

2021 年度 博士学位論文

鉄鋼業におけるマイクロ波利用技術に  
関する研究

2022 年 2 月

新潟大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程

電気情報工学専攻

木下 貴博

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
<b>第2章</b>	<b>マイクロ波の鉄鋼製造プロセスへの応用</b>	<b>4</b>
2.1	鉄鋼製造プロセス	4
2.2	マイクロ波による加熱の原理	6
2.3	鉄鋼プロセスにおけるマイクロ波加熱の適用検討	6
2.3.1	鉄鋼原料の乾燥プロセスへの適用	7
2.3.2	連続鋳造プロセスにおける溶鋼保温への適用	17
2.4	マイクロ波による計測の原理	25
2.5	鉄鋼プロセスにおけるマイクロ波計測の適用事例	27
2.6	まとめ	30
<b>第3章</b>	<b>CW ドップラレーダによる変位推定における振動外乱除去方法</b>	<b>31</b>
3.1	緒言	31
3.2	構造物の振動測定を行う上での課題	32
3.3	CW ドップラレーダによる振動状態の推定と外乱除去の方法	34
3.3.1	提案手法	34
3.3.2	最適なキャリア周波数の探索	41
3.3.3	電波の広がりの影響	45
3.4	原理検証と精度の評価	51
3.4.1	実験による提案手法の原理検証	51
3.4.2	クラメール・ラオの下限	56
3.4.3	精度の検証	61
3.5	まとめ	62
<b>第4章</b>	<b>FMCW レーダによる変位推定における振動外乱除去方法</b>	<b>63</b>
4.1	緒言	63
4.2	FMCW ドップラレーダによる振動状態の推定と外乱除去の方法	63

4.2.1	提案手法 . . . . .	63
4.2.2	電波の広がりの影響 . . . . .	73
4.3	原理検証と精度の評価 . . . . .	78
4.3.1	実験による提案手法の原理検証 . . . . .	78
4.3.2	クラメール・ラオの下限 . . . . .	85
4.3.3	精度の検証 . . . . .	91
4.4	スケールアップ試験 . . . . .	93
4.5	まとめ . . . . .	99
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>100</b>
5.1	本研究の成果 . . . . .	100
5.2	今後の課題 . . . . .	100
	謝辞	<b>102</b>
	参考文献	<b>103</b>
	付録	<b>109</b>
	研究業績	<b>126</b>

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

鉄鋼業は、自動車・造船・建築等の産業に欠かすことのできない鋼材を製造する基幹産業として発展してきた。鉄鋼の製造プロセスでは、はじめに原料となる鉄鉱石が高炉において2000°Cを超える温度で還元され、溶銑が製造される。次いで製鋼工程では、転炉において溶銑に酸素を吹き込み、1500°C以上の温度で不純物が取り除かれ、所定の成分に調整された溶鋼が製造される。溶鋼は連続鑄造機において凝固され、スラブとよばれる中間製品となる。さらにスラブは、各種の圧延工程を経て金属組織が造り込まれるとともに、鋼板や形鋼等の最終製品に成形される。このようなプロセスは高温の熔融物や粉体を大量に取り扱い、生産設備が巨大であり、24時間昼夜を問わず稼働を続ける等、他の産業にはない特徴を有している。

このような過酷な条件においても、生産設備を適切に制御し、鋼の成分や組織、形状を緻密に造り込むことにより高品質な鋼材を製造するためには、プロセスを可視化するためのセンサ技術の開発が重要である [1]。可視化の対象は、プロセスや材料の温度・形状・寸法・位置・成分等の物理量であり、高温粉塵環境下でこれらの連続測定を実現するためには、未だ多くの課題が存在している。さらに、日本の製鉄設備の多くは高度経済成長期に建設され、稼働から40年以上が経過したものが多い。このような設備を使用しつつ製品の品質や生産の安定性を担保するためには、設備の劣化の予兆を把握することが必要であり [2]、そのためには24時間、周囲の環境に依らず設備の状態を監視する新たなセンサ技術の開発も不可欠である。

加えて鉄鋼製造プロセスでは、鉄鉱石を還元し溶銑を得るために本質的に多くのエネルギーを要し、二酸化炭素も多く排出する [3]。鉄鋼業においては、これまで多くの環境・省エネルギー対応技術が開発されてきたが [4]、気候変動へのさらなる取り組みとして、従来にない新たな視点での鉄鋼製造プロセスの開発も求められている。

