

インターネットインフラ特論

15. バーストモードCDR

太田昌孝

mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

<ftp://chacha.hpcl.titech.ac.jp/infra14.ppt>

CDR (Clock Data Recovery)

- 受信側が信号を復号するには
 - 受信信号から送信クロックを位相まで復元し
 - Clock Recovery
 - 受信信号をサンプリング
 - Data Recovery

デジタルコヒーレント受光

- 信号光から変調前の光を周波数レベルで復元し
 - 復元した光とさらに位相を90度ずらせた光とを、信号光と干渉させて信号光から振幅情報と位相情報を復元
 - 位相のずれはデジタル信号処理で復元
 - ただの回転なので楽(LANならこれで十分)
 - 時間領域でシンボルの一部を繰り返して、デジタル信号処理でFFTを使えば、分散が除去できる
 - すごい計算が大変(消費電力も)

回線交換とパケット交換

- 回線交換では
 - 通信は長期に継続
 - CDRや変調前の光の回復はゆっくりでよい
- 普通の電気パケット交換では
 - 隣の機器との通信は長期に継続
 - CDRや変調前の光の回復はゆっくりでよい
- 光パケット交換では
 - 一般にパケット単位で送信者は違う
 - CDRや変調前の光の回復は大至急(バーストモード)

電気パケット交換でも

- PONではパケット単位で加入者が異なる
 - バーストモードCDR
- イーサネットで省電力モードからの回復後
 - 省電力中は無信号
 - こまめな省電力のためにはバーストモードCDRが必要

クロック回復なしのデータ回復

Data Recovery without Clock Recovery

太田昌孝

東京工業大学情報理工学研究科

mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

スーパーコンピュータやデータセンター網 でのアナログコヒーレント受光

- 前回(8月)PN研での発表
 - LANでは、LOが共通なので、DLLによる位相あわせだけで、アナログコヒーレント受光が可能
 - 同期に長時間が必要な光PLLは不要
 - 短い光パケットの期間では、光PLLの同期は不可能
 - デジタル演算が不要で、低消費電力化が可能
- 実はWANでも同じことが可能というのが、今回の発表

