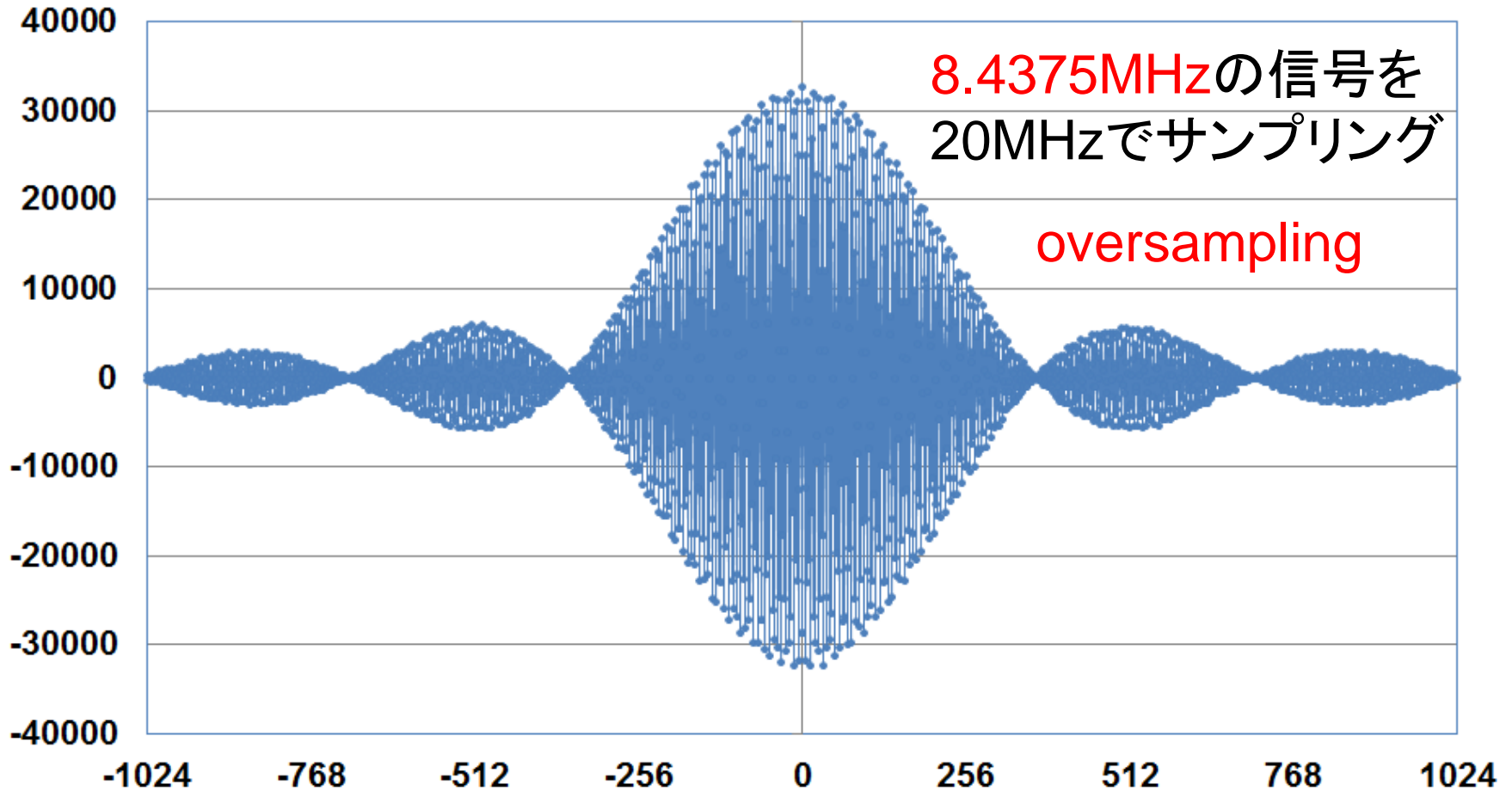
ω_0 : Larmor frequency

ω_{IF} : intermediate frequency

デジタルレシーバーにおける信号処理(1)

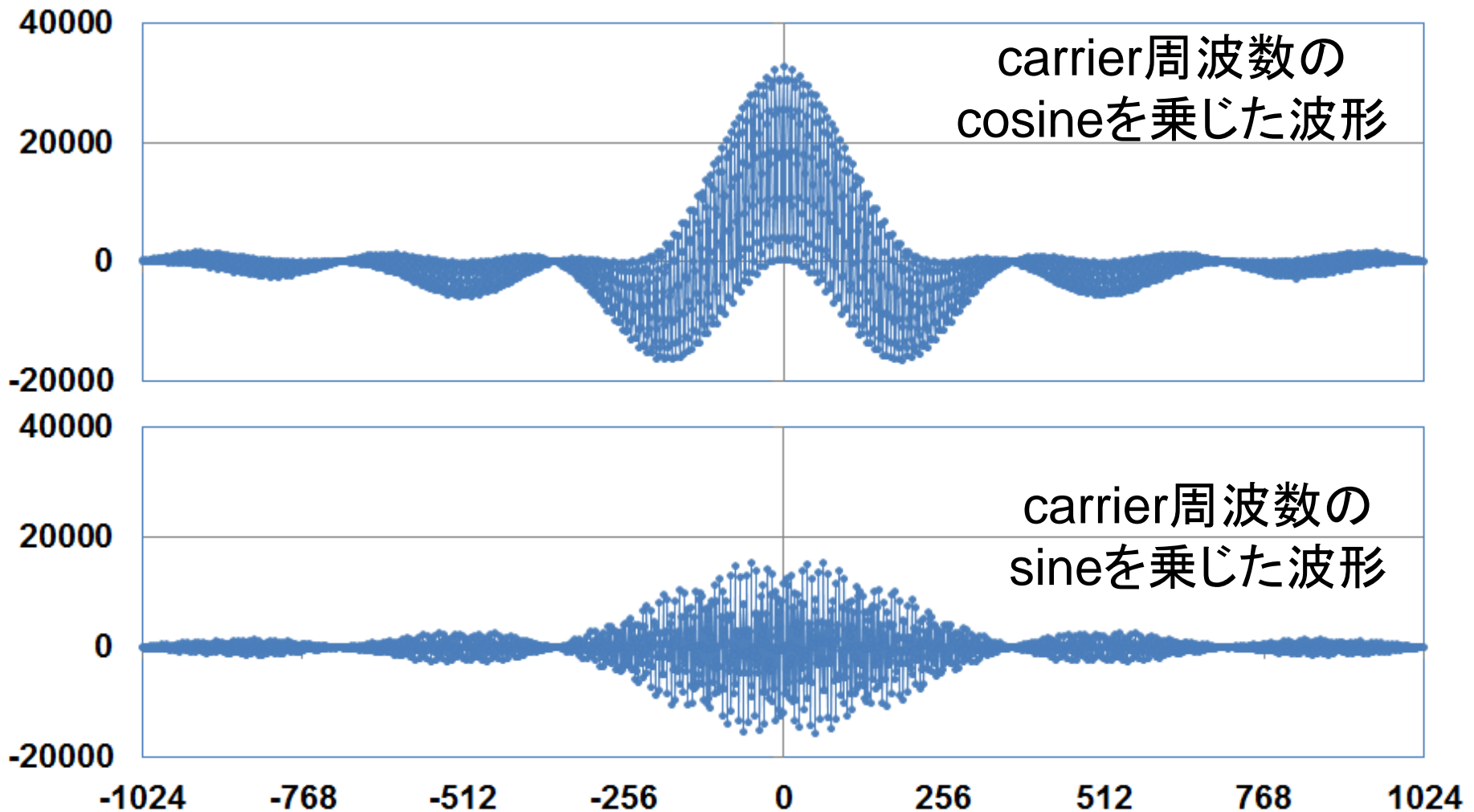


デジタルレシーバーにおける信号処理(2)



