

# 修士論文

前方散乱方式を用いた流星レーダー観測手法の開発

および 5ch 流星電波干渉計との同時観測の試み

**Development of a meteor-radar observation tool by using forward-scattering method and a trial of simultaneous observation with 5 channel meteor radio interferometer**

---

報告者

学籍番号： 1235083

氏名： 佐藤 匠

---

指導教員

山本 真行 教授

---

令和3年2月5日

高知工科大学 知能機械工学コース

# 目次

第1章 序論	…1
1.1 背景	…1
1.2 目的	…3
第2章 観測手法	…5
2.1 流星レーダー観測	…5
2.1.1 レンジング	…5
2.1.2 送信システム	…7
2.1.3 受信システム	…11
2.2 5 c h 流星電波干渉計	…14
2.2.1 校正 (キャリブレーション)	…15
2.3 その他の流星観測	…18
2.3.1 光学観測	…18
2.3.2 インフラサウンド観測	…19
第3章 解析手法	…20
3.1 レンジングコードの視認比較	…20
3.2 同一流星観測時の3次元位置推定	…23
第4章 結果	…27
4.1 1月3, 4日の送信実験	…27
4.2 1月16日の送信実験	…28
4.3 1月22日の送信実験	…29
4.4 1月27日の送信実験	…30
4.5 1月31日の送信実験	…31
4.6 2月2日の送信実験	…32
第5章 考察	…35
5.1 1月3, 4日の送信実験	…35
5.2 1月16, 27, 31日の送信実験	…35
5.3 2月2日の送信実験	…35
第6章 結論	…40
謝辞	…41
参考文献	…42
付録	…45

## 第1章 序論

### 1.1 背景

流星(Meteor)は流れ星(Shooting Star)とも称され、その正体は宇宙空間に漂う直径およそ数[mm]～数[cm]の主に岩石質の塵の粒である。この塵の粒はもともと太陽系内の小天体(彗星や小惑星)の一部であったと考えられ、地球のような太陽系内の惑星と同様に太陽の周りを一定の周期で公転(ケプラー運動)している。塵の粒の公転軌道が地球の公転軌道と空間的に交差することがあり、特定期間に集中的に交差する場合“流星群”と呼ばれる(“〇〇座流星群”と呼称されることが多く、前述の空間的に交差する点(輻射点)と視線上で重なる星座の名前をとることが一般的である)。

地球の超高層大気中で塵の粒が地球との相対速度による莫大な運動エネルギーを持ちながら地球大気と衝突するとき、平均して約 40 [km/s]もの対地速度で地球大気を貫く[1]。塵の粒のまわりの膨大な数の大気分子が塵の粒に瞬間的に与え

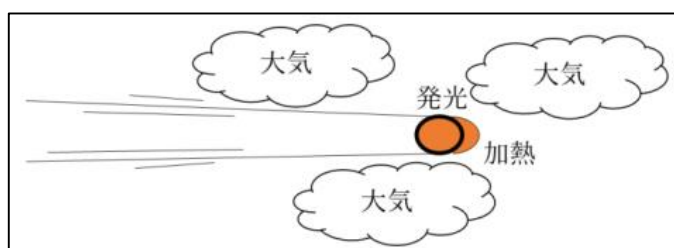


図 1.1 空力加熱

る空力加熱、ならびに塵の粒の前方で接触する大気が瞬間的に断熱圧縮されることにより、塵の粒は超高温(約 4000 [K])[2]になり、やがて昇華する。一方で塵の粒のまわりの大気分子との衝突により、塵の粒の組成物質や大気分子の一部が気化・プラズマ化する(電離して陽イオンと電子となる)ことでガスが発生し発光する。流星の発光要因は空力加熱によるが化学反応的に燃焼して光っているわけではなく、このガスそのものの原子・分子やプラズマの発光である(図 1.1)。

地球大気のうち熱圏下部に相当する超高層大気(電離層では E 層付近)の高度約 80～120 [km]において、流星の発光時に流星飛跡に沿って発生したプラズマにより細長く高密度な円柱状の電離柱(プラズマ)が形成される。流星電波観測はこの電離柱が入射電波を反射・散乱させる性質を用いた流星観測手法である(図 1.2)[3]。この散乱と流星の関係は前述の超高層大気の性質に起因する。特に流星からの金属イオンは消滅速度が遅く寿命が著しく長いことから前方散乱(2.1 節に後述)に大きく寄与すること、さらにこれが電離層 E 層の密度が突発的に上昇し異常電波伝搬をもたらすことで知られるスポラディック E 層の生成にも関与することが知られている(本研究では流星による散乱電波の性質まで深く議論しないため、詳細は[4]等を参照されたい)。

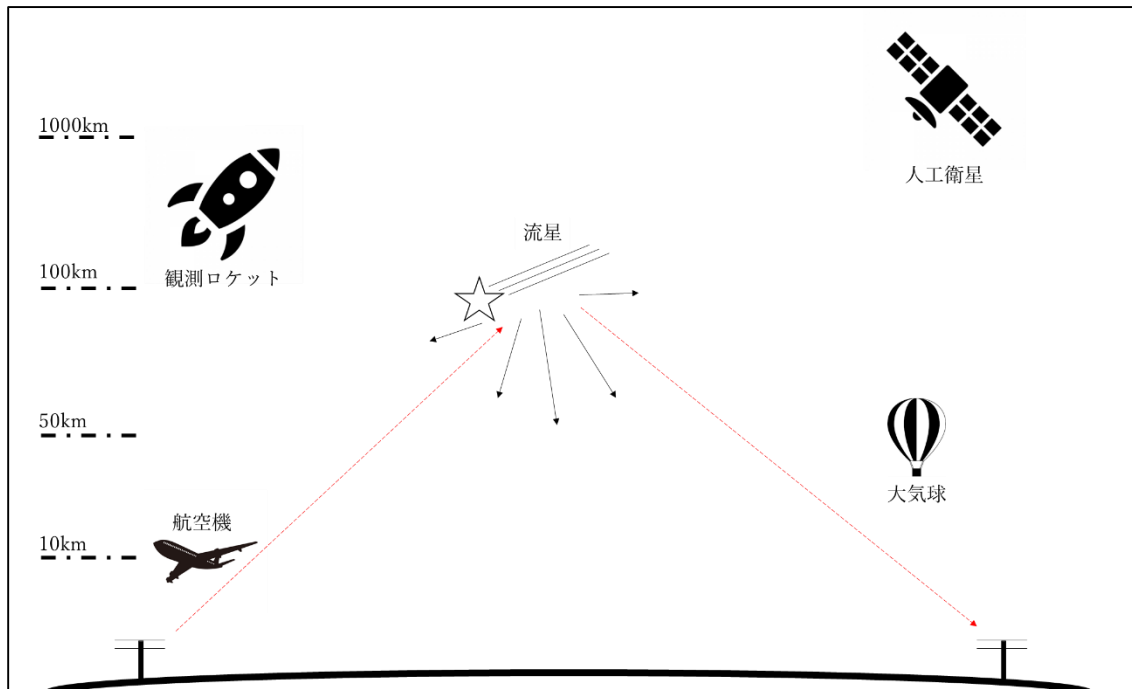


図 1.2 各高度における飛翔物体(見易さのため縮尺は実際とは異なる)と HRO [3]

アマチュア無線帯(Ham-band)を用いた流星電波観測を HRO(Ham-band Radio meteor Observation[5])と呼称する。他にも FM 電波を用いた FRO(FM Radio Observation)、京都大学生存圏研究所(RISH: Research Institute for Sustainable Humanosphere[6][7])が運用する MU レーダー(Middle and Upper atmospheric radar)を利用した MURO(MU Radar Observation)などの多様な電波観測が国内の多くの地点で行われてきた。



図 1.3 CMOR の受信アンテナ[8]

海外に目を向けると、カナダのウェスタンオンタリオ大学 (University of Western Ontario) が運用する CMOR(Canadian Meteor Orbit Radar, 図 1.3[8]) や、ノルウェーの MAARSY (Middle Atmosphere Alomar Radar System, 図 1.4 [9])、アルゼンチンの SAAMER (Southern Argentina Agile Meteor Radar, [10])、フランスの GRAVES(Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale, [11])



図 1.4 MAARSY のモノスタティックレーダー[9]

等が流星レーダーとして数多くの観測結果を生んでいる。一般の博物館でも、例えばウィーン自然史博物館において、隕石展示のコーナーに流星電波観測ライブが展示されており、博物館屋上に設置したアンテナで受信した 143.05 [MHz]の散乱電波をライブ中継されている。

HRO では 1 本の受信アンテナ運用で流星出現数(ここでは規格化された 1 時間あたりの流星出現数として用いられる ZHR(Zenith Hourly Rate, 天頂出現数)[12]ではなく単に散乱電波の受信個数(エコー数)を意味する)を計測でき、複数の受信アンテナ運用で干渉処理[13]を行えば散乱電波の到来角すなわち流星出現方向の推定が行える。HRO のような電波の観測における難しさの一つに、受信電波の情報が観測時刻、観測周波数、そして受信強度のみである場合それらの情報のみで、観測された電波の発信源(散乱源)を推定(ある程度特定)するには相当の調査や実験による経験を要する点が挙げられる。さらには電波の受信環境にはノイズが含まれ、その時間的変動が多い場所であることも多いため、特定の時間枠だけノイズが含まれてしまうことも珍しくない。すなわち如何に対象電波を受信するのに適した場所を受信地点として選ぶかも重要なポイントの一つである。

高知工科大学 システム工学群 宇宙地球探査システム研究室(以下、本研究室)では、2003 年より学生研究・開発テーマとして 50 [MHz]帯の観測用アンテナ・受信機を用いた流星研究を行ってきた。当研究室における観測の経緯は著者の学士論文[13]等を参照されたいが、学士論文以降の系譜は以下で新たに説明する。

著者が学士研究として流星電波観測に本格的に着手した 2018 年 8 月には、当時流星電波観測をプロジェクト化していた株式会社バスキュールとの共同研究が実現し、同社が本研究室のノウハウを元に研究開発した最大 5ch 同時接続対応の新受信機および同社 武田 誠也氏が開発した前述の新受信機と連動する新ソフトウェアを、5ch 流星観測干渉計用に本学香美キャンパス内に既設の 5 台のアンテナと組み合わせて試験運用する機会を得た[13]。試験運用を流星群のタイミングに合わせることで、流星群における流星出現数やその時間分布、流星出現方向の情報を得ることができるが、当時は観測システムの内部位相を特定できなかったため、出現方向の推定には系統的誤差が含まれる課題が残った。一方で 2019 年には 2017 年以前に行われた多地点観測の観測地点をリニューアルし、流星の精密時間差計測と流星速度算出が実施された[14]。

## 1.2 目的

筆者が本研究(修士論文テーマ)に着手し始めた 2019 年 4 月時点では、本研究室における流星電波観測の歴史のなかで、観測に用いるアマチュア無線波を学生自らで送信し観測することが必須の事例(テーマ)はなかった。これに関しては、アマチュア無線波を送信するには基本的に 2 種類の免許(電波を送信するための免許と送信局を運用するための免許)が必要であること(特定の微弱電波であれば一部免許が不要な場合あり[15])や、長期的な連続送信には免許所有者による適正な運用技術が必要になり、電波を受信するのみの従来の観測に比べて多くの課題があることが理由としてあげられる。

筆者は 2019 年 8 月に上述の免許(第 3 級アマチュア無線技士)を取得し、市販のアマチュア無線機(本研究では ICOM 製 IC7100M[16])を利用することで自ら電波を送信することが可能になった。この送信機を用いることで、本研究室では過去に例のない独自の通信実験やレンジング(測

距)による対象物(流星)との直線距離計測が理論上可能になった。本研究の目的の一つ目は、前方散乱方式による流星レーダー観測を実施し、流星との直線距離の推定例を 1 例以上得ることで前方散乱方式における流星レーダー観測手法を開発することである。

筆者は学士研究[13]でも流星電波観測を行い、5ch 流星電波干渉計を 2020 年 12 月時点で約 3 年間運用してきた。上述提案の流星レーダー観測手法では流星までの直線距離しか算出できないが、5ch 流星電波干渉計では干渉計原理により流星の方位角と仰角が得られる。すなわち流星レーダー観測と 5ch 流星電波干渉計での観測を組み合わせれば、流星の 3 次元位置推定を実現できる。もう一つの目的として、両システムでの 1 例以上の同一流星の観測(同時観測)および観測に成功した流星の 3 次元位置推定を達成することを掲げる。

## 第2章 観測手法

本章では本研究で扱った流星電波観測手法について説明する。

### 2.1 流星レーダー観測

アマチュア無線を利用した流星電波観測の手法については、著者の学士論文 2.1.1 項[13]を参照されたい。2021 年 1 月時点においても福井県永平寺町にある福井県立大学から、福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会により超短波(VHF : 30~300 [MHz]) 域のアマチュア無線帯のうち、53.755 [MHz]のビーコン波が出力 50 [W]で 24 時間連続的に送信されている(図 2.1, JH9YYA)。なおメンテナンスや降雪等のトラブルで一時的に停波することはある。



図 2.1 送信アンテナ(福井県立大学)

送信波が流星により生成されたプラズマと空間的に交差し電波が散乱した場合、その散乱した電波(散乱波)を受信する方向や受信機器の構成によって得られる観測データの種類は幅広い。受信局で受信した散乱波を流星エコーと定義する。

流星出現高度を約 100 [km]と仮定すれば、その高度に対して送信局とほぼ同じ位置とみなせる受信局で散乱波を受信する後方散乱方式をとると、流星出現数が得られるだけでなく、送信波の送信時刻と散乱波の受信時刻の時刻差から送信局(受信局)と流星の直線距離を推定することが理論上可能である。原理は一般的なレーダー(Radar : Radio Detecting and Ranging, “レーダ”と呼称する場合もある)と同様で、後方散乱方式を用いるとき後方散乱レーダーという。ただし電離柱における散乱断面積が小さく、強力な送信電力を必要とする。

一方で送信波に対して特定の幾何学的条件(図 2.2)を満たす散乱方向にて散乱波を受信する前方散乱方式を利用した観測として、1.1 節でも述べた HRO や FRO などがある。

本研究の主題である「前方散乱方式を用いた流星レーダー観測手法」は、後方散乱レーダー的要素であるレンジングと HRO の 2 要素を組み合わせた観測手法である。2.1.1 項以下で具体的なシステムの説明に入る。

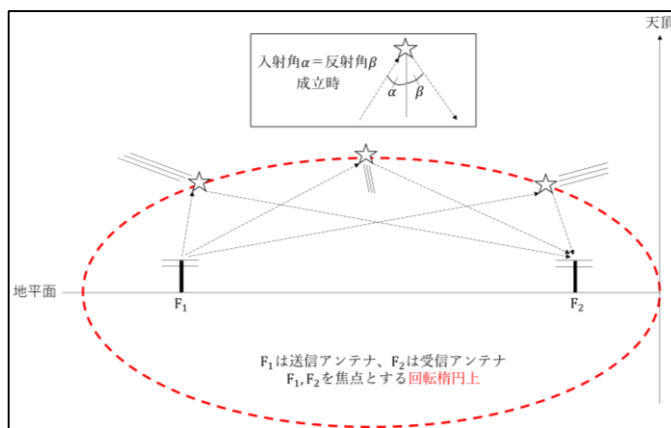


図 2.2 前方散乱方式の幾何学条件

#### 2.1.1 レンジング

“レンジング(測距)は既知信号であるレンジングコードを送信し、受信側で相関をとることで信

号の正しい送信タイミングを検出する処理である”と定義されている[17]。電波は電磁波の一種であり伝搬速度である光速は約 30 万 [km/s](正確には 299,792,458 [m/s])は既知である。つまり送信時刻と受信時刻の時間差を得ることで対象物との距離を理論上推定できる。しかしながらレンジングを本研究に応用した場合、いくつかの課題点があがった。

まず時刻精度問題である。先述のように電波の伝搬速度は約 30 万 [km/s]であるので、流星との直線距離推定について誤差 3 [km]を許容するとしても時刻精度は 0.01 [ms]が必須である。本研究室の過去研究には時刻精度を 1 [ms]まで追求した流星速度算出の研究例[14][19]がある。説明を抜粋すると、受信機から PC にデータ入力する処理に使用していた SAYA 社 AD ボード(ADX II 85X-1M-PCIEX)のサンプリング周波数は 1 [MHz]、AD ボード制御ソフトウェアとして運用された同社 TrigBufferEX(入力チャンネルのデータファイルを一定間隔でバイナリファイルに出力する)が作成するファイルに対して GPS の 1PPS 信号を対応づける役割を担う波形抽出ソフトウェアのサンプリング周波数は 43.4 [kHz]であった。波形抽出ソフトウェアの最大の特徴として流星速度算出に必要な時間分解能 1 [ms]を保証しつつ、指定した範囲のピーク周波数(最も強度の強い周波数)に追従した FFT 処理ができる点がある。過去研究の改良も検討したが、受信機から PC にデータ入力する処理を一新する(パッケージ化された市販品の使用によって時間分解能向上を達成する)ことを本研究では選択した。波形抽出ソフトウェア作成当時の 2012 年[18]に比べて、2021 年現在高性能な市販の機器が安価になり入手しやすくなった背景事情も選択理由の一つである。新たな受信システムの構成については次の 2.1.2 項で説明する。

次に絶対時間差取得の問題を述べる。ここでいう絶対時間差は送受信する時刻を何時何分何秒小数点以下数桁(精度により変わる)まで測定したときの時間差のことである。送信時刻と受信時刻の時間差を得ることで対象物(流星)との距離を理論上推定できると述べたが、仮に 0.01 [ms]の精度を求めるとしても誤差の要因は無限に考える。というのも送信側も受信側も時刻を得る処理のなかでは例えば PC を使う。たとえ全く同じシステム構成の PC を送信側と受信側で用意したとしても 0.01 [ms]のズレなしに正確な絶対時刻データの比較を行うのは不可能に近い。一方で流星出現高度を約 100 [km]、電波到達経路を約 200 [km]と仮定した場合、電波の伝搬速度は約 30 万 [km/s]なので 200 [km]の距離を約 0.67 [ms]で到達することになる。したがって送信時刻および受信時刻を得るために 1 [μs] の精度が必要とすれば、相対時刻差の算出自体は測定基準時刻を 1 [μs]精度で統一できれば理論上可能になる。この測定基準時刻の統一について 3.1 節で GPS モジュールの 1PPS 信号を利用した方法を詳細に説明する。

3 つ目に当然ながら図 2.2 の幾何学条件は常に生じないため、流星エコーを受信した平均数秒しか受信データを得ることはできない。ここが一般的なレーダーとは異なる挑戦的な課題であり、いつ入るかわからない数秒のデータのなかで送信側と受信側の相関が取得できるようなレンジングコードを作成する必要がある。理想では視認比較できるレベルの時間長さで、ノイズ成分とレンジングコードの相対電圧差による突発的な波形(波形の立ち上がりや立ち下がり)の変化や、受信波形の 1 周期(周波数)に明らかな変化があるデータを取得できれば時間差比較に使いやすいため、本研究では複数の周波数を数 [ms]～数 [s]単位で切り替えるようなレンジングコードを作成した。



## 2.1.2 送信システム

第3級アマチュア無線技士の免許を所持すれば、アマチュア無線局の空中線電力 50 [W]以下の無線設備で 18 [MHz]以上または 8 [MHz]以下の周波数の電波を使用する機器の操作が許可される[20]。そこで本研究では ICOM 製 IC-7100M(図 2.3, PS-126 は無線機用外部電源(出力 DC 13.8 [V]))を送信システムとして利用した。50 [MHz]帯のアマチュア無線を送信できる機器は他にもあるが、車載での持ち運びやすさと使いやすさから本機を選択した。送信アンテナには



図 2.3 PS-126 と IC-7100M

COMET 製 CA-52HB 50MHz 帯ビームアンテナ(図 2.4(左))を使用した。送信局の開局に伴って申請した情報を可能な範囲で図 2.4(右)に示す。送信アンテナの特性は表 2.1 に示す。



無線局免許状		免許の番号	四 A 第 241815 号	識別信号	JJ5QEA
氏名又は名称	佐藤 匠				
免許人の住所	[Redacted]				
無線局の種類	アマチュア局	無線局の目的	アマチュア業務用	運用許容時間	常時
免許の年月日	令 2. 8. 13	免許の有効期間	令 7. 8. 12 まで		
通信事項	アマチュア業務に関する事項		通信の相手方 アマチュア局		
移動範囲	陸上、海上及び上空				
無線設備の設置場所／常置場所	[Redacted]				
電波の型式、周波数及び空中線電力					
3HA	1910 kHz	50 W	3VA	435 MHz	50 W
3HA	3537.5 kHz	50 W			
3HD	3798 kHz	50 W			
	A1A	4630 kHz	50 W		
3HA	7100 kHz	50 W			
3HA	18118 kHz	50 W			
3HA	21225 kHz	50 W			
3HA	24940 kHz	50 W			
3VA	28.85 MHz	50 W			
3VA	52 MHz	50 W			
3VA	145 MHz	50 W			
備考					
法律に別段の定めがある場合を除くほか、この無線局の無線設備を使用し、特定の相手方に対して行われる無線通信を受受してその存在若しくは内容を漏らし、又はこれを窃用してはならない。					
令和 2 年 8 月 13 日			四国総合通信局長		

図 2.4 CA-52HB 50MHz 帯ビームアンテナ(左)、開局に伴う申請情報の一部(右)

表 2.1 CA-52HB 50MHz 帯ビームアンテナ アンテナ特性

ブーム長	0.75 m
回転半径	1.54 m
最大エレメント長	2.97 m
質量	0.91 kg
利得	50 MHz : 6.3 dBi(2エレHB9CV)
周波数	50~53 MHz
耐入力	400 W(SSB)
受風面積	0.054 m <sup>2</sup>
耐風速	35 m/s
取付マスト	25~65 φ

次に送信場所候補の選定条件として、以下を設定した。

- ①高知県内(新型コロナウイルス感染防止対策の影響で県外出張が困難だったため)
- ②本学香美キャンパス内に設置した受信アンテナに直達波が届かないような場所
- ③機材運搬に車を利用するため、車の出入りがある程度可能な場所

2020 年 12 月に高知県内候補計 12 か所を移動局として移動し(図 2.5)、条件すべてを満たす場所の一つとして高知県長岡郡大豊町にある JA 高知 大杉支所の敷地内(図 2.4)を選択した。交渉の末、2020 年 12 月末から 2 月にかけての使用許可を得て電波送信実験を行った。



図 2.5 送信局候補地高知県内 13 か所

次に本研究の具体的な電波送信手法についてであるが、1 月～2 月に実施した計 7 度の送信実験それぞれで送信手法が部分的に異なるため時系列順に説明する。まず全実験に共通する手法として以下 2 点を挙げる。

- ・マイクロホン HM-151(図 2.6)を IC-7100M に接続してレンジングコードを音声入力する
- ・レンジングコードは搬送波周波数に対して 1 kHz の正弦波を数 [ms]～数 [s]間隔で記録を取りつつランダムに ON/OFF する

1 月 3, 4, 16, 22, 27 日の実験では、市販の Arduino Uno(図 2.7)を用いてレンジングコードをプログラム作成し(コードは付録を参照)、圧電スピーカー(図 2.7)を含む回路(図 2.8)を用いて音声出力した。Windows 用音声処理ソフトウェア”音声工房”のスペクトル解析機能を使用して圧電スピーカーによる音声をスペクトル解析した図を図 2.9 に示す。



図 2.6 HM-151

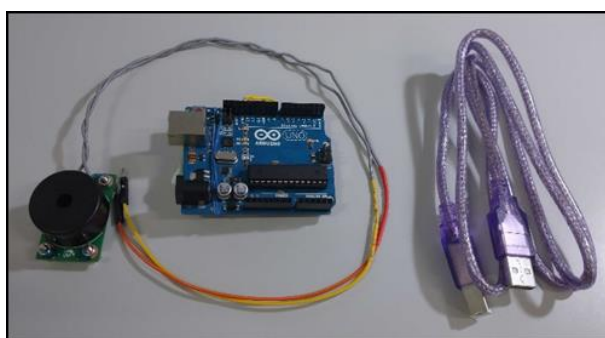


図 2.7 圧電スピーカー(左)、  
Arduino Uno(中)、USBtypeA-B(右)

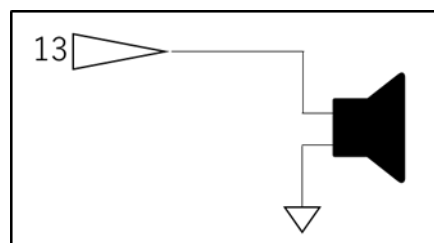


図 2.8 Arduino Uno 回路図

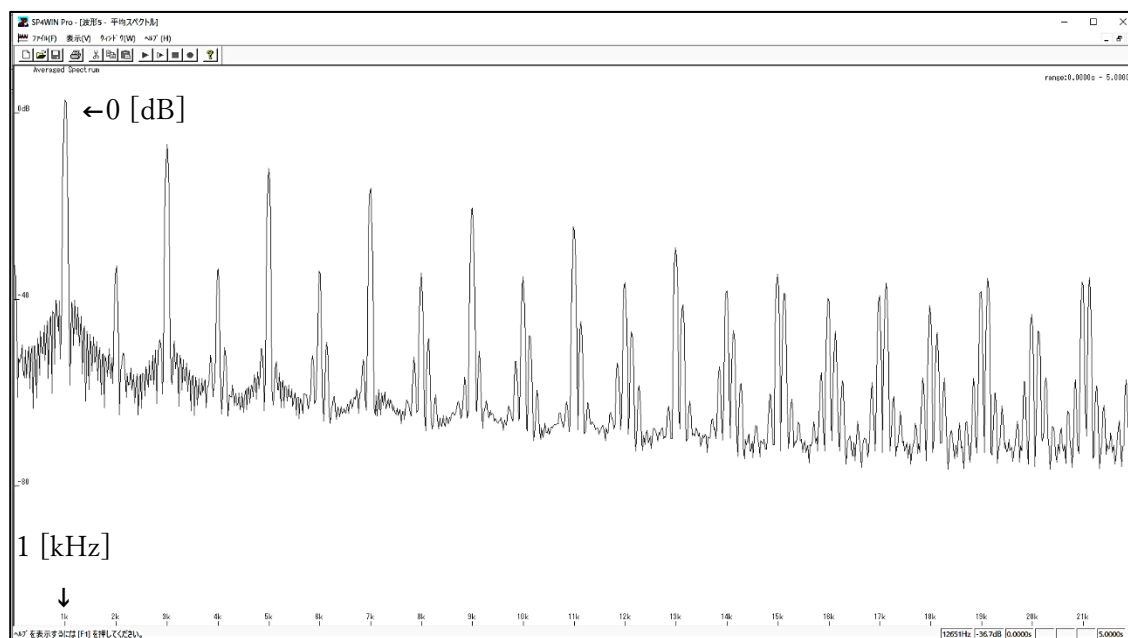


図 2.9 スペクトル解析図(縦軸 1 目盛り : 40 [dB]、横軸 1 目盛り : 1 [kHz])

1月31日および2月2日の実験では音声工房を用いてレンジングコードを音声ファイルで作成し(図 2.10)、市販のスピーカーである ELECOM 製 MS-87BK (図 2.11)を用いて音声出力した。音声 ON 時のスペクトル解析図を図 2.12 に示す。レンジングコードの作り方として、10 進数表記の 0~60 までの数字を 2 進数表記に変換し、順番に並ぶ 0 と 1 の数字を 0 の場合 OFF、1 の場合 ON に対応させた。0.2 秒間隔で ON/OFF を 300 回行う 60 秒の音声ファイルを作成した。



図 2.11 ELECOM 製 MS-87BK



図 2.10 音声工房によるレンジングコード(60 秒間)

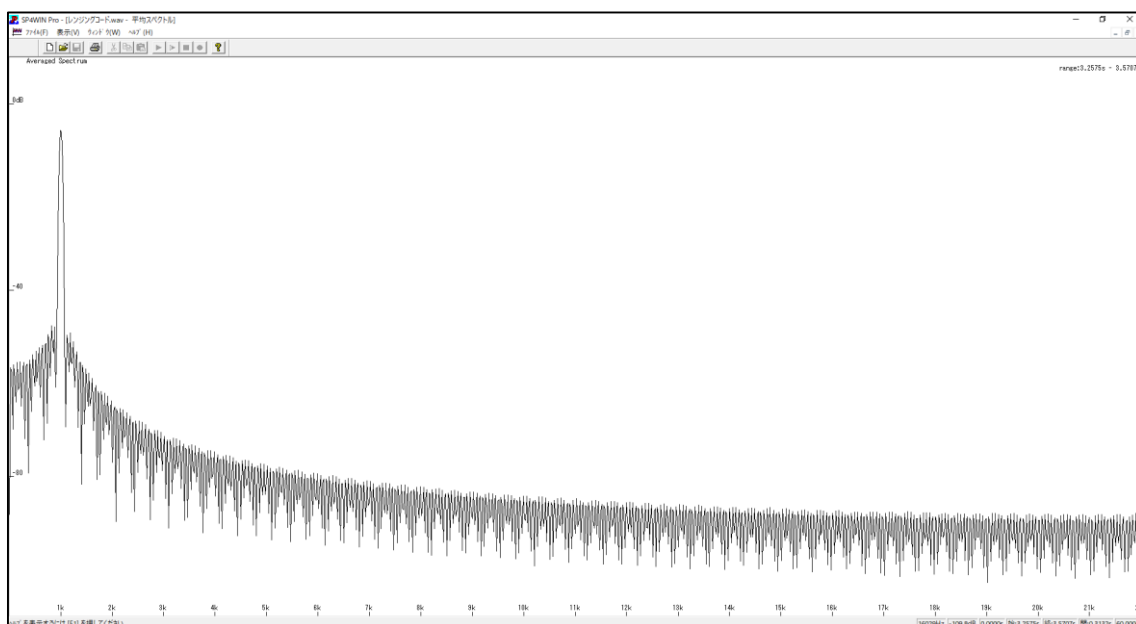


図 2.12 レンジングコードのスペクトル解析図(1 [kHz]出力時)