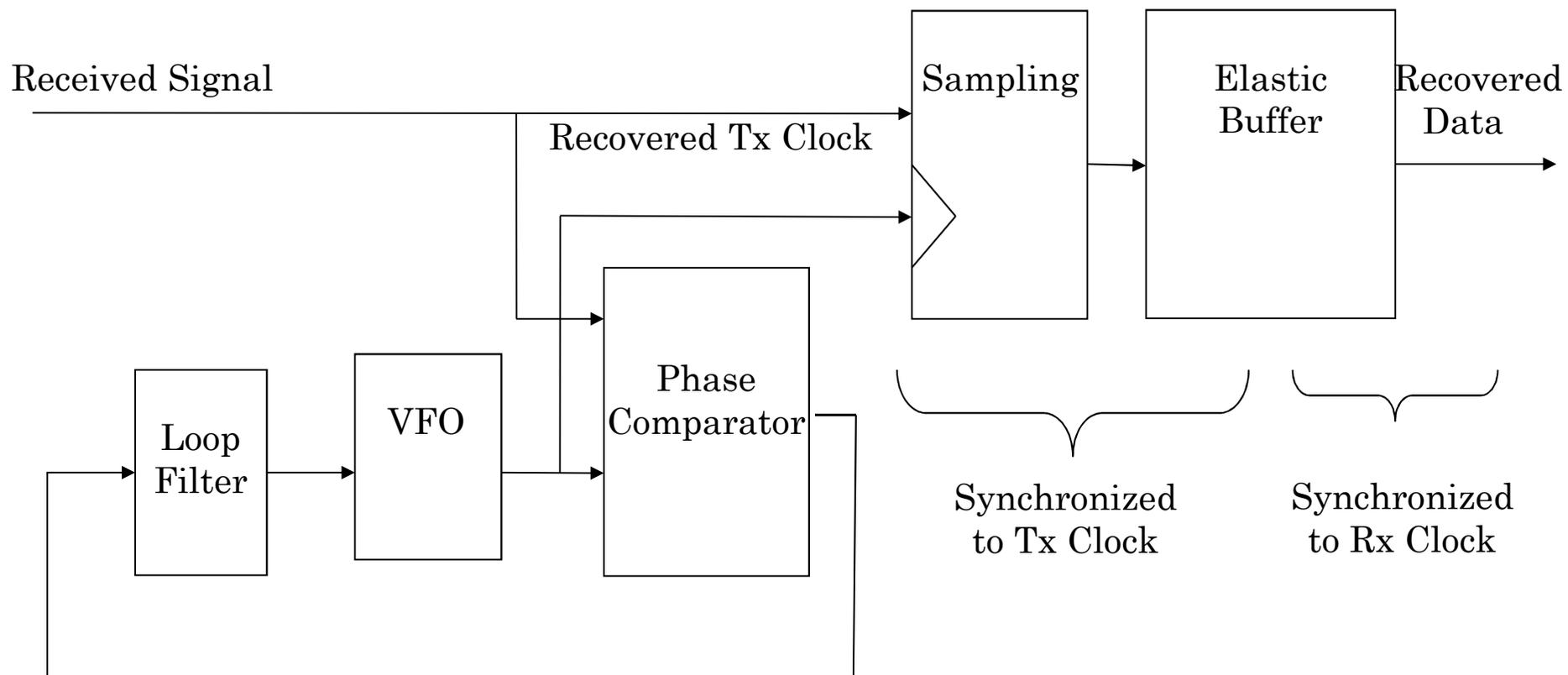
多波長光パケットの特徴

- パケット内容を同時に多波長に展開
- 高速化が容易
 - 10G * 100波長で、1Tbpsの光パケットに
 - 光スイッチやFDLの広帯域性が活きる
 - 1Tbpsで1500Bのパケットは**12ns**
 - 約2mのFDLで、1パケット分の遅延
 - 波長あたりのビット数は120ビット
 - **CDRやコヒーレント受光のPLLの同期時間が不足**
 - 光パケット網では、一般にパケット毎に送信者とそのクロックが異なるので、パケット毎に新たな位相同期確立が必要

Clock Data Recovery

- NRZ信号等の復号技術
 - PLLにより、受信信号から送信側クロックを復元
 - 復元されたクロックで、データをサンプル
 - 弾性バッファ経由で、受信側クロックに同期した回路に引渡し
- PLLの同期に時間がかかる
 - PONではバーストモードCDRという技術は一応あるが、WANではジッタの平均化をしたい

PLLによる クロックデータ回復



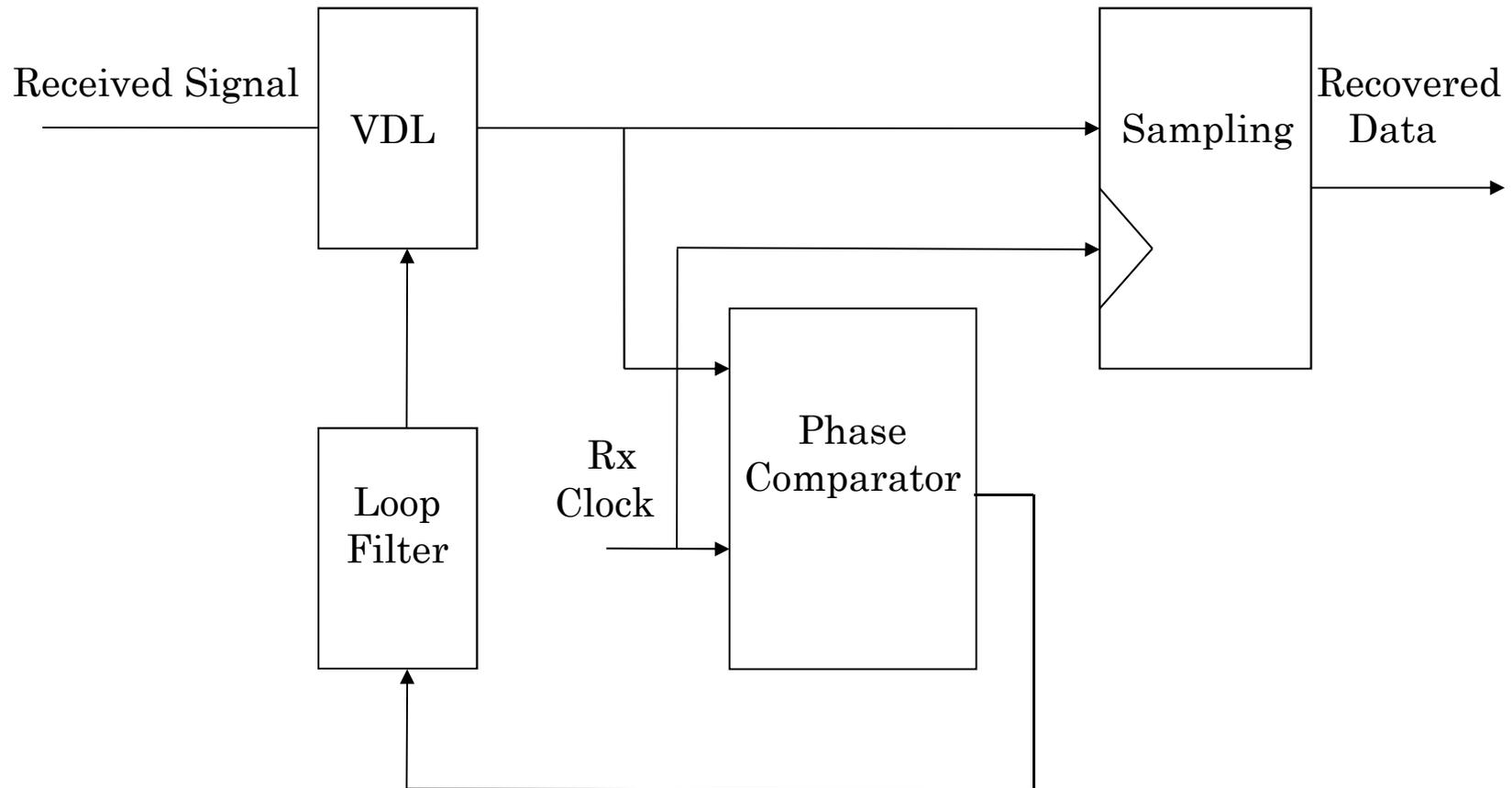
Delay Locked Loopの特徴

- 位相同期方式として、安定、収束も速いが、、
、
- 送受信クロック周波数が完全に同一でないとして
 - 長期間の同期維持は、可変遅延線(VDL)の可変範囲を超えるため、不可能
- 同一クロックの位相調整に使われてきた
- しかし**パケットの場合**
 - **長期間の同期維持は不要！**
 - DLLが使える
 - 特に、多波長光パケットに有効

