

分散型海洋レーダ開発に向けての 高精度同期信号供給システム開発



杉谷 茂夫 ・ 雨谷 純 ・ 岩井 宏徳

情報通信研究機構
沖縄電磁波技術センター

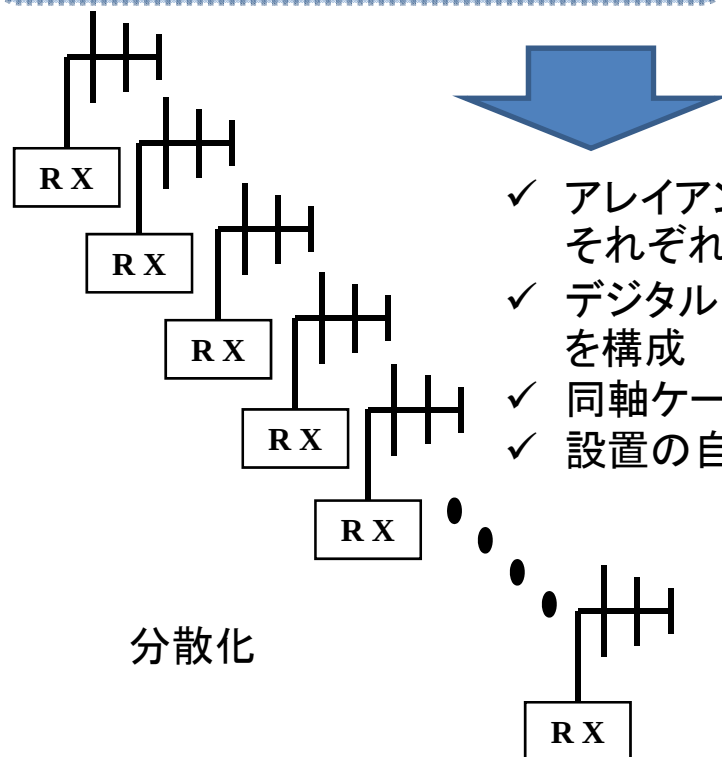
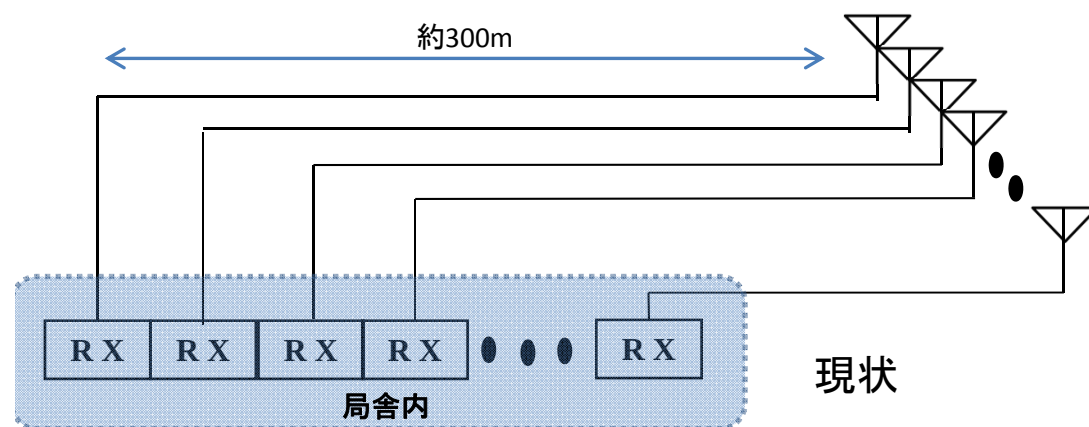
2014年12月11日九州大学応用力学研究所

情報通信研究機構
沖縄電磁波技術センター

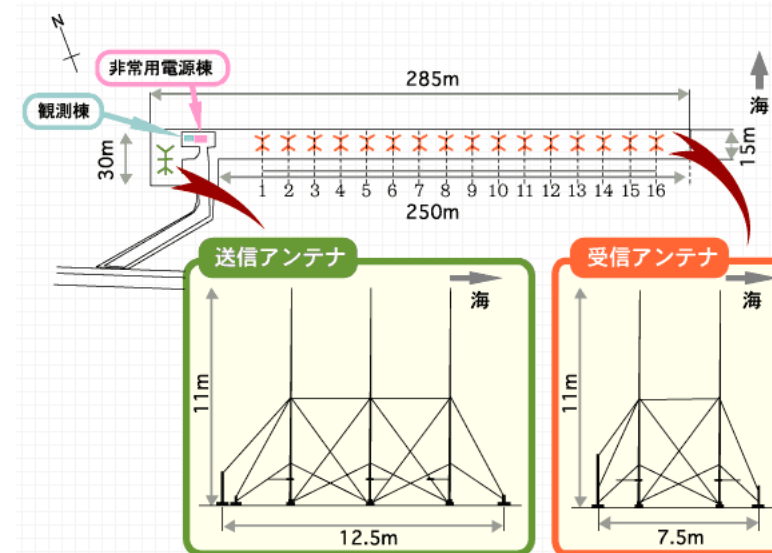
- 開発の動機
- 無線方式を用いた高精度な同期信号の供給原理
- 実験結果
- まとめ

開発の動機

- 短波帯海洋レーダを分散化する



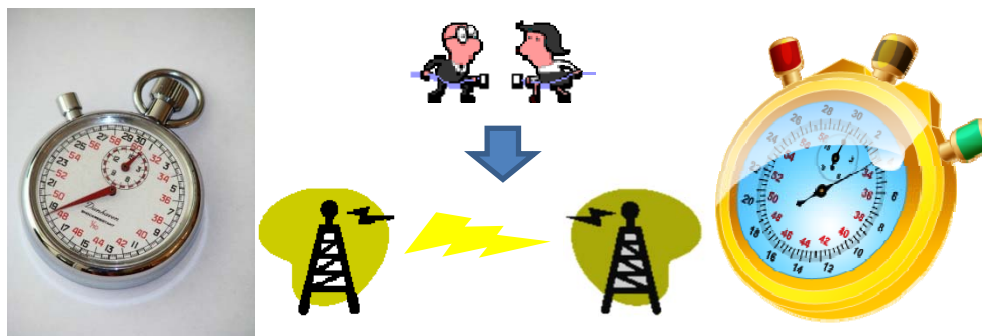
- ✓ アレイアンテナ直下に受信機を備え
それぞれの受信機は単独で動作
- ✓ デジタルビームフォーミングアンテナ
を構成
- ✓ 同軸ケーブルを廃止
- ✓ 設置の自由度を高める