送信機の送信設定について、表 2.2 のように使い分けた。送信機の電源供給にはポータブルバッテリー Suaoki 製 G500(図 2.13)を使用した(移動局運用のため外部電源は準備しなかった)。バッテリー容量 500 [Wh] に対して送信電力 50 [W] 出力時の送信機の総合的な電力消費は最大約 120 [W] であったため、一度の送信実験時間は平均 4, 5 時間程度を計画した。



図 2.13 Suaoki 製 G500

表 2.2 計 7 度の送信実験日時と各送信設定

実験日時	送信設定	実験日時	送信設定
1/3 (14:00~18:00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ AMモード</li> <li>・ 搬送波53,754,700 [MHz]</li> <li>・ マイクゲイン100%</li> <li>・ 送信電力20 [W]</li> </ul>	1/31 (15:10~18:00, 21:00~23:00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ USBモード</li> <li>・ 搬送波53,753,750 [MHz]</li> <li>・ マイクゲイン100%</li> <li>・ 送信電力50 [W]</li> </ul>
1/4 (11:00~15:00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ AMモード</li> <li>・ 搬送波53,754,700 [MHz]</li> <li>・ マイクゲイン100%</li> <li>・ 送信電力12 [W]</li> </ul>	2/2 (16:30~18:00, 21:30~24:00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ USBモード</li> <li>・ 搬送波53,754,900 [MHz](16:30~18:00) 53,753,750 [MHz](21:30~24:00)</li> <li>・ マイクゲイン100%</li> <li>・ 送信電力20 [W](16:30~18:00) 50 [W](21:30~24:00)</li> </ul>
1/16 (12:50~17:00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ USBモード</li> <li>・ 搬送波53,753,750 [MHz]</li> <li>・ マイクゲイン20%</li> <li>・ 送信電力20 [W]</li> </ul>		
1/22 (15:00~18:30)			
1/27 (3:00~7:00)			

### 2.1.3 受信システム

2.1.1 項のレンジングを達成するには求める精度に見合った時刻情報を記録できる送信局と受信局が各 1 局ずつあればよいが、本研究で利用した IC7100M には送信時刻を 1 [μs]単位で正確に記録する機能は付帯していない。よって大学に設置予定である受信システム A を複製し、送信局周辺数メートル範囲で動作させるための受信システム B を構築した。すなわち本研究における受信局(受信システム)は受信側に置く受信システム A と送信側に置く受信システム B の 2 局存在することに注意されたい。

1 月～2 月に実施した計 7 度の送信実験の前半(1 月 3, 4 日)と後半(1 月 16, 22, 27, 31, 2 月 2 日)において、システム全工程のうち受信機以降の工程が一部大きく異なる。前半の送信実験では受信システム A, B とともに 2.2.1 項で触れた波形抽出ソフトウェアを含む流星多地点観測のシステムを再使用した。波形抽出ソフトウェアを含む受信システムについては赤松(2019)を参照されたい[14]。

後半の送信実験の受信システム A, B の概要図を図 2.14 に、受信システム A, B のアンテナ設置場所の様子を図 2.15 に、受信アンテナ(Radix 製 KIT-53Y2/X)の特性を表 2.3 に示す。図 2.14 をさらに紐解くと、両システムにおいてまず受信アンテナと受信機は同軸ケーブル(5D-FB, MP-MP

コネクタ)で接続される。受信機からは音声出力をステレオで2分配し、片方はPCのステレオカードに接続しPC上のHROFFTソフトウェア(図2.16, 作成: 大川一彦氏)と連動させ(両端ステレオ端子運用)、もう一方は市販のUSBオシロスコープPicoscope2204A(図2.17)にステレオ端子-RCAケーブル(L側運用)-BNC端子と経由して接続した(ステレオ分配については他の分配運用による動作を保証しない)。

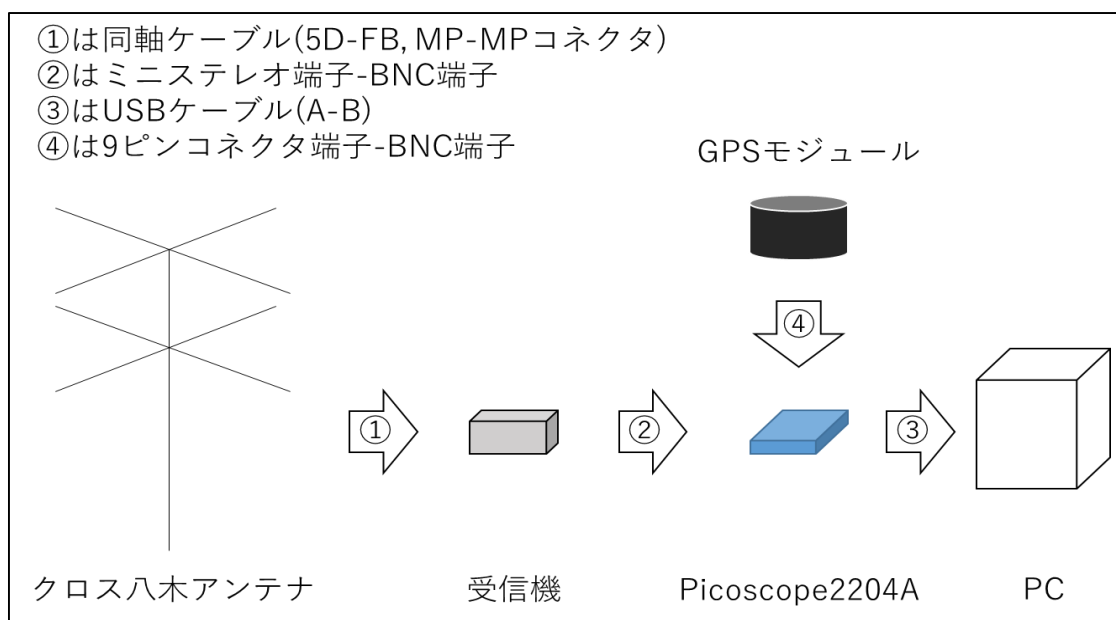


図 2.14 受信システム A, B の概要図



図 2.15 受信システム A(学内、左)、  
 受信アンテナ B(JA 高知県 大杉支所、右)

表 2.3 受信アンテナ特性

型式	KIT-53Y2/X
周波数	53.75 MHz
インピーダンス	50 $\Omega$
利得	6.3 dBi
FB比	10 dB 以上
VSWR	1.5 以下
耐入力	300 W
コネクタ	M-J 型
ブーム長	1200 mm
適合マスト	$\Phi 25 \sim \Phi 60$ mm
耐風速	瞬間最大風速 40 m/s
重量	約 2200 g

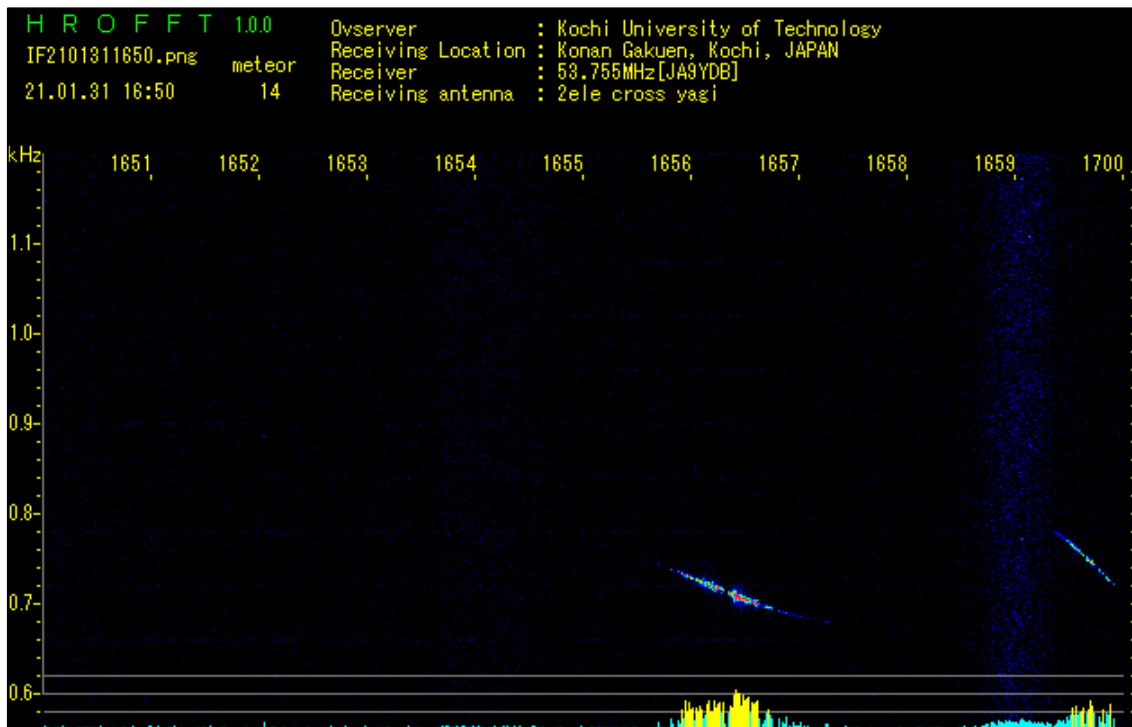


図 2.16 HROFFT 運用画面(16:56 頃、17:00 頃のスペクトル変動は飛行機エコー、受信場所は香南学園と表記されているが、著者の設定変更ミスである)



図 2.17 Picoscope2204A(左)、設置風景(右)

受信機については、2020 年同研究室赤松が学士研究で使用した 53.755 [MHz]対応に改造した流星電波観測用受信機(ITEC 製 HRO-RX605a(図 2.18(左))および ITEC 製 MRX-50(図 2.18(右))を再使用した[14]。受信機の周波数特性について HROFFT ソフトウェアでスペクトル変動を確認すると、ITEC 製 HRO-RX605a(一部改造)は中心周波数約 53,754,900 [Hz]、ITEC 製 MRX-50(一部改造)は中心周波数約 53,755,000 [Hz]を記録した(なお HROFFT 運用画面では各中心周波数に対して



図 2.19 GARMIN 製 GPS16X-HVS



$\pm 300$  [Hz]の周波数範囲のスペクトル変動を視認できる(図 2.16))。Picoscope2204A についてサンプリング周波数は最大 100 [MHz]でのアナログ 2ch 同時入力が可能のため、GARMIN 製 GPS16X-HVS(図 2.19)の 1PPS 信号を 1ch、受信機からの信号をもう 1ch として計 2ch を同時入力した。その後 PC 上で専用ソフトウェア Picoscope6(第 3 章で詳しく説明)を運用し 2ch の波形を記録した。

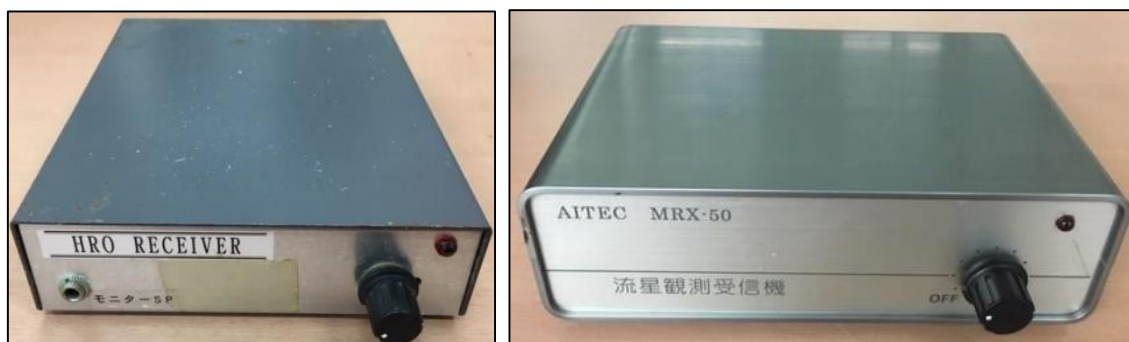


図 2.18 ITEC 製 RX-605a(左)、 ITEC 製 MRX-50(右)

## 2.2 5ch 流星電波干渉計

本研究では流星の 3 次元位置推定を行うことも目的の一つであるため、2.1 節で説明した前方散乱方式による流星レーダー観測のシステムに、著者が学士研究で扱った 5ch 流星電波干渉計(図 2.20)を組み合わせた。5ch 流星電波干渉計についての説明は著者の学士論文[13]の 2.1.2 項を参照されたい。

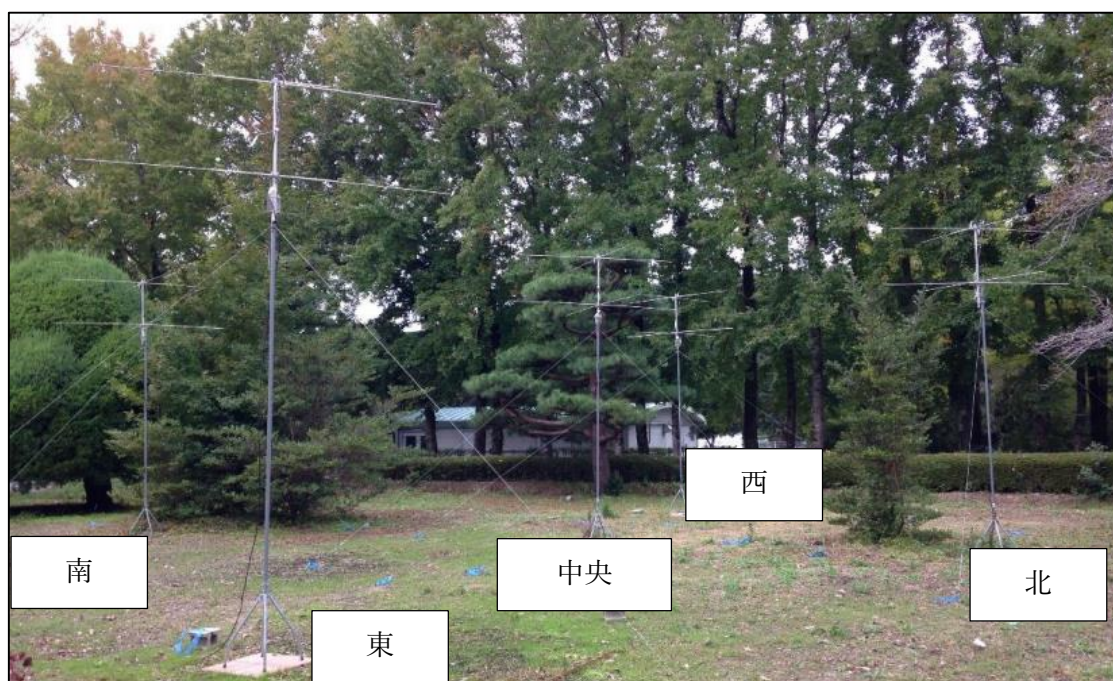


図 2.20 5ch 流星電波干渉計のアンテナ[19]



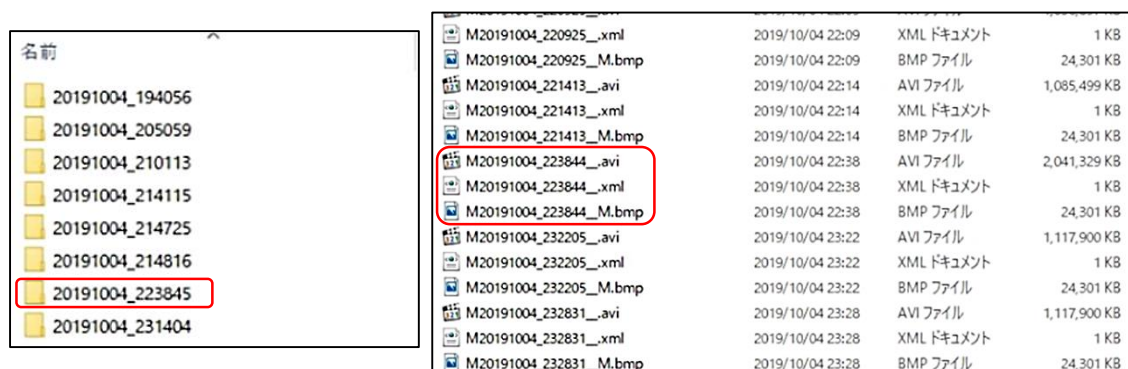
## 2.2.1 校正(キャリブレーション)

5ch 流星観測電波干渉計で得られるデータのなかに、流星出現高度を仮定したうえでの流星の位置情報(方位角・仰角)がある。算出方法については著者の学士論文[13]と本論文の 3.2 節を参照されたいが、学士研究で残った課題の一つとして、システムの内部位相差(各受信アンテナと PC 間の同軸ケーブルや回路内のインピーダンス不整合などで生じる総合的な位相差のこと)を特定するに至らなかったため、観測データに誤差が含まれてしまった。内部位相差を特定する方法として主に以下の 2 手法が挙げられる。

①空間的な電波送信源(疑似輻射点)による校正

②他の流星観測手法(ただし観測場所は流星出現高度を約 100 [km]と仮定すれば、その高度に対して 5ch 流星観測電波干渉計とほぼ同じ位置(方位角・仰角)とみなせる場所でなければならぬ)との同一流星観測による校正

学士研究では 2018 年 12 月末時点で大学内にカメラを 2 台設置[13]し、②の手法を試みたが 2019 年 2 月時点では内部位相差を特定できる観測データは得られなかった。その後諸事情によりカメラの台数が 1 台になったが、2019 年 3 月～2020 年 3 月の約 1 年にわたり観測を続けた。結果的には時刻差 1 秒の観測データが 1 例のみ得られた(図 2.21, 2.22, 2.23, ただし同一流星と断定はできない)。学士論文[13]3.4 節にもあるように 5ch 流星電波干渉計では流星エコー受信時に一定の位相差を取り続けるため、その位相差と 4K カメラの位置情報を用いて計算した結果、 $0.5\lambda$  の場合の東西内部位相差 $91^\circ(1.6[\text{rad}])$ 、南北内部位相差 $39^\circ(0.68[\text{rad}])$ という暫定的な内部位相差を得た。



名前	種類	サイズ
20191004_194056	XML ドキュメント	1 KB
20191004_205059	BMP ファイル	24,301 KB
20191004_210113	AVI ファイル	1,085,499 KB
20191004_214115	XML ドキュメント	1 KB
20191004_214725	BMP ファイル	24,301 KB
20191004_214816	AVI ファイル	2,041,329 KB
20191004_223845	XML ドキュメント	1 KB
20191004_231404	BMP ファイル	24,301 KB

名前	種類	サイズ
M20191004_220925_.xml	XML ドキュメント	1 KB
M20191004_220925_.M.bmp	BMP ファイル	24,301 KB
M20191004_221413_.avi	AVI ファイル	1,085,499 KB
M20191004_221413_.xml	XML ドキュメント	1 KB
M20191004_221413_.M.bmp	BMP ファイル	24,301 KB
M20191004_223844_.avi	AVI ファイル	2,041,329 KB
M20191004_223844_.xml	XML ドキュメント	1 KB
M20191004_223844_.M.bmp	BMP ファイル	24,301 KB
M20191004_232205_.avi	AVI ファイル	1,117,900 KB
M20191004_232205_.xml	XML ドキュメント	1 KB
M20191004_232205_.M.bmp	BMP ファイル	24,301 KB
M20191004_232831_.avi	AVI ファイル	1,117,900 KB
M20191004_232831_.xml	XML ドキュメント	1 KB
M20191004_232831_.M.bmp	BMP ファイル	24,301 KB

図 2.21 2019 年 10 月 4 日に観測された 1 秒ずれイベントの例  
5ch 流星電波干渉計データ(左)、4K カメラデータ(右)

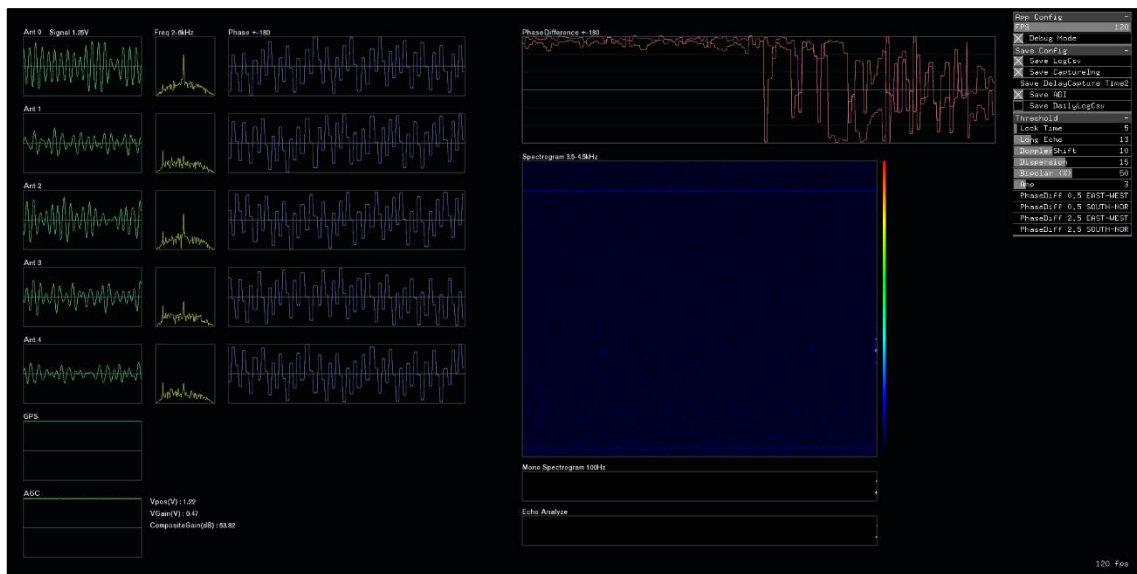


図 2.22 5ch 流星電波干渉計スペクトル画像(2019 年 10 月 4 日 22:38:45 頃)

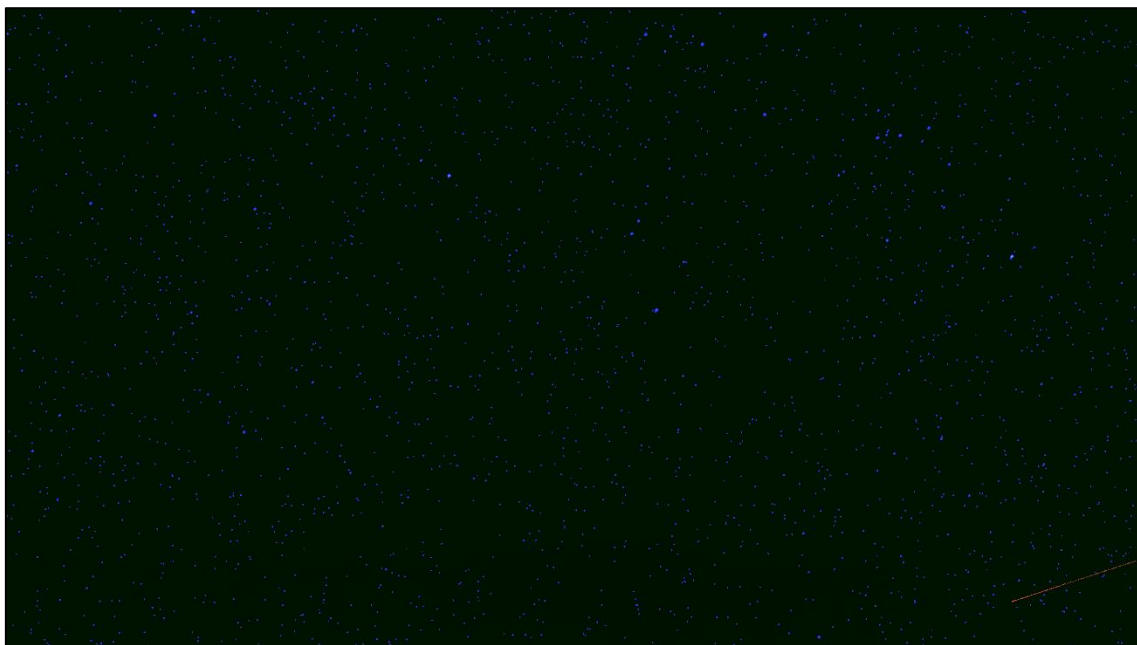


図 2.23 4K カメラと UFOCaptureHD2[13]を使用して流星自動検出時の bmp 画像  
(2019 年 10 月 4 日 22:38:44 頃)

一方で、学士研究では適切な送信設備や免許を保持していなかったため実施困難だった①の手法についても、2020 年 11 月 14 日および 23 日に IC-7100M を用いて校正実験を行った。電波送信位置として 5ch 流星電波干渉計周辺の地点 E, E', W, S、および約 100 [m]離れた 15 階建ての学生寮であるドミトリー A 棟屋上を選択した(図 2.24)。この電波送信位置の選択にあたり、校正実験で求めたい  $0.5\lambda$  の内部位相差の本質が鍵になった。干渉計原理の計算過程[12]では  $1.0\lambda$  ( $\lambda$  は観測周波数の波長であり、53.755 [MHz] の電波の場合およそ 5.5 [m]) と  $1.5\lambda$  の足し引きをして  $0.5\lambda$  と  $2.5\lambda$  の位相差を算出するが、これは 5ch 流星電波干渉計のアンテナ配置[13]に依存した計算方法である。いま受信アンテナ(中央)と(東)のちょうど真ん中の位置に仮想受信アンテナ X(図 2.24)を想像したとき、観測される  $0.5\lambda$  の東西位相差が半波長分(半周期分)になるような電波送信位置は、受

信アンテナ(東)-(中央)-(西)を通る直線上に設定するとすれば仮想受信アンテナ X から $n\lambda$ 離れた位置である(ただし $n$ は整数)。これは南北でも同様である。つまり任意の $n\lambda$ の位置から 53.755 [MHz]出力したときに観測される内部位相差を含んだ $0.5\lambda$ の東西・南北位相差から半波長分差引いた値が内部位相差に該当する。

送信設定は AM モード、送信周波数 53.755 [MHz]、送信出力 0.5 [W]を選択した。地点E,E',W,S については地上(つまり地面から天頂方向の垂直な軸をZ軸としたとき、Z成分 0)なので 5ch 流星電波干渉計のアンテナ素子部(Z成分約 3 [m])から見たときわずかにマイナス方向の仰角を考えなければならないが、送信位置と受信位置が極めて近距離なので方位角のみ考慮し、電波到来方向を既知として観測された位相差から逆算することで内部位相差を導出した(表 2.4)。具体的な逆算方法は 3.2 節に記した。