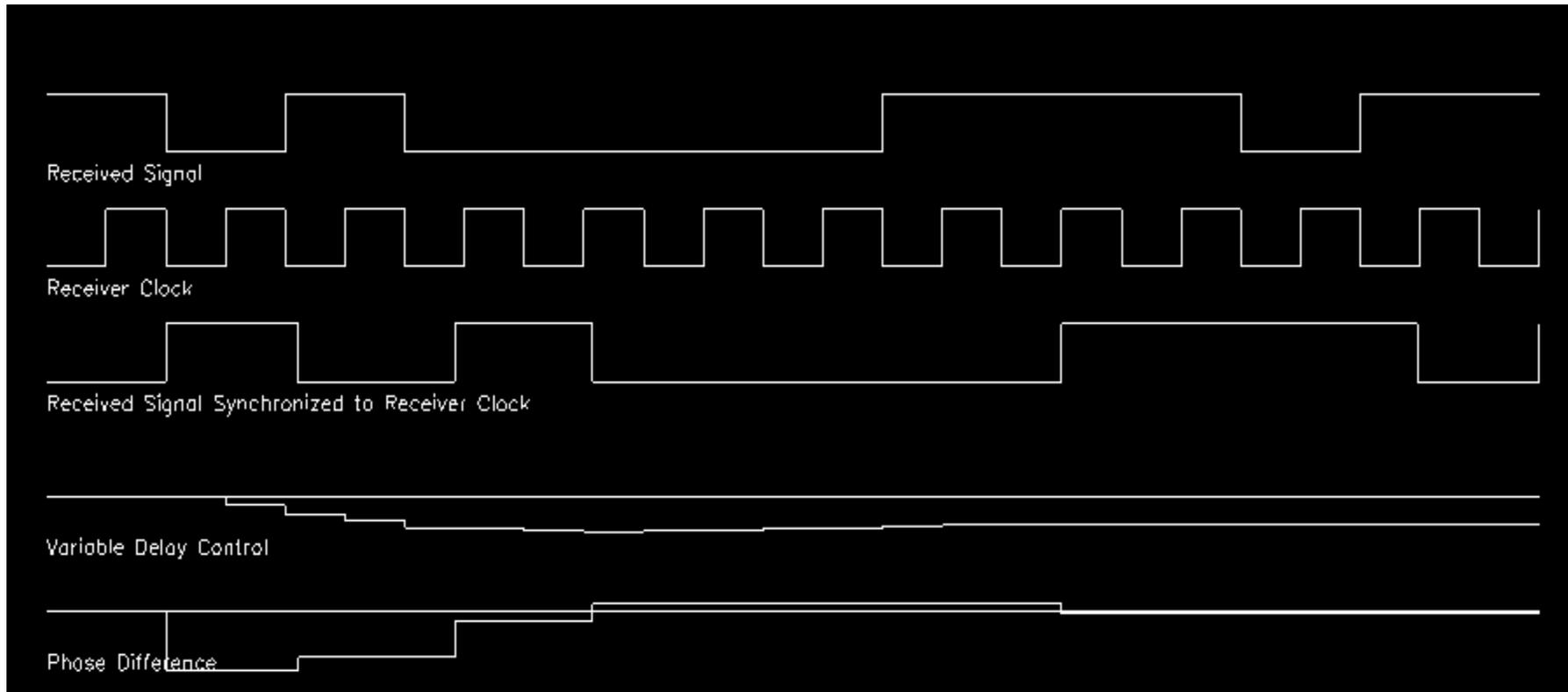
DLLによる クロック回復なしのデータ回復

- NRZ信号等の復号のため
 - DLLにより、受信信号を受信側クロックに同期
 - 受信側クロックで受信信号をサンプルし、データ回復
 - 弾性バッファは不要
 - ループフィルタを単純な積分器にすればP制御、さらに積分器を追加すれば送受の周波数差への追従特性のよいPI制御となる