9MHz帯短波海洋レーダの例



- 少し離れた場所に設置する複数の装置間の同期をとりたい(装置間の同期信号の共有化)
 - ➡ 装置の配置の自由度を確保
- 信号ケーブルを必要としないシステムを構築したい
 - ➡ 配線工事等を簡略化＋信号供給の無線化
- 同期の精度は1ナノ秒以下を確保したい
 - ➡ 無線方式による既存機器の同期精度を向上
GPSによる方法は一般に100ナノ秒程度



- 遠く離れた場所にある二つの時計を精密に測定する既存の手法



- 衛星双方向時刻比較方法

正弦波(10MHz又は5MHz)と1PPS信号を衛星で折り返して測定する

- 精度向上の手法 → 群遅延測定法

信号の到達時間を計測する方法の一つで簡便で精度が良い

1. 広帯域化による等価帯域幅拡大 → 欧米で実施
2. 周波数を離れた二つの狭帯域の疑似雑音信号 → **NICT** で開発^{*1}
(複疑似雑音方式衛星双方向時刻比較)

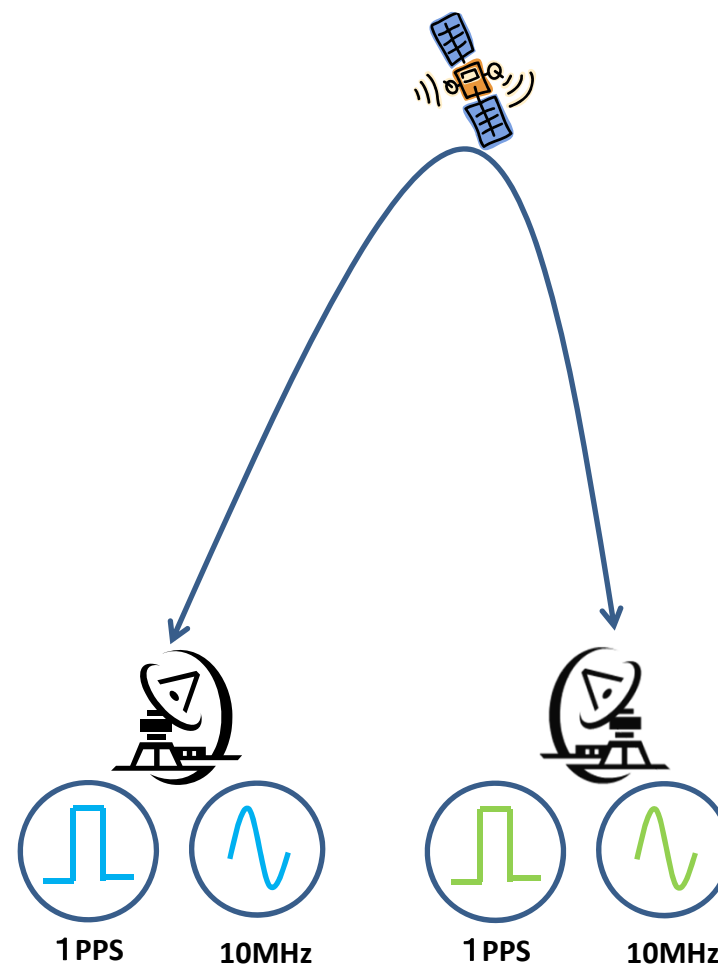
^{*1}: 雨谷純, 後藤忠弘, “複疑似雑音方式衛星双方向時刻比較装置の開発”, 情報通信研究機構季報. Vol.56

高精度同期信号の供給方法

衛星双方向時刻比較



- 遠くの二か所の時計の時刻差を知る方法 ➡ 互いに衛星を経由して基準信号を送りあい、自局の時計を基準にして計測し、その差を取る。
 - 到達時刻の計測法 ➡ パルス計測, 搬送波位相の遅延計測, 広帯域による群遅延計測がある。
 - 疑似雑音を用いた群遅延計測が簡便で比較的精度よく計測できる
- ➡
- 疑似雑音を用いた群遅延測定の場合送信側と同じパターンコードの信号を受信系で生成し、その相互相関を取り相互相関関数の極大値となる時間を測定する。



衛星双方向時刻比較では
基準信号を相互に送り合うことにより
それぞれの時計の比較を行う

高精度同期信号の供給方法

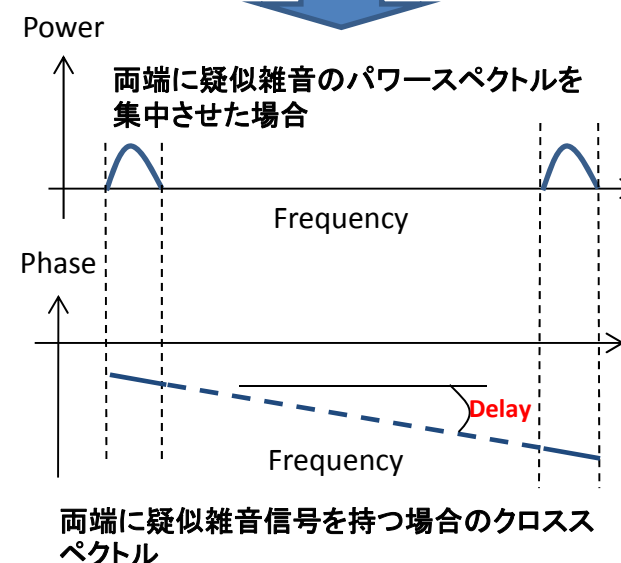
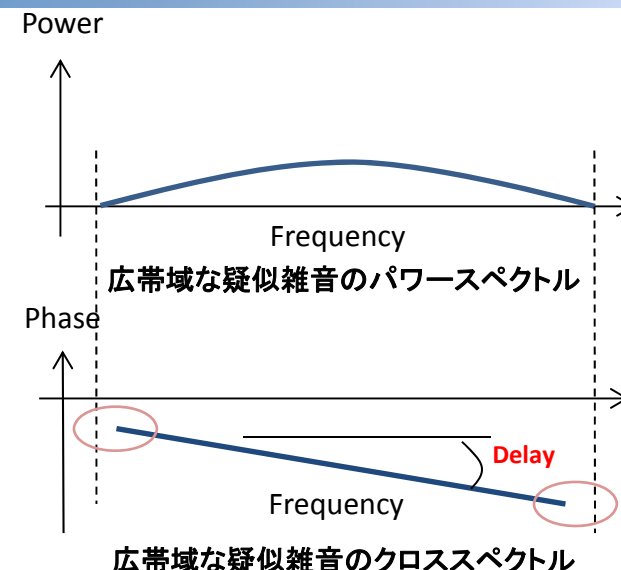
複疑似雑音信号の利用