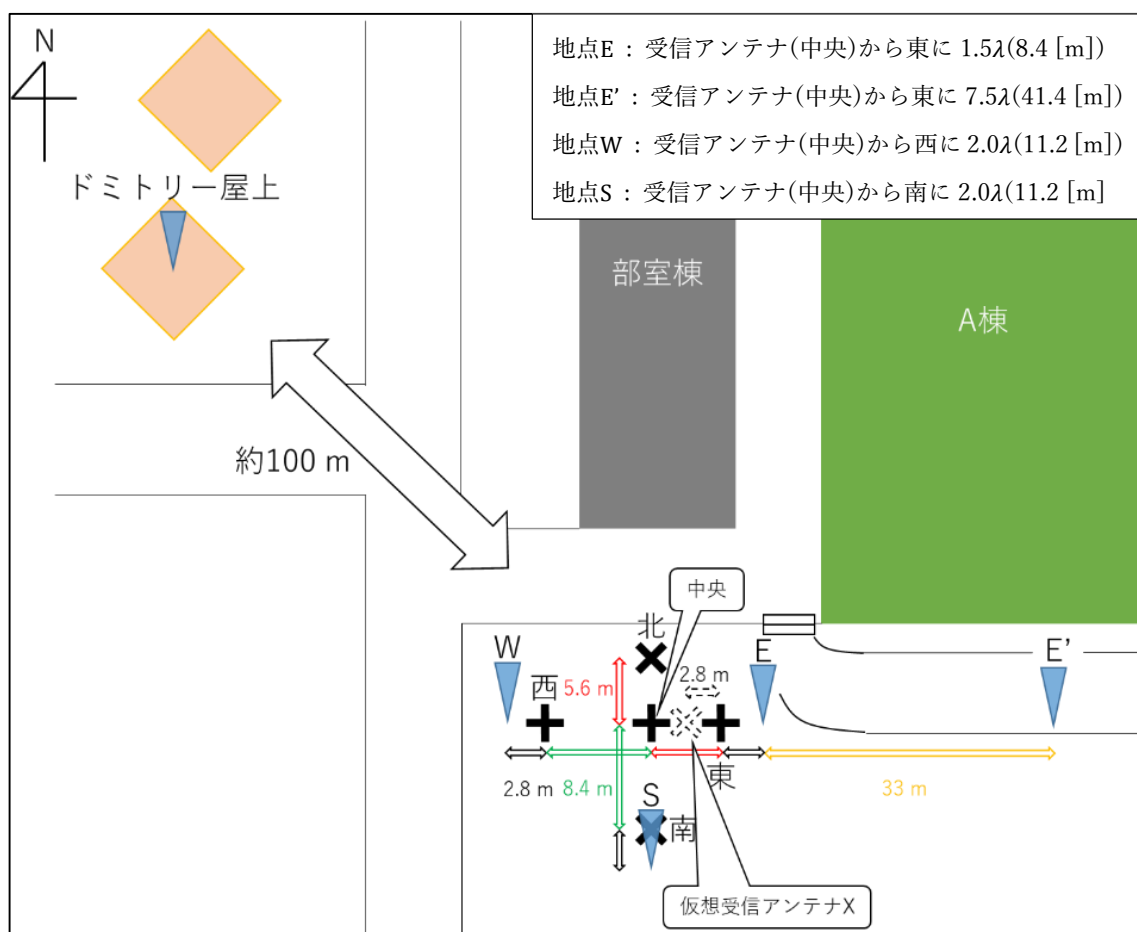


表 2.4 校正実験データ

		E	E'	W	S	ドミトリー屋上	同時観測例(参考)
		(rad)					
電波送信位置	方位角	1.6	1.6	4.7	3.1	6.0	
	仰角	0	0	0	0	0.44	
$\frac{\pi}{2}-\theta_x$		0	0	3.1	-1.6	1.8	
$\frac{\pi}{2}-\theta_y$		1.6	1.6	1.6	-3.1	0.52	
到来角 $\theta_x$		1.6	1.6	-1.6	3.1	0	
到来角 $\theta_y$		0	0	0	4.7	1.1	
位相差理論値 $\phi_x$		3.1	3.1	-3.1	0	-0.83	
位相差理論値 $\phi_y$		0	0	0	-3.1	2.7	
5ch測定値 $\phi_x+\phi'_x$		2.9	-2.9	-3.7	-0.052	-1.4	-0.13
5ch測定値 $\phi_y+\phi'_y$		-1.4	-2.1	0.21	-0.45	-3.0	-0.43
内部位相差 $\phi'_x$		-0.19	-6.0 (0.24)	-0.59	-0.052	-0.56	1.59
内部位相差 $\phi'_y$		-1.4	-2.1	0.21	2.7 (-0.45)	-5.7 (0.59)	0.67

誤差範囲をどこまで許容するか議論の末、建物などの遮蔽物が少ない送信地点W,Sとドミトリー屋上のデータ(表 2.4 の赤字の数値)を使うとすれば、 $0.5\lambda$  の場合の東西内部位相差 $-32^\circ \sim -3^\circ$  ( $-0.59[\text{rad}] \sim -0.052[\text{rad}]$ )、南北内部位相差 $-26^\circ \sim 33^\circ$  ( $-0.45[\text{rad}] \sim 0.59[\text{rad}]$ )まで範囲を絞りこめたため、この範囲に内部位相差が存在すると考えた。なお②の校正手法で得た暫定的な内部位相差( $0.5\lambda$  の場合の東西内部位相差 $91^\circ$  ( $1.6[\text{rad}]$ )、南北内部位相差 $39^\circ$  ( $0.68[\text{rad}]$ ))と比較したとき、範囲外にあるため 1 秒差のデータは同時観測データではなかった可能性が高いと判断した。

## 2.3 その他の流星観測

2.1 および 2.2 節では本研究で扱った流星電波観測手法について説明した。しかし流星の観測方法はもちろん電波だけではない。本節では、本研究室で著者以外の研究室メンバーが中心となり実施されている他の観測手法について簡潔に説明する。

### 2.3.1 光学観測

表 2.4、図 2.25 のようなカメラ構成にて主に 2020 年 8 月のペルセウス座流星群や 12 月のふたご座流星群をターゲットに研究室で運用された。両流星群ともに新月に近い時期で光学観測条件が良好だったため、5ch 流星電波干渉計との同時観測例の取得を狙った。

表 2.5 観測機材の仕様

機材	仕様
カメラ	ZWO ASI178MM センサーサイズ: $7.4 \times 5 \text{ mm}$ 解像度: 最大 $3096 \times 2080 \text{ pixel}$
レンズ	Edmund Optics 焦点距離: $8.5 \text{ mm}$ F 値: 1.3~16



図 2.25 設置風景



### 2.3.2 インフラサウンド観測



図 2.26 インフラサウンドセンサ(左)、設置風景(右)[22]

インフラサウンド(超低周波音)とは人間の可聴域(約 20 [Hz]~20 [kHz])より低い周波数(約 0.3 mHz~20 Hz)の音波のことである。その発生メカニズムとしては、瞬間的かつ莫大なエネルギー変位により空気が圧力変動を受けたとき超長周期な音波が生成されることで知られるが、音波の伝搬経路にはいまだ不明点も多い。地震や津波、火山噴火、雷、隕石(地上への落下時ではなく上空からの衝撃波として)などの地球規模の自然現象での発生が確認されており、流星でも火球クラスのものや電波観測においてロングエコーといわれる大規模なものであれば場合によりインフラサウンドを観測することが可能である(Edwards et al., 2007) [21]。2021 年 1 月時点で高知県内 15 ヶ所にインフラサウンドを観測するためのセンサ群 (図 2.26[22])が運用されており、上述のような自然現象を観測可能である。また 2021 年現在、国内でインフラサウンド観測と流星電波観測を同時に運用する研究施設や研究機関は本研究室以外で報告されておらず、本研究室において過去に同一流星の観測データを得ることに成功している[19]が、本研究で扱ったシステムでの同時観測成功例はない。本研究の目的には必要不可欠な観測手法ではないが、同一流星の観測が達成できればデータの信頼性や精度をさらに深く議論できる可能性があるため本研究との比較観測手法の一つとして紹介した。

## 第3章 解析手法

第2章で説明した観測手法で得た観測データの解析手法を説明する。

### 3.1 レンズングコードの視認比較

Picoscope6 による運用画面の例を図 3.1, 3.2 に示す。

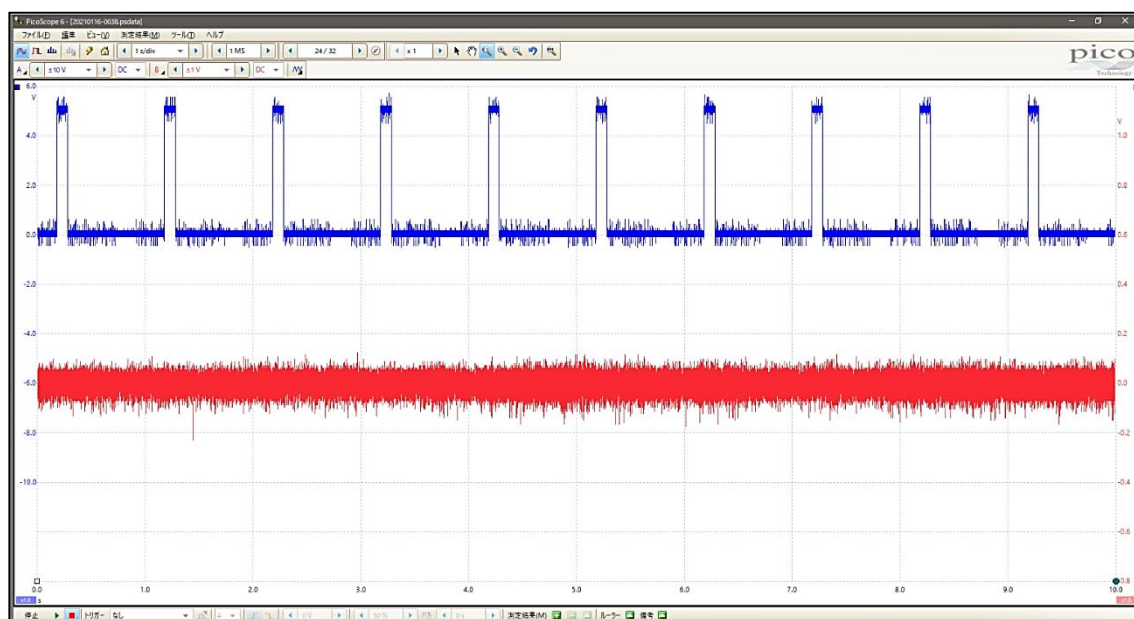


図 3.1 受信システム A(学内設置)の運用画面

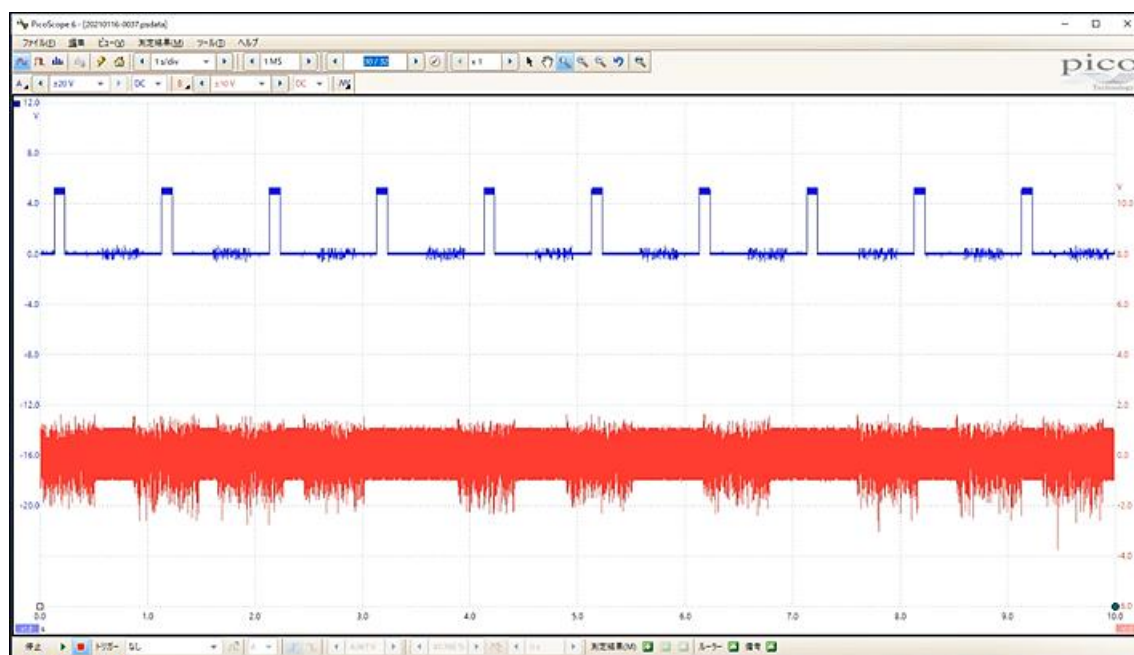


図 3.2 受信システム B(送信局脇に設置)の運用画面

オシロスコープ表示・記録ソフトウェア Picoscope6 には様々な機能があるが、本研究では主に以下の機能を設定した。

- ・2つの波形信号(2ch)の同時入力
- ・スコープモードで計測
  - 横軸：時間(1目盛り1秒)、縦軸：電圧(1目盛りは各chで異なる)
- ・自動で波形データを保存するようにアラーム機能を用いて設定

図 3.1, 3.2 において上側の青い波形は GARMIN 製 GPS16X-HVS (図 2.18)の受信する 1 PPS 信号にあたる。図では1秒ごとのパルス波形がはっきりと視認できるので、GPS や手作りした接続部分の動作も正常と考えられる。一方で下側の赤い波形が各受信システム A, B にて受信された波形である。受信システム B では送信局が数メートル以内にあるため実験中は常に直達波(レンジングコード)が受信された。対して受信システム A では直達波は全く入らないため、他の電波源の信号やノイズなどの不特定の電波が受信された。

しかしながら、特定の幾何学条件(図 2.2)を満たす流星による間接的電波伝搬経路が成立すれば、受信システム A でもレンジングコードのごく一部(流星エコーを受信できるわずか数秒の間)を理論上受信することが可能である。受信システム A で受信されたレンジングコードの一部を、同じ時間帯の受信システム B の波形と精密に比較することで相対的な時刻差を得ることができる。

この比較の際に注意しなければならないポイントが、

- ①2.2.1 項で触れた測定基準時刻の統一
- ②レンジングコードの1周期の長さ
- ③送信電力の減衰具合

である。①に関して、両受信システムでは 100 [MHz]サンプリングすなわち 0.01 [ $\mu$ s](10 [ns])まで時間分解能が保証される Picoscope2204A を用いているが、Picoscope6 を使用する上で分解能を高く設定し過ぎると1ファイルがとても重くなってしまった(10秒間で約 180 [MB])。そのため Picoscope6 の設定を 1 [MHz]サンプリング(時間分解能 1 [ $\mu$ s])にし、1ファイルが 320 秒分で約 30 [MB]になるように調整した。このファイル作成の工程は Picoscope6 のアラーム機能を利用した。設定によって 32 フレーム(1フレームが 10 秒分)の波形計測が完了するとファイルが自動保存される(このときファイルは情報通信研究機構が提供する NTP サーバーである ntp.nict.jp と同期した PC 時刻にて日、時、分までが表示される)。ここで 320 秒分のデータは同時アナログ入力された GPS の 1PPS 信号によって正確に 320 等分されており、GPS の 1PPS 信号が 1 [MHz]以上の精度で基準として安定的に使えるならば相対時間分解能 1 [ $\mu$ s] が保証される。したがって測定基準時刻の統一を達成したといえる。

②に関して、理論上得られると予想される流星エコーの時間幅は短いもので 1 秒以下、長いもので 10 秒ほどであり、受信システム A, B の相対時間差は約 0.67 [ms]である(電波伝搬距離 200 [km]と仮定)。例えばレンジングコードが単なる 1 秒周期の繰り返しパルス波形だった場合、10

秒の流星エコーが受信システム A に記録されると、一意に相対時間差を算出できなくなる可能性が高い。これを防ぐためにレンジングコードとして、1 周期が 5 分程度ある複雑かつ既知の繰り返しパターンを作成した。

③に関してレーダー方程式を考える。送信アンテナからあらゆる方向に一様に(無指向に)電波を放射したときの電力 $P_t$  [W]とすると、距離 $R$  [m]での点の電力密度 $S$  [W/m<sup>2</sup>](単位面積あたりの電力)はアンテナを中心とした半径 $R$ の仮想の球の表面積( $4\pi R^2$  [m<sup>2</sup>])に対する放射電力で表される(式(3.1))[23]。

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad \dots(3.1)$$

本研究では指向性アンテナを用いているため、送信アンテナの電力利得 $G_t$ を考慮すると式(3.1)は書き直すことができ、式(3.2)が成り立つ。

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad \dots(3.2)$$

式(3.2)より、送信電力は距離の二乗に反比例して減衰していく。

次に輻射点における反射波の強度を考える。流星エコーは主にオーバードンス・エコーとアンダーデンス・エコーに分類されるが、本研究では主にアンダーデンス・エコーを対象にしている。ここでアンダーデンス・エコーは一つ一つの電子からの散乱により電波を反射するため、電波が電離柱から全反射するような現象はおこらず、エコー継続時間は短い。このためアンダーデンス・エコーの散乱は強い方向依存性をもち、斜めから電波が入射した場合には入射角と反射角が等しくなる方向に強く反射する”[24]。送信周波数 50 [MHz]、電離層出現高度(流星出現高度)100 [km]、流星エコーとしての電波伝搬距離 200 [km]の場合、電波伝搬距離による減衰と輻射点における反射効率を合わせた電力損失は約 160 [dB](水平偏波の場合)とされる[25]。つまりアンダーデンス・エコーの場合、理論計算では受信電力は送信電力に対して $10^{-8}$ 倍もの損失が生じることになる。

受信局(大学)から約 10 [km]地点にてレンジングコードを入力した送信電波を 30 [W]で出力したとき、Picoscope6 では約 200 [mV]の振幅 $V_{pp}$ を記録した(図 3.4)が、ノイズも同レベルの振幅があるので図 3.2 のように送信局すぐ脇で観測した場合の明確な立ち上がりによる波形の違いを視認するのは直達波による電波伝搬距離わずか 10 [km]でも電波環境によっては相当難しいことがわかる。20 倍距離のある流星エコーの場合、距離による電力減衰だけでも 400 倍あるためさらにシビアになるが、周りのノイズが極端に小さい場合に限ればノイズとレンジングコードの切り替わりの波形を視認でも判別できる可能性は残される。また図 3.5 は図 3.4 の 20 倍の拡大図の一部であるが、左右で波形の濃さ(色)が変わっているのは視認できる。様々なノイズ成分を含むランダムな周期性の波形から 1 [kHz]の正弦波に切り替わる場合のように、波形の周期が極端に変われば波形の濃さ(色)が変わったように見える(これを拡大波形グラフ表示における波の疎密性の違いと本研究では定義する)。本研究では以上の 3 項目、特に視認による波形比較にこだわって解



析を行った。

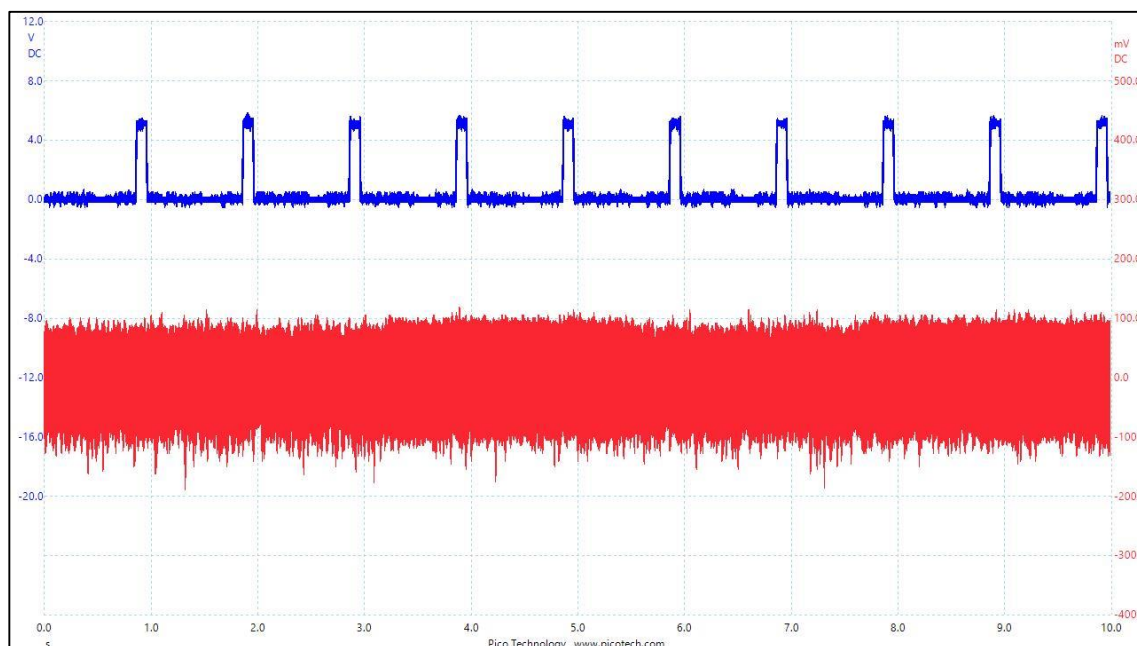


図 3.4 10 [km]離れた送信局からの直達波の波形

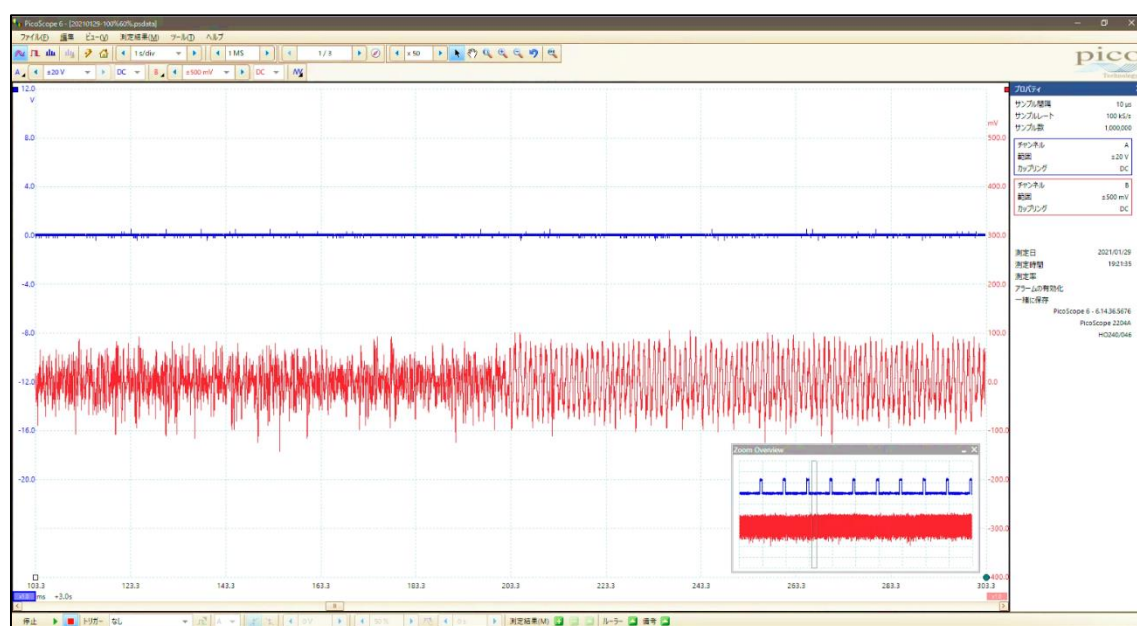


図 3.5 拡大波形グラフ表示における波の疎密性の違い

### 3.2 同一流星観測時の3次元位置推定

5ch 流星電波干渉計での流星出現位置(方位角・仰角)の計算方法を以下に示す[26]。複数の受信アンテナで受信された信号の微小行路差 $D$ [m]はアンテナ間の基線長 $d$ [m]、受信信号の到来角 $\theta$ ( $0 < \theta < \pi$ )[rad]とおくと、図 3.6 の干渉計原理[19]から式(3.3)で表される。

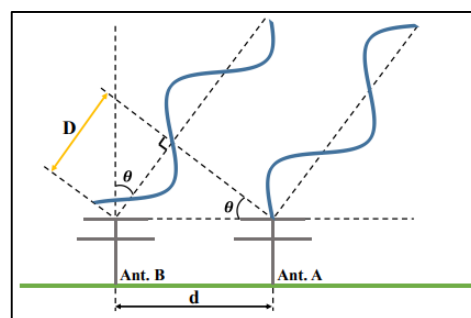


図 3.6 干渉計原理[19]

$$D = d \sin \theta \quad \dots(3.3)$$

行路差 $D$ と受信信号の波長 $\lambda$ [m]の関係は、観測される（この場合は内部位相差 $\phi'(-\pi < \phi' < \pi)$ [rad]を差引いた）位相差 $\phi(-\pi < \phi < \pi)$ [rad]と受信信号の1周期 $2\pi$ [rad](360[度])分の関係に等しい(図 3.7)。これを用いれば、式(3.4)が成り立つ。ただし、 $n$ は整数とする。

$$\frac{\phi - 2n\pi}{2\pi} = \frac{d \sin \theta}{\lambda} \quad \dots(3.4)$$

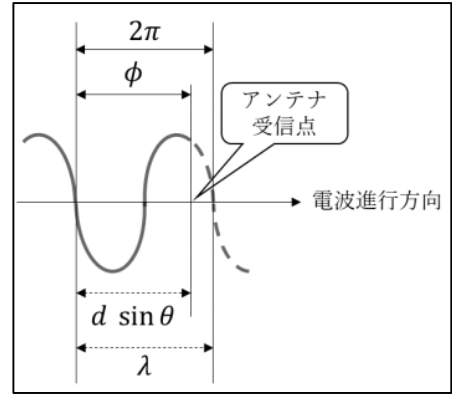


図 3.7 位相差と到来角の関係 I  
( $d = 0.5\lambda$ ,  $n = 0$  の場合)

$d = 0.5\lambda$ のとき、観測周波数 53.755 [MHz]における値は $d = 0.5\lambda \approx 2.8$ [m]であり、このときの $n$ は 0 とみなせる。

$d = 0.5\lambda$ ,  $d = 2.5\lambda$ のとき、式(3.4)を $\theta$ について整理すると式(3.5), 式(3.6)がそれぞれ成り立つ(図 3.8)。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\phi}{\pi}\right) \quad \dots(3.5)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\phi}{5\pi} - \frac{n}{2.5}\right) \quad \dots(3.6)$$

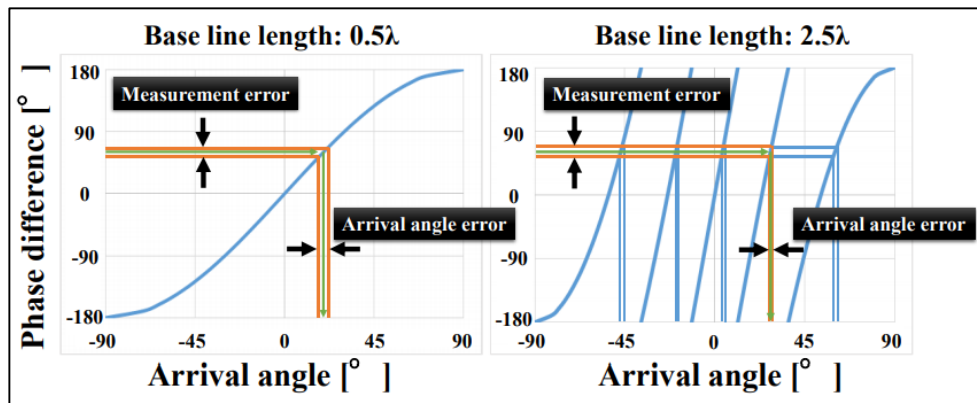


図 3.8 位相差と到来角の関係 II [19]

式(3.5)から $d = 0.5\lambda$ では観測された位相差 $\phi$ から一意に到来角 $\theta$ が求まるが、図 3.8(Base line length :  $0.5\lambda$ )のように傾きがややなだらかなため誤差範囲が大きい。一方で式(3.6)から $d = 2.5\lambda$ ではとりうる $n$ が5種類あり $2\pi$ の任意性(位相差の解1つに対して考える到来角の解が2つ以上(この場合は5つ)存在すること)はあるが、 $d = 0.5\lambda$ の計算結果から最適な $n$ が分かれば到来角の解は1つに絞れる。また図 3.8(Base line length:  $2.5\lambda$ )にて $d = 0.5\lambda$ と比べて傾きは急なため誤差範囲は小さくなり、両者を合わせればより精度の良い到来角 $\theta$ を導出できる。

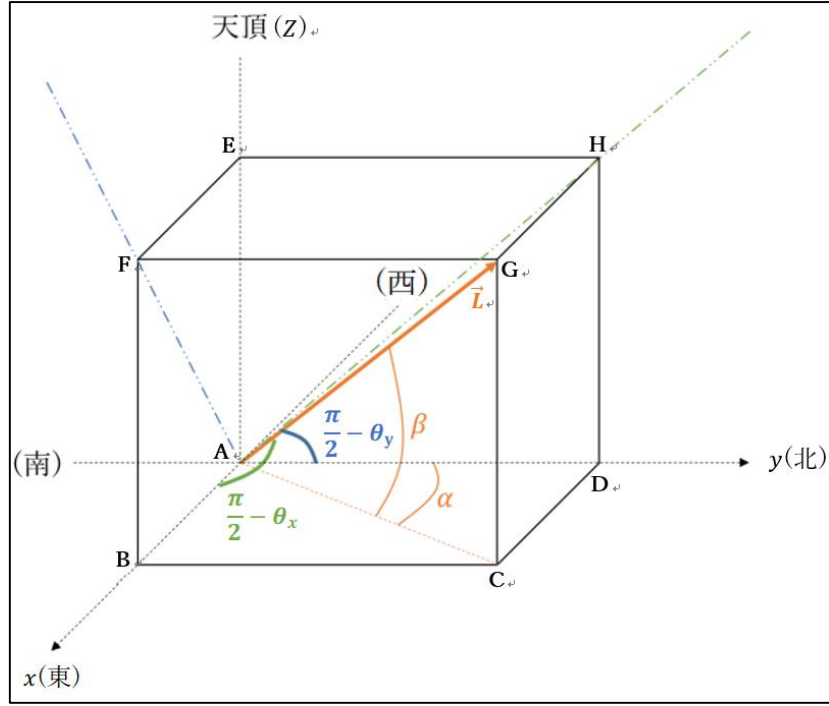


図 3.9 方位角と仰角の算出図

5ch 流星電波干渉計にて干渉計原理を東西・南北方向それぞれで適用したとき、求まった到来角  $\theta$  は 2 種類存在する。図 3.9 で  $\angle FAG$  を到来角  $\theta_x$  とすると  $\theta_x$  は、基線 AD と電波到来方向ベクトル  $\vec{AG}$  を含む面 ADGF と、基線 AD への垂線 AF とのなす角と定義できる。 $\theta_y$  も同様に定義でき、各基線 AB, AD とのなす角に直すと  $\frac{\pi}{2} - \theta_x$  と  $\frac{\pi}{2} - \theta_y$  となる(図 3.9)。

電波到来ベクトルを  $\vec{L}(x, y, z)$  とおくと、各  $x, y$  軸となす角から方向余弦を用いて式(3.7)のように表現できる。

$$\vec{L} = (\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_x), \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_y), z) \quad \dots(3.7)$$