## 1.2 本研究の目的

このような背景の下、本研究では、マイクロ波帯の電磁波の鉄鋼製造プロセスにおける新たな計測技術としての適用可能性を論じ、上記の課題の解決手段を提案することを目的とする。また、これまでに報告されている、マイクロ波の熱源としての利用可能性を検討した結果を概説する。



## マイクロ波の加熱への利用

マイクロ波は、周波数が 300 MHz から 300 GHz、波長が 1 mm から 1 m の電磁波を指す。マイクロ波の用途のひとつとして、マイクロ波加熱がある。マイクロ波加熱は、民生用の電子レンジとしても知られている。加熱に用いられる周波数は主に 2.45 GHz であり、波長は 122 mm である。赤外線による輻射加熱は物体の表面数  $\mu\text{m}$  の範囲が加熱されるのに対して、マイクロ波はその波長の長さゆえ物体の数 cm 内部にまで入り込み、熱伝導を経ずに物体の内部を加熱できるという特徴を有する。また、マイクロ波エネルギーの吸収量は物体の複素誘電率・複素透磁率・導電率で決まり、これらの物性値に応じて選択的に加熱を行うこともできる。鉄鋼原料の酸化鉄はマイクロ波の吸収が比較的大きい物質であることが知られており、マイクロ波加熱により酸化鉄を還元し銑鉄を製造することが試みられている [5]。また、マイクロ波加熱技術の新たな適用先として、鉄鋼原料の乾燥、及び連続鋳造プロセスにおける溶鋼の保温の実現可能性を検討した結果が報告されている [6, 7]。

## マイクロ波の計測への利用

マイクロ波の中で特に、周波数が 30 GHz から 300 GHz、波長が 1 mm から 10 mm の電磁波をミリ波とよんでいる。マイクロ波・ミリ波の主要な用途は、レーダ・通信等であり、レーダは気象・航空・船舶分野等で利用されている。さらに近年は、自動車の ACC(Adaptive Cruise Control) や衝突防止用のセンサにも使用されるようになってきている [8]。

これらのレーダは、電磁波による非接触・非破壊計測であることに加え、可視光や赤外光に比べて波長が長いため、粉塵や雨滴等の粒子で散乱されにくく、これらの環境を透過し人間の視力の及ばない遠方まで測定が可能であるという特長を有している。また、マイクロ波帯における空気の屈折率の温度変化は小さく、周囲の温度変動の影響を受けにくいという特長も有する。鉄鋼製造プロセスの多くは、高温かつ粉塵の飛散している過酷な環境であるが、これらの影響を受けにくいマイクロ波は、鉄鋼製造プロセスの計測に適している手段のひとつと考えられ、高炉や転炉等の高温プロセスにおいて、内部の物体の位置計測等に実用されている [9, 10]。

さらに、近年の新たなニーズとして、先に述べた設備監視技術が挙げられる。屋外に設置された大型の設備の変位や振動の状態を周囲の明るさや天候に左右されずに監視する手段としても、レーダは有用であると考えられる。しかしながら、製鉄所の構内は大型の重機やクレーンが数多く稼働しており、これらの影響でレーダ自身が振動外乱を受けるといった課題がある。そこで本研究では、このような外乱の存在下でも測定対象のみの変位や振動状態を抽出する手法を提案し、鉄鋼製造プロセスにおける新たなマイクロ波計測手法を確立することを目的とする。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1 に示す。本章に続く第 2 章では、はじめに鉄鋼製造プロセスの概要と、マイクロ波による加熱と計測の原理を述べる。次に、鉄鋼製造プロセスにおいてこれまで取り組ま

れてきた，マイクロ波加熱技術の耐火物乾燥・鉄鋼原料の乾燥プロセス・連続鋳造プロセスへの適用の試み，及びマイクロ波計測技術のプロセス計測への適用について概説する。

第3章，及び第4章では，マイクロ波計測技術の新たな展開のひとつとして，設備監視への適用について述べる．設備監視を行うにあたりセンサそのものが振動外乱を受けるという課題に対して，2つの異なる外乱を受けるセンサを用い，これらのベースバンド信号のクロススペクトルを推定することで，外乱の影響を抑制し測定対象の変位のみを抽出する手法を提案した．提案手法をCWドップラレーダ，及びFMCWレーダの各々に適用し，シミュレーションと実験で基礎的な動作原理を検証するとともに，クラメール・ラオの下限を導出し，提案手法の精度を明らかにした．