- 群遅延の決定精度を決める要素
- 相互相関関数のピークの鋭さ
- ピークの幅は信号の周波数帯域幅に反比例するので、信号が広帯域であるほど精度は向上する。
- 通常の衛星双方向時刻比較は単一の広帯域疑似雑音信号を相互に送受信する。



- 帯域の両端にパワースペクトルを集中させる複雑音信号を用いることにより群遅延精度の改善を図る → 右図の群遅延Delayを精密に測定することが精度向上につながる



高精度同期信号の供給方法 疑似雑音信号による精度^{*1}



- 一つの疑似雑音信号方式の群遅延決定精度 σ_τ

疑似雑音信号のチップレート(BPSK変調) R_c , 積分時間 T , 搬送波対雑音比 C/N_0

$$\sigma_\tau \sim \frac{1}{3R_c\sqrt{TC/N_0}} \quad (1)$$

近似式の条件:

疑似雑音信号をBPSK変調した場合の一つのパワースペクトルの中央部を考えて、チップレート R_c がパワースペクトルのバンド幅の1/2に等しい場合。

- 二つの疑似雑音信号方式を用いたときの精度 $\sigma_{\tau S}$

離間周波数 F

$$\sigma_{\tau S} \sim \frac{1}{2\pi F\sqrt{TC/N_0}} \quad (2)$$

近似式の条件:

二つの疑似雑音信号パワースペクトルは離間した周波数関係にあり、そのクロススペクトルの位相傾斜が一つの直線上に乗る時の場合でありチップレートは帯域幅の1/2に等しい。

- 二つの疑似雑音信号方式を用いたときの拘束条件

一つの疑似雑音信号の式は他方の疑似雑音信号の式とで決定される群遅延を反映した位相が一つの直線状に乗る必要があるための拘束条件が存在する

$$R_c > \frac{2F}{3\sqrt{TC/N_0}} \quad (3)$$

チップレートの条件:

デジタル処理による相互相関を計測する場合は $2\pi(F)\sigma < \pi$ を満たす必要がある

実際には群遅延決定を行うための位相不確定性を決める最低条件のため、チップレート R_c はさらに広めにとる必要がある。

^{*1}: 雨谷純, 後藤忠弘, “複疑似雑音方式衛星双方向時刻比較装置の開発”, 情報通信研究機構季報, Vol.56

無線局免許の簡易化と汎用性

- 無線局免許の取得は費用と時間が必要でしかも手間も大変



- 無線局免許の簡易化に特定小電力無線局制度を積極活用
技術基準適合証明の取得のみで即運用可！
- 特定小電力1200MHz帯を利用し、汎用デバイス等の活用
容易な製造と低価格化！



- ただし、同期信号を伝送するには無線設備の条件が厳しい！
- 最大周波数の離間は36MHz ・ 最大占有帯域幅32KHz
- 最大出力は10mW



- どの程度の性能(精度)が得られるのか？

- 精度を見積もる

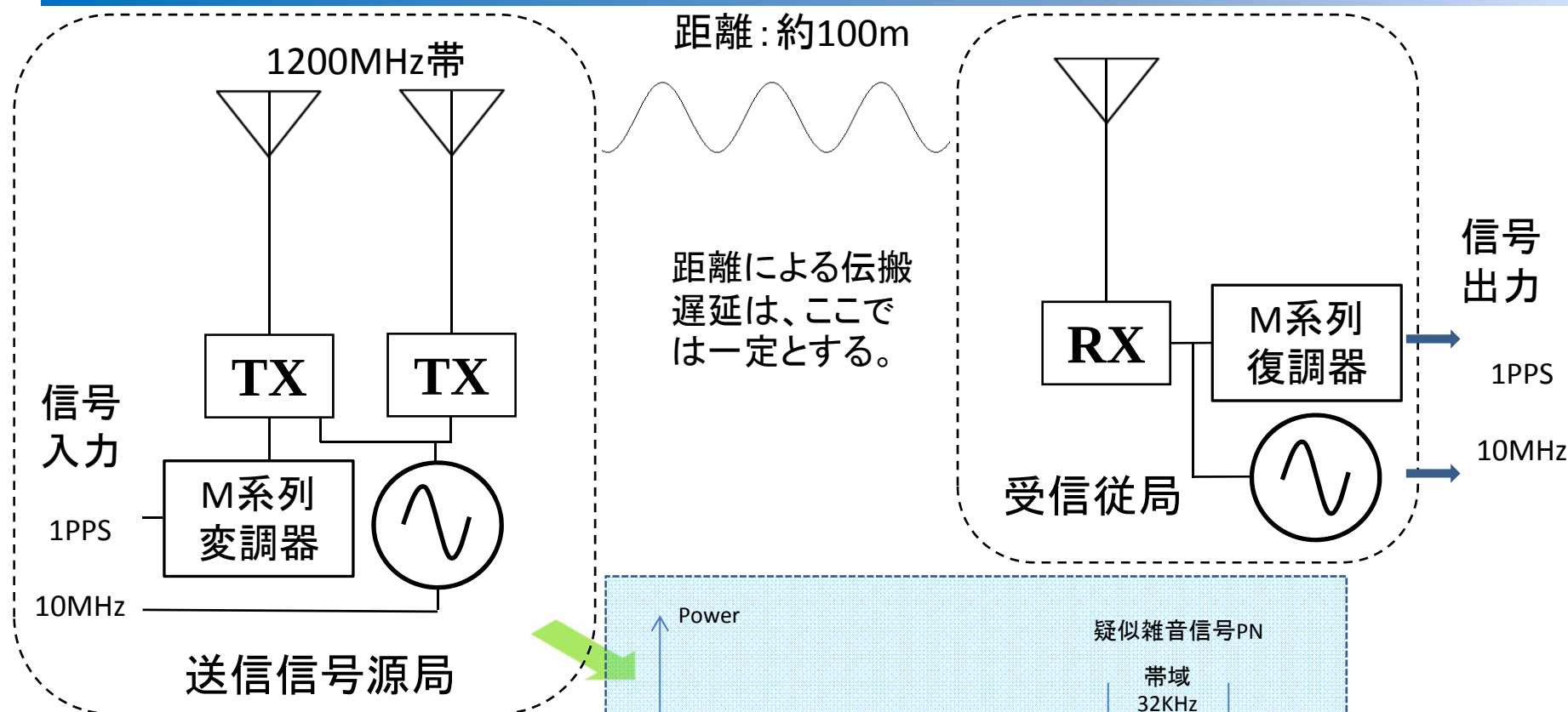
1200MHz帯特定小電力で許される無線設備の条件より
離間周波数 $F=36\text{MHz}$ 帯域幅 32KHz の時、 $\sigma_{ts} \sim \frac{1}{2\pi F \sqrt{TC/N_0}}$ (2) を用いて

$$\therefore \sigma_{ts} \sim 2.9 \times 10^{-12} [\text{s}] \quad T=1[\text{s}], C/N_0=57.5[\text{dBHz}]$$