なお、 $\vec{L}$  を単位ベクトル  $|\vec{L}| = 1$  とすると、 $z$  は式(3.8)となる。

$$z = \sqrt{1 - (\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_x))^2 - (\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_y))^2} \quad \dots(3.8)$$

以上より到来方向ベクトル  $\vec{L}$  は  $\theta_x, \theta_y$  が既知であれば導出できる。

$x$  軸と AC のなす角を方位角  $\alpha$ 、AC と  $\vec{L}$  のなす角を仰角  $\beta$  とすると、式(3.9), (3.10) から電波到来方向が求まる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_x)}{\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_y)} \right) \quad \dots(3.9)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \sqrt{\left( \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta_x \right) \right)^2 + \left( \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta_y \right) \right)^2} \right) \quad \dots(3.10)$$

以上で 5ch 流星電波干渉計により算出できる流星出現位置のうち、方位角と仰角の算出方法を説明した。続いて流星レーダー観測により求まる流星出現高度の算出方法について説明する。

受信システム A, B にて受信された波形の相対時間差を  $p$  [秒] とする。電波の伝搬速度を 299,792,458 [m/s] としたとき、輻射点を経由した電波伝搬経路  $q$  [m] は式(3.11)で求まる。

$$q = 299,792,458 \times p \quad \dots(3.11)$$

受信システム A と送信局は直線距離で約 17 [km] に対して、流星出現高度を約 100 [km] と仮定すればおよそ  $q$  の半分が受信システム A と(上空の電離柱上の)散乱点、または送信局と散乱点との直線距離と考えてよい。

目的の 1 つにあるように、流星レーダー観測と 5ch 流星電波干渉計にて同一流星の観測に成功すれば、流星出現高度  $H$  [m] は  $q$  と式(3.10)で得られた仰角  $\alpha$  を使って式(3.12)で算出できる。

$$H = q \sin \alpha \quad \dots(3.12)$$

## 第4章 結果

送信システムの改変を繰り返しながら、2021 年 1~2 月に JA 高知 大杉支所にて計 7 度の送信実験を行った(表 4.1)。受信システム A(高知工科大学)で運用した HROFFT ソフトウェアでは、飛行機エコーや流星エコーとみなせるスペクトル変動を計 37 例取得できた。同時時間帯の Picoscope2204A と Picoscope6 ではレンジングコードの一部とみなせる波形データを視認特定することはできなかった。以下日程順に詳細をみていく。なお Picoscope6 の波形データは時間分解能が高いためすべて載せられないので抜粋したものを図示し、残りは付録にまわした。

表 4.1 1/3~2/2 の送信実験(概要)

	実験時間	使用機器(一部抜粋、前回との変更点を太字)	送信設定	受信システムAにおける HROFFTの観測数(個)	
				飛行機エコー	流星エコー
1/3	14:00~18:00	・ Arduino Unoで作成したコード ・ 圧電スピーカー ・ ADボード ・ 波形抽出ソフトウェア	・ AMモード ・ 搬送波53,754,700 MHz ・ マイクゲイン100% ・ 送信電力20 W	10	1
1/4	11:00~15:00		・ AMモード ・ 搬送波53,754,700 MHz ・ マイクゲイン100% ・ 送信電力12 W	0	0
1/16	12:50~17:00	・ Arduino Unoで作成したコード ・ 圧電スピーカー	・ USBモード ・ 搬送波53,753,750 MHz ・ マイクゲイン20% ・ 送信電力20 W	6	0
1/22	15:00~18:30	(1/3, 4からの変更点) ・ Picoscope2204A ・ Picoscope6			
1/27	3:00~7:00			2	1
1/31	15:10~18:00 21:00~23:00	(1/16, 22, 27からの変更点) ・ 音声工房で作成した.wavファイル ・ 市販スピーカー ・ Picoscope2204A ・ Picoscope6	・ USBモード ・ 搬送波53,753,750 MHz ・ マイクゲイン100% ・ 送信電力50 W	15	0
2/2	16:30~18:00 21:30~24:00	・ 音声工房で作成した.wavファイル ・ 市販スピーカー ・ Picoscope2204A ・ Picoscope6 (1/31からの変更点) ・ 53.750 MHz対応の受信機を一時的に使用(16:30~18:00) ・ 受信システムA, Bの受信機を一時的に入れ替え(21:30~24:00)	・ USBモード ・ 搬送波53,754,900 MHz(16:30~18:00) 53,753,750 MHz(21:30~24:00) ・ マイクゲイン100% ・ 送信電力20 W(16:30~18:00) 50 W(21:30~24:00)	2	0

また、第2章で紹介した光学観測やインフラサウンド観測と、流星レーダー観測や5ch 流星電波干渉計との同時観測例は確認できなかった。

### 4.1 1月3,4日の送信実験

3日について、受信システム A で運用した HROFFT データのなかで飛行機エコーとみなせる観測例は10例、流星エコーとみなせる観測例は1例あった。図 4.1 に飛行機エコー1例、流星エコー1例を抜粋したものを、図 4.2 に同時時間帯の波形抽出ソフトウェアの受信波形を示した。

4日について、受信システム A で運用した HROFFT ソフトウェアのなかで飛行機エコーや流星エコーとみなせる観測例は1例もなかった。

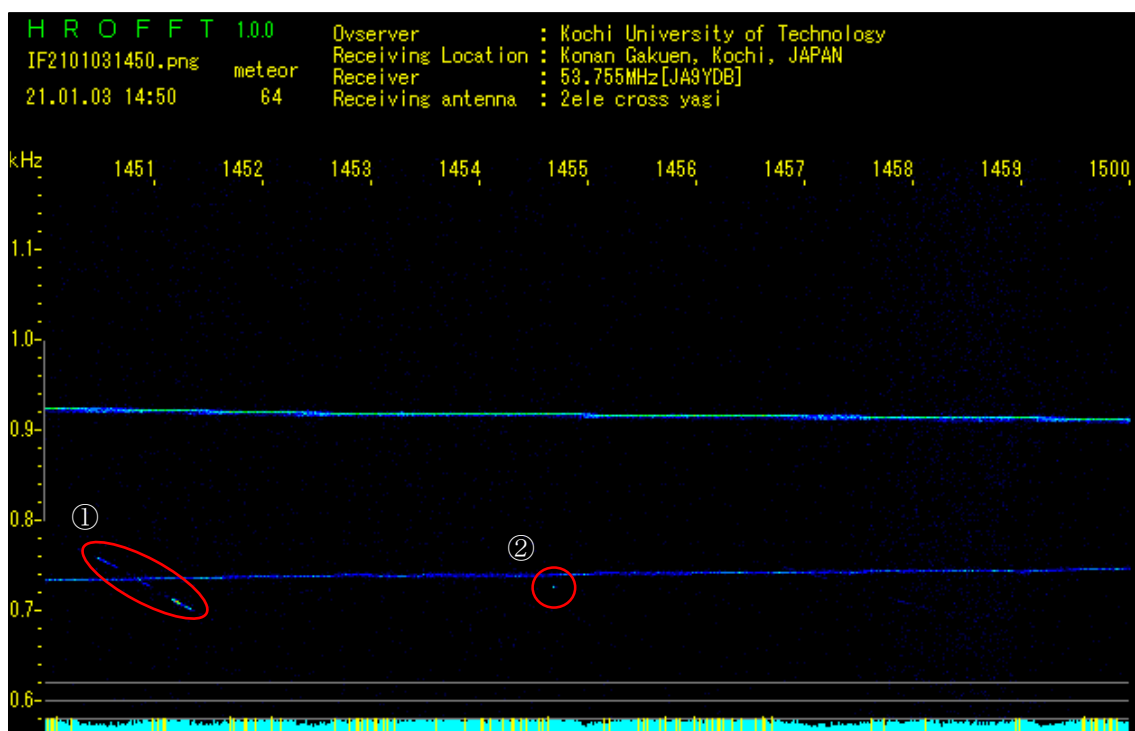


図 4.1 ①飛行機エコー(14:51 頃)、②流星エコー(14:44~45)

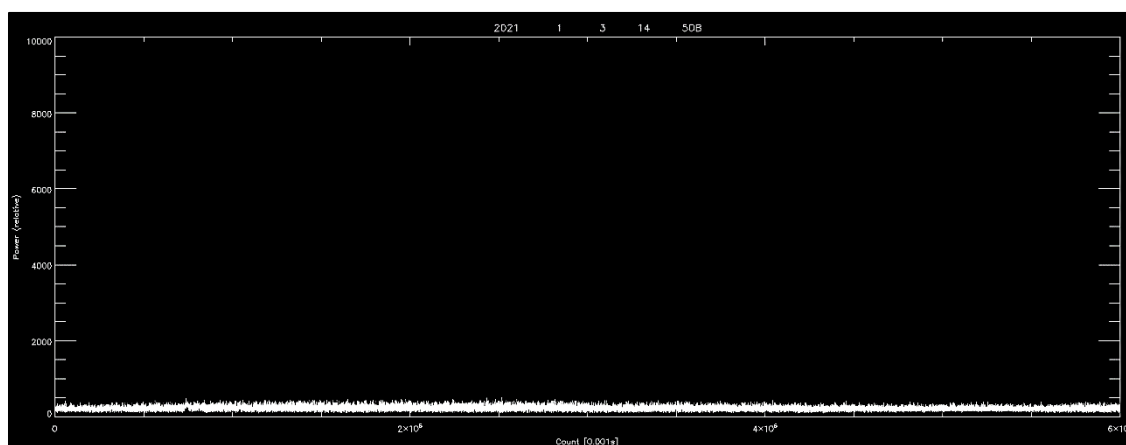


図 4.2 2021 年 1 月 3 日 14:40~50 の波形抽出ソフトウェアの受信波形

## 4.2 1 月 16 日の送信実験

受信システム A で運用した HROFFT ソフトウェアのなかで飛行機エコーとみなせる観測例は 6 例あった(図 4.3、一番強い信号を示した 1 例のみ抜粋)。同時時間帯の Picoscope2204A および Picoscope6 で得られた受信波形の一部(10 秒分)を図 4.4 に示す。

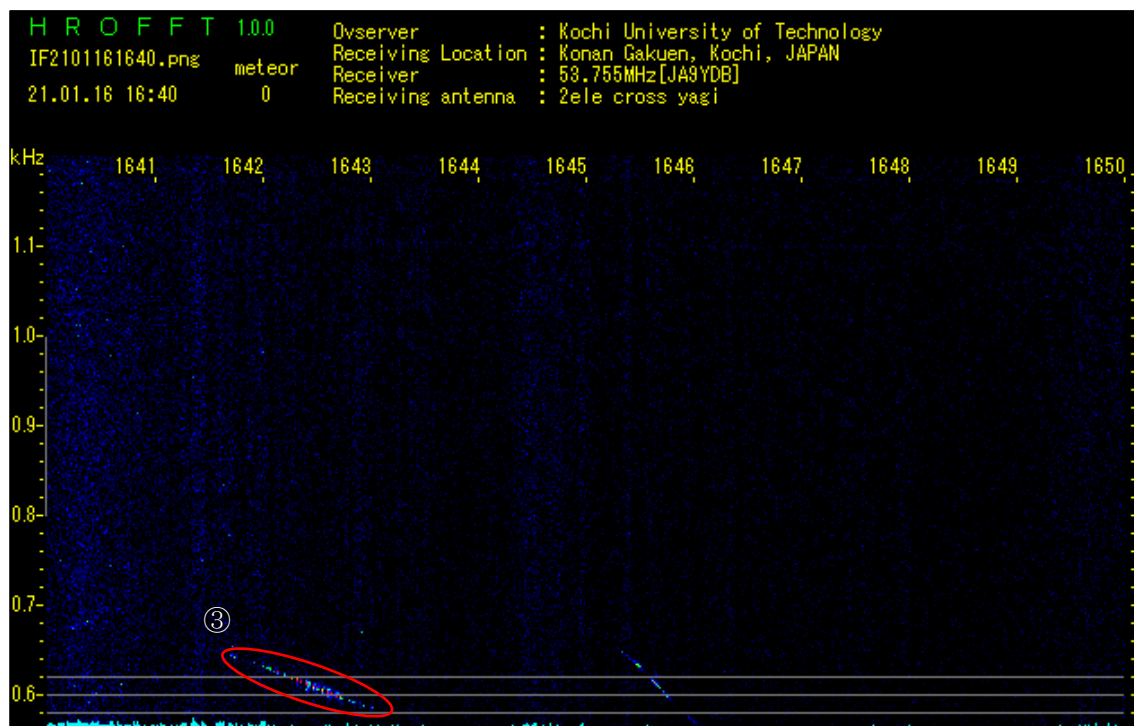


図 4.3 信号が特に強い飛行機エコー (③16:42 頃(16:45 頃にも飛行機エコー))

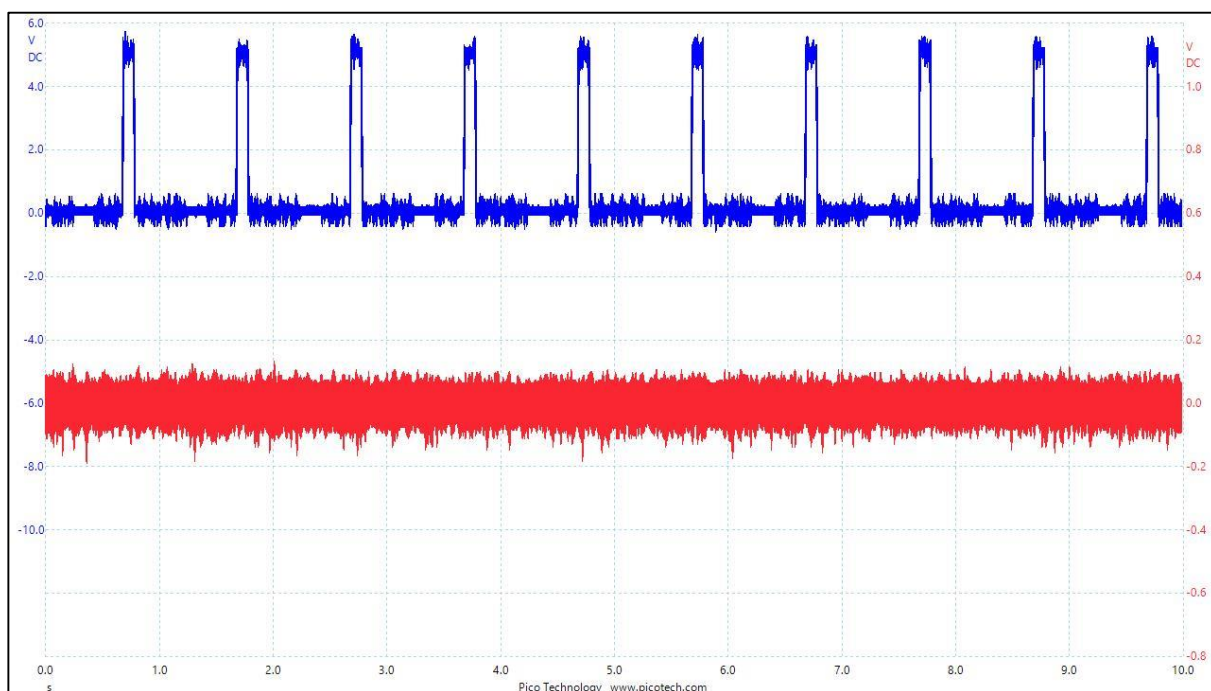


図 4.4 16:42 頃の受信波形 10 秒分

#### 4.3 1月22日の送信実験

受信システム A の受信機と HROFFT ソフトウェアが連動できていない事象が起き(不定期的に生じる)、気づかずに実験を行ってしまったため、実験時間すべてにおいて HROFFT ソフトウェアのデータは取得できていなかった。



#### 4.4 1月27日の送信実験

気温条件がよかったため実験時間帯を深夜から明け方に設定した27日の実験では、受信システム A で運用した HROFFT ソフトウェアのなかで飛行機エコーとみなせる観測例は2例、流星エコーとみなせる観測例は1例あった。流星エコー1例を図4.5、同時時間帯の Picoscope6 で得られた受信波形の一部(10秒分)を図4.6に示す。

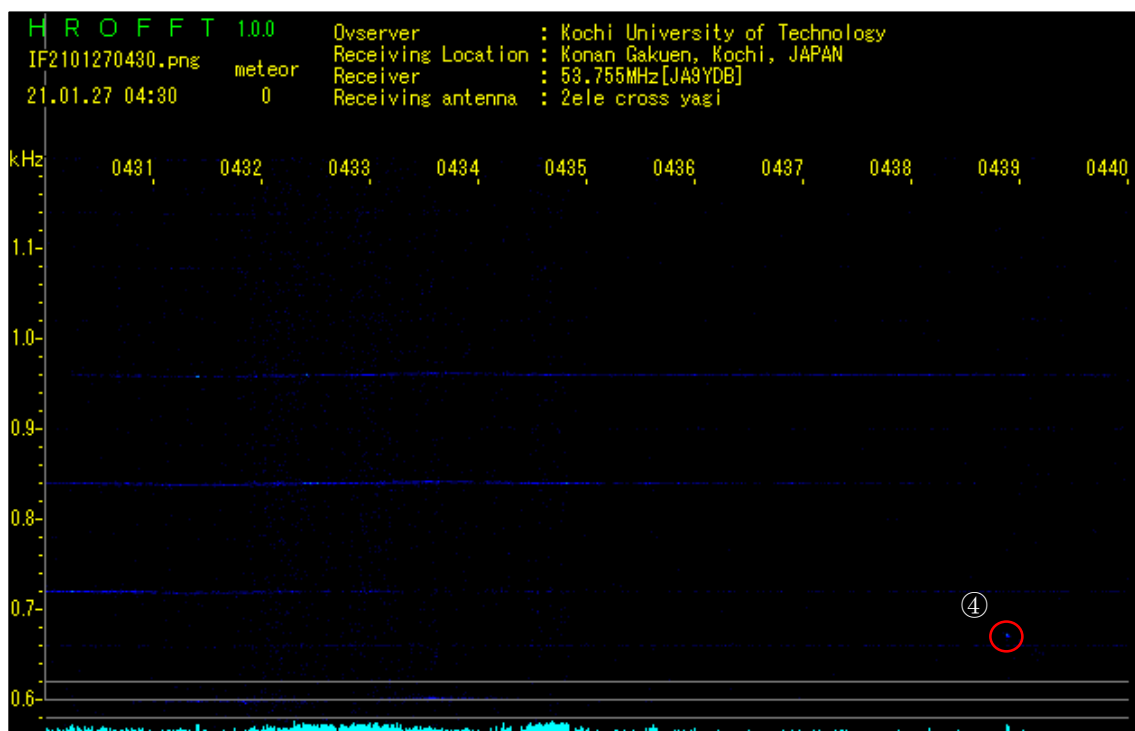


図 4.5 流星エコー(④4:39 頃)

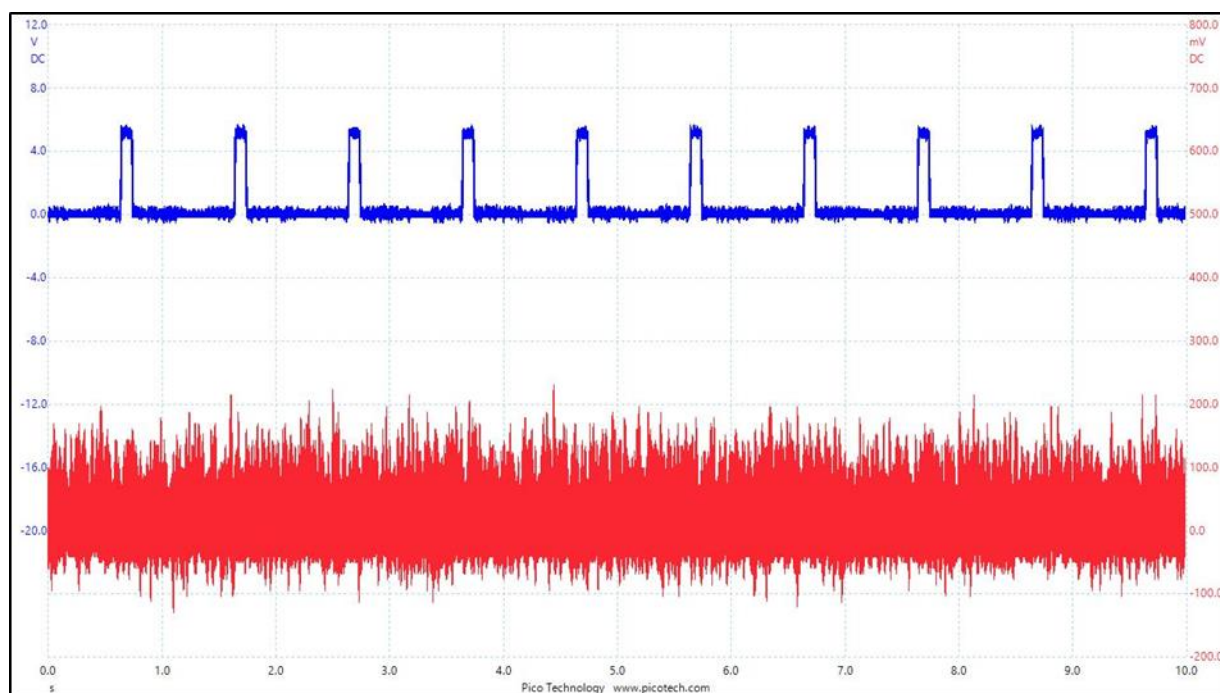


図 4.6 4:39 頃の受信波形 10 秒分



#### 4.5 1月31日の送信実験

受信システム A で運用した HROFFT ソフトウェアのなかで飛行機エコーとみなせる観測例は 15 例、流星エコーとみなせる観測例はなかった。一番強い信号を示した飛行機エコーを図 4.7、同時間帯の Picoscope6 で得られた受信波形の一部(10 秒分)を図 4.8 に示す。

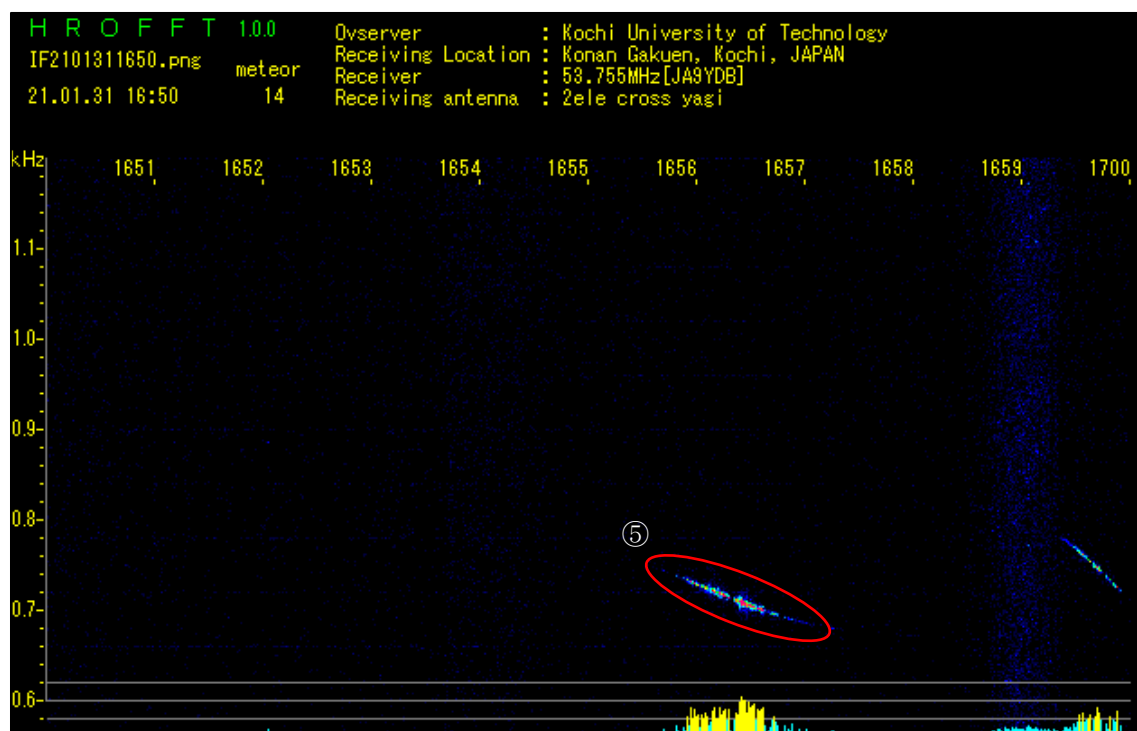


図 4.7 信号が特に強い飛行機エコー(⑤16:56 頃(17:00 頃にも飛行機エコー))

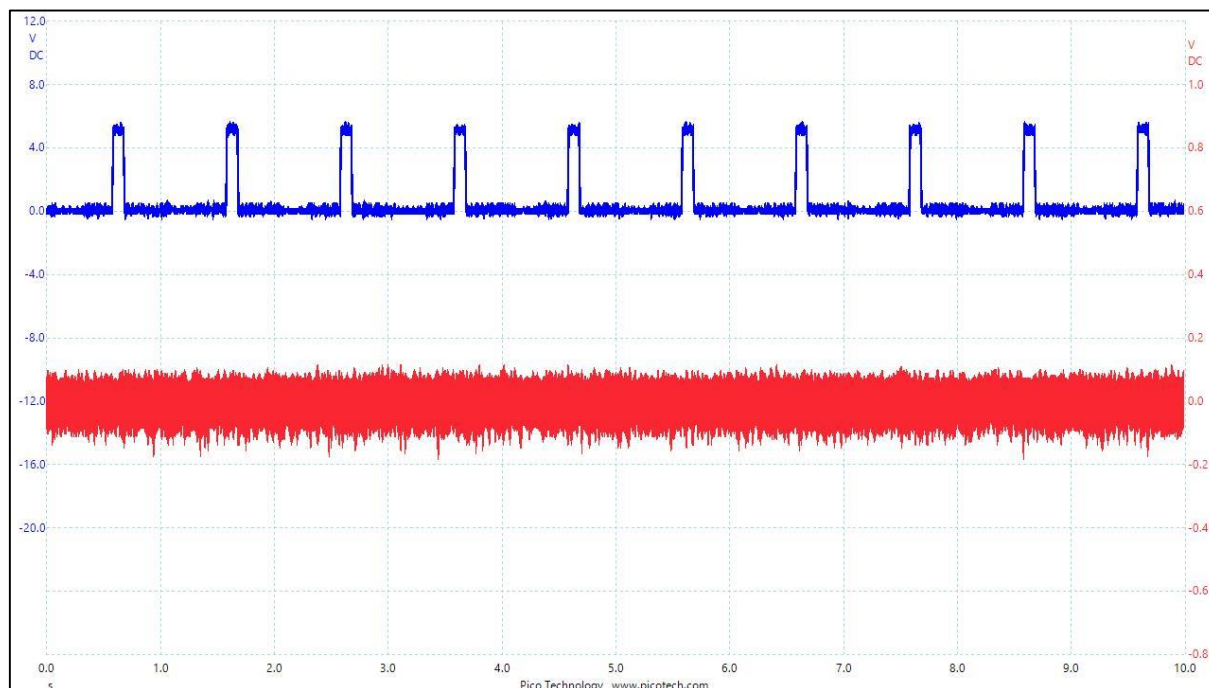


図 4.8 16:56 頃の受信波形 10 秒分

#### 4.6 2月2日の送信実験

受信システム A で運用した HROFFT ソフトウェアのなかで飛行機エコーとみなせる観測例は 2 例のみだった。HROFFT ソフトウェアで得た飛行機エコーを図 4.9、同時時間帯の Picoscope6 で得られた受信波形の一部(10 秒分)を図 4.10 に示す。また図 4.10 の 20 倍拡大図を図 4.11、5ch 流星電波干渉計で得た飛行機エコーを図 4.12、当該区間 1.5 秒間のデータに対して Matlab を用いた Picoscope6 記録データの FFT 解析結果を図 4.13、図 4.13 の矢印部分拡大スペクトルを図 4.14 にそれぞれ示す。