最後に第5章では，本研究で得られた知見と今後の課題をまとめ，結論とする．

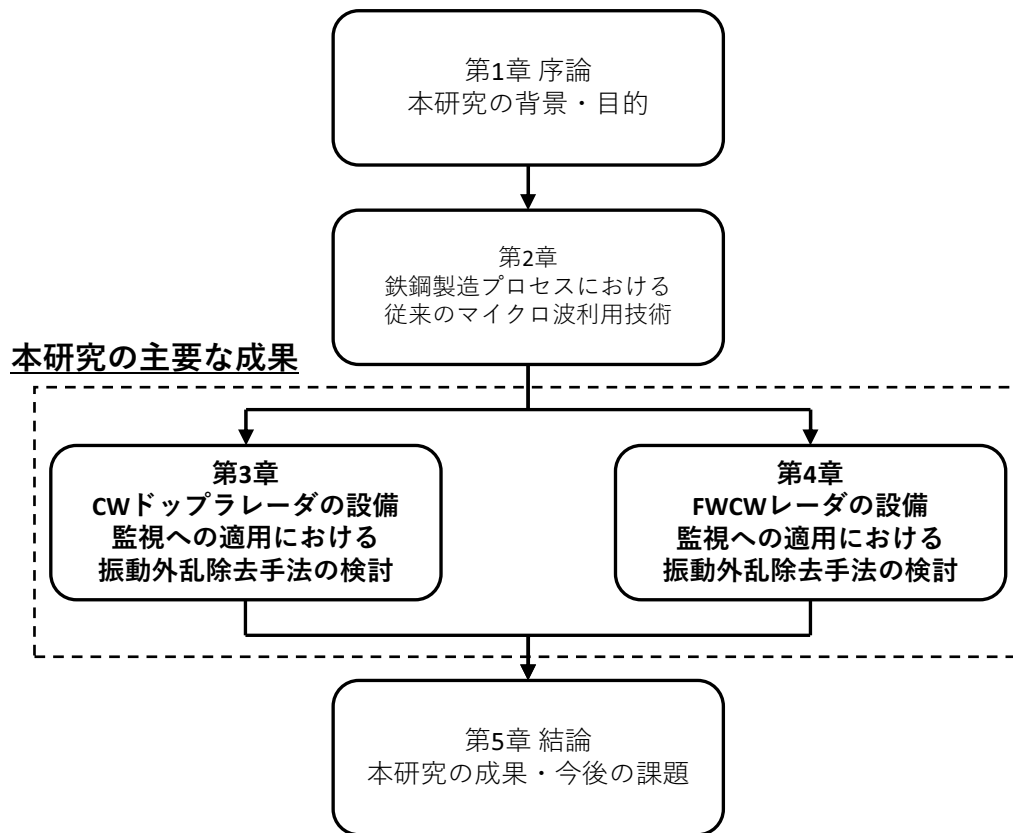


図 1.1 本論文の構成

## 第2章 マイクロ波の鉄鋼製造プロセスへの応用

本章では、まず、鉄鋼製造プロセスの概要と、マイクロ波の用途である加熱と計測の原理について述べる。次に、鉄鋼製造プロセスにおいてこれまで取り組まれてきた、マイクロ波加熱によるプロセス効率化の試みと、マイクロ波計測によるプロセス可視化技術について概説する。

### 2.1 鉄鋼製造プロセス

図 2.1 に鉄鋼製造プロセスの概要を示す [11]。鉄鋼製造プロセスは鉄鉱石を還元し溶銑を製造する製銑工程、溶銑の不純物を取り除いて溶鋼とし、中間製品であるスラブを製造する製鋼工程、スラブを圧延して最終製品に成形する圧延工程に分けられる。