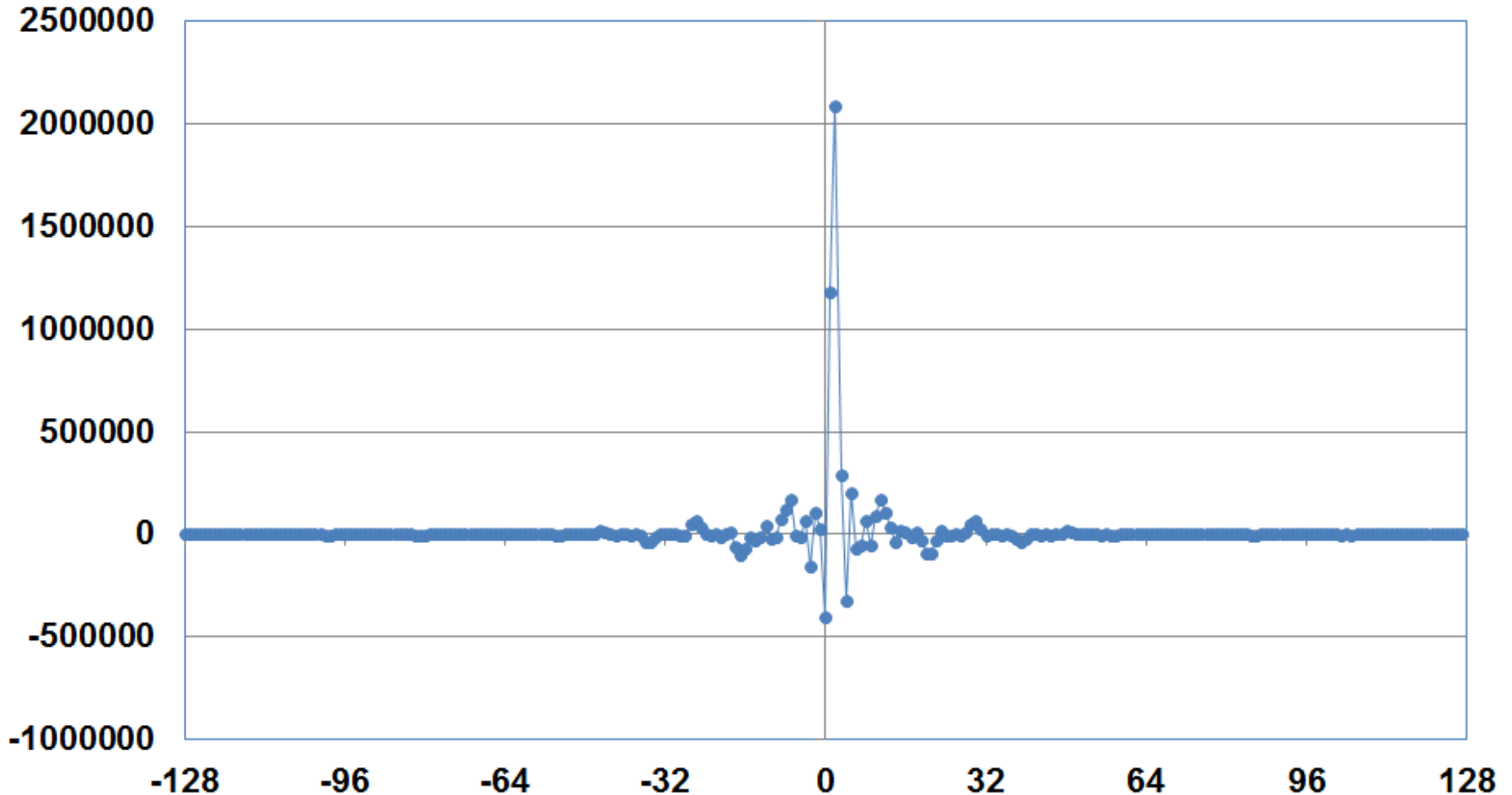
高周波NMR信号(8.4375MHz)をサンプリングした波形. データ収集点数は, 65536ポイント(3.2768ms)であり, 全体の1/32を表示

デジタルレシーバーにおける信号処理(3)



デジタル検波を行うために、キャリア周波数のcosineとsineをそれぞれ乗じた波形。この中から、**低周波成分を効果的に取り出す方法がdecimationとfiltering**

デジタルレシーバーにおける信号処理(4)



デジタル検波した波形からdecimation(65536→256)で得た波形(実数部). 4096点のconvolutionより計算.

Decimationとは？



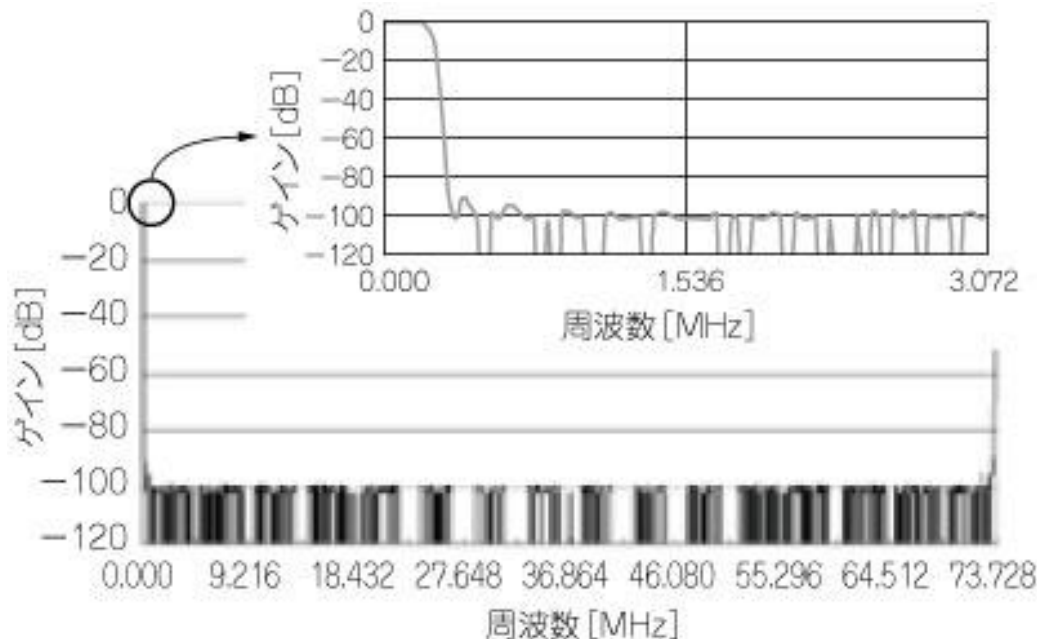
*Spartacus: War of the Damned:
“Decimation” Review*