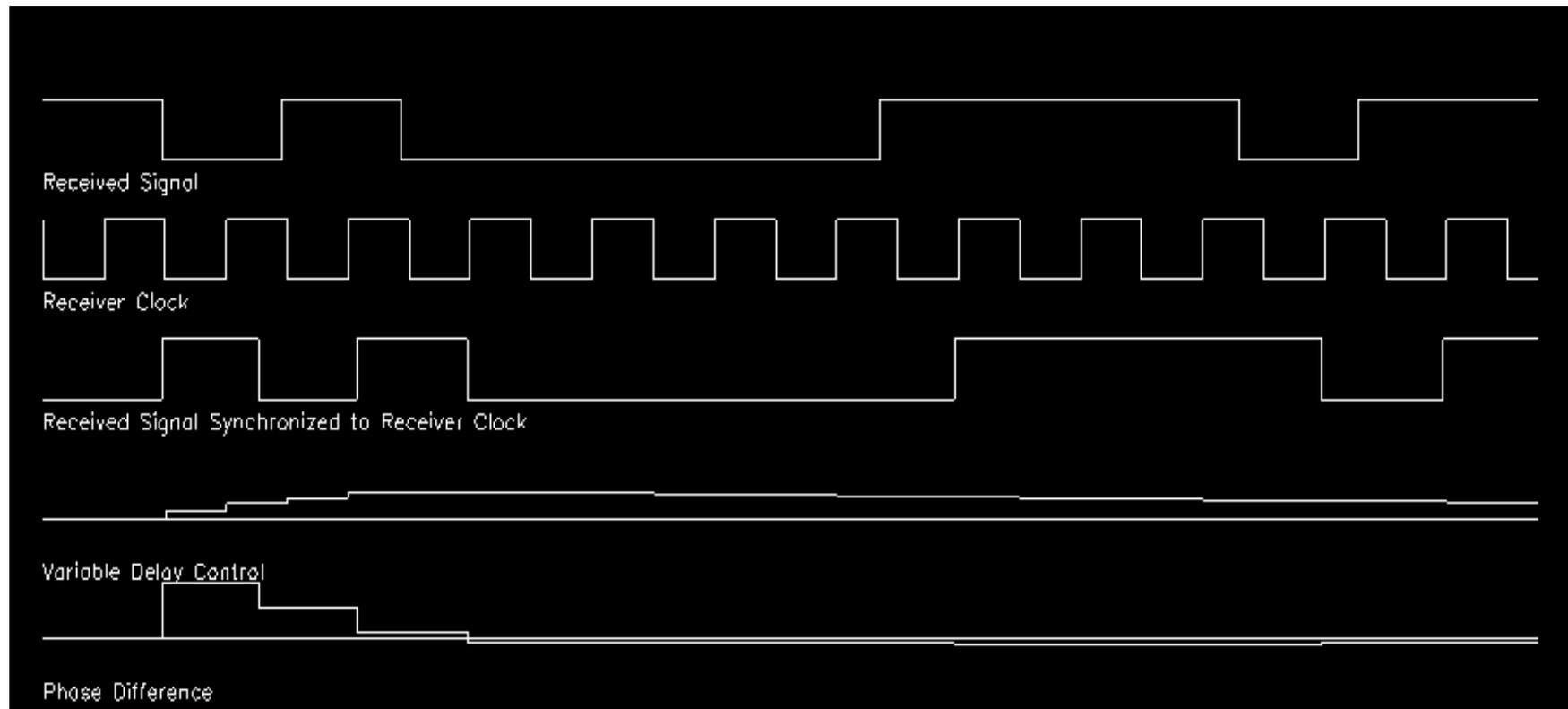
DLLによる クロック回復なしのデータ回復



P制御で送受の周波数が同一の場合のシミュレーション



P制御で送信側の周波数が受信側より2%低い場合のシミュレーション



PI制御で送信側の周波数が受信側より2%低い場合のシミュレーション



イーサネットの場合

- 最大パケット長は1500B(12Kb)
- 送受信クロックの許容誤差は $\pm 0.01\%$
 - 最大パケット長で、パケット先頭と末尾の位相差は ± 2.4 周期
 - パケット先頭での位相差の整合を含め、 ± 2.9 周期のVDLで、データ回復が可能
 - 受信側クロックの許容誤差をさらに減らせば、 ± 1.7 周期で、データ回復が可能に
 - パケット間では、クロック以外の回路は電力断可