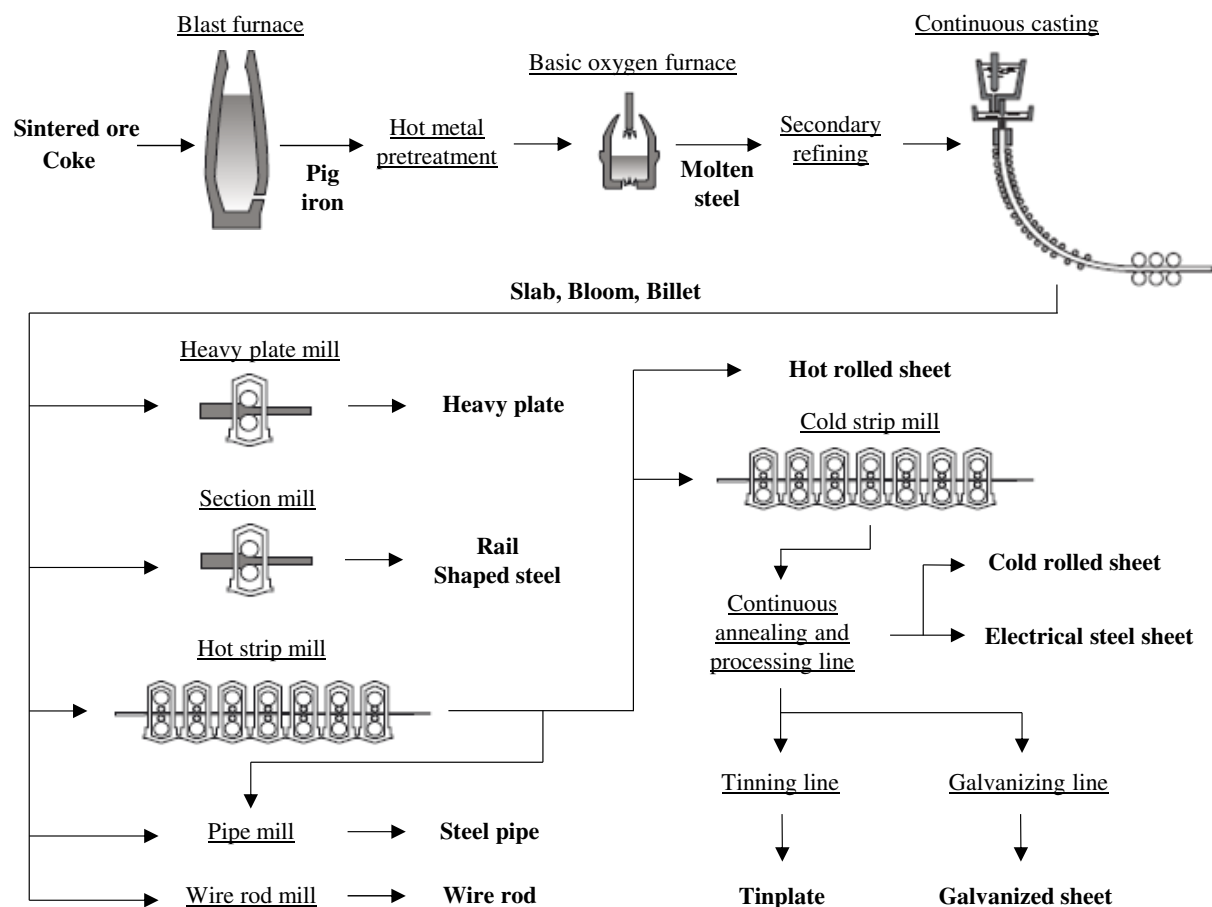


図 2.1 鉄鋼製造プロセス

## 製鉄工程

製鉄工程では、酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) が主成分の鉄鉱石と、還元剤や熱源としての役割を果たす石炭を上部から高炉に投入し、高炉の下方から熱風を吹き込むことで鉄鉱石の還元を行う。ただし、高炉内の熱風の通気性を向上させ還元反応効率を上げるために、粉状の鉄鉱石は事前に焼結鉱として焼き固められ、石炭は事前に乾留処理によりコークスとして炭素の純度が高められたものを使用する。

コークスの燃焼熱により高炉内は  $2000^\circ\text{C}$  を超える高温となり、鉄鉱石が溶融されるとともに、主に燃焼で生じた一酸化炭素により鉄鉱石中の酸化鉄が還元され、高炉の下部には溶融状態の銑鉄 (溶銑) が製造される。