元々は、ローマ帝国の軍団に対する刑罰で、10人の兵士の中からくじ引きで1人を選び、その1人を他の9人で撲殺するというもの。転じて、**サンプリング点を間引きして減らす方法**を指す。

デジタルレシーバーにおける信号処理(5)

高い比率のデシメーションを行うために、通常は、CIC(cascaded integrator comb)フィルタとFIR(finite impulse response)フィルタを使用を用いて、2段階で行う手法が使われている。

これは、CICフィルタは加算のみで実現でき(FIRフィルタは乗算が必要)、演算が比較的容易にできるためである。



CICフィルタ(1/16)とFIR
フィルタ(1/12)を組み合わせ
て急峻なフィルタ特性を
実現した例:

**デジタルFMステレオ・
チューナの製作(林輝彦)**

**73.8MHzのデジタル信号
を384kHzのデジタル信号
へと変換**

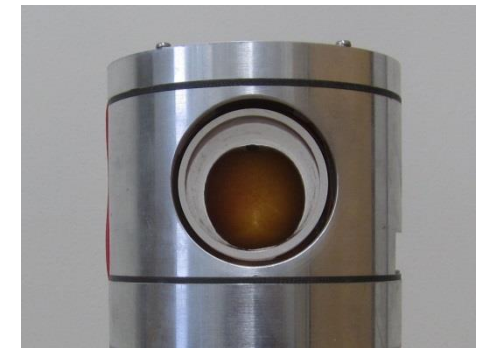
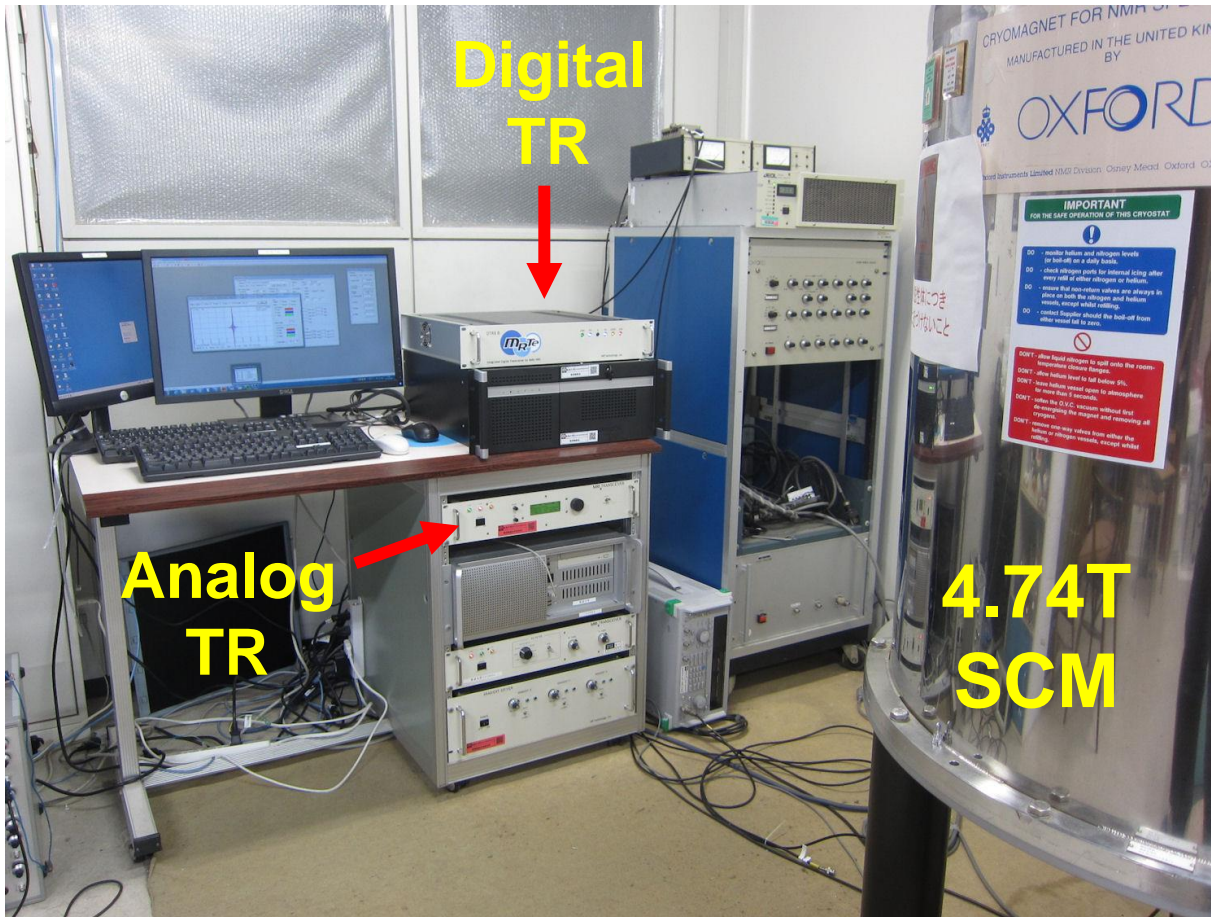
この章の要約

1. デジタルトランシーバーでは、変調、検波をデジタル回路(演算)で行う.
2. デジタルレシーバーの信号処理は、①デジタル検波、②デシメーション(サンプル点数の間引き)、③フィルタリングである.

講演の概要

1. はじめに
2. MRITランシーバーとは？
3. アナログトランシーバーの仕組み
4. デジタルトランシーバー仕組み
5. 撮像によるトランシーバーの比較
6. むすび