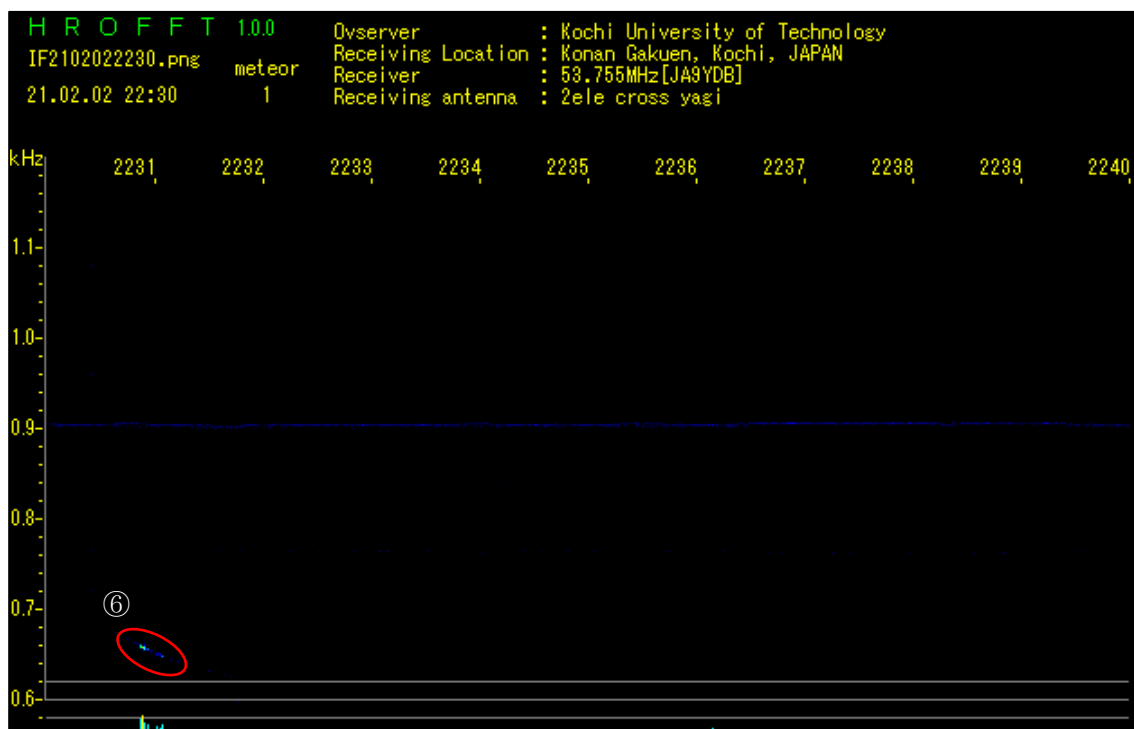


図 4.9 飛行機エコー(⑥22:31 頃)

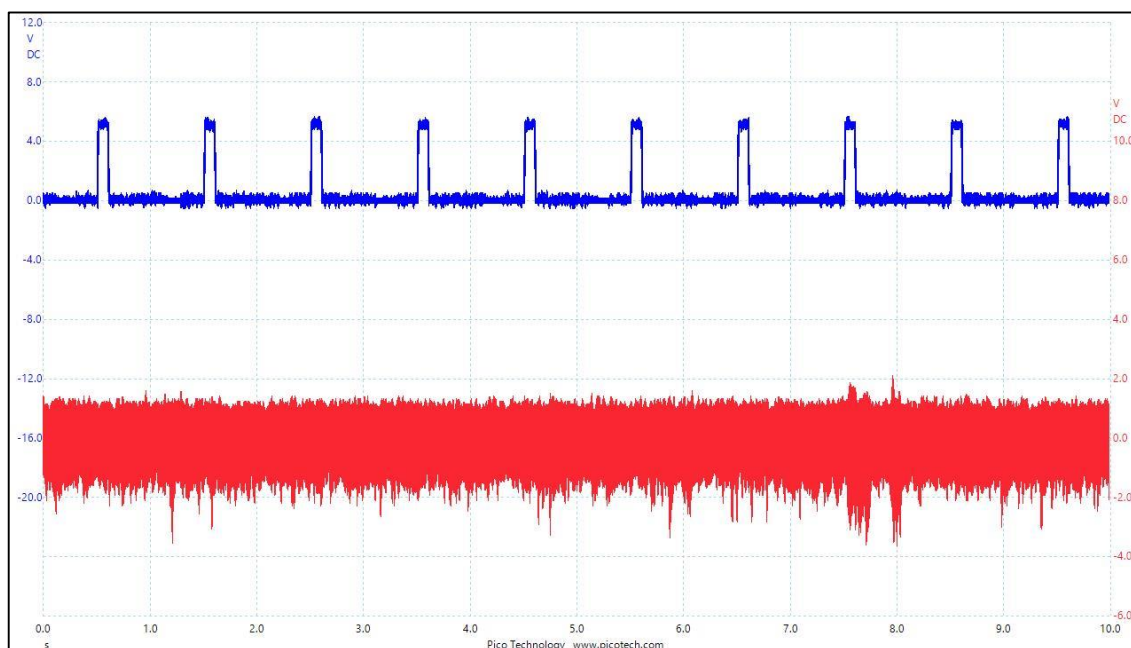


図 4.10 22:31 頃の受信波形 10 秒分

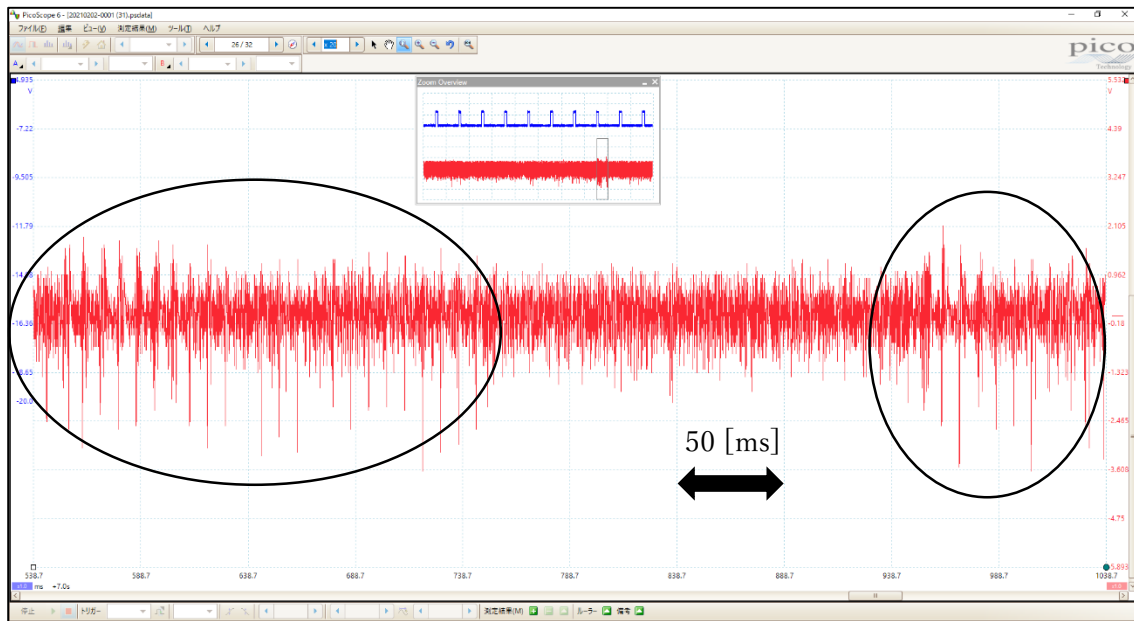


図 4.11 図 4.10 の 20 倍拡大図(横軸 1 目盛り : 50 ms,  
黒色丸印に振幅最大 2 [V], 約 120 [Hz]の波形が混じっている)

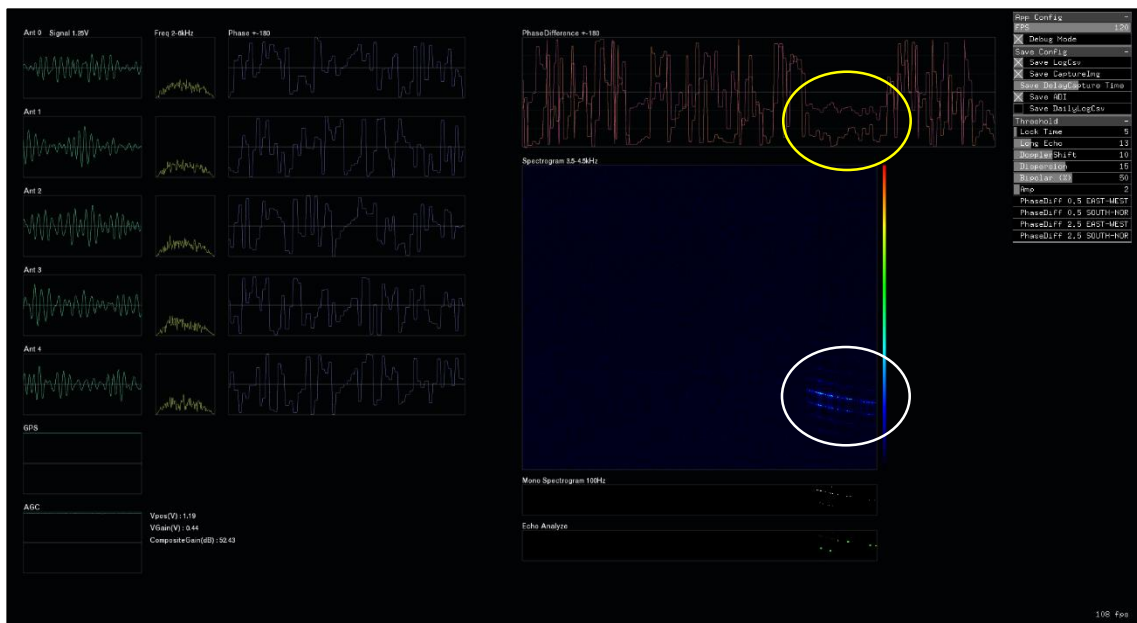


図 4.12 5ch 流星電波干渉計による飛行機エコー(22:31 頃,  
白色丸印部分が該当するスペクトル、黄色丸印部分がそのときの東西・南北位相差)

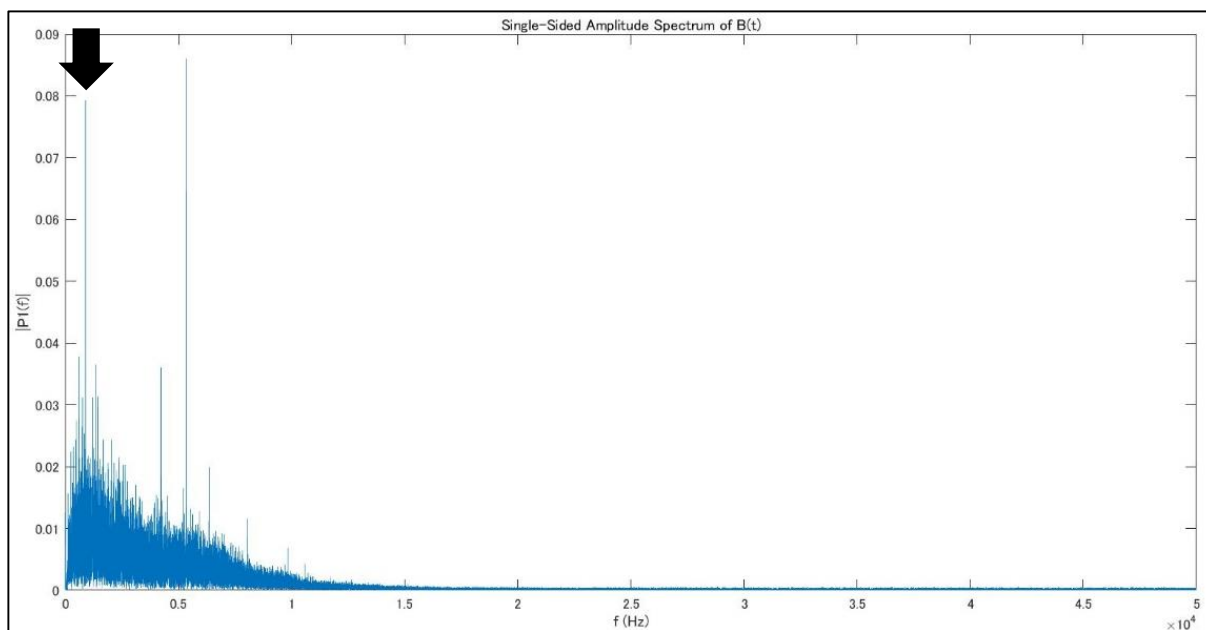


図 4.13 Picoscope6 の記録データの Matlab による FFT 解析結果  
(縦軸：電圧利得  $|P1(f)|$  [dB]、横軸：周波数 [Hz])

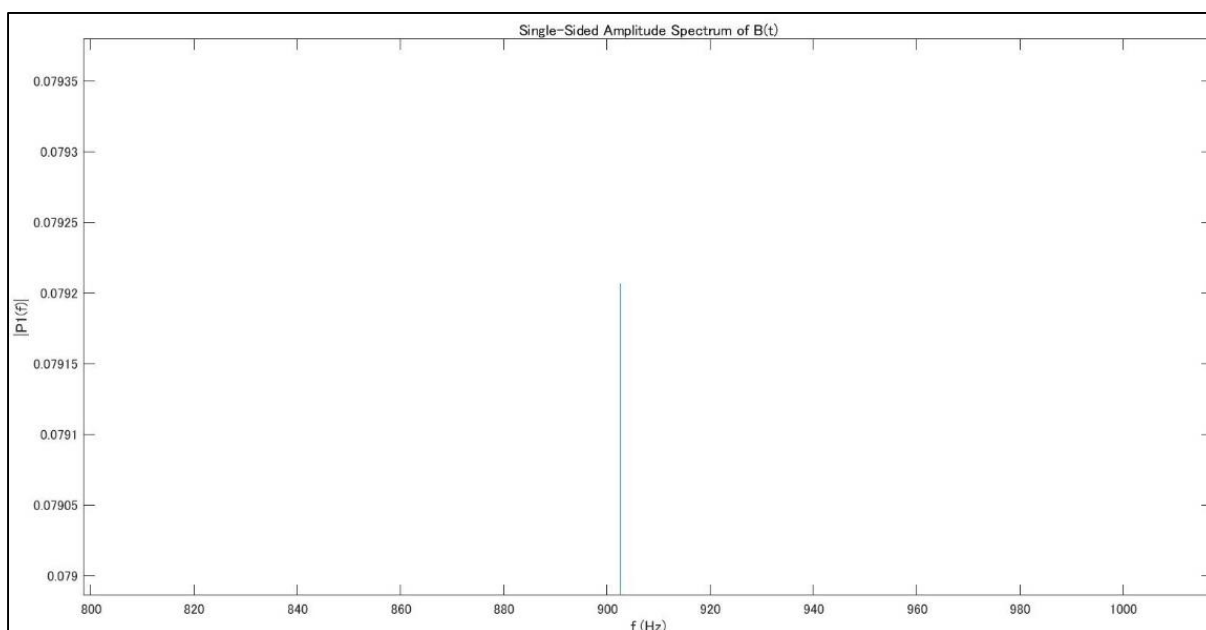


図 4.14 図 4.13 に矢印に示した 900 [Hz] 付近のスペクトル拡大画像  
(縦軸：電圧利得  $|P1(f)|$  [dB]、横軸：周波数 [Hz])

## 第5章 考察

本研究の目的に沿う結果を得られなかった要因について、考察していく。

全日程に共通することとして、飛行機エコーの数に対して流星エコーの数が圧倒的に少ない。実験期間を一部しか流星群到来期間に重ねられなかったため散在流星が主なターゲットになったが、現行の 5ch 流星電波干渉計システムにおける流星群到来期間ではない時期の流星出現(検出)数は 1 日平均 20 個ほどであるため[13]、条件は違えど 1 時間あたり 1 個ほどのエコー数を期待できたはずである。推論だが送信場所である JA 高知 大杉支所と受信場所である高知工科大学を基準とする特定の幾何学条件は、輻射点高度で分類した場合に飛行機の航行高度数 [km]では条件の成立する頻度が高いが、高度 100 [km]では幾何学的には前方散乱ではなく条件の成立は後方散乱的であり、非常に限定的だったのではないかと考える。

以下、日程ごとに詳細な考察を行う。

### 5.1 1月3,4日の送信実験

1月3,4日に波形抽出ソフトウェアを含む多地点観測システムを再使用して実験を行った理由は、JA 高知 大杉支所を送信場所とする長時間の送信実験は初の試みだったため、理想的な(時間分解能をもった)結果が得られるかに関わらず、まずは実験の経験値を得ることを優先したからである。同時にしぶんぎ座流星群の活発な活動時期というのも重なり、昼間でも一定数の観測数は期待された。

3日に関して、観測エコーは 11 例あったが波形抽出ソフトウェアでは特徴的な波形抽出はできていなかった。理由は明白で波形抽出ソフトウェアの抽出範囲設定を誤っていたことだった。53,754,700 [Hz]を送信周波数に設定したので該当周波数が抽出範囲のなかに含まれるよう設定する必要があったが、実験後に設定できていなかったことに気付いた。

4日に関しては HROFFT ソフトウェアでさえ観測例をまったく得られなかったが、特定の幾何学条件の成立頻度だけでなく送信側や受信側に他にも認識していないミス設定があった可能性は否定できない。

### 5.2 1月16,27,31日の送信実験

3,4日のデータ確認を完了した後に、波形抽出ソフトウェアよりも時間分解能に優れた方法を検討した結果、Picoscope2204Aを導入することを決めた。

16,27,31日について、飛行機エコー8例、流星エコー1例について Picoscope6 の波形データを確認したが、視認でレンジングコードの一部と断定できる箇所はなかった。27日は時間帯を夜間にずらしたためか福井県立大学(JH9YYA)の 53.755 [MHz]による流星エコーとみなせる観測例は 3 例ほど増えた。またこの 3 例について 5ch 流星電波干渉計との同時観測例はなかった(5ch 流星電波干渉計側のトリガー機能[13]でデータ保存されなかった可能性がある)。

### 5.3 2月2日の送信実験

16:30~18:00 については、53.750 [MHz]対応の旧受信機(ITEC 製 RX-605a)の組を用いて実験

を行ったが飛行機エコーを 1 例観測したのみだった。実験に使用する周波数を 53.755 [MHz] 周辺を使用した場合は 5ch 流星電波干渉計での観測データとの比較ができる利点があるが、福井県立大学(JH9YYA)からの 53.755 [MHz] による流星エコーも同時に観測されうるため、周波数ごとの適切な分類が必須であるのが欠点である。一方で 53.750 [MHz] 周辺を使用すれば、もともと福井工業高等専門学校からの送信周波数に使用されていたが現在は停波されているため、他に送信する無線技士がいなければ分類の手間は省ける。

21:30~24:00 について、今まで受信システム A で使用していた ITEC 製 RX-605a を受信システム B に、ITEC 製 MRX-50 を受信システム A に入れ替えて実験した。入れ替えた理由として、それまでの計 6 度の実験のなかでの両受信機の拾うノイズの時間変化を比較したとき、ITEC 製 RX-605a は数分単位で電波環境が乱れやすい(ノイズを拾いやすい)特徴があるのに対して、ITEC 製 MRX-50 は数時間単位で電波環境安定しやすい傾向にあることが定性的に判断できた。受信システム A ではより高感度な波形取得が要求されるのに対して、受信システム B は直達波の波形が取得できれば感度は優先ではないので、入れ替えてみる価値があると判断した。2 月 2 日の数時間分の実験しか入れ替えた例がないのでどういった影響が出たかは現時点では判断できない。

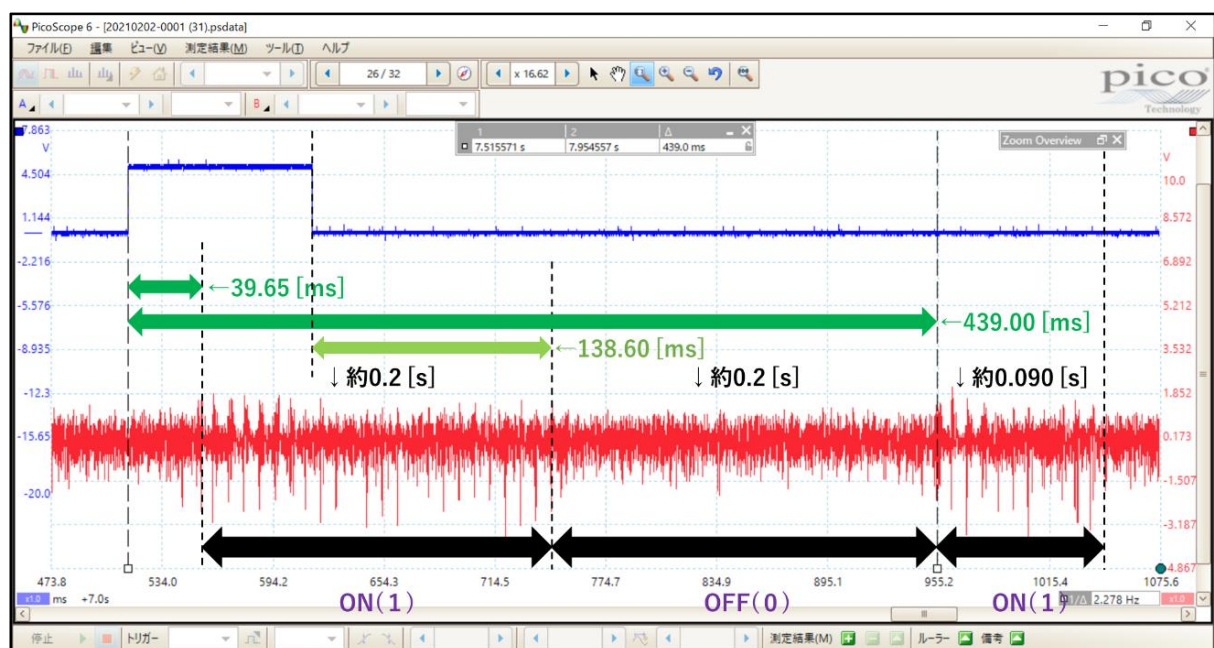


図 5.1 22:31 頃の特徴的波形拡大図(図 4.10 の 16.62 倍拡大)

22:31 頃の飛行機エコー 1 例について、HROFFT ソフトウェアと 5ch 流星電波干渉計で同時観測に成功した。Picoscope6 の波形データについて該時間帯に特徴的な波形が視認できた。図 5.1 に図 4.10 の 16.62 倍拡大図を示す。約 120 [Hz] 周期の波形が約 0.2 [s]、ノイズが約 0.2 [s]、再び約 120 [Hz] 周期の波形が約 0.090 [s] 記録されていると判断でき、使用したレンジングコードは 0.2 [s] ごとに特定の周波数(電波)の ON/OFF が切り替わる設定のため、コード内の ON—OFF—ON の一部が受信できていた可能性が考えられる。作成したコード内にて ON—OFF—ON のパターンは 47 通り存在し、一意に特定することは困難だったため、該当時刻の受信システム B における Picoscope6 の記録データ 20 秒分の 1PPS 信号のパルス立ち上がりタイミングと、コードの ON タイミングを図 5.2, 5.3 を参考にリスト化した(表 5.1)。1PPS 信号(図 5.1 の青)の立ち上



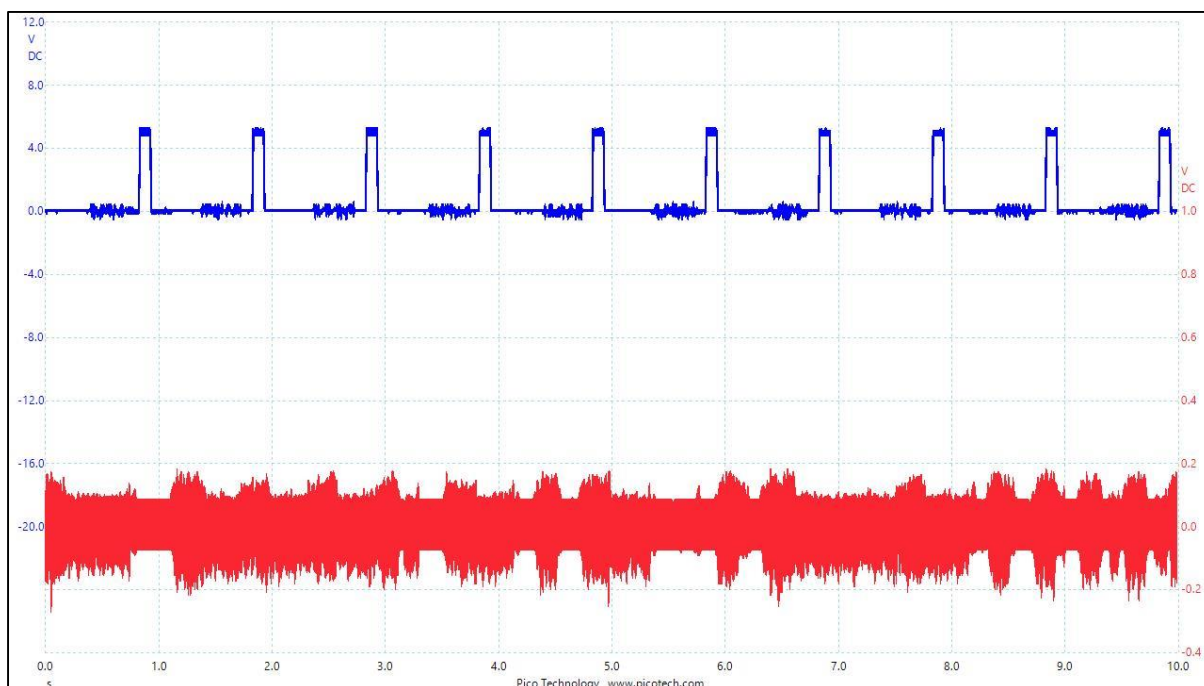


図 5.2 22:31 頃の受信システム B における記録データ I

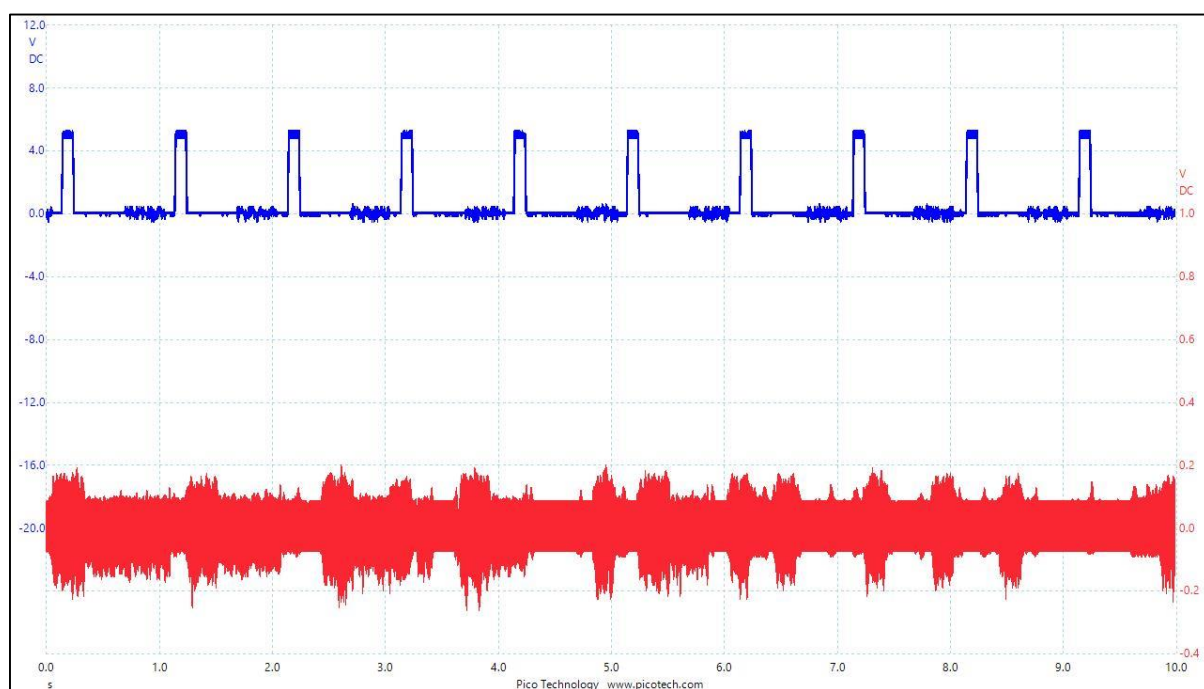


図 5.3 22:31 頃の受信システム B における記録データ II (I の次の 10 秒分)

がり時刻に対して、受信波形内でノイズ(もしくは OFF 時)から信号が受信され始める時(すなわち ON 時)の立ち上がり時刻の差分(ただし 1PPS 信号の立ち上がり時刻の方が早い箇所で見ていることに注意)を比較すると、受信システム A では 1 回目の ON 時の差分は 39.65 [ms]、2 回目の ON 時の差分は 439.00 [ms]であった(図 5.1)。一方、表 5.1 において ON-OFF-ON の順序と各立ち上がり時刻の順序に対応する相対時間差候補は 13 通り(表中赤字)あるが、真上に出現したと仮定したレンジング距離 100 [km]に対する理論上の相対時間差 0.67 [ms]差に対しては、最も近い値でも約 40 [ms](電波伝搬距離約 12,000 [km])となり誤差範囲が大きい。

表 5.1 受信システム B における各立ち上がり時間差

1PPS立ち上がり[ms]	受信波形立ち上がり[ms]	時間差[ms]	備考	1PPS立ち上がり[ms]	受信波形立ち上がり[ms]	時間差[ms]	備考
①831.60	⑪744.00	279.42	⑫-③	⑳145.6	㉑1095.25	949.65	㉒-㉑
②1831.60	⑫3111.02	299.34	⑬-④	㉓1145.6	㉔2073.57	927.97	㉕-㉒
③2831.60	⑬4130.94	681.30	⑭-⑤	㉖2145.6	㉗3235.61	90.01	㉘-㉓
④3831.60	⑭4512.90	503.59	⑮-⑥	㉙3145.6	㉚3415.48	269.88	㉛-㉖
⑤4831.60	⑮5335.19	282.45	⑯-⑦	㉜4145.6	㉝4255.72	110.12	㉞-㉙
⑥5831.60	⑯6114.05	316.63	⑰-⑧	㉟5145.6	㊱5035.42	889.82	㊲-㉞
⑦6831.60	⑰8148.23	680.98	⑱-⑧	㊳6145.6	㊴5856.49	710.89	㊵-㊲
⑧7831.60	⑱8512.58	83.53	㉑-⑨	㊶7145.6	㊷6226.39	80.79	㊸-㊵
⑨8831.60	㉑8915.13	490.14	㉒-⑨	㊹8145.6	㊸6627.73	482.13	㊹-㊸
⑩9831.60	㉒9321.74	890.31	㉓-⑨	㊺9145.6	㊹7426.83	281.23	㊻-㊹
	㉓9721.98				㊺8026.47	880.87	㊼-㊹
					㊻8624.18	478.58	㊽-㊺