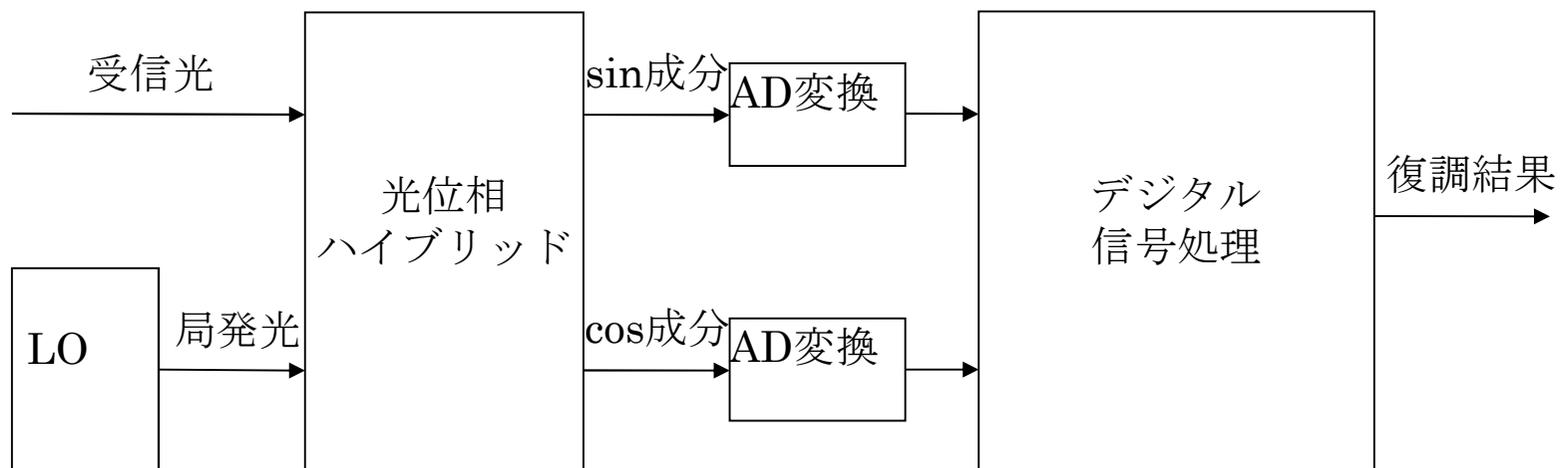
多波長光パッケージの場合

- 最大パッケージ長は1500B(12Kb)とすると
 - 100波長なら、波長あたり最大120ビット
- 送受信クロックの許容誤差が $\pm 0.01\%$ なら
 - 最大パッケージ長で、パッケージ先頭と末尾の位相差は ± 0.024 周期
 - パッケージ先頭での位相差の整合を含め、 ± 0.524 周期のVDLで、データ回復が可能

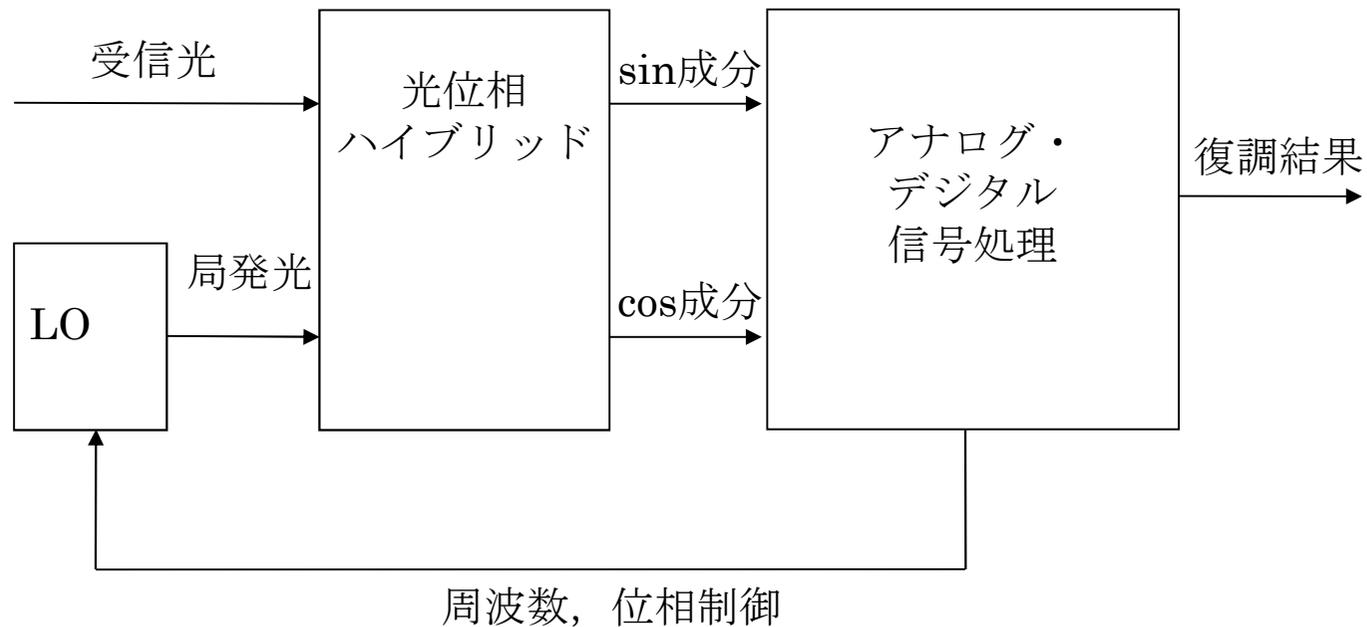
デジタルコヒーレント受光

- デジタル信号処理で各種補正が可能
 - 周波数、位相補正により、光PLLは不要に
 - QAM、OFDM復調等も可能
 - OFDMではシンボルレートは低いが、高いサンプリングレートが必要で、**本末転倒？**
 - 分散補償、非線形補償も可能
 - **非線形補償は、光網では無理** (除: 全波長パケット)
- 高度な補正には膨大な演算が必要で、演算量に比例して**消費電力も増える**