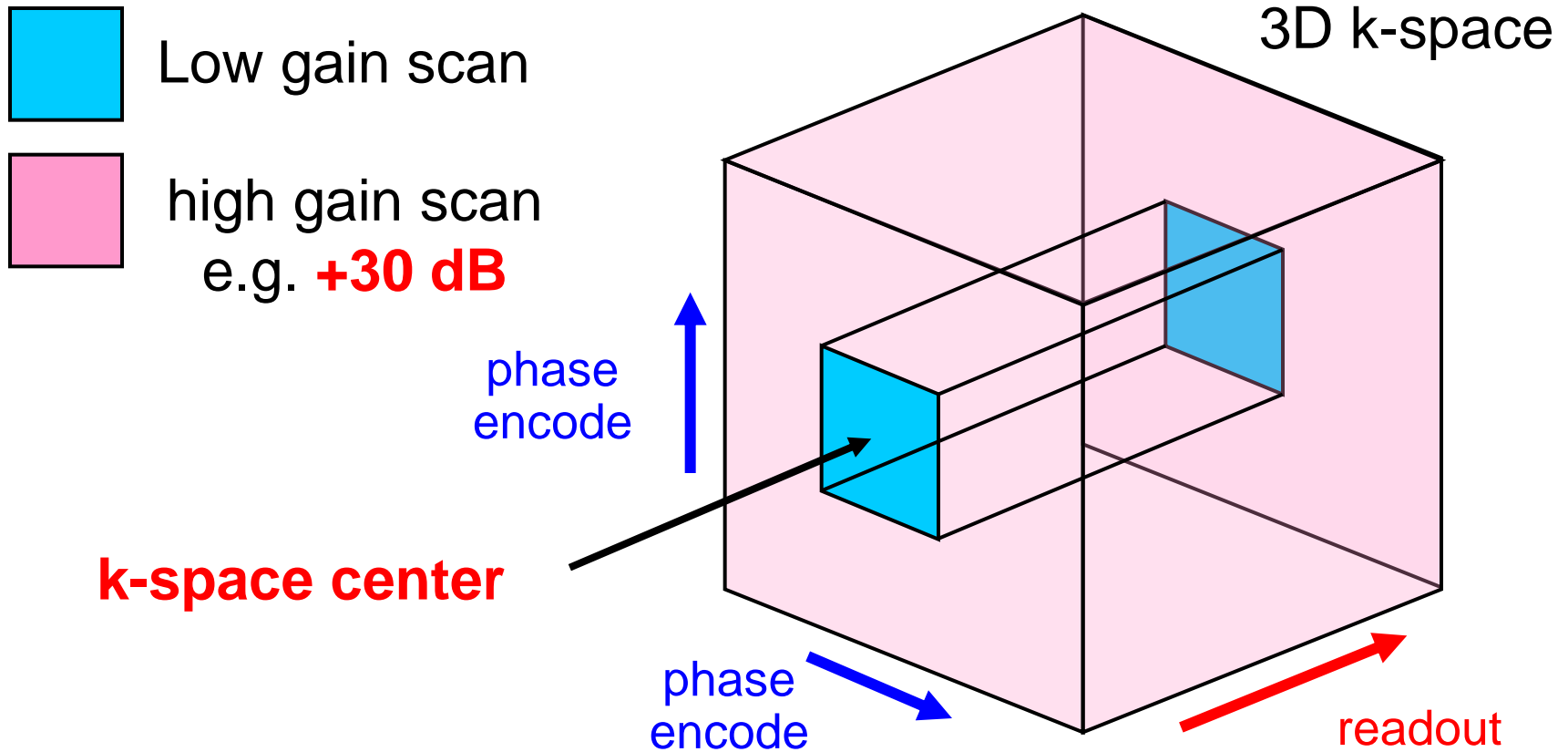
トランシーバーの比較撮像実験



Kumquat in a solenoid coil probe

トランシーバー以外は**同一のハードウェアと撮像条件**を用いて、比較実験を行った。磁石は4.74Tの超伝導磁石、試料は、**広い信号のダイナミックレンジ**が期待できる、**直径40mmのソレノイドコイル**に挿入した金柑である。

Gain stepping scanによる3D撮像(1)

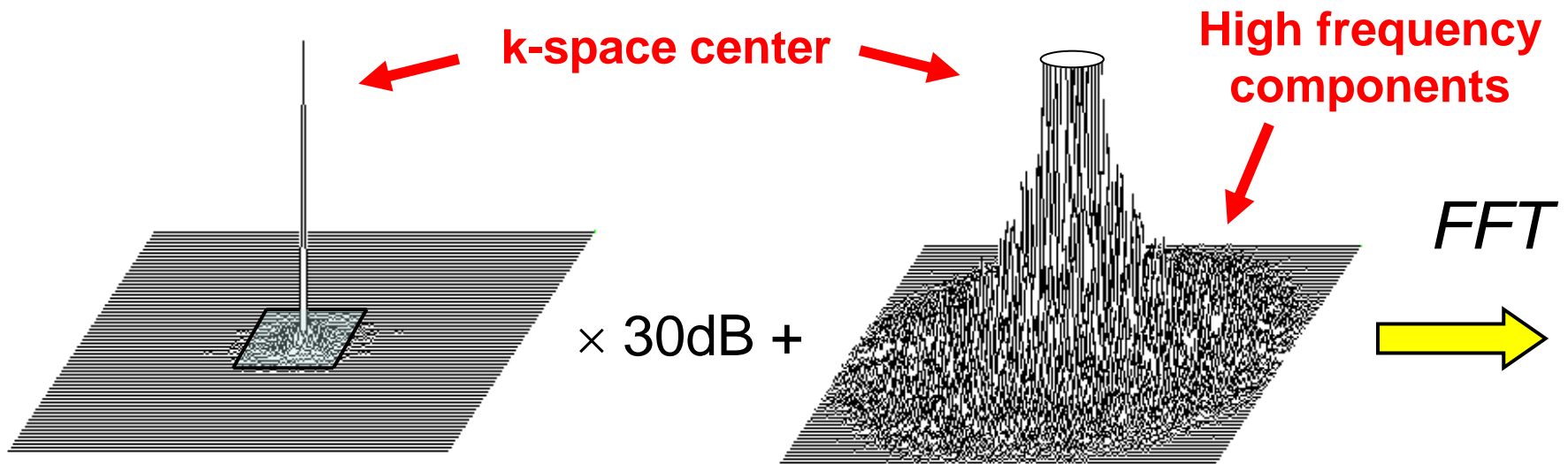


レーザーのダイナミックレンジ(DR)の限界の問題を解決するために、いずれも30dBのゲイン差によるゲインステップングスキャンを用いた。DR以外の性能を比較するために実施した。

Gain stepping scanによる3D撮像(2)