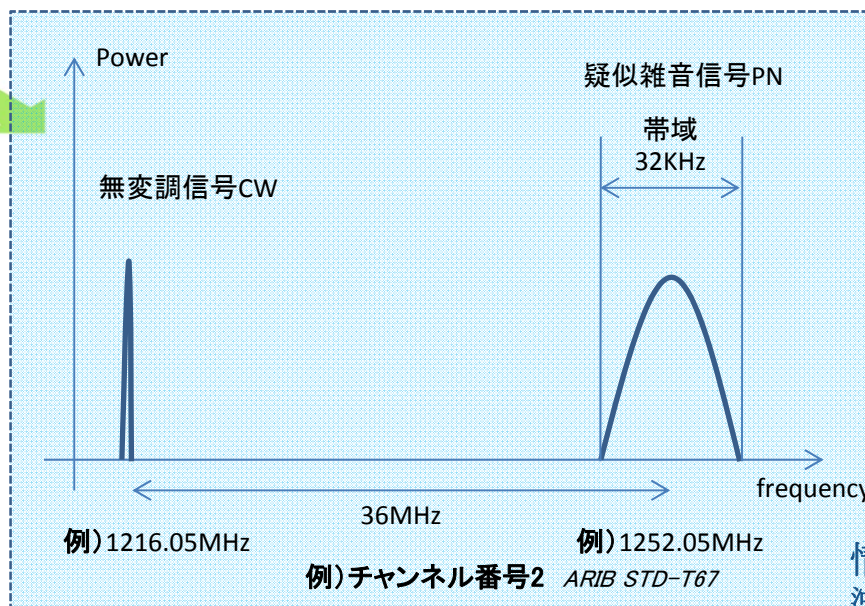
また、拘束条件から相互相関を取るための積分時間を1秒としたときのチップレート R は無線設備の条件と通信の C/N_0 の条件から $16.0[\text{kcps}]$ よりも大きな値にする。

- ① 2波での群遅延決定精度は上記より目標値(1nS)に対して十分に得られるが、疑似雑音の帯域幅が衛星双方時刻比較法よりもあまりに狭いため、位相不確定性を解くために、 C/N を高くする必要があると考えられる。
- ② 2波での群遅延決定精度は、理論上は十分得られる。しかし、実際は、受信機ノイズより、他による影響が大きいので、理論値よりはかなり悪くなると予想される。それでも、目標値レベルは得られるはず。