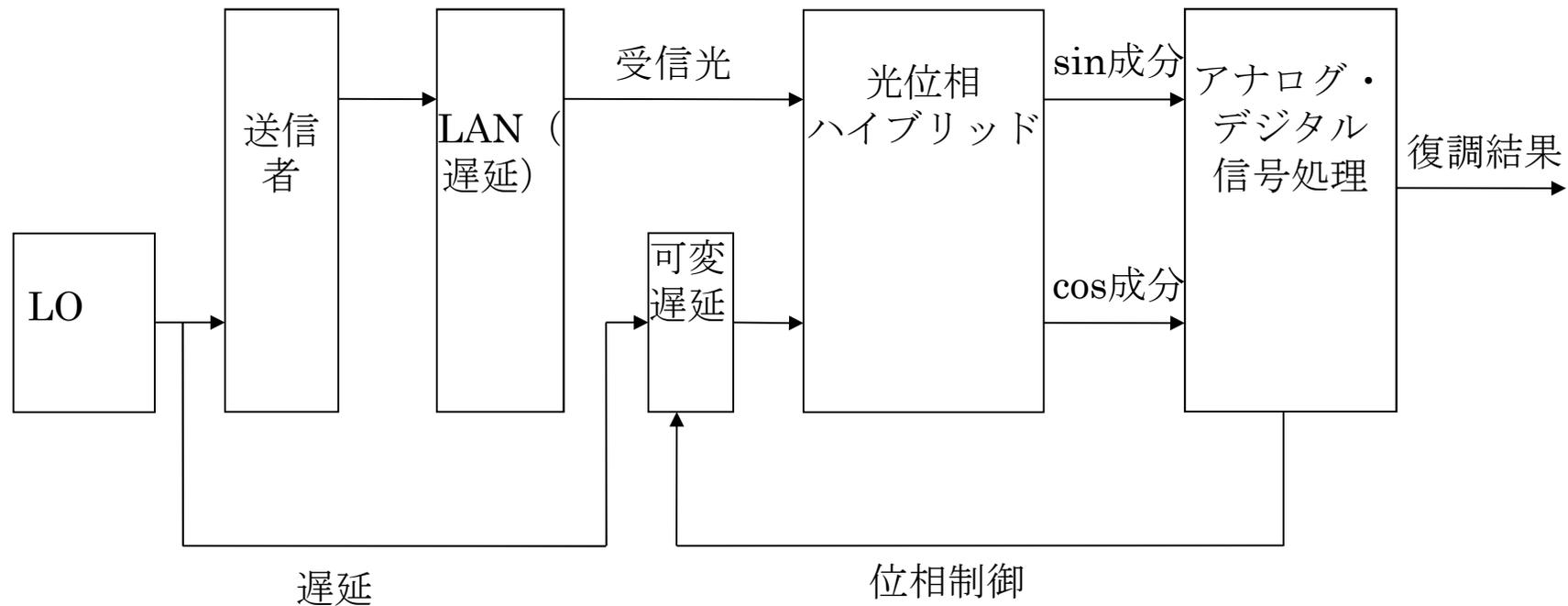
デジタルコヒーレント受信方式



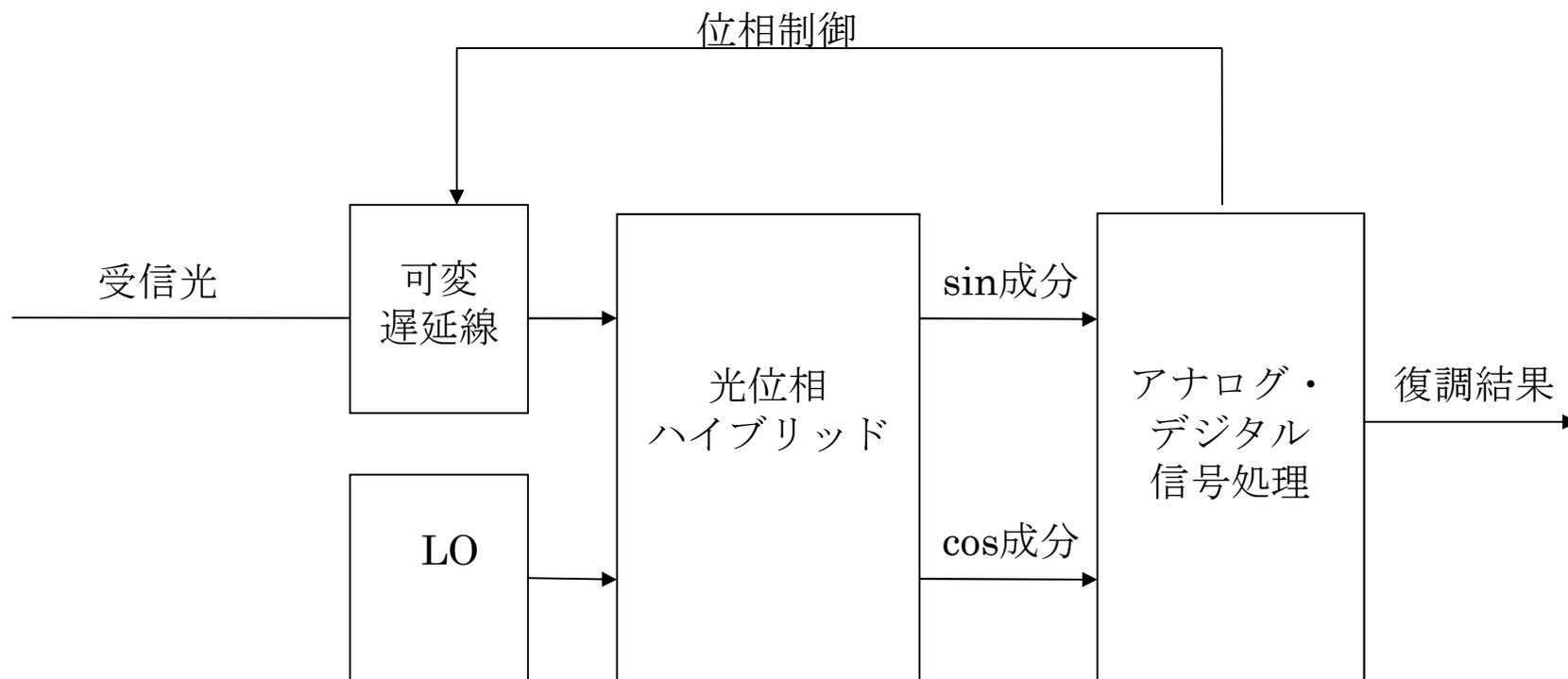
光PLLによる アナログコヒーレント受信方式



光DLLによるLANでの アナログコヒーレント受信方式



光DLLによるWANでの アナログコヒーレント受信方式



位相差の程度

- 送受周波数差(含線幅)が1MHzだとすると
 - 1Tbpsで1500Bのパケットは12nsなので
 - パケットの途中で位相は4度程度変動
 - 変調方式によっては、パケット先頭で位相を合わせれば十分