## 製鋼工程

高炉で得られた銑鉄には炭素が4%ほど含まれており、このままでは硬いが衝撃により割れやすい鉄となる。そこで、製鋼工程では、溶銑中の炭素を取り除くとともに、ケイ素、リン、硫黄等の含有量を、所望の鉄の特性が得られるように調整する。まず溶銑予備処理工程にて主に硫黄とケイ素が取り除かれ、次いで転炉において  $1500^\circ\text{C}$  以上の温度で、溶銑に対して石灰などの副原料を加えるとともに、高速で酸素を吹き付けることで、リンと炭素の含有量が調整され溶鋼が得られる。最後に二次精錬工程にて、溶鋼中の気泡等が取り除かれるとともに、その他の元素の含有量が調整される。こうして得られた溶鋼は、鋳型にて冷却凝固と引き抜きを同時に行う連続鋳造工程に送られ、スラブとよばれる中間製品となる。

## 圧延工程

圧延工程は、スラブを圧延し最終製品に成形する工程である。最終製品は、自動車・飲料缶等に用いられる薄板、造船用の厚板、建材やレールとなる形鋼等、多岐にわたっており、プロセスフローも細かく分かれている。代表的な自動車用の薄板は、スラブを加熱炉で所定の温度まで加熱し熱間で圧延するとともに、冷却速度を制御することで金属組織が造り込まれる。次いで冷間圧延工程で所定の厚みまで成形された後、熱処理やめっき工程、検査工程を経て製品となる。

一般に、製鉄・製鋼工程は合わせて上工程とよばれ、圧延工程は下工程とよばれる。上工程では高温の溶融物や粉体を大量に扱っており、粉塵が飛散している過酷な環境であったり、高炉や転炉の内部そのものが極めて高温となるため、プロセスの状態を把握するための計測装置を設置することには困難を伴い、数が限られているのが現状である。このようなプロセスを安定的に操業したり、より生産性を高めるため、炉内の状態を詳細に可視化することには未だ大きなニーズがある [12]。また、近年の気候変動への取り組みとして、従来の製鉄・製鋼・圧延プロセスの枠を超えた、新たな視点でのプロセス開発も求められている。

## 2.2 マイクロ波による加熱の原理

マイクロ波加熱は、交流電磁場が誘電体中の電気双極子に作用し、エネルギーが吸収されることにより物質が加熱される現象である [13]。単位体積当たりのエネルギーの吸収量  $P$  は、物質の誘電率の虚数部  $\epsilon''$ 、透磁率の虚数部  $\mu''$ 、導電率  $\sigma$  で決まり、電界強度を  $E$ 、磁界強度を  $H$ 、マイクロ波の周波数を  $f$  とすると、

$$P = \pi f \epsilon'' E^2 + \pi f \mu'' H^2 + \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad (2.1)$$

で与えられる。したがって、マイクロ波加熱は、加熱のされ易さが物性値に依存する選択性を示す。鉄鋼原料である酸化鉄は、誘電率が大きくマイクロ波を良く吸収することが知られている [14]。また、炭素や鉄等の導体も、粉末状であればマイクロ波により加熱される [15]。

電磁波が物体の内部に入り込み、その電力密度が表面の 1/2 になる深さを電力半減深度とよび、

$$D = \frac{3.32 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (2.2)$$

で与えられる。ただし、 $\epsilon_r$  は比誘電率、 $\tan \delta$  は誘電正接である。加熱対象が水の場合、赤外線による輻射加熱では式 (2.2) は  $1 \mu\text{m}$  程度となり、表面近傍のみが加熱されるのに対して、周波数が 2.45 GHz のマイクロ波の場合は、電力半減深度は 1 cm 程度となり、熱伝導を経ずに物質の内部が直接加熱される [16]。

産業分野においては、これらの選択加熱・内部加熱という特徴を利用し、食品加熱や木材・建材の乾燥、化学合成等に応用されている [17]。

## 2.3 鉄鋼プロセスにおけるマイクロ波加熱の適用検討

マイクロ波加熱は、食品加熱や木材・建材の乾燥、化学合成等に応用されているが、鉄鋼プロセスへの応用は僅かである。これはマイクロ波を熱源とした場合のエネルギー単価が高く、生産量が膨大である鉄鋼プロセスに応用するには、コストに見合わないことが多いためだと考えられる。ここでは唯一の応用事例である耐火物の乾燥への利用について述べ、次に、マイクロ波加熱技術の新たな展開先として、鉄鋼原料の乾燥プロセスと連続鋳造プロセスへの適用を検討した結果を述べる。