加えて表 5.1 について、各立ち上がり相対時間差を分類すると表 5.2 ようになり、平均をとると約 200 [ms] の時間差は証明できるので、これは受信システム B においてコードは正常に受信できていることを示す。

立ち下がりについても同様の考察を行った。該当時刻の受信システム B における Picoscope6 の記録データ 20 秒分の 1PPS 信号のパルス立ち下がり

表 5.2 各立ち上がり相対時間差の分類

Group	A	B	C	D	E
立ち上がり相対時間差 [ms] (図 5.2)	83.53	279.42 299.34 282.45 316.63	490.14 503.59	681.30 680.98	890.31
Ave.	83.53	294.46	496.87	681.14	890.31
立ち上がり相対時間差 [ms] (図 5.3)	90.01 80.79	269.88 281.23	482.13 478.58	710.89	949.65 927.97 889.82 880.87
Ave.	85.40	275.56	480.36	710.89	912.08
Total Ave.	84.465	285.01	488.61	696.02	901.19
Difference		200.54	203.60	207.41	205.18

表 5.3 受信システム B における各立ち下がり時間差

1PPS立ち下がり[ms]	受信波形立ち下がり[ms]	時間差[ms]	備考	1PPS立ち下がり[ms]	受信波形立ち下がり[ms]	時間差[ms]	備考
①931.60	⑪1120.75	189.15	⑫-①	㉑245.6	㉒1232.70	987.10	㉓-㉑
②1931.60	⑫3519.12	587.52	⑬-②	㉔1245.6	㉕2433.55	187.95	㉖-㉔
③2931.60	⑬4319.53	387.93	⑭-③	㉗2245.6	㉘3278.23	32.63	㉙-㉗
④3931.60	⑭4719.35	787.75	⑮-④	㉚3245.6	㉛3632.65	387.05	㉜-㉚
⑤4931.60	⑮5919.08	987.48	⑯-⑤	㉞4245.6	㉟4833.08	587.48	㊱-㉞
⑥5931.60	⑯6318.26	386.66	⑰-⑥	㊲5245.6	㊳5233.50	987.90	㊴-㊲
⑦6931.60	⑰8319.21	387.61	⑱-⑦	㊶6245.6	㊷6033.97	788.37	㊸-㊶
⑧7931.60	⑱8719.81	788.21	⑲-⑧	㊺7245.6	㊻6432.93	187.33	㊼-㊺
⑨8931.60	㉑9118.51	186.91	㉒-⑨	㊾8245.6	㊿7233.09	987.49	㉑-㊾
⑩9931.60	㉒9518.72	587.12	㉓-⑨	㉑9245.6	㉒7834.90	589.30	㉓-㉑
	㉔9918.80	987.20	㉕-⑨		㉔8432.51	186.91	㉕-㉑
					㉕9838.48	592.88	㉖-㉕

タイミングと、コードの OFF タイミングを図 5.2, 5.3 を参考にリスト化した(表 5.3)。受信システム A において 1PPS の立ち下がり時刻と OFF 時の差分は 138.60 [ms] であった。一方、表 5.3 において ON-OFF-ON の順序と各立ち下がり時刻の順序に対応する相対時間差候補は 13 通り(表中赤字)があるが、理論上の相対時間差 0.67 [ms] 差に対しては最も近い値でも約 48 [ms] (電波伝搬距離約 14,400 [km]) となり立ち下がりの場合と同様に誤差範囲が大きい。また表 5.4 は表 5.2 同様に受信システム B においてコードはほぼ正常に受信できていることを示すが、一部例外があった。

表 5.4 各立ち下がり相対時間差の分類

Group	A	B	C	D	E	F
立ち下がり相対時間差 [ms] (図 5.2)		189.15 186.91	387.93 386.66 387.61	587.52 587.12	787.75 788.21	987.48 987.20
Ave.		188.03	387.4	587.32	787.98	987.34
立ち下がり相対時間差 [ms] (図 5.3)	32.63	187.95 187.33 186.91	387.05	587.48 589.30 592.88	788.37	987.10 987.90 987.49
Ave.	32.63	187.40	387.05	589.89	788.37	987.50
Total Ave.	32.63	187.71	387.23	588.60	788.18	987.42
Difference		155.08	199.51	201.38	199.57	199.24



表 5.4 中の GroupA 32.63 [ms]について、記録されたデータにおけるコードの ON 時間が約 40[ms]となっており、160 [ms]分ノイズが合成された可能性、もしくは送信側の何らかのトラブルが考えられるが、現時点では解決に至っていない。

誤差範囲の要因について主に 3 点考察する。まず本研究では受信システム A,B ではそれぞれまったく同じ GPS を使用したため、相対時間差を算出するにあたって基準とする GPS の信号にずれがないものとして扱ってきた。各実験において、GPS 受信機からの 1PPS 信号にずれがないのを実際に確認したわけではないため、今後実験方法を工夫する必要があるかもしれない。次に使用機材の一部である Picoscope2204A はサンプリング周波数最大 100 [MHz]有するが、Picoscope6 において記録する 1 ファイルの容量を 30 [GB]、320 [秒分]に設定した影響で(時間分解能とファイル容量は比例するゆえにバランスを考えた設定)、100 [kHz]サンプリングが自動設定されていたことを実験後に発見した。つまり理論上 10 [ms]精度までしか保証されないため、40 [ms]の誤差範囲は時間分解能が足りていないゆえの誤差として考えうる。最後にファイル保存時間の影響である。受信システム B において 22:31 はファイル保存時間内にあたる可能性があった。ファイルサイズや PC の動作状況で変化するため精密測定できていないが、平均数秒間は保存には時間を要する。表 5.1 における 1PPS 立ち上がり注目したとき、①~⑩と⑫~⑳で 314 [ms]のズレがある。これは表 5.3 においても同様で、ファイル保存時間によるズレ時間が 314 [ms]+n [s](n は 0 もしくは自然数)であることを意味する。この保存中にコードの一部を受信したのであれば、そもそも相対時間差を算出するためのデータは取れていなかった可能性が考えうる。

図 4.14 によると 900 [Hz]付近に 0.07 [dB]ほどの相対的に強い信号が記録されている。120 [Hz]の波形が見られる点については、相手が飛行機であるため近づく状況から遠ざかる状況へと変化するドップラーシフトが $\pm 100$  [Hz]程度は見込まれ、これと 1 [kHz]のレンジングコードの ON の状況との差分によりレンジングコードの一部のみが何らかの特性として波形内に現れている可能性があり、同様の実験を続ければ解釈できるかもしれない。

## 第 6 章 結論

本研究の目的の 1 つである前方散乱方式による流星レーダー観測を計 7 度実施することはできたが、期間内に流星との直線距離の推定例を得ることはできなかった。Picoscope6 の波形データに対して解析方法を視認比較に限定した本研究では、たとえ受信システム A でレンジングコードの一部を受信できていたとしても定量的かつ客観的に特定することは困難であった。データ取得およびデータ記録方法の大まかな改変を 1 月に行った影響もあり、計画性の欠如も観測不良の一要因だった。

本研究のもう 1 つの目的である、流星レーダー観測と 5ch 流星電波干渉計の両システムでの 1 例以上の同一流星の観測(同時観測)は叶わなかったが、飛行機エコー1 例に関して HROFFT ソフトウェアと 5ch 流星電波干渉計で同時観測に成功し、Picoscope6 の該当する時間の波形データに特徴的な波形の取得を確認した。視認比較ではその波形が確実な 1 [kHz]の断続するレンジングコードの一部とは断定できなかった。本研究は手法確立のため試行可能な実験をいろいろ試した段階であった。したがって予測、考察、実験日数等に不足があり有力なデータが取得できなかった可能性も考えられる。今後同様の実験を続ければ新たな解釈が生まれるかもしれない。

著者の研究内容は 2019 年 12 月に行われた中間報告会で報告した研究内容から大きく変更があった。当初は外部協力の下、県内だけでなく県外にも受信システムを設置し数 100 [km]規模で複数の干渉計を設置する方法等を模索していたが、新型コロナウイルス(COVID-19)の猛威の影響で研究室の出入りさえも自由にできるか怪しい状況になった。実質的に県外出張ができない状況下で県内移動にとどめ自力で行える研究内容を検討した結果、本研究テーマを定め直した。過去に例のないことに対するアプローチの難しさ、理論上できると思っていることと実際できるかどうかの想像以上の差を経験し、送信局開設から実際の実験運用にいたるまで約 5 か月を要した。

最後に本研究のシステムすべてを独自運用するのは相当の労力を割いた。著者自身は忙しさも楽しめたが、計画性や技術力において力不足なことも多かったためデータを取得するまでに想像以上の時間を使ってしまい、その先にある解析や本質を深く議論するデータを得るには至らなかった。

## 謝辞

本研究の指導教員である高知工科大学 システム工学群 山本 真行 教授には、本研究に加えて学会発表(特に国際学会(METEOROIDS2019)の発表)や就職活動などでも数えきれない丁寧なご指導ご鞭撻を賜りましたこと心から感謝申し上げます。私が研究室配属された 2018 年秋から約 3 年半にわたり本当にお世話になりました。

本論文の副査である岩下 克 教授、星野 孝総 准教授をはじめとするシステム工学群 電子系の先生方には、学士・修士の各報告会にて適切なご指導やアドバイスを頂けましたことに心から感謝するとともに深く御礼申し上げます。

流星電波観測の観測仲間であり、福井県立大学永平寺キャンパス屋上の送信局(JH9YYA)の運用にご尽力されている福井県立大学 中村 匡 教授、故 前川 公男 様、中根 純夫 様には、多忙にもかかわらず本研究についても数々の熱心なアドバイスやご協力を頂戴し、感謝の言葉しかありません。特に HRO の創始者である前川様には本研究だけでなく本研究室の歴代の流星電波観測に大きく貢献くださいました。心よりご冥福をお祈りいたします。

株式会社バスキュールおよび同社 武田 誠也 氏には本研究で扱った 5ch 流星電波干渉計で利用した最大 5ch 同時対応受信機および専用ソフトウェアを共同研究(貸出)の形で長期間ご提供いただきましたことに感謝申し上げます。

本研究で電波送信場所としてご協力頂きました JA 高知 大杉支所 支所長 西村 尚利 様に感謝申し上げます。交渉時期が年末の多忙な時期だったにも関わらず早急にご対応くださり非常に有難い気持ちでいっぱいでした。実験の際にもとても温かいお言葉をおかけくださったことは非常に励みになりました。

本研究室の OB であり先行研究者の一人である水本 聡 氏には、本研究だけでなく著者の学士研究の頃からご経験に基づいた様々な実践的アドバイスをいただきました。時には夜遅くまで電話相談に応じてくださり、感謝してもしきれません。

本研究の送信実験を含む幾度の県内出張にご協力くださった修士課程 2 年 井上 祐一郎 氏、大畑 遥 氏、修士課程 1 年 赤松 直 氏、谷 優希 氏、山本 大誠 氏、学士課程 3 年 田中 智泉さんに感謝と御礼申し上げます。独力ではできない作業もあったので非常に助かりました。

研究室配属されてから 3 年半の間お世話になりました本研究室に所属する学生の皆様、研究室 OB の皆様、電子系事務室の方々、他研究室的の皆様に感謝申し上げます。特に同期 4 名とはかけがえのない時間を過ごせて本当に楽しい 3 年半でした。

最後になりましたが、高知での学生生活 6 年にわたってサポートしてくれた両親、家族、そして親戚一同に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 福田明, “流星バースト通信,” 3 流星バースト通信路, 3.1 流星, pp. 29-30, コロナ社, 1997.
- [2] 司馬康生, 星はなぜ光るのか, “2. 流星の光はプラズマの発光による輝線スペクトル,”  
<http://www5e.biglobe.ne.jp/~shibaya/fireballs/physics/luminous.htm>, (2020 年 12 月 25 日参照).
- [3] JAXA, 観測ロケットと大気球, 2016,  
[http://www.isas.jaxa.jp/missions/balloons/files/small\\_launch\\_vehicle.pdf](http://www.isas.jaxa.jp/missions/balloons/files/small_launch_vehicle.pdf), (2020 年 12 月 25 日参照).
- [4] 新野賢爾, 蛭川八千代, “VHF 電離層前方散乱と流星の関係,” pp. 64, 昭和 52 年 6 月 23 日,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/nictkenkyuhoukoku/23/123.124/23\\_63/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/nictkenkyuhoukoku/23/123.124/23_63/_pdf/-char/ja), (2020 年 12 月 25 日参照).
- [5] Maegawa, K., HRO : A new forward-scatter observation method using a ham-band beacon, *WGN*, **27**, 64~72, 1999.
- [6] 京都大学生存圏研究所, “MU レーダーについて,” 京都大学生存圏研究所,  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/radar.html>, (2020 年 12 月 25 日参照).
- [7] 濱口佳之, 藤原康德, 中村卓司, 田中利彦, 田名瀬良一, 上田昌良, 阿保真, 堤雅基, “新流星観測システムによる流星速度ベクトルの測定及び大気風の測定,” 2009.
- [8] The department of physics and astronomy, “The Upgraded Canadian Meteor Orbit Radar CMOR II,” The University of Western Ontario,  
<http://meteor.uwo.ca/research/radar/cmorII.html>, (2020 年 12 月 25 日参照).
- [9] R.Latteck, W.Singer, M.Rapp, B.Vandeppeer, T.Renkowitz, M.Zecha, G.Stober, “MAARSY: The new MST radar on Andøya—System description and first results,”  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011RS004775>, (2021 年 2 月 2 日参照).
- [10] NASA Meteor Shower Portal, SAAMER,  
<http://cams.seti.org/FDL/index-SAAMER.html>, (2021 年 2 月 2 日参照).
- [11] Radio Meteor Observing Bulletin,  
<https://www.rmob.org/index.php#Kees%20Meteor>, (2021 年 2 月 2 日参照).

- [12] 国立天文台, 主な流星群の一覧, 極大時の ZHR(注 3),  
<https://www.nao.ac.jp/astro/basic/major-meteor-shower.html>, (2021 年 2 月 2 日参照).
- [13] 佐藤匠, 新 HRO 干渉計システムにおけるリアルタイム解析手法の確立と流星総合観測の運用試験, 平成 30 年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2019.  
<http://hdl.handle.net/10173/00002069>, (2020 年 12 月 25 日参照).
- [14] 赤松直, 流星の多地点観測を用いた精密時間差計測と流星速度算出の試み, 2020 年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2020.
- [15] 総務省電波利用ホームページ, 微弱無線局の規定,  
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/ref/material/rule/>, (2020 年 12 月 25 日参照).
- [16] ICOM, IC-7100,  
<https://www.icom.co.jp/lineup/products/IC-7100/>, (2020 年 5 月 16 日参照).
- [17] 宮城統, キムミンジ, 阪口啓, 荒木純道, “基地局連携におけるレンジングの基礎検討,” 東京工業大学, 平成 19 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会.  
<https://www.ieice.org/tokyo/gakusei/activity/kenkyuu-happyoukai/happyou-ronbun/13/pdf/98.pdf>, (2021 年 2 月 2 日参照).
- [18] 山崎倫誉, 5ch 干渉計及び多地点観測に基づく流星軌道計測法の開発と KUT 流星電波観測システムの改良, 平成 22 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2012.
- [19] 水本聡, 多地点電波観測による流星飛跡情報の算出と流星総合観測システムの構築, 平成 28 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2017.
- [20] 野口幸雄, 第 3 級ハム国試要点マスター2019, pp.258, 2019.
- [21] W.N. Edwards, P.G. Brown, R.J. Weryk, D.O. ReVelle, “Infrasonic Observations of Meteoroids: Preliminary Results from a Coordinated Optical-radar-infrasound Observing Campaign,” *Earth, Moon, and Planets*, vol. **102**, issue 1, pp.221-229, Jun. 2008,  
DOI:10.1007/s11038-007-9154-6
- [22] 藤本将司, 高知県沿岸に配置されたインフラサウンドセンサ群を用いた音波源推定法の開発, 令和元年度 高知工科大学 特別研究報告, 2020.



[23] 大内和夫, “レーダの基礎 — 探査レーダから合成開口レーダまで —,” 2 レーダ方程式とマイクロ波の散乱, 2.2 レーダ方程式, pp. 41, コロナ社, 2017.

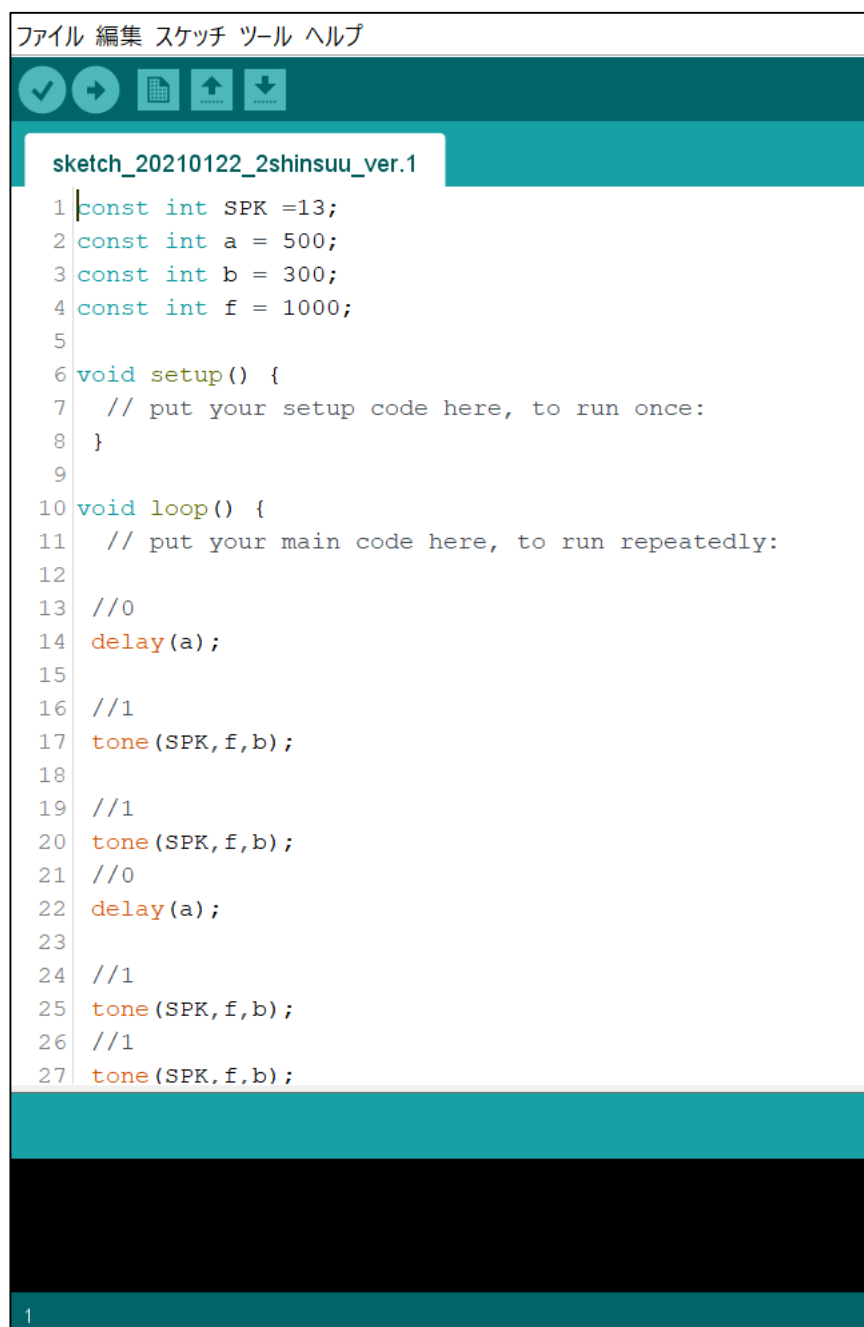
[24] 野中康輝, 塩谷望, 森田晃平, 阿部新助, “電波流星観測システムの構築,” 令和元年度 日本大学理工学部 学術講演会予稿集,  
<https://www.cst.nihon-u.ac.jp/research/gakujutu/63/pdf/K-85.pdf>, (2020 年 2 月 2 日参照).

[25] 福田明, “流星バースト通信,” 3 流星バースト通信路, 3.3 流星バースト通信路, 3.3.4 流星バーストからの反射波の強度, pp. 47-54, コロナ社, 1997.

[26] 埜口和弥, 5ch 電波干渉計による流星出現位置の精密測定と自動観測システムの開発, 平成 20 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2009.

## 付録

第2章 2.1.2 項で説明した Arduino Uno で記述したレンジングコードを図 A.1 に示す。Digital13 ピンに接続した圧電スピーカーに対して、1 [kHz] 音声 OFF 時が 500 [ms]、ON 時が 300 [ms] になるように設定した。1 秒周期の 1PPS 信号に対して周期による比較困難を防ぐために、なるべく 1 秒周期にならない ON/OFF の周期を作成するように心がけた。//0 と//1 が OFF と ON 時に対応し、//0 と//1 の順番は 10 進数の 0~63 を 2 進数表記に変換し 1 桁ずつ並べたものである。



```
1 const int SPK =13;
2 const int a = 500;
3 const int b = 300;
4 const int f = 1000;
5
6 void setup() {
7   // put your setup code here, to run once:
8 }
9
10 void loop() {
11   // put your main code here, to run repeatedly:
12
13   //0
14   delay(a);
15
16   //1
17   tone(SPK,f,b);
18
19   //1
20   tone(SPK,f,b);
21   //0
22   delay(a);
23
24   //1
25   tone(SPK,f,b);
26   //1
27   tone(SPK,f,b);
```

図 A.1 Arduino Uno によるレンジングコード(ソースコード)

第 4 章 4.2 節にて載せられなかった Picoscope6 波形データを図 A.2~A.7 に示す(1月 16 日 16:42 頃の 10 秒×6)。

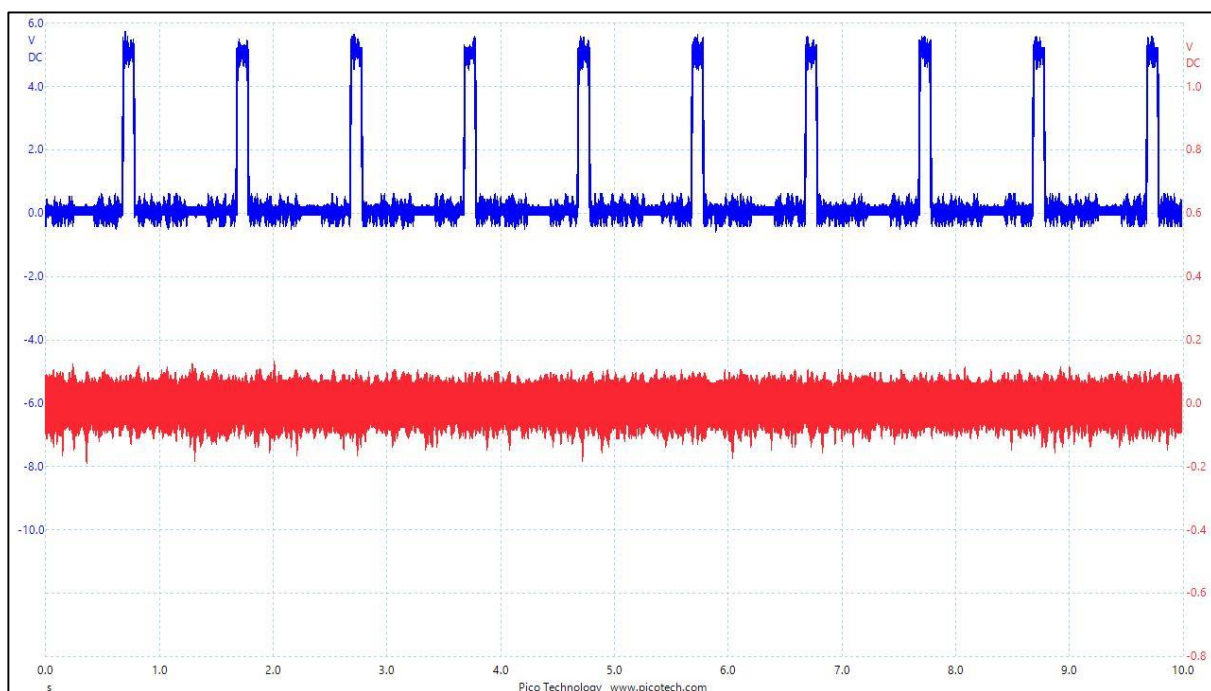


図 A.2 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 4.4 に同じ)

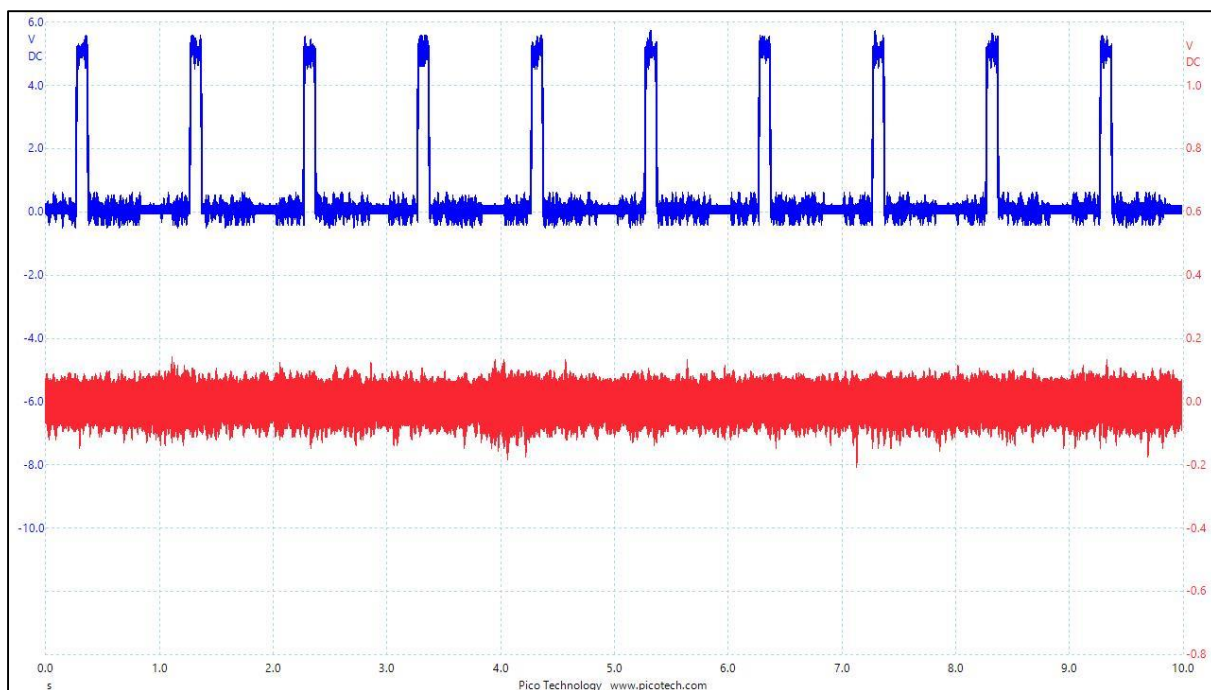


図 A.3 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 A.2 の次の 10 秒分)

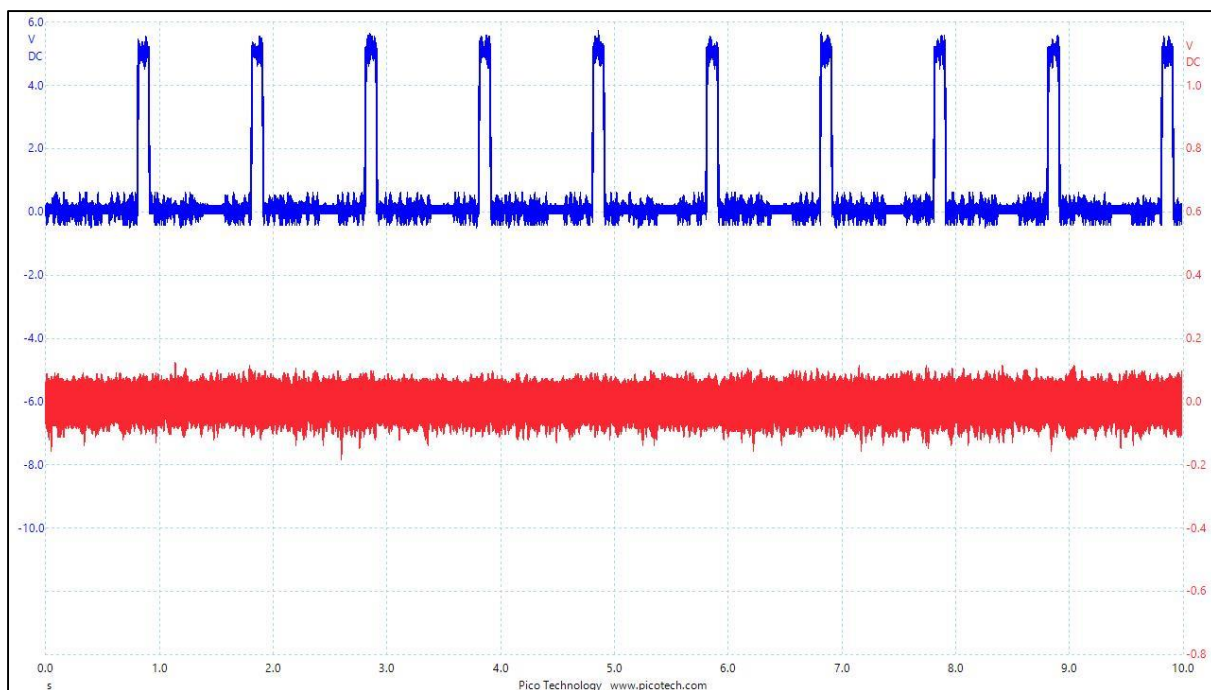


図 A.4 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 A.3 の次の 10 秒分)