 - 高度な変調方式では、パケット途中でも位相を追従させる必要がある
 - 10Gbpsでは、位相は400度程度変動
 - やはり、光はビットレートが速いほど楽

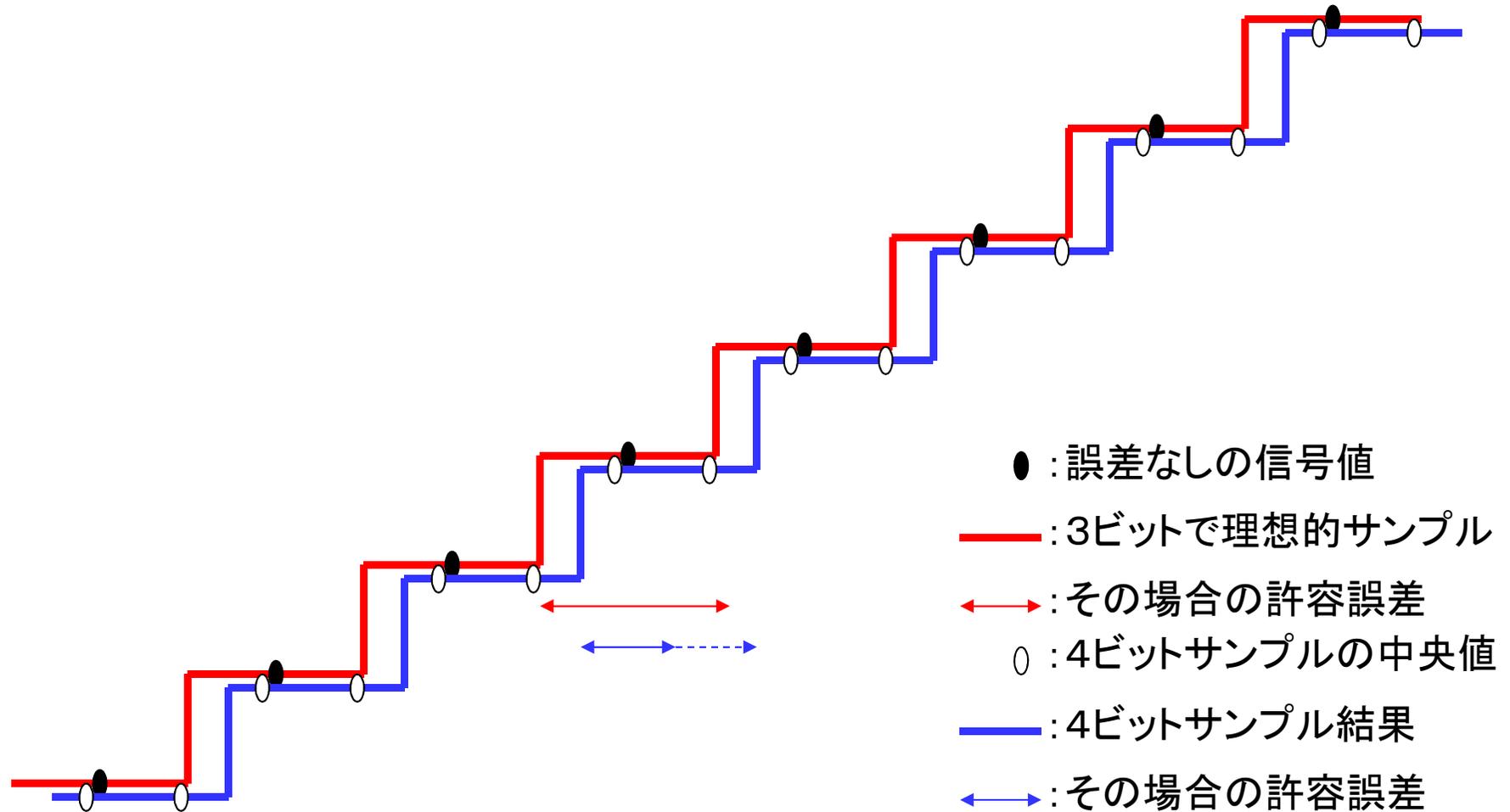
偏波多重？

- 光パケット網を構成する光スイッチ素子は
 - ほぼ完全な偏波無依存は、無理？
- 光パケット網では、何十段も光スイッチを経由
 - 偏波間で、かなりの強度差が累積しそう
 - 0. 1dB差が100段だと、最悪10dB、 3σ で3dB差
 - 強度差を考えない中継系では、SNが劣化
- 偏波多重はあきらめ、受信側でHとVの強度の大きい側を受信するのが現実的？