### 耐火物乾燥への利用

高炉や転炉、あるいは溶けた鉄を輸送するための容器は、外側は鉄でできているが、高温溶融物と接触する内側は耐火物とよばれるセラミックスの内張りが使用されている。耐火物は使用に伴って溶損し、その補修には、水と耐火物を混練した材料を溶損部に流し込む不定形施工が行わ

れている。不定形施工に際して、水分を乾燥させる必要があるが、この乾燥にマイクロ波加熱が用いられている [18].

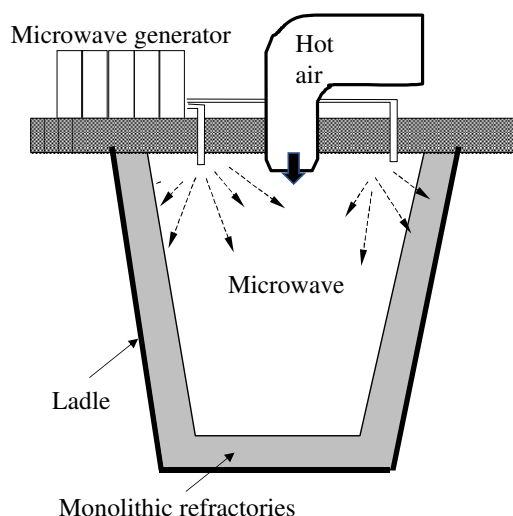


図 2.2 耐火物のマイクロ波乾燥

容器の内側の溶損部に不定形耐火物が流し込まれた後、図 2.2 に示すように、容器に蓋をするようにマイクロ波照射装置が移動し、容器の外側の鉄皮と蓋でシールドされた領域にマイクロ波が照射される。容器内の耐火物はマイクロ波を吸収しないため、水のみエネルギーの多くが吸収され効率良く乾燥が進行する。また、比較的厚みのある耐火物の内部にもマイクロ波が浸透し、熱伝導を経ずに加熱されることにより、爆裂を防ぎつつ乾燥速度を向上できる。これにより、従来の熱風のみ乾燥に比べて所要時間が短縮され、容器の稼働率が向上したことに加え、乾燥に要するエネルギーも削減されたとの報告が成されている。

### 2.3.1 鉄鋼原料の乾燥プロセスへの適用

#### 背景と課題

鉄鋼製造プロセスでは、鉄鉱石を還元し溶銑を得るために多量のエネルギーを要し、二酸化炭素も多く排出する [3]。そのため、それぞれの工程でエネルギーの利用効率や生産性を改善することが求められている。これまで多くの環境・省エネルギー対応技術が開発されてきたが [4]、気候変動へのさらなる取り組みとして、従来にない新たな視点での鉄鋼製造プロセスの開発が求められている。プロセスの生産性向上のひとつの手段は、マイクロ波を熱源として利用することである。マイクロ波はその波長の長さゆえ、物体の数 cm 内部にまで入り込み、熱伝導を経ずに物体の内部を加熱できるという特徴を有するため、従来の外部加熱では成し得なかった加熱時間の短縮や加熱効率の向上が期待できる。また、マイクロ波エネルギーの吸収量は物体の複素誘電率・複素透磁率・導電率で決まり、これらの物性値に応じて選択的に加熱を行うこともできる。鉄鋼原

料の酸化鉄はマイクロ波の吸収が比較的大きい物質であることが知られており、マイクロ波を用いれば酸化鉄の還元反応が起きる 1000℃ 超の高温まで加熱が可能である。

このような背景の下、鉄鋼製造プロセスにおいて発生する酸化鉄を含む製鉄ダストを回収し、再び鉄鋼原料として利用するダストリサイクルプロセス [20] において、乾燥機内の原料の乾燥不良を改善するための、マイクロ波加熱技術の適用を試みた [6]。