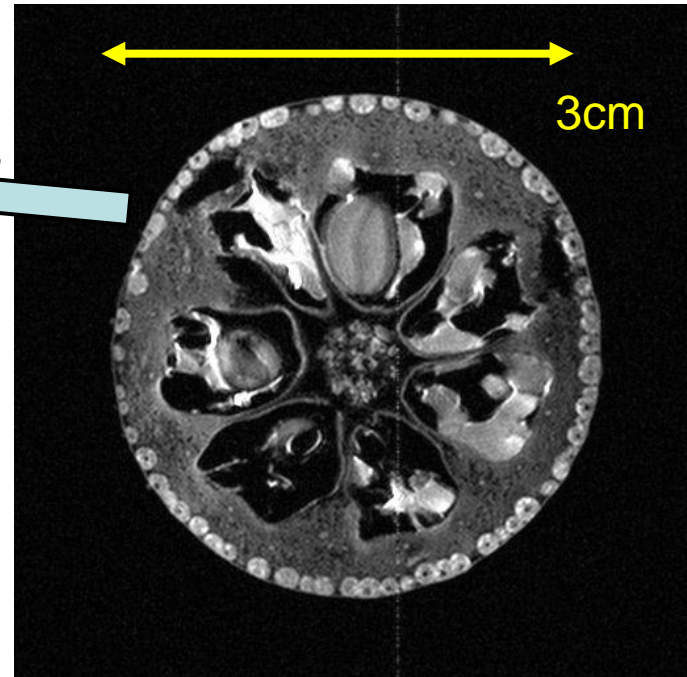
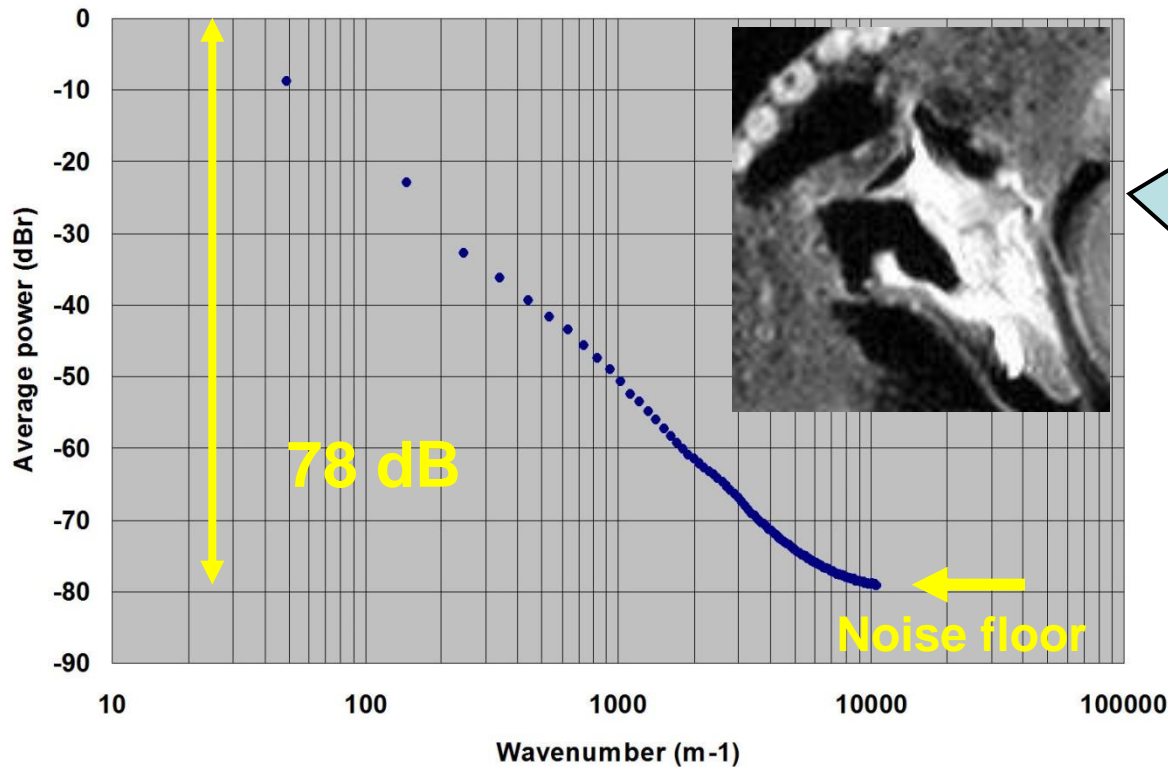
■ Low gain scan

■ high gain scan, e.g. 30dB



画像再構成に使用したフーリエデータは、ローゲインで取得したk空間中心部のデータを30dB増幅したデータと、ハイゲインで取得したk空間の周辺データを合成することによって作成した。

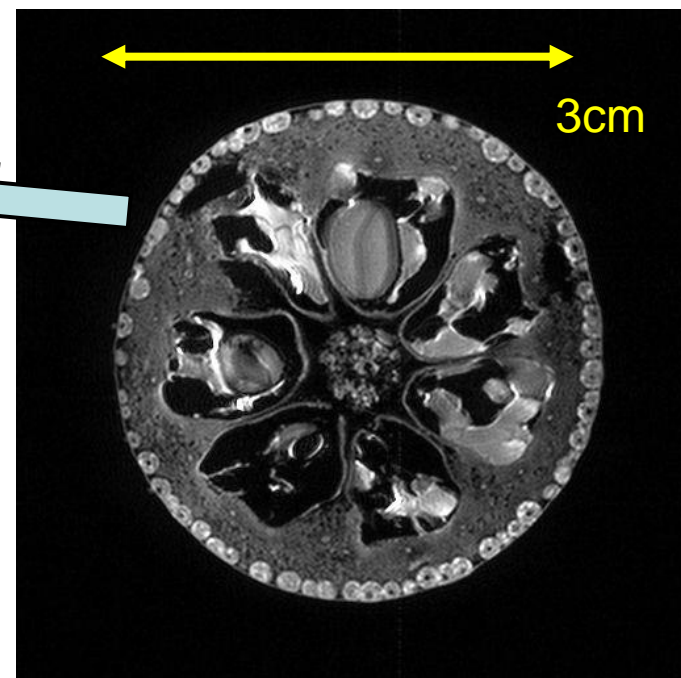
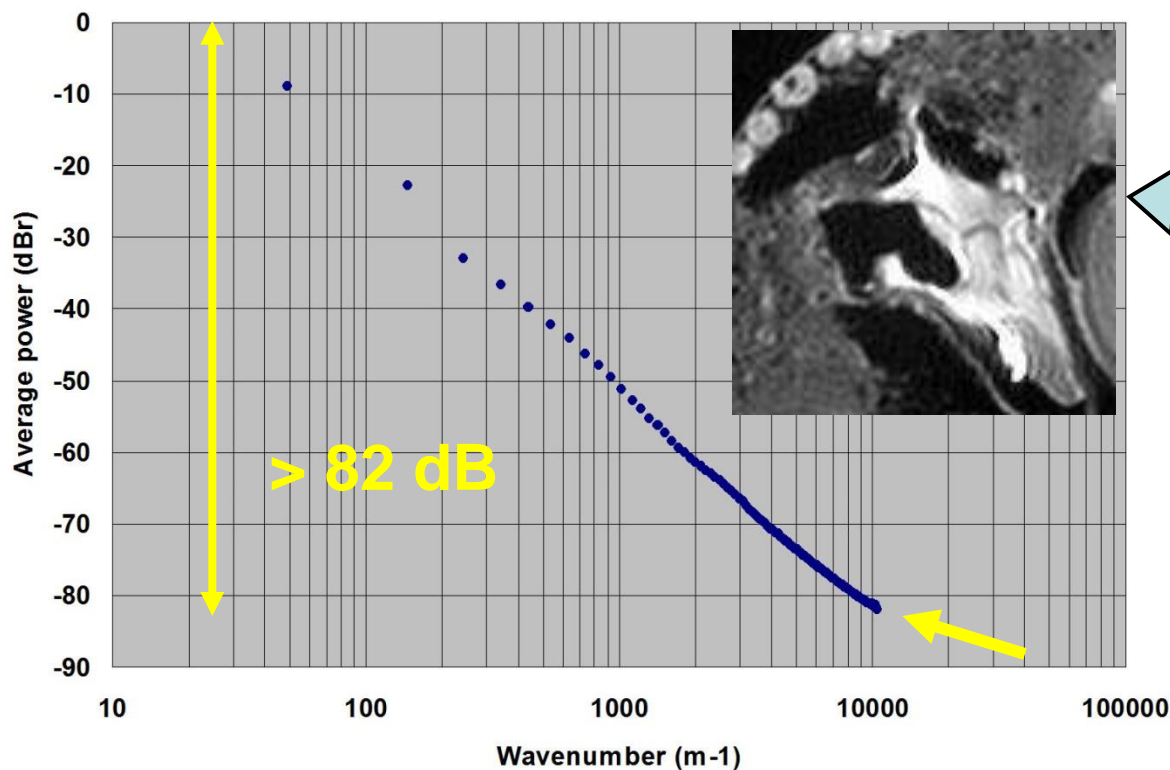
Gain stepping scanなしのときのDR (digital)