同期信号供給装置の構成

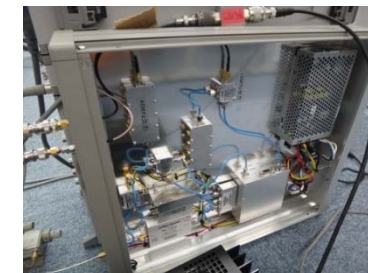


注: 疑似雑音信号は一方の搬送波にのみ使用し、他方はCW伝送とする。

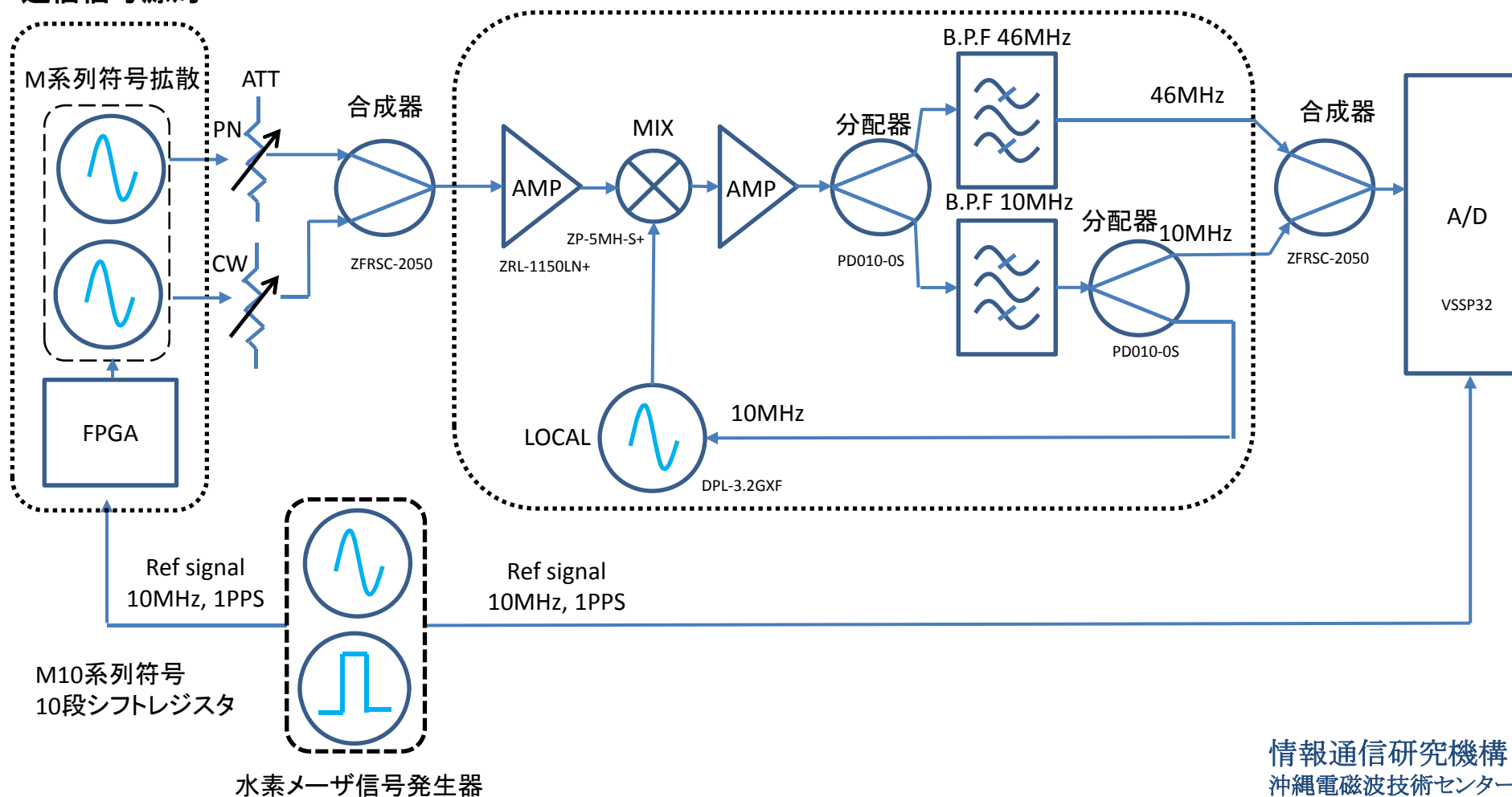




送受信機間距離100m
を想定し受信機信号
入力を-74dBmに設定



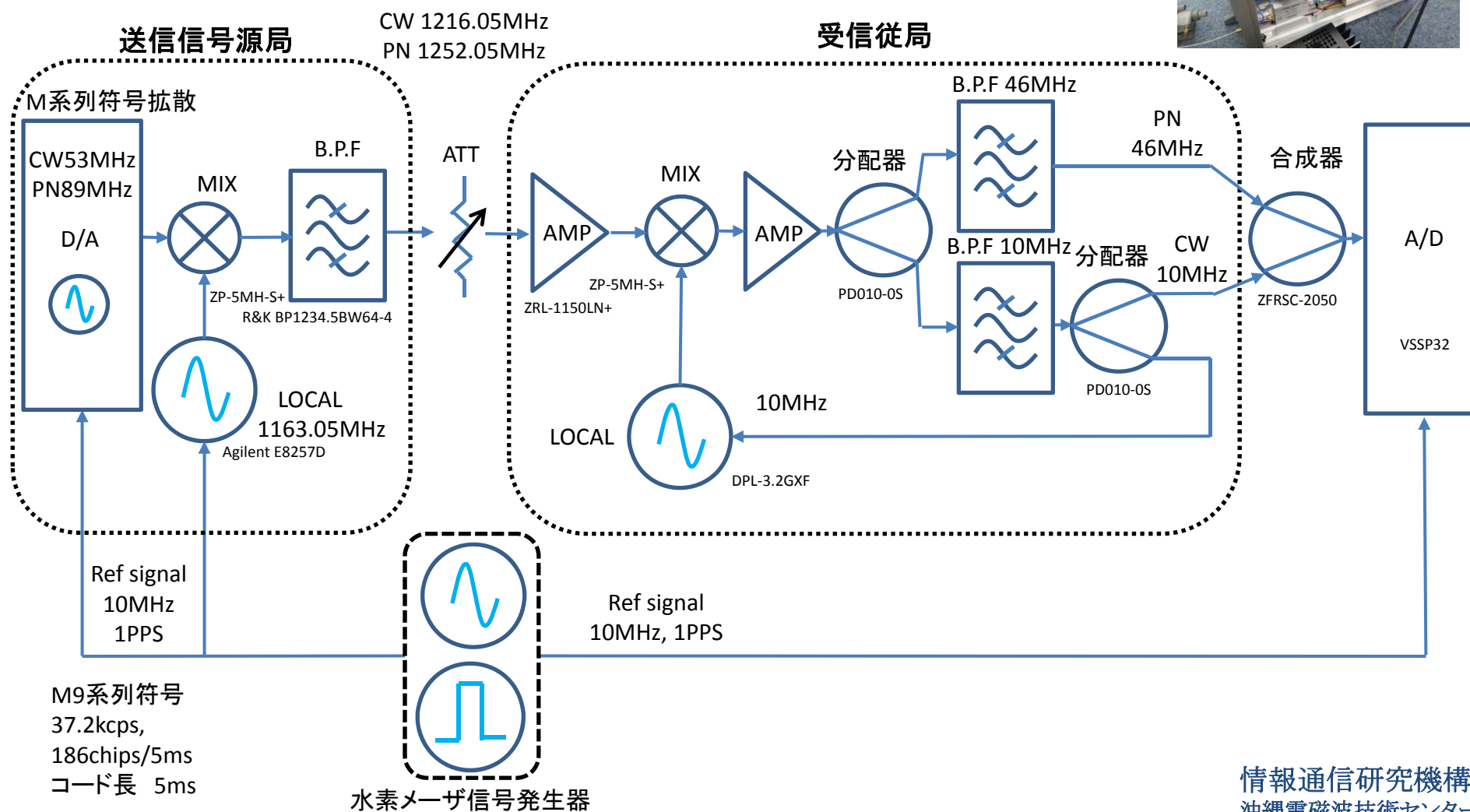
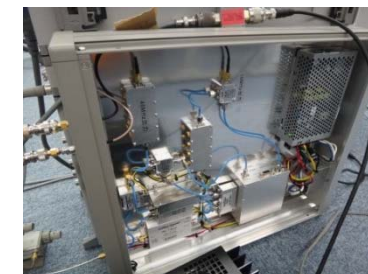
受信従局



実験装置の構成 送受信を行った実験の構成図

- 送信機と受信機は同軸ケーブルを用いて接続

送受信機間距離100mを想定し受信機信号入力を-74dBmに設定



実験結果 条件

• 試験信号周波数

無変調波 1216.05MHz, 疑似雑音符号による搬送波 1252.05MHz → 周波数間隔 36MHz,

搬送波入力レベル 約-74dBm

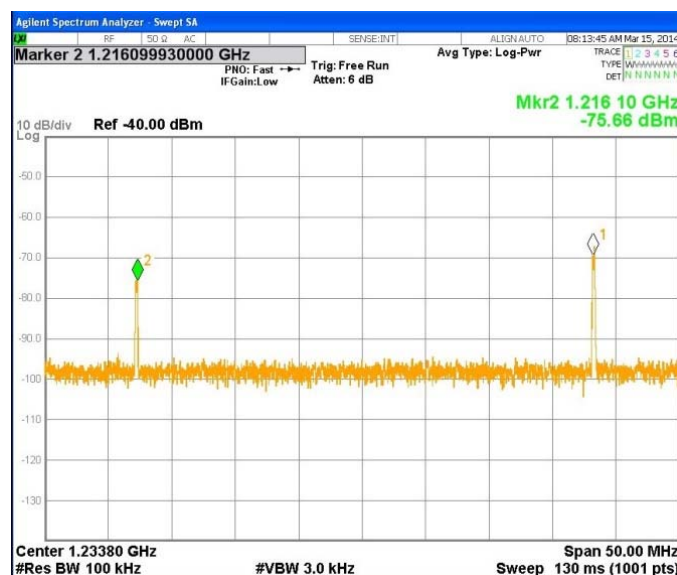
疑似雑音符号による信号 占有帯域幅32KHz, M系列符号 M9, チップレート37.2Kcps, 186chips/5ms