鉄鋼製造プロセスにおいては、高炉の出銑、転炉の溶銑装入等のプロセスの継ぎ目や、溶銑に高速に酸素を吹き付ける転炉吹錬等の各工程において、酸化鉄を含むダストがプロセス系外に排出される。製鉄所内で発生するダストは、従来、焼結工程等で再利用されてきた。しかしながら、ダストには亜鉛等の合金成分が含まれており、高炉に投入できる合金量には上限があるため、ダスト全量をそのまま再利用するのは困難であった。そこで、ダストリサイクルプロセスが開発された。ダストリサイクルプロセスの流れを図 2.3 に示す。焼結工程等で再利用しきれない余剰ダストは、石炭・水・バインダーと混練され厚みが 10~50 mm 程度の塊成化物として成形される。塊成化物はバンド乾燥機にて水分を除去された後、加熱炉に投入され、予備還元されるとともに亜鉛等の合金成分が除去され、再び鉄源として高炉で利用される。

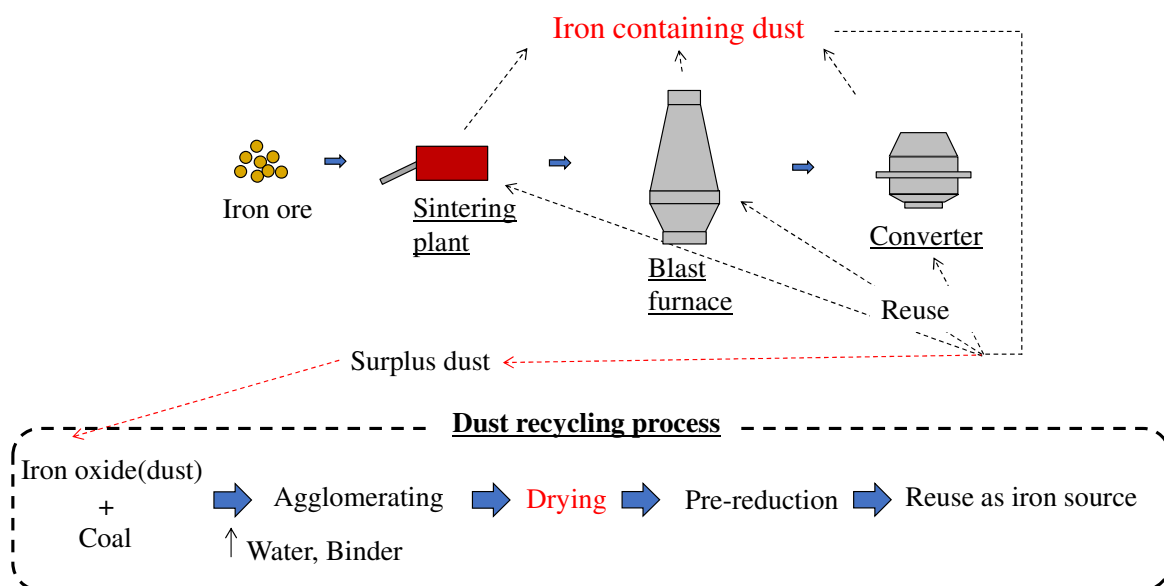


図 2.3 ダストリサイクルプロセス

バンド乾燥機では、図 2.4 に示すように、メッシュ状の金属コンベアに塊成化物を積層し、上方より熱風を供給して乾燥を行う。乾燥機の構造上、熱風の届きにくい塊成化物の下層部において乾燥が十分に進行しないという課題がある。乾燥不良の塊成化物は圧潰強度が低下するため、搬送中の粉化による歩留まり低下を招く。乾燥不良による強度低下を抑制できれば、歩留まりの改善や、バインダー使用量の削減による造粒コストの削減が可能となる。そこで、伝熱を経ずに物質を内部から直接加熱できる特徴を持つマイクロ波を利用し、塊成化物層の下層部に多く存在する乾燥不良部を選択的に加熱して、乾燥改善を行う方法を検討した。