Single scan (256^3)

Gain stepping scanのないときの 256^3 マトリクスのスキャン (TR=800ms, TE=20ms, NEX=1) によるデータは、**レシーバー系のDRが約78dB**であることを示している。この時、**エコー信号は、full scaleの約1/4であった**ため、DRは、+12dBの約90dB (片側で15ビット: 両側96dB) であることが推定される。

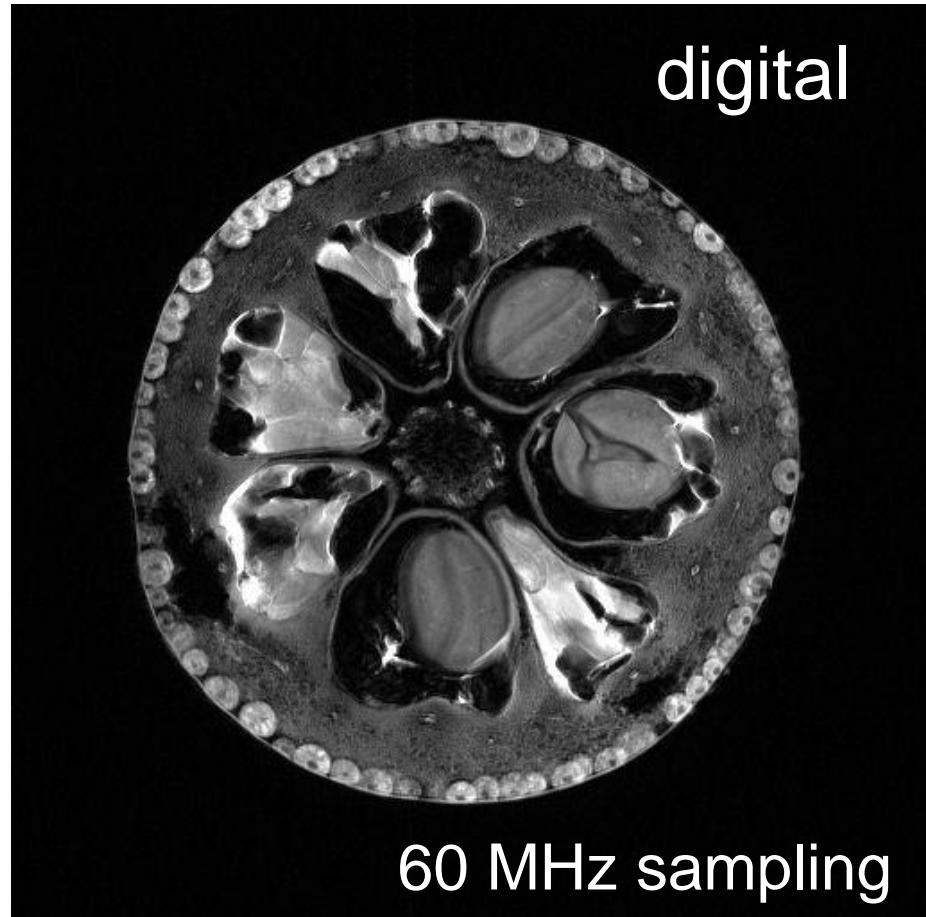
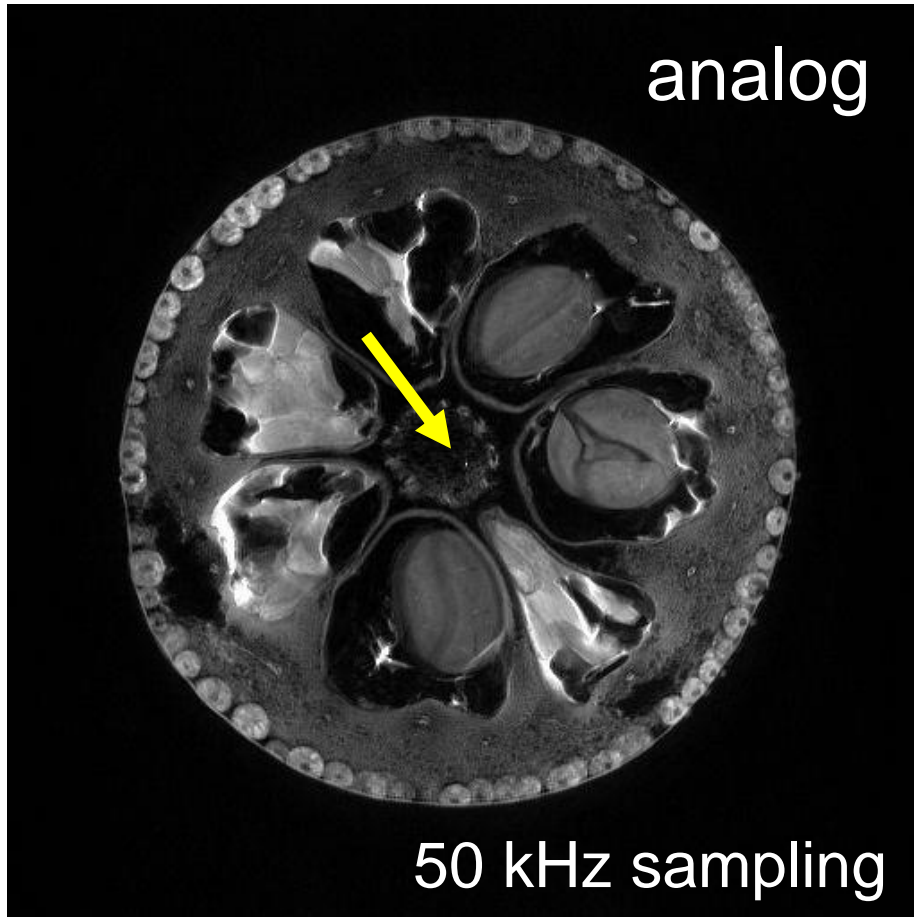
Gain stepping scanありのときのDR (digital)