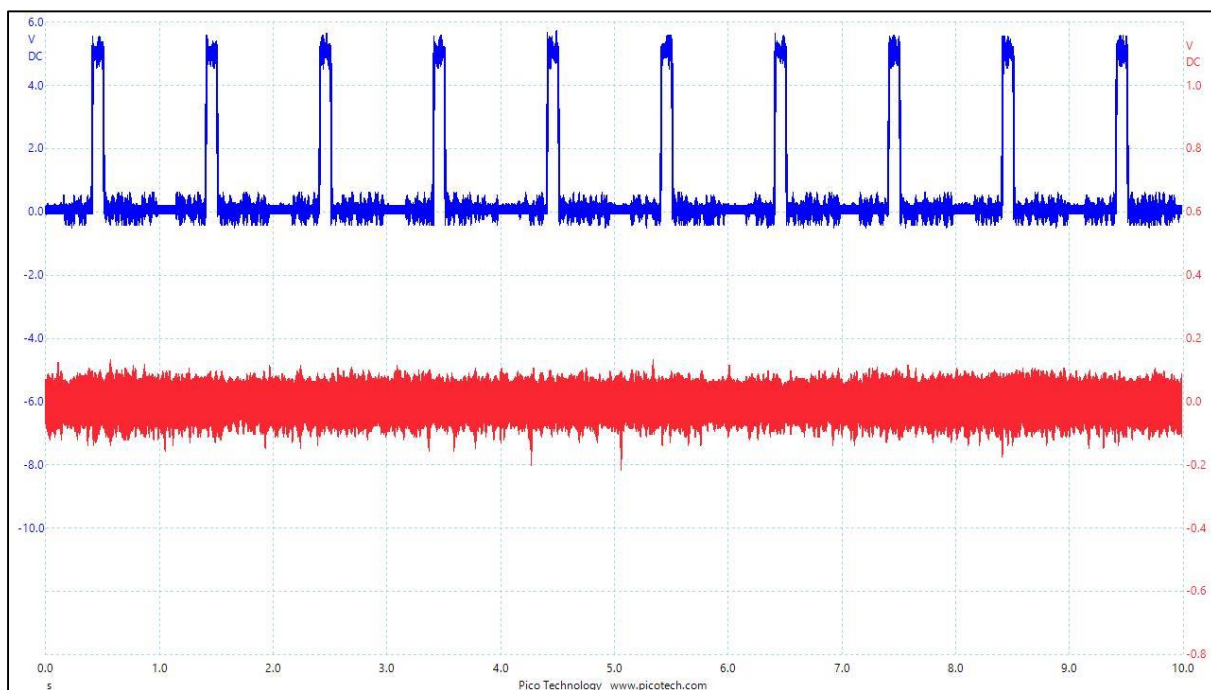


図 A.5 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 A.4 の次の 10 秒分)

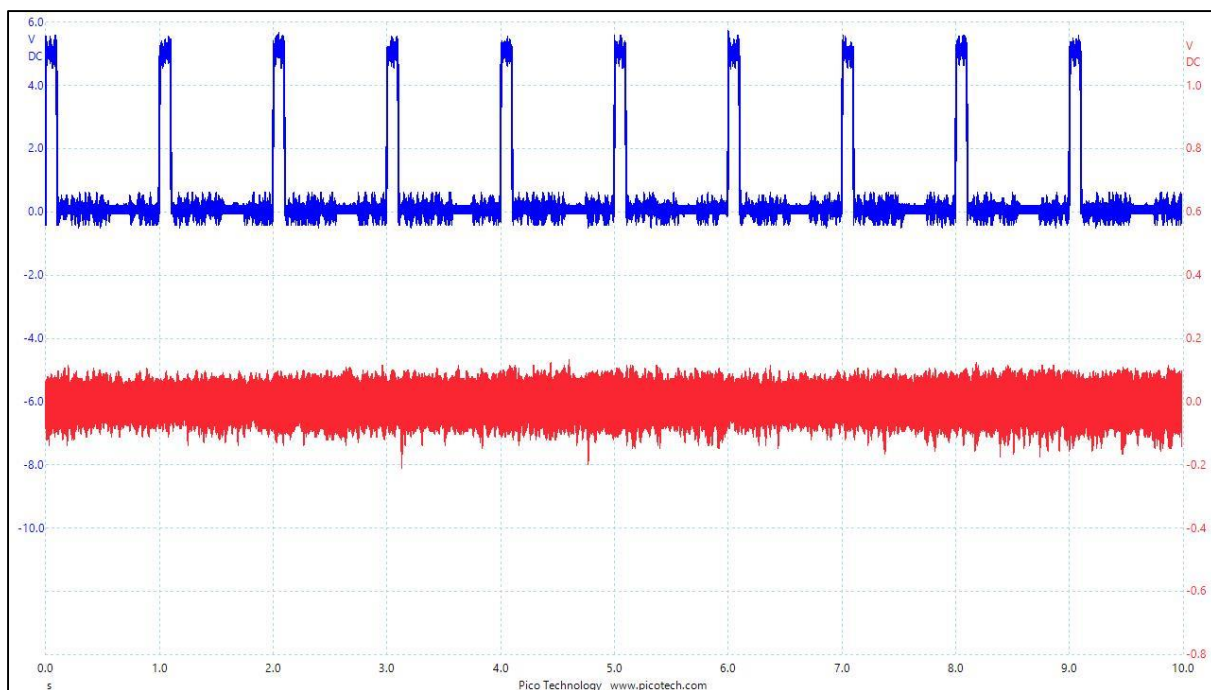


図 A.6 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 A.5 の次の 10 秒分)

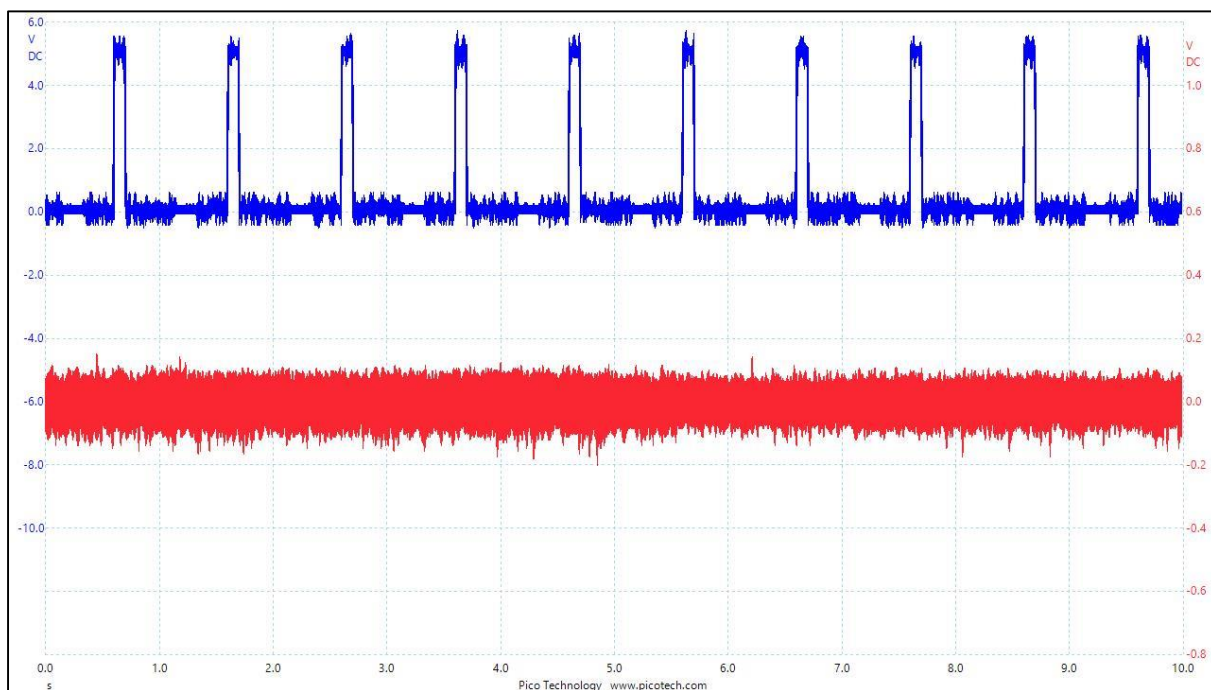


図 A.7 16:42 頃の受信波形 10 秒分(図 A.6 の次の 10 秒分)



第 4 章 4.4 節にて載せられなかった Picoscope6 波形データを図 A.8~A.13 に示す(1 月 27 日 4:39 頃の 10 秒×6)。

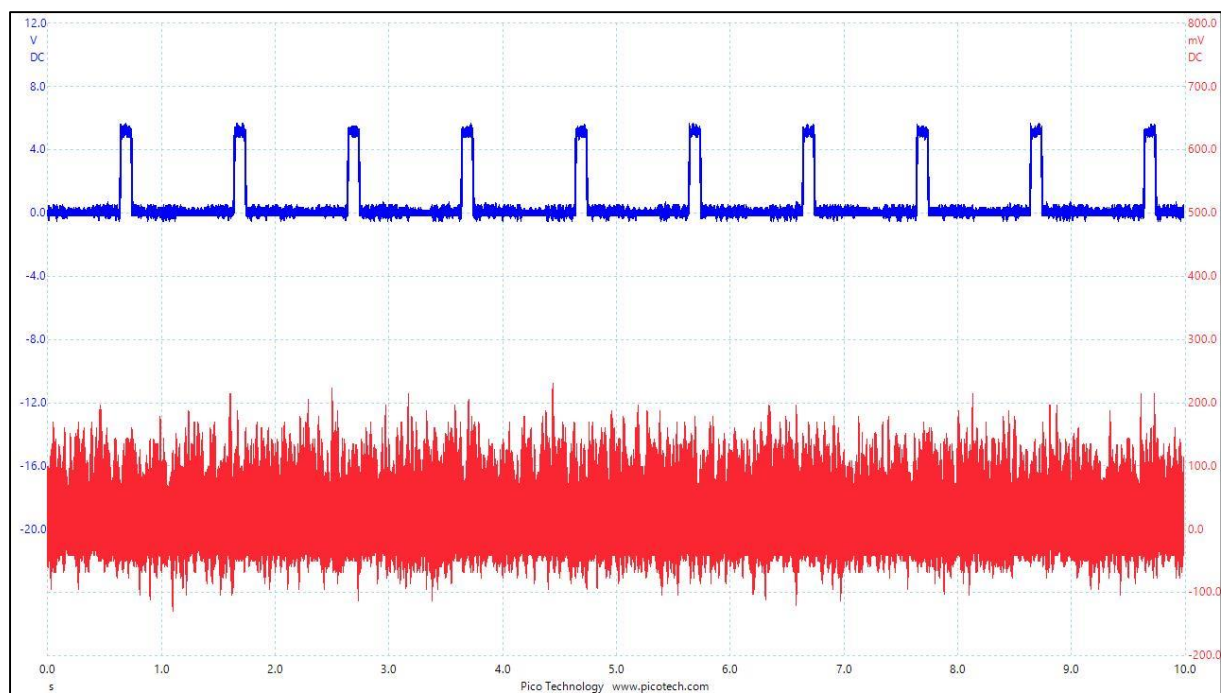


図 A.8 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 4.6 に同じ)

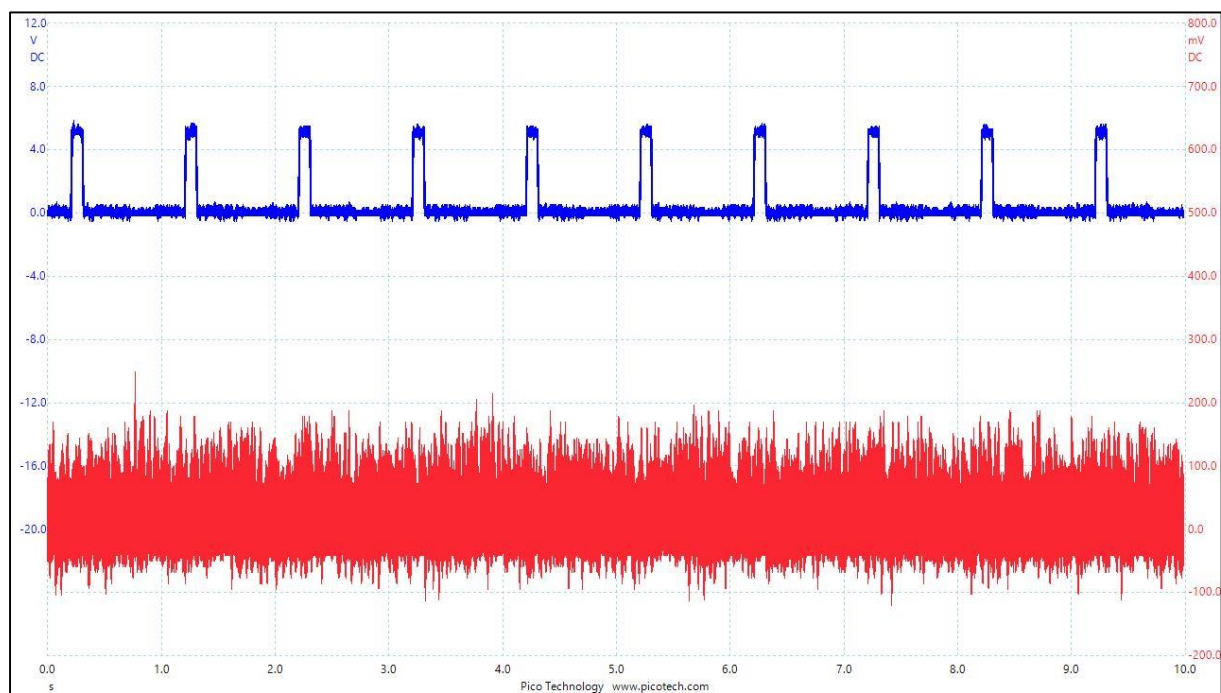


図 A.9 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 A.8 の次の 10 秒分)

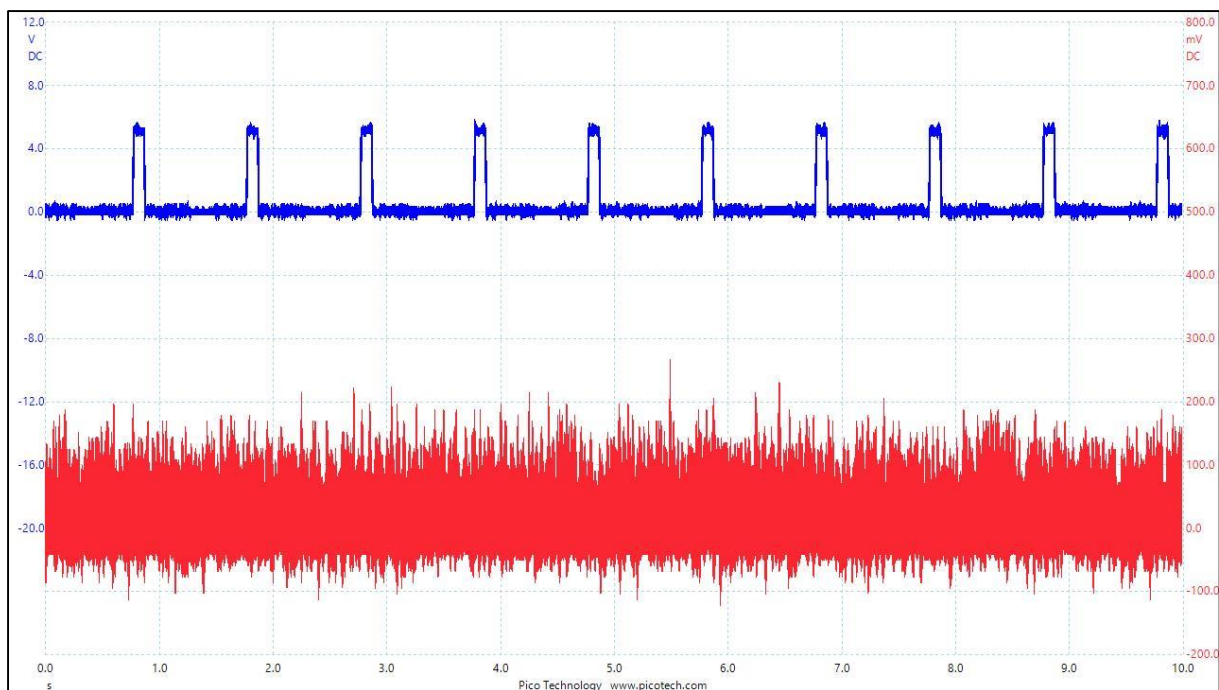


図 A.10 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 A.9 の次の 10 秒分)

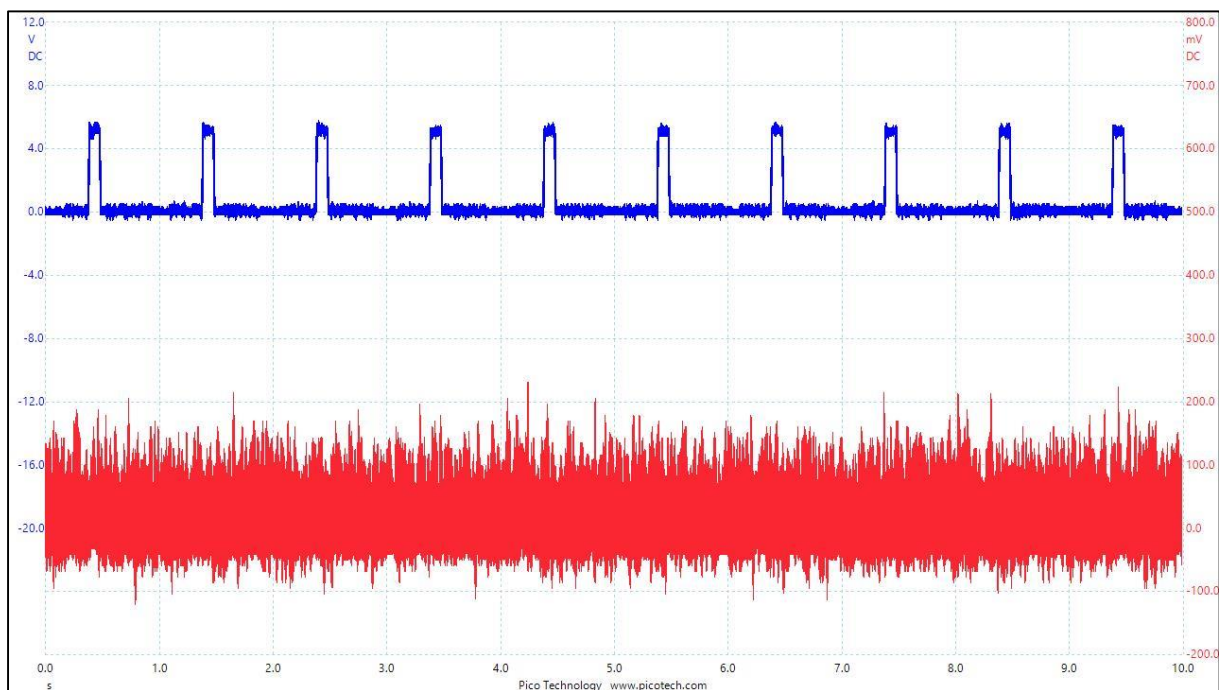


図 A.11 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 A.10 の次の 10 秒分)

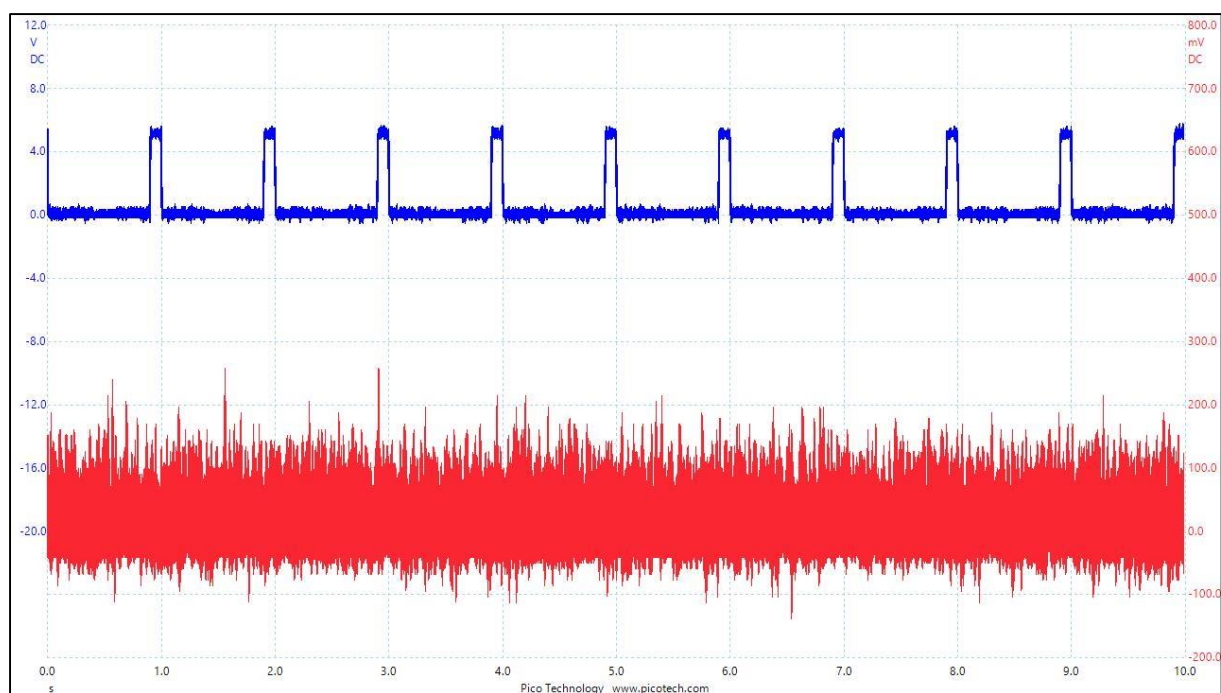


図 A.12 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 A.11 の次の 10 秒分)

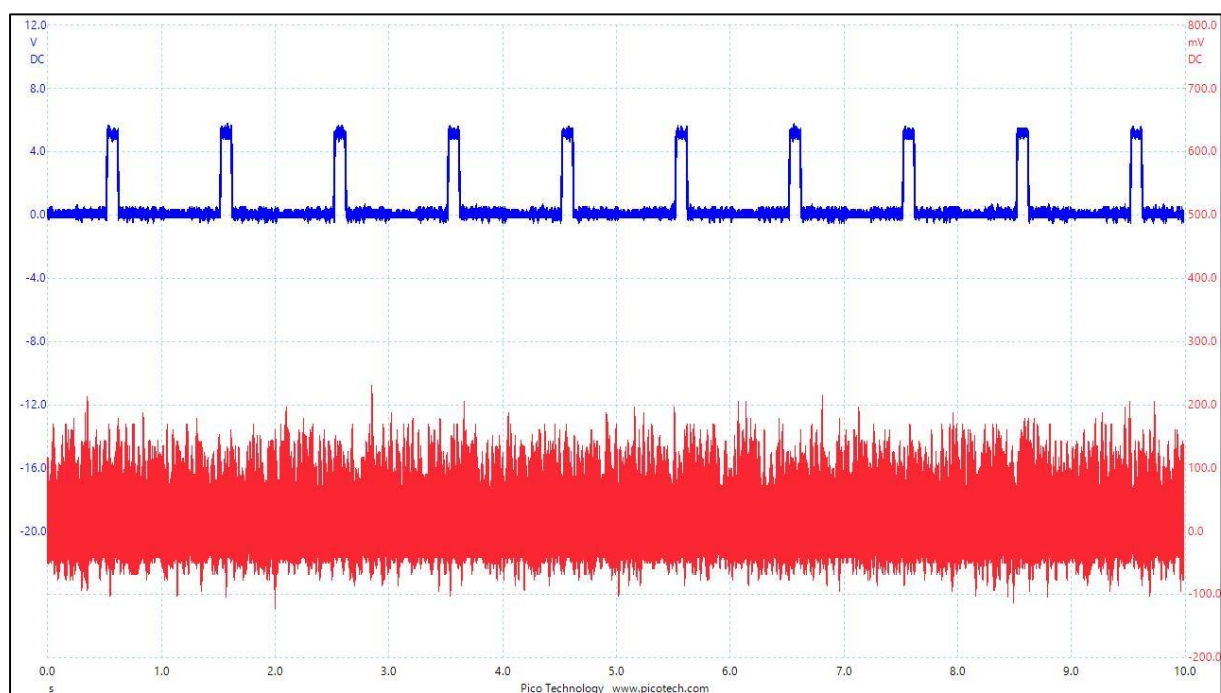


図 A.13 4:39 頃の受信波形 10 秒分(図 A.12 の次の 10 秒分)

第 4 章 4.5 節にて載せられなかった Picoscope6 波形データを図 A.14~A.19 に示す(1 月 31 日 16:56 頃の 10 秒×6)。

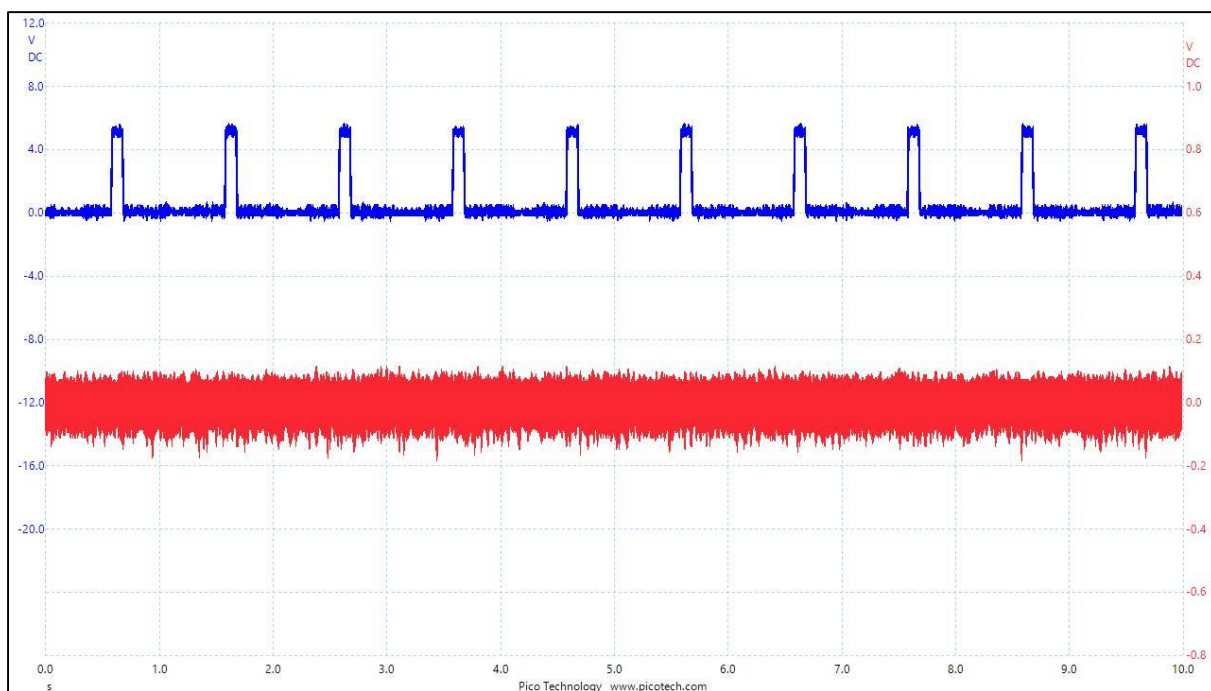


図 A.14 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 4.8 に同じ)