• 試験機材

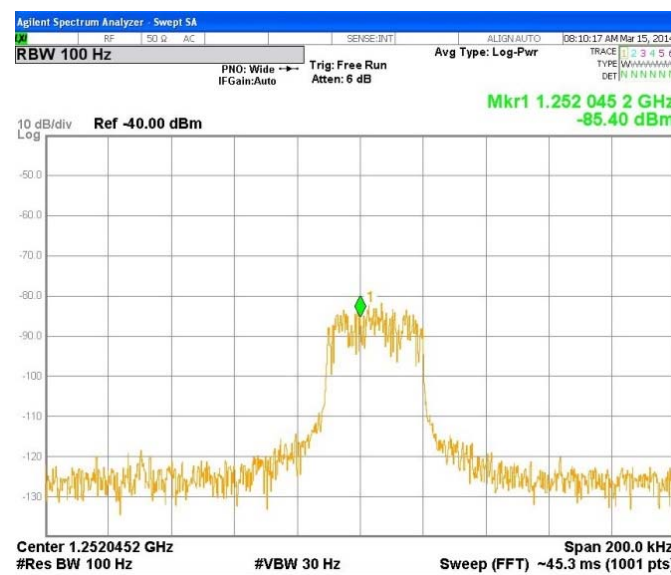
同軸ケーブル 長短2種類の遅延量

①ケーブル長1.01m, 短縮率 0.79 実測値 4.370 ns, 計算値 4.266ns

②ケーブル長10.05m, 短縮率 0.67 実測値 50.315ns, 計算値 50.035ns



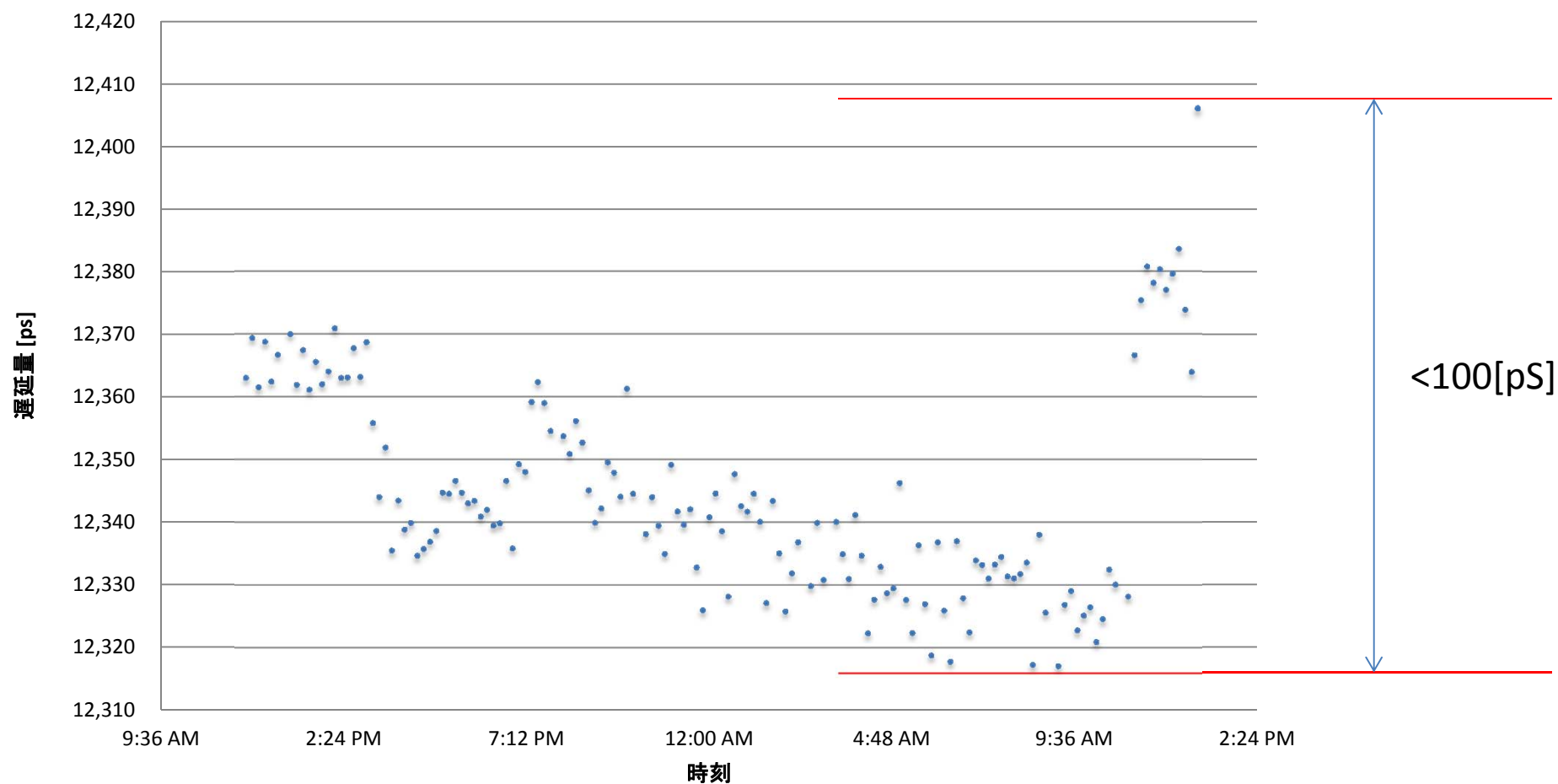
2周波のスペクトラム



疑似雑音符号による搬送波のスペクトラム

実験結果

2波(CW,PN)を用いた測定結果



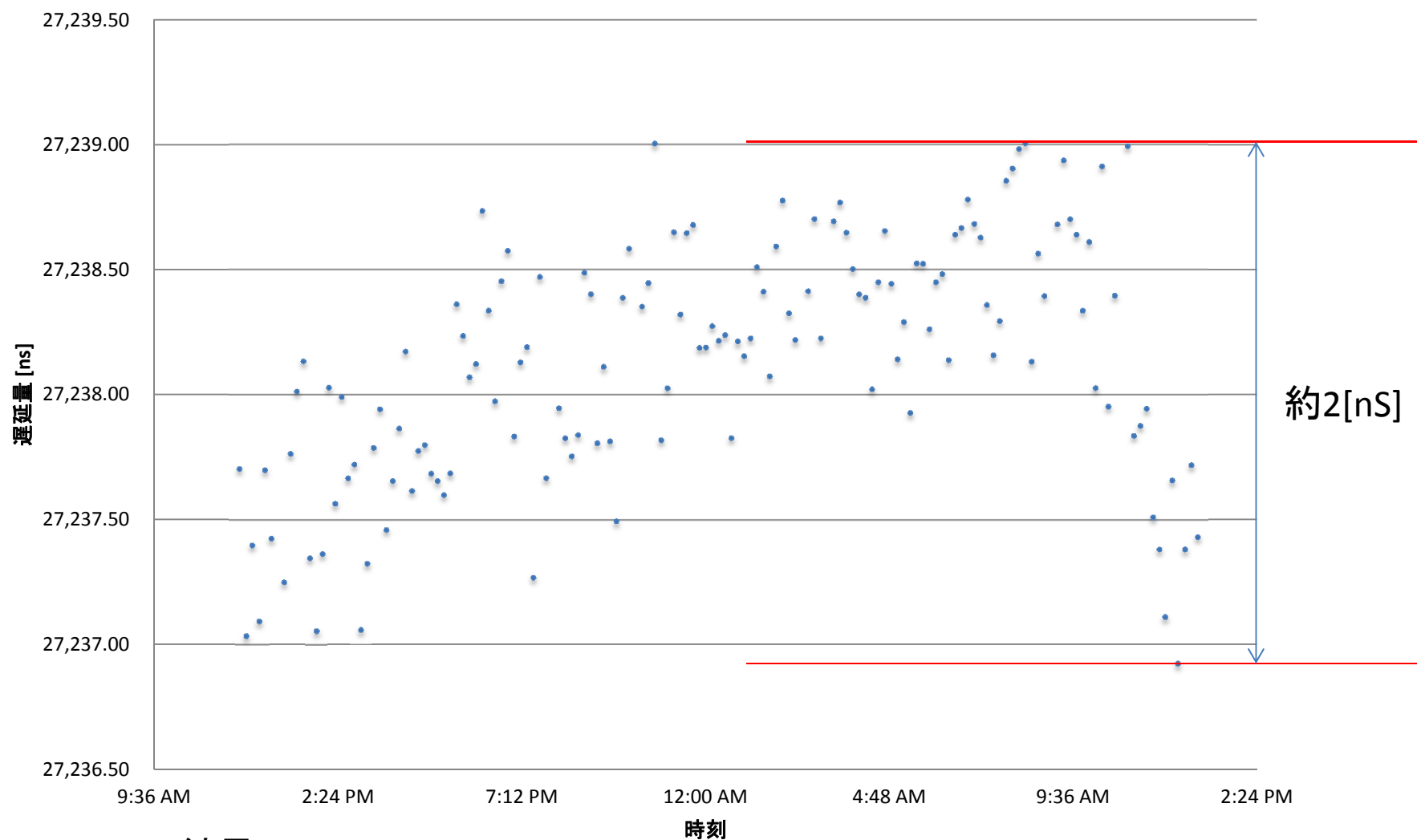
結果：

24時間連続に送信し、10分おきに測定した。

変動幅は100ピコ秒(p-p)に収まる結果を得た。

実験結果

疑似雑音信号のみを用いた場合の測定結果



結果：

24時間連続に送信し、10分おきに測定した。

変動幅は約2ナノ秒(p-p)に収まる結果を得た。

特定小電力60GHz帯での伝送