Dual scan (256³)

これに対し、ゲインステッピングスキャンを行うと、受信系のDRは拡大されて、**信号のDRも82dB以上**であることが示され、また、同時に、高い分解能も実現された。

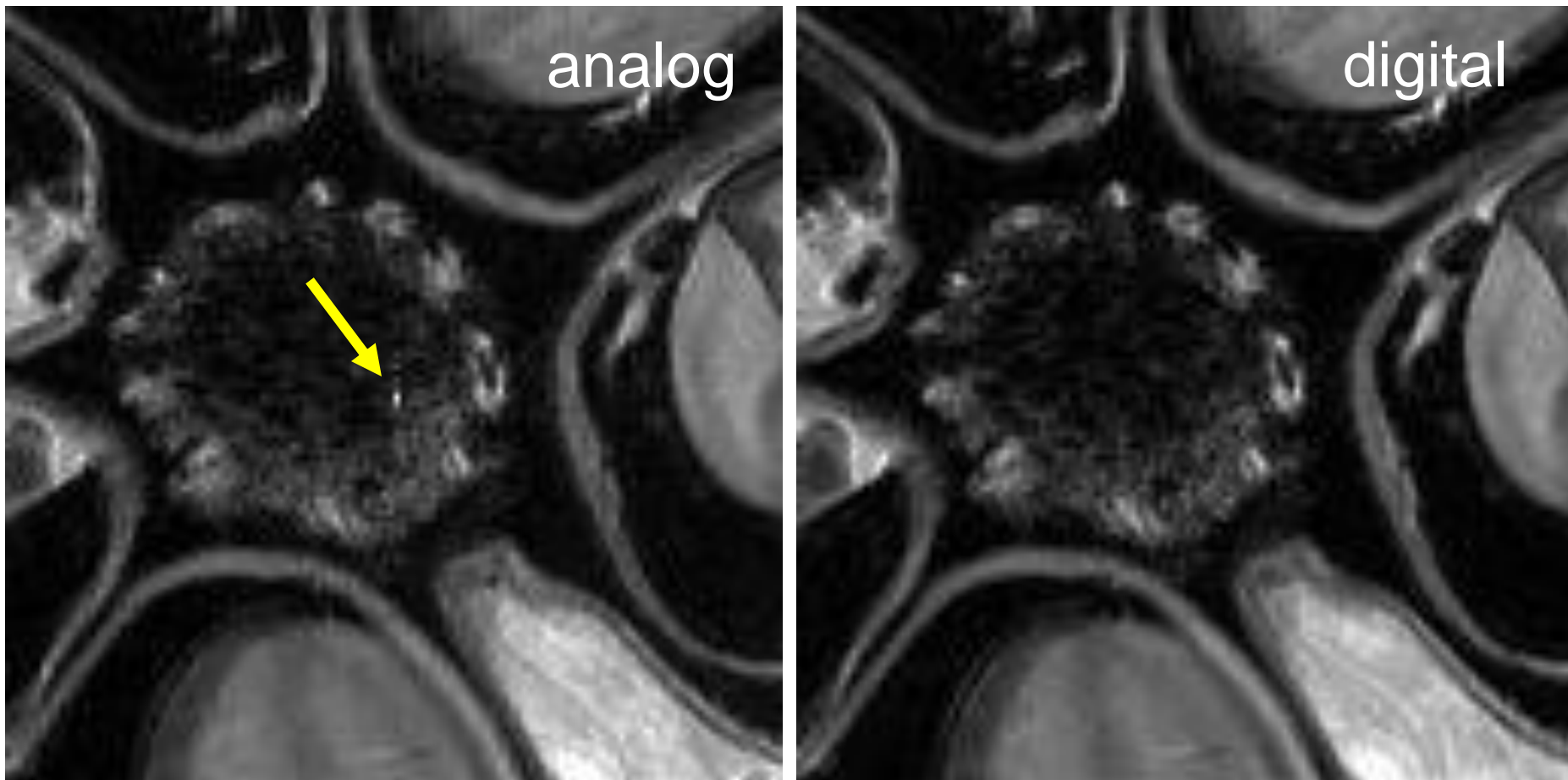
アナログとデジタルの違い : DC noise?



どちらのトランシーバーでも、同様のimage qualityが得られた

Cross sectional images acquired with the analog and the digital transceivers using a 3DSE sequence with TR/TE = 800ms/20ms, FOV = (40.96 mm)³, image matrix: 512² x 64, NEX = 1

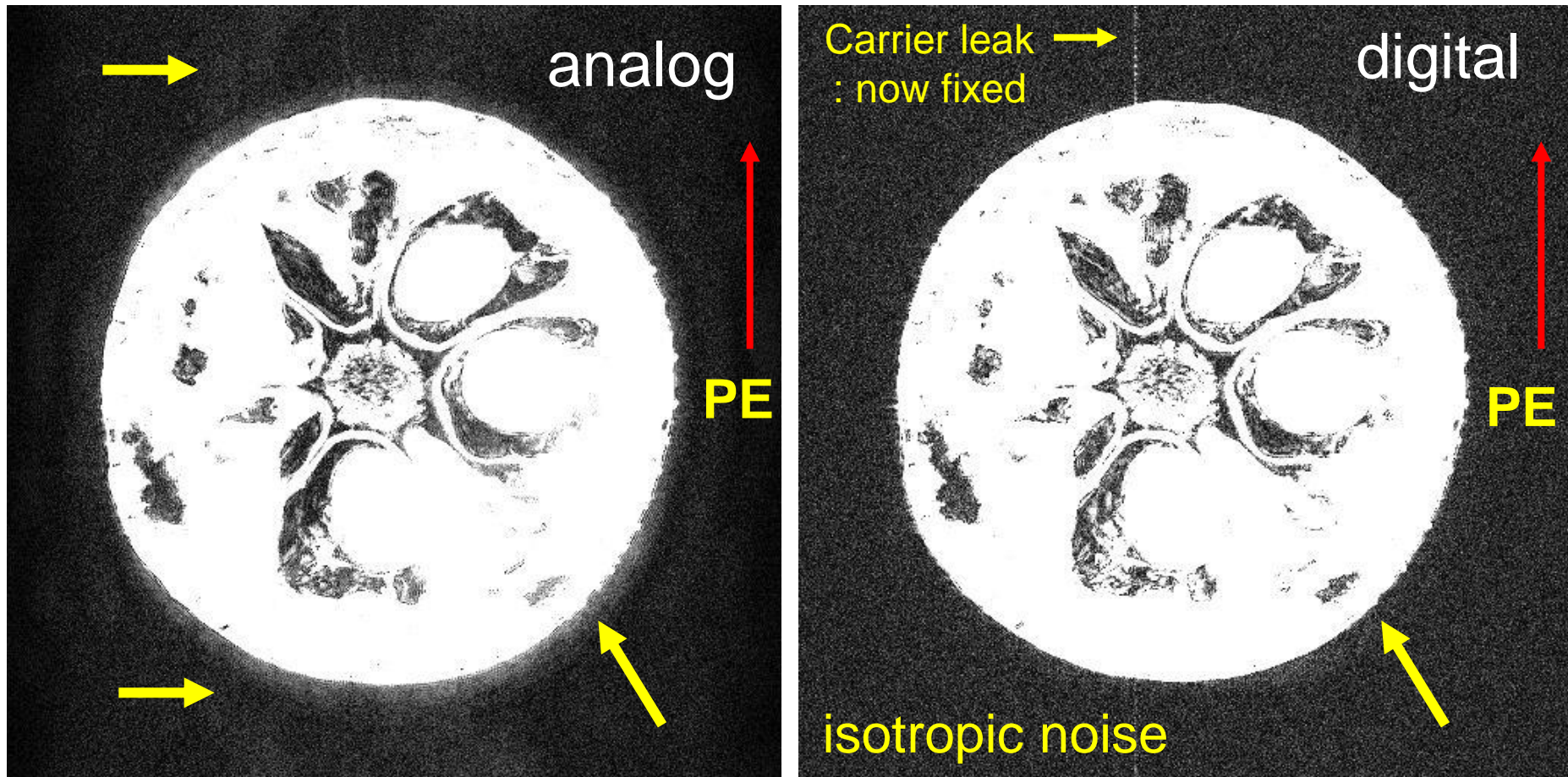
アナログとデジタルの違い : DC noise?