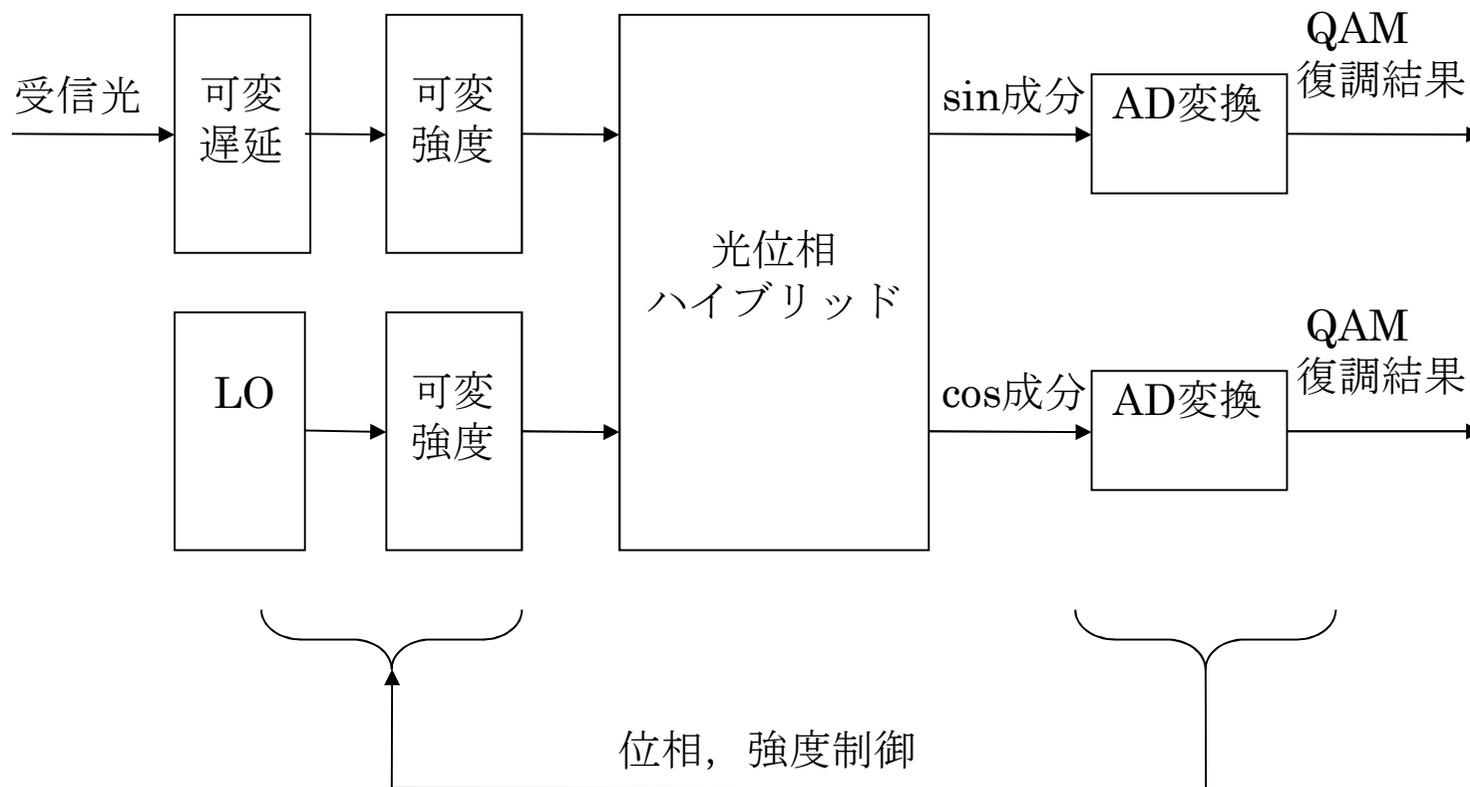
QAM変調と AD変換器の効率的利用

- 64QAMの場合、4～5ビット程度の精度でAD変換して、3ビットに変換
 - 位相補正や偏波多重もやるならしようがないが、QAMだけではAD変換器の精度がもったいない
- 3ビットのAD変換器を、アナログ的にフルスケールで動作させると、楽
 - AD変換器の出力が、そのままQAMの復調結果

4ビットADから3ビットへの変換



強度補正も行うDLLによる アナログコヒーレント受信方式



おわりに

- (多波長光)パケットは短いので
 - パケットのCDRやアナログコヒーレント受光のためのPLLによる位相同期確立時間がとりづらい
- 送受クロックの周波数差が小さければ
 - 短い期間の位相同期は、DLLで迅速に確立可
 - 受信信号をDLLで受信側クロックに同期させ
 - データ回復やアナログコヒーレント受光が可能に
 - アナログコヒーレント受光で強度もアナログ制御すれば、AD変換器の精度もフルに使える
 - » コヒーレント受光の本筋は、実はアナログ？