- 同期信号を、例えばセンター局から独立した受信機へ伝送できることがわかった。

このことにより独立した受信機は同期信号源に同期して受信することが可能となる

- 実際の海洋レーダ受信機は受信情報の伝送も必要
- 1200MHz帯技術適合基準取得には、さらに壁があった！ ← CWの伝送ができないなど（のちに判明！）



- 1200MHzで考案した同期信号の伝送を60GHz帯を利用して伝送する。
- 自己ヘテロダイン方式（NICT特許）による復調の場合は、オリジナルの信号を伝送可能となる→商品化されている。

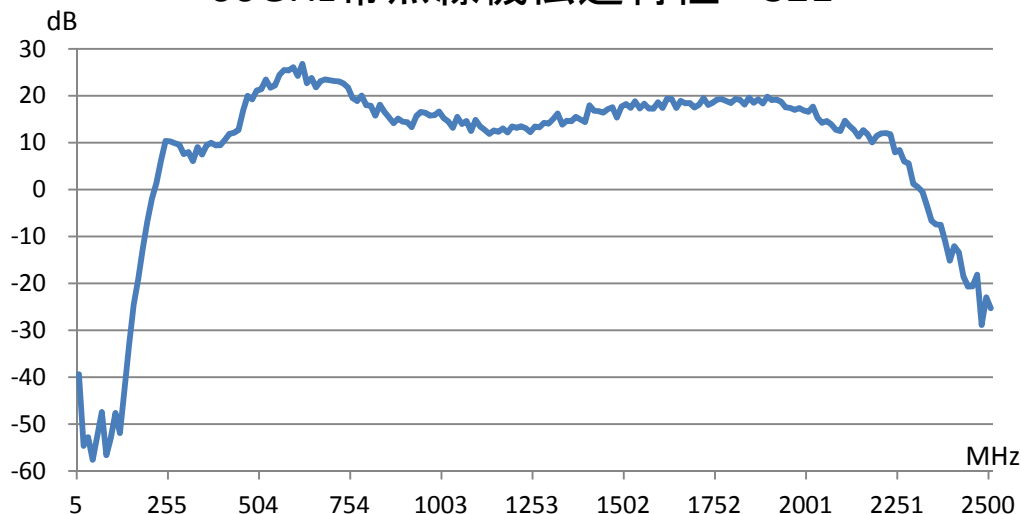
特定小電力60GHz帯での伝送

- 利用した機器 BS・CS・デジタル共聴用機器
DXアンテナ ミリ波送受信機 MTX23L1K,MRX23L1K
- 伝送可能な電波の型式と伝送帯域
CW , FSK , PSK , QAM , OFDM
470～710MHz , 1032～2100MHz
- 送信機と受信機を対向で使用
一方通行