アナログトランシーバーでは、**DCオフセットによる輝点**が見られた

Cross sectional images acquired with the analog and the digital transceivers using a 3DSE sequence with TR/TE = 800ms/20ms, FOV = (40.96 mm)³, **image matrix: 512² x 64, NEX = 1**

アナログとデジタルの違い：位相安定性？



デジタルトランシーバーでは、**均一なバックグラウンドノイズ**が観測された。いっぽう、アナログトランシーバーでは、**アナログ回路の非線形性や位相の不安定性**に起因すると思われるゴースト状のアーチファクトが観察された。

この章の要約

同一の実験条件で、アナログトランシーバーとデジタルトランシーバーの比較を行った。

その結果、デジタルトランシーバーでは、DCオフセットは観測されず、線形性と位相安定性に優れていることが確認された。

ただし、ダイナミックレンジを確保すれば、アナログトランシーバーでも、デジタルトランシーバーと同等の画像が得られることを示した。



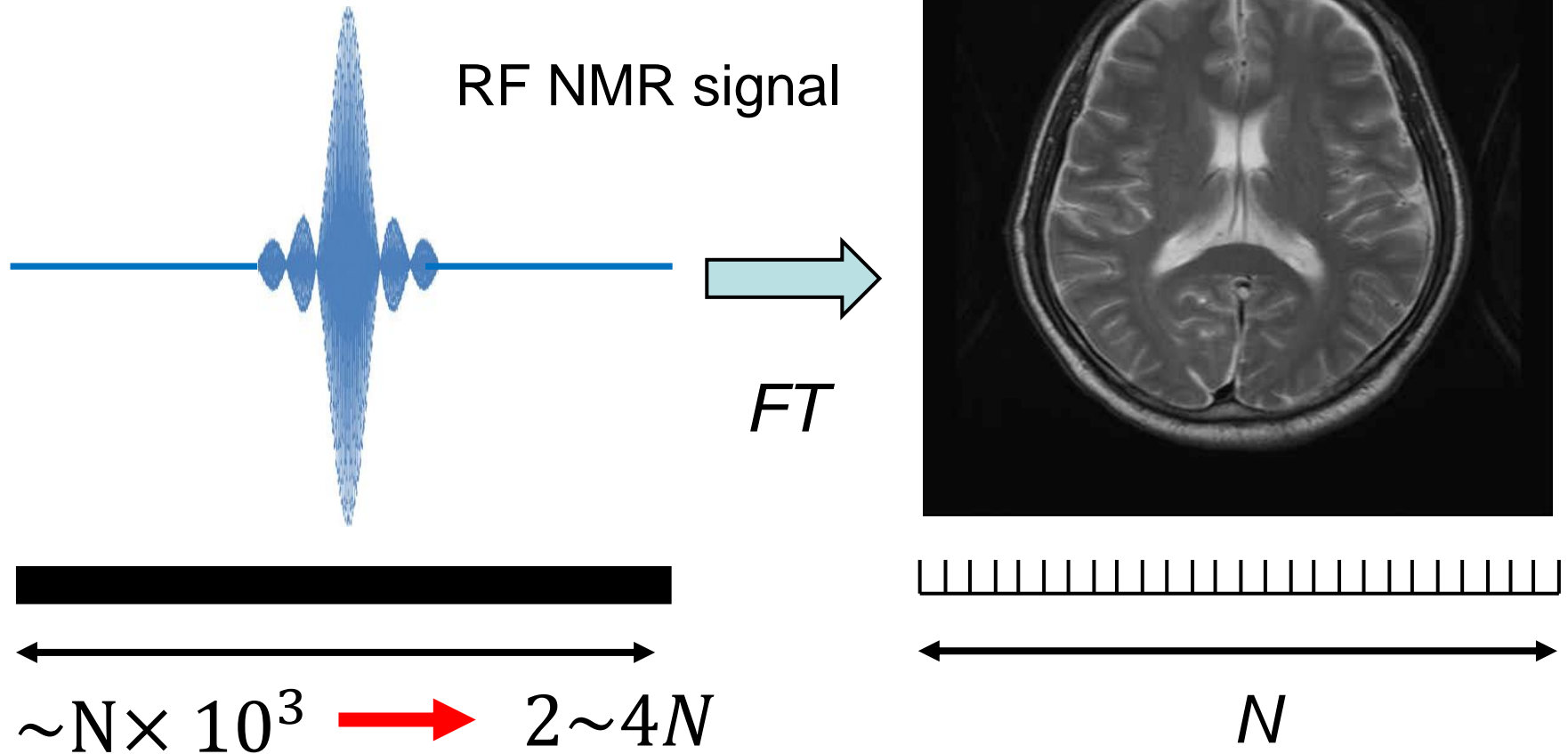
Analog



Digital

サンプリング点数=リード方向の画素数？

新しい教科書？



デジタルトランシーバーでは、3桁程度の量のデータサンプリングが行われ、decimationによってNの数倍程度のデータに集約される。

むすび

1. MRIにおける**デジタルトランシーバーの仕組み**について解説した.
2. **トランシーバーの機能の理解**には、アナログトランシーバーが有用であるが、デジタルトランシーバーは、アナログトランシーバーに比べて**多くの優位性**があり、今後は、置き換えられていくことになるだろう.
3. このため、教科書などでも、**デジタルトランシーバーを前提とした解説**などが必要になるだろう.

詳細は、P-2-125 橋本征太郎氏のポスターをご覧ください.

研究室HPで、パウポのpdfを公開予定.