単位体積あたりに物質が吸収するエネルギーは、式 (2.1) で与えられるように、物質の誘電率・

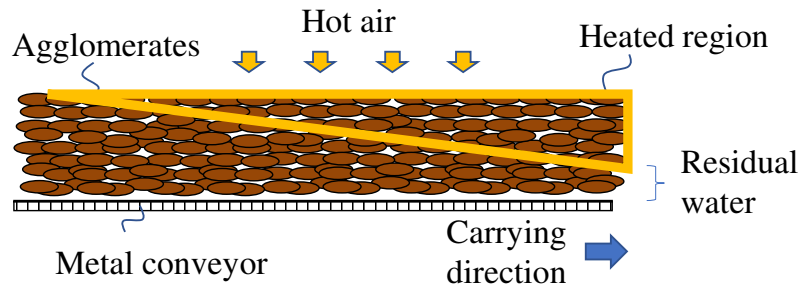


図 2.4 バンド乾燥機 (側面図)

透磁率・導電率で決まる．一般的に加熱に用いられる周波数である 2.45 GHz 付近において，水の比誘電率の実部は 76.7，虚部は 12.0 であり，水はマイクロ波の良吸収体と言える．また，塊成化物を構成する酸化鉄粉末の比誘電率は，実部が 5~40 程度，虚部は 0.1~20 程度である [21]．塊成化物と塊成化物に含まれる水分のどちらも良く加熱できるマイクロ波は，塊成化物の乾燥に適した熱源であると考えられる．一方，式 (2.2) で与えられる電力半減深度は，水の場合 17 mm 程度，酸化鉄の場合 3~40 mm 程度となり，高々塊成化物 1~2 層分程度に相当する深さしか浸透できないことになる．したがって，図 2.5 のように，単にバンド乾燥機の上方からマイクロ波を照射しても，水分の多く残留している塊成化物層の下層にマイクロ波を吸収させることはできない．逆に，図 2.6 のように，バンド乾燥機の下方からマイクロ波を照射した場合，塊成化物を搬送する金属コンベアにマイクロ波が遮られてしまい，同様に下層の塊成化物を乾燥できない．

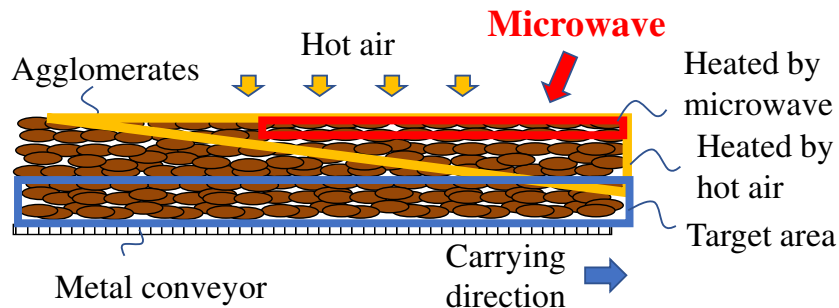


図 2.5 バンド乾燥機の上方からマイクロ波を照射した場合

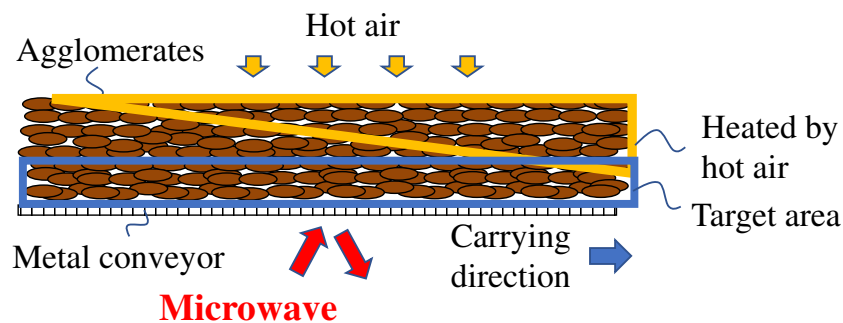


図 2.6 バンド乾燥機の下方からマイクロ波を照射した場合



そこで、図 2.7 に示すように、側面に開口部を持つ矩形の導波管、すなわちスロットアンテナを塊成化物層内に挿入する方法を考案した。2.45 GHz のマイクロ波を導波するスロットアンテナの断面寸法は、長辺が 109.22 mm である。一方、短辺側の寸法、すなわち炉幅方向の厚みはマイクロ波の伝播に影響しないため、空気の絶縁破壊が起きない程度に薄くすることで、塊成化物の搬送抵抗を小さくすることが可能である。また、炉幅方向全体を加熱するために、スロットアンテナを幅方向に複数挿入することもできる。