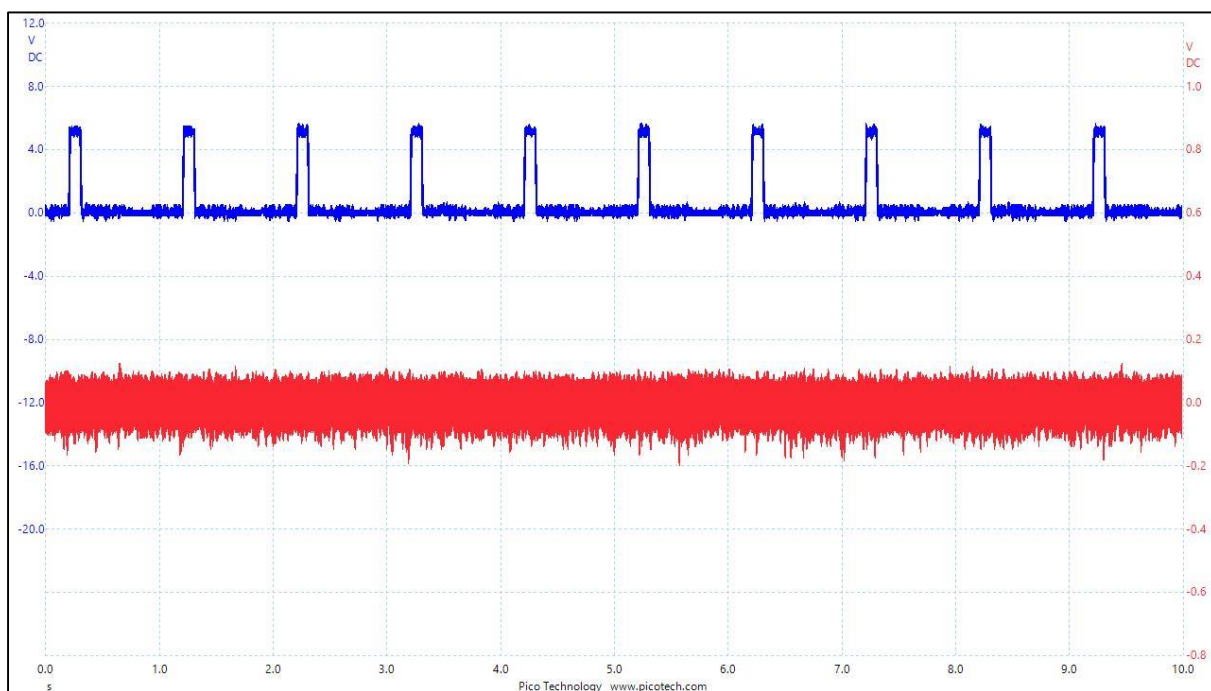


図 A.15 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 A.14 の次の 10 秒分)



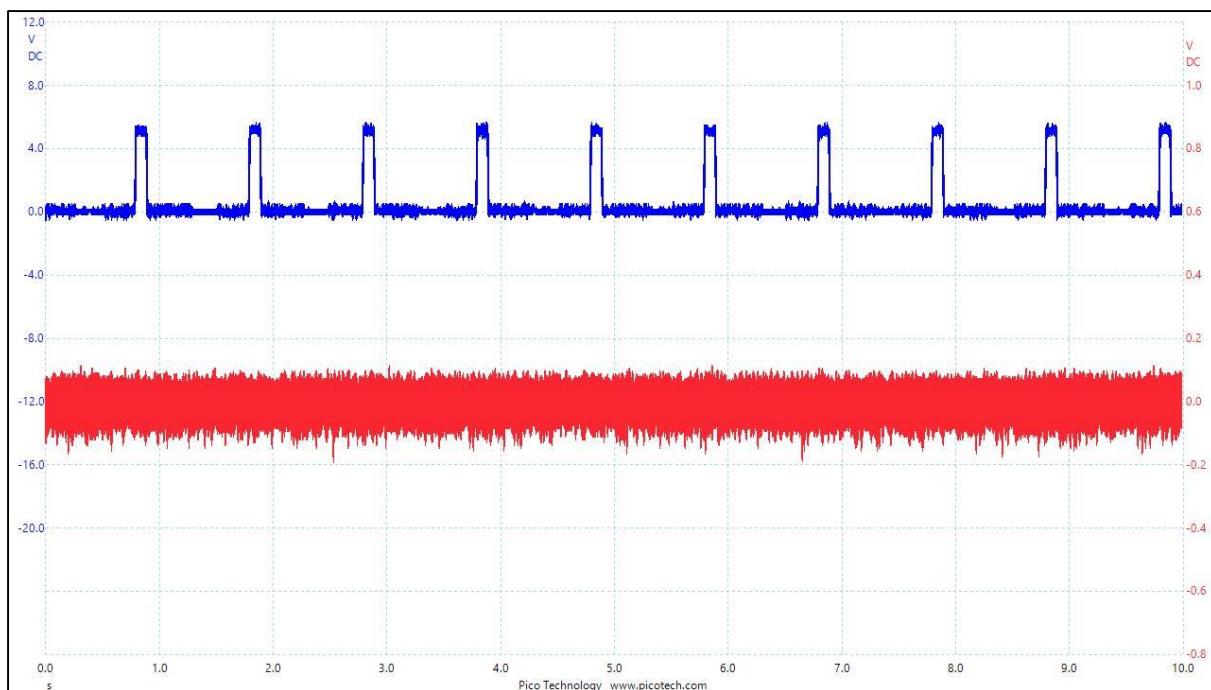


図 A.16 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 A.15 の次の 10 秒分)

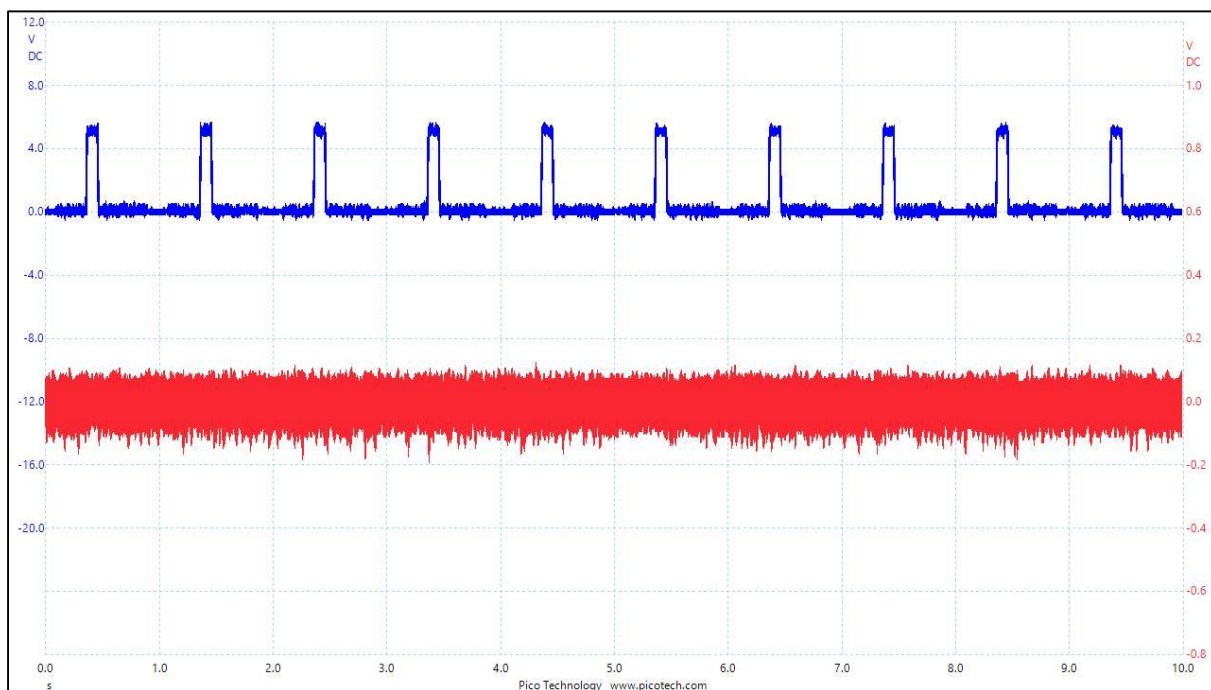


図 A.17 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 A.16 の次の 10 秒分)



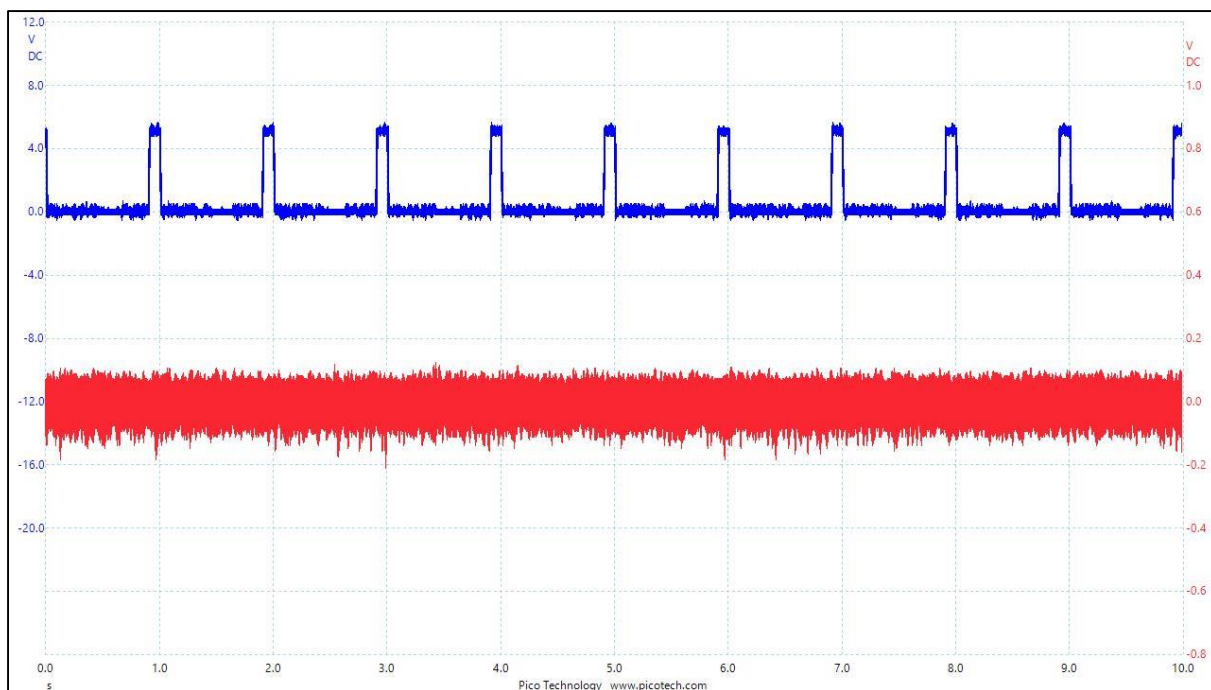


図 A.18 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 A.17 の次の 10 秒分)

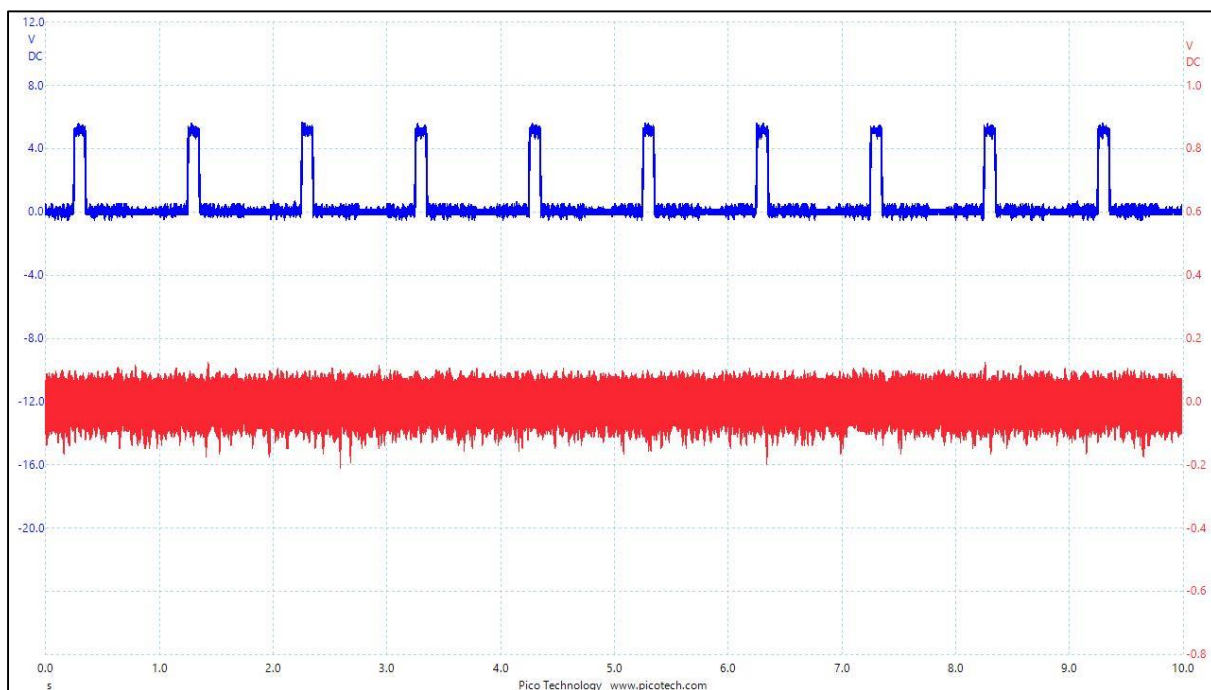


図 A.19 16:56 頃の受信波形 10 秒分(図 A.18 の次の 10 秒分)

第 4 章 4.6 節にて載せられなかった Picoscope6 波形データを図 A.20~A.25 に示す(2 月 2 日 22:31 頃の 10 秒×6)。

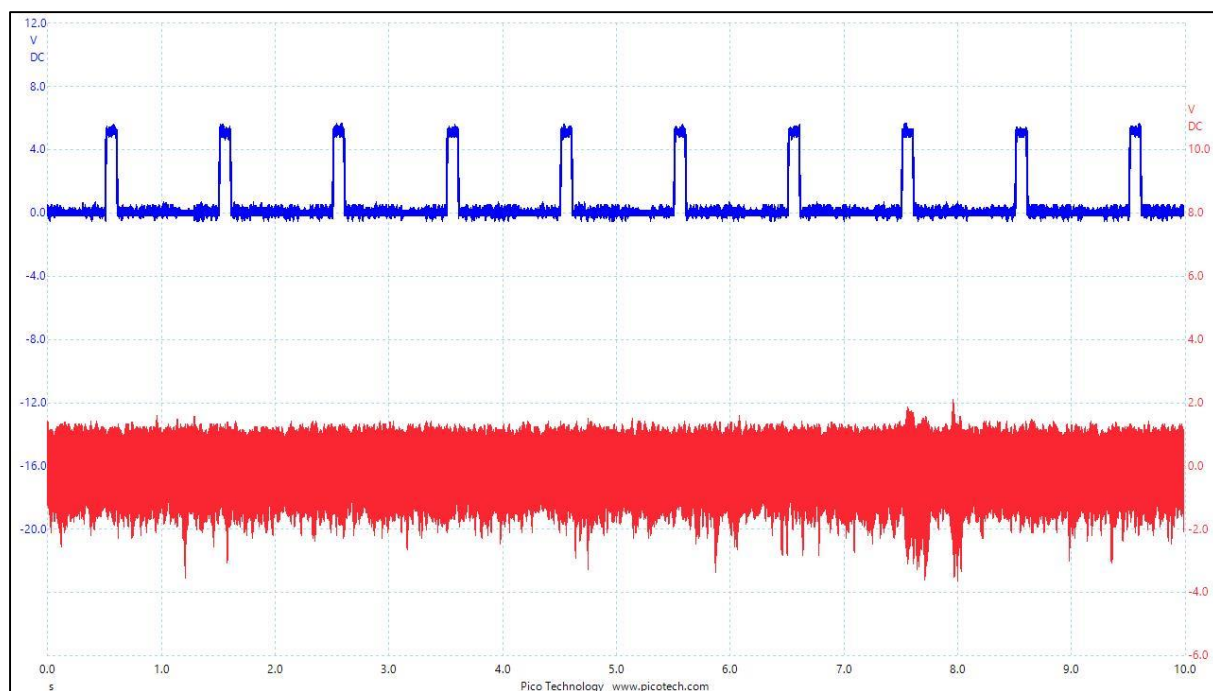


図 A.20 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 4.10 に同じ)

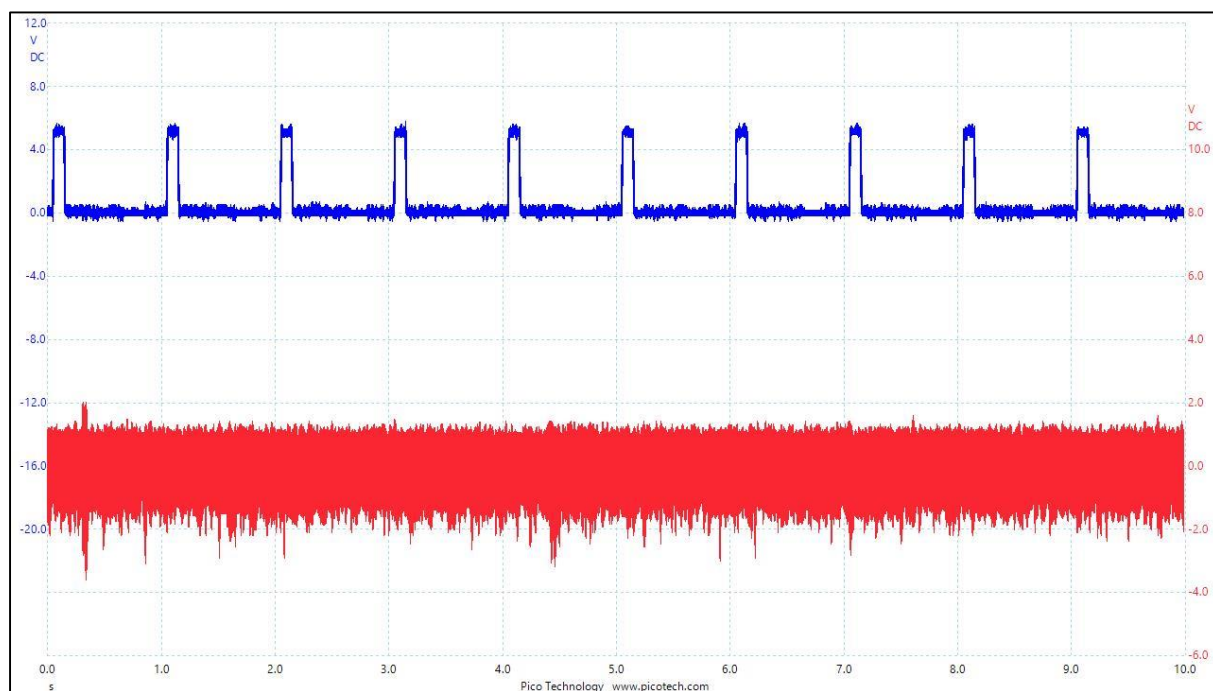


図 A.21 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 A.20 の次の 10 秒分)

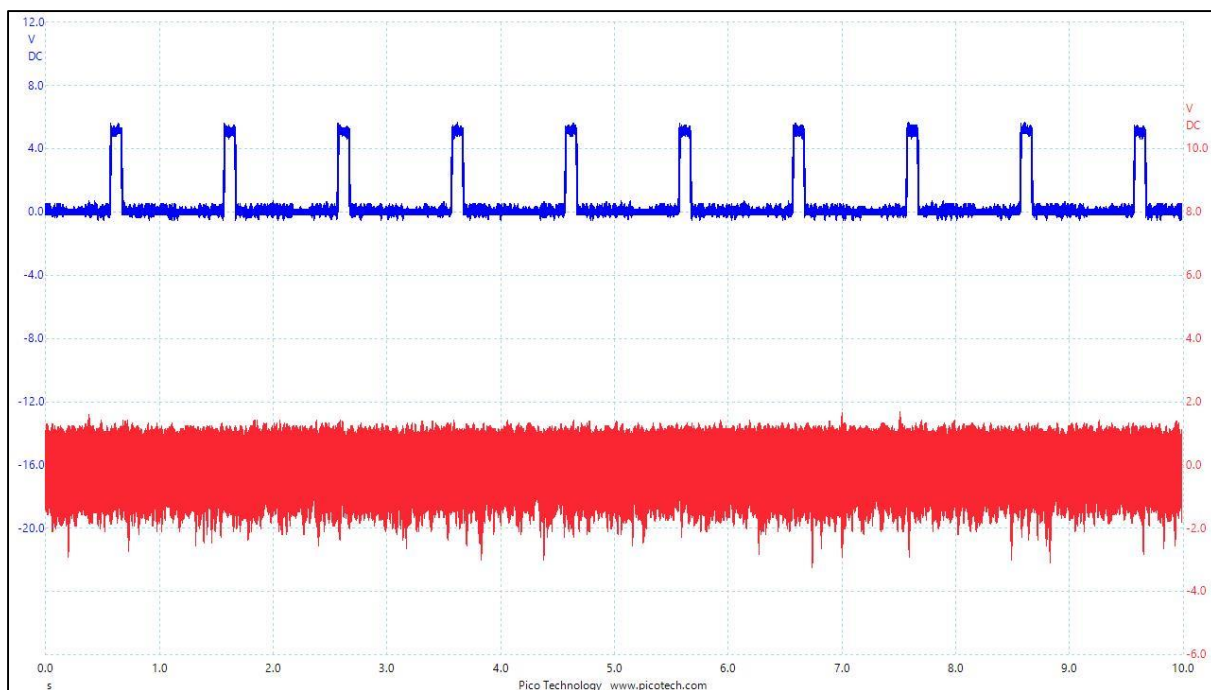


図 A.22 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 A.21 の次の 10 秒分)

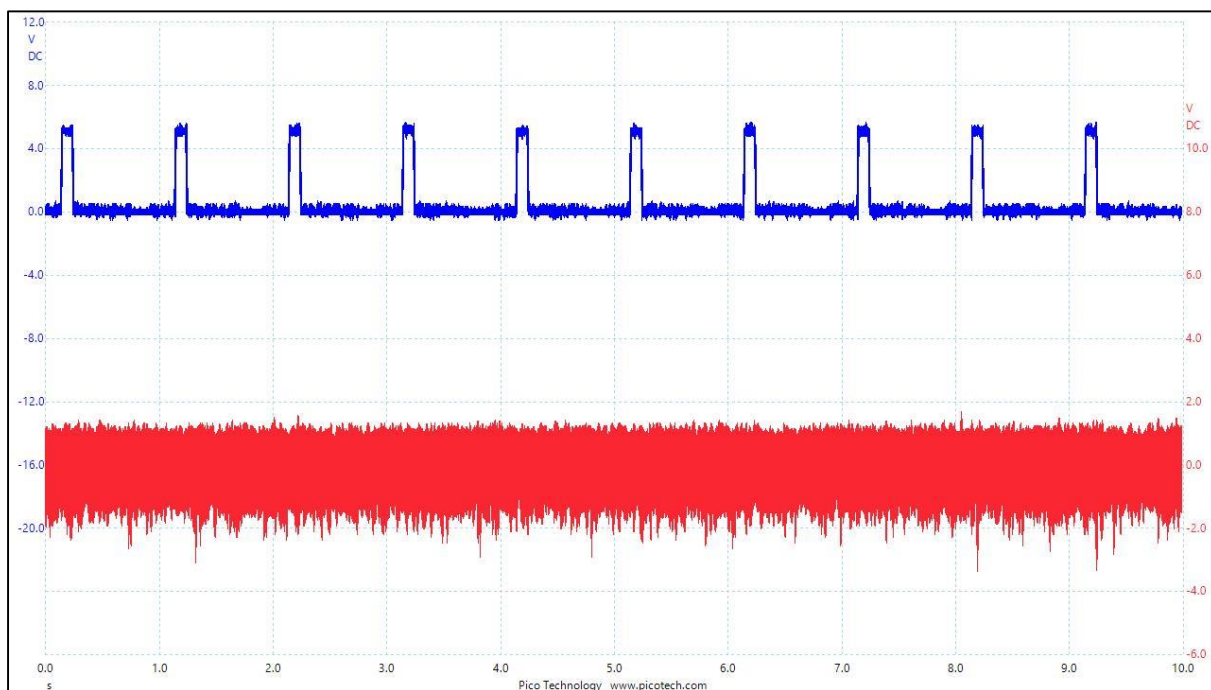


図 A.23 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 A.22 の次の 10 秒分)

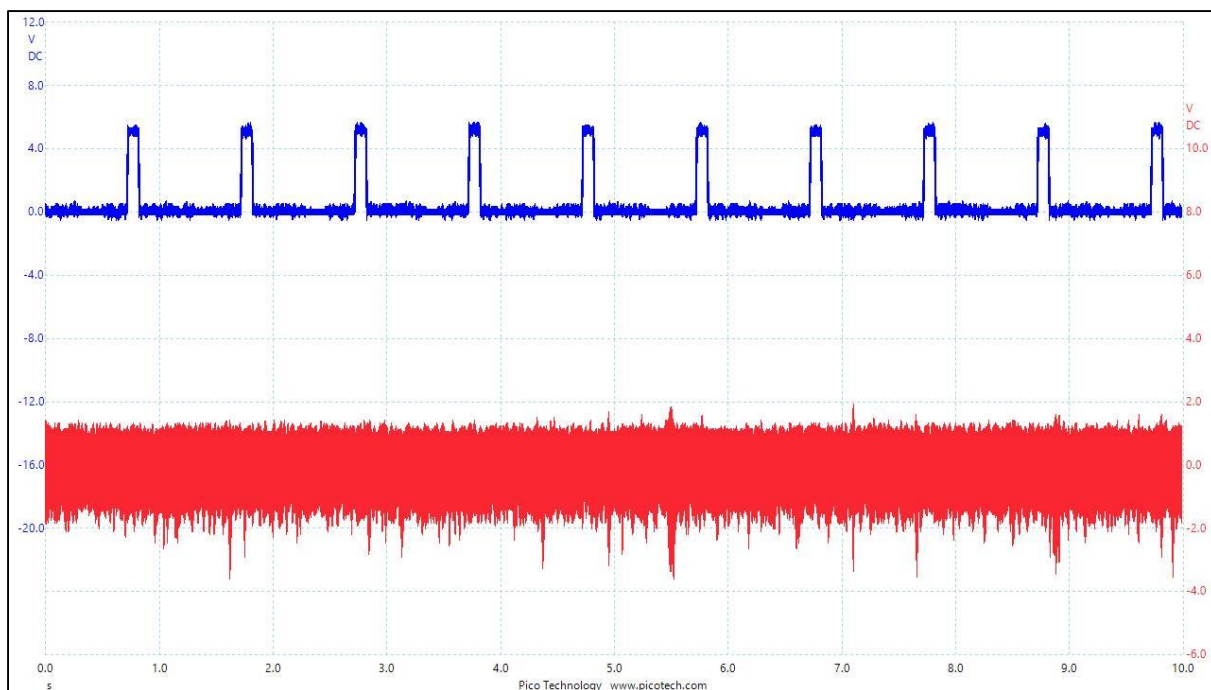


図 A.24 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 A.23 の次の 10 秒分)

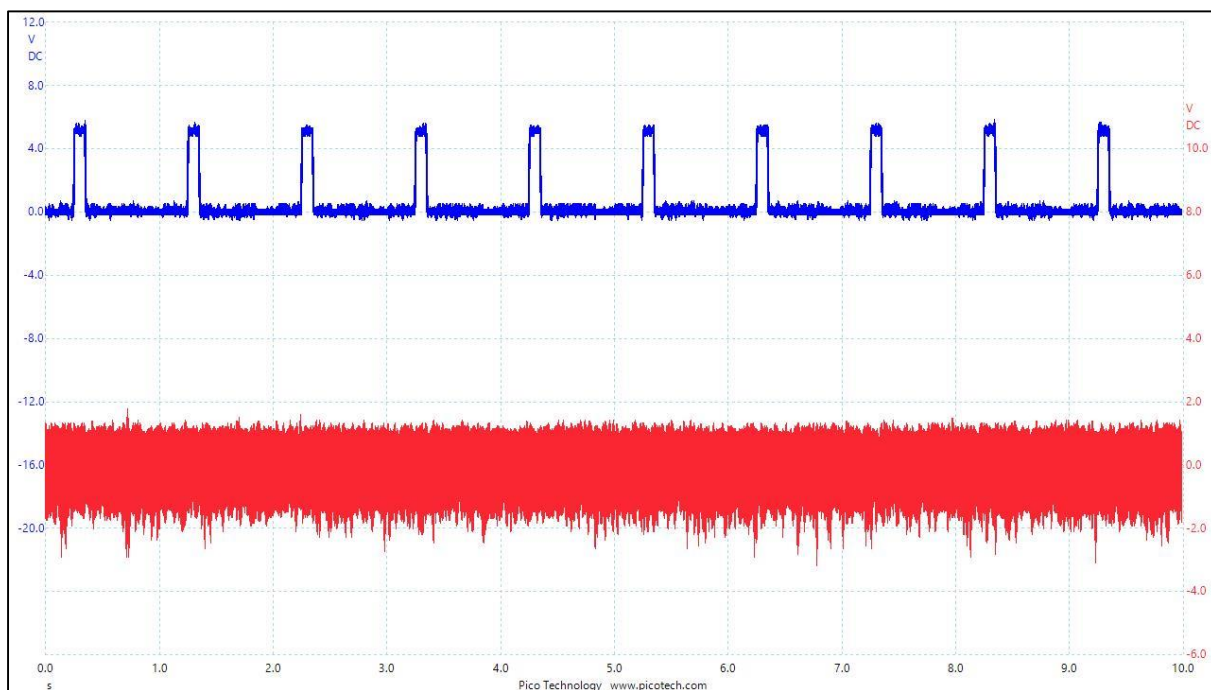


図 A.25 22:31 頃の受信波形 10 秒分(図 A.24 の次の 10 秒分)