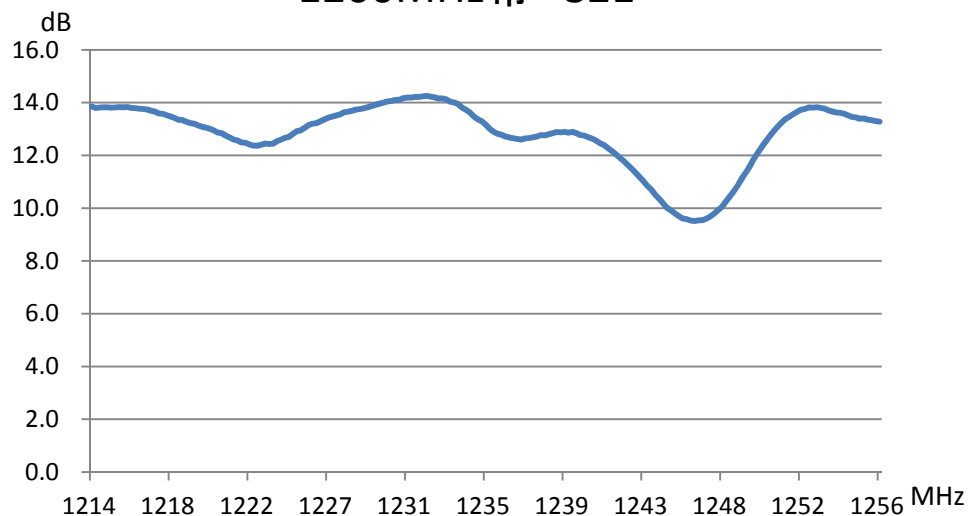
特定小電力60GHz帯での伝送特性

60GHz帯無線機伝送特性 S21

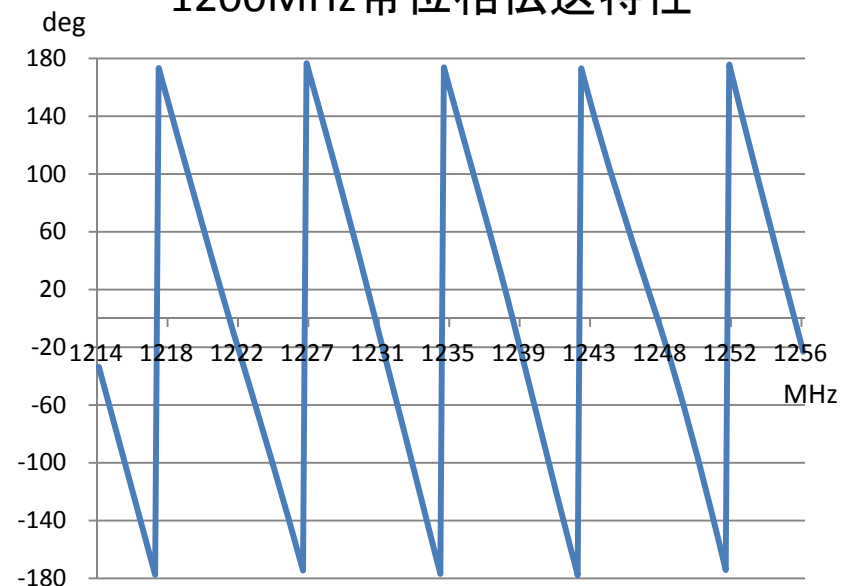


TXとRXとの離間9.5mの時

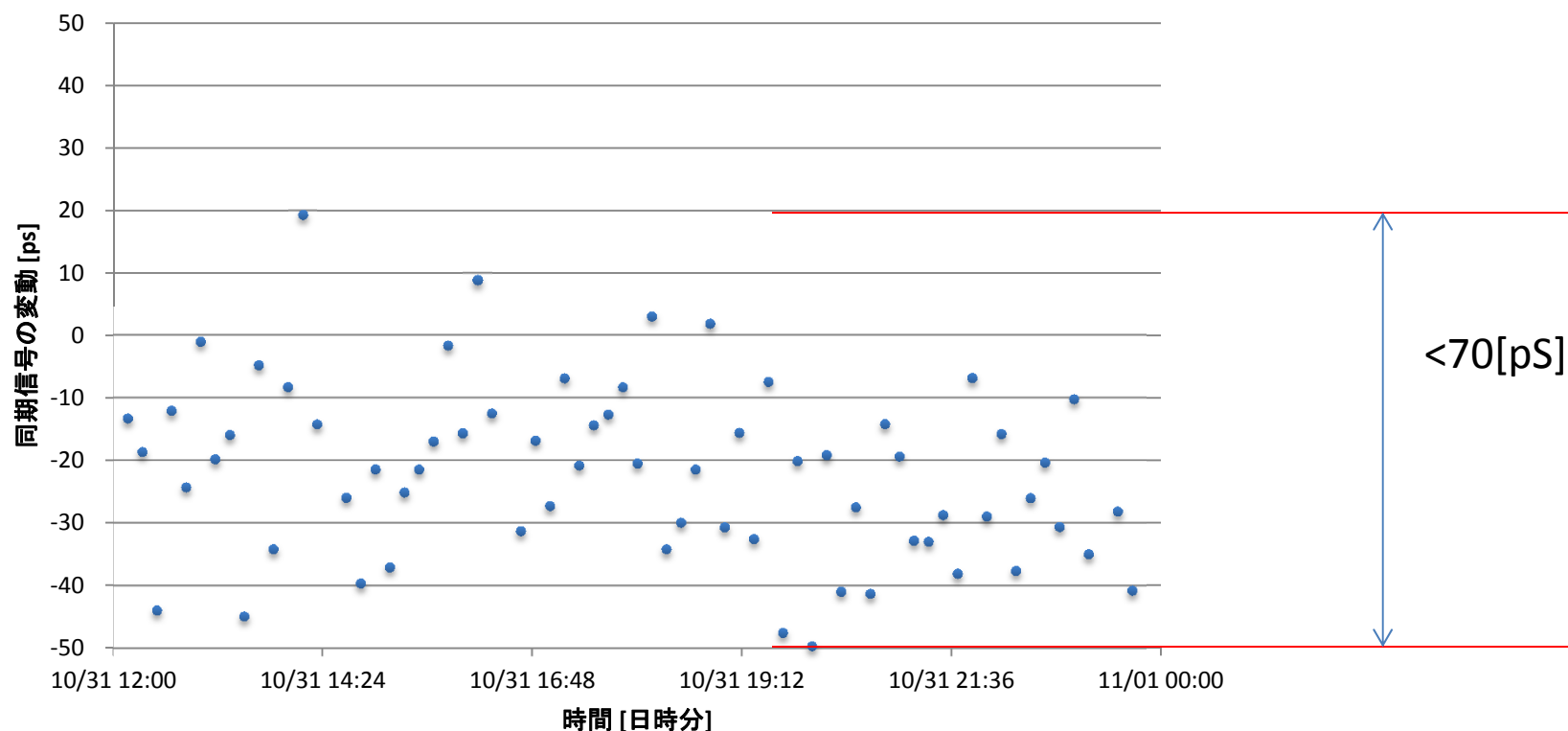
1200MHz帯 S21



1200MHz帯位相伝送特性



特定小電力60GHz帯での伝送特性



まとめ

- GPSなどによる従来の同期信号よりも精度の高い無線による供給方法を提案した。
- GPSが100ナノ秒程度に対して、本実験では100ピコ秒前後の精度が得られた。
- 装置の普及のため特定小電力無線局制度を積極的に活用した。
- 伝送する信号に時刻情報を織り込んだ実験を行う。
- 無線伝送のため、遅延時間の補正を行う必要がある。このために信号を折り返すまたは時刻情報を受信データと重畳する双方向通信を開発し実験する予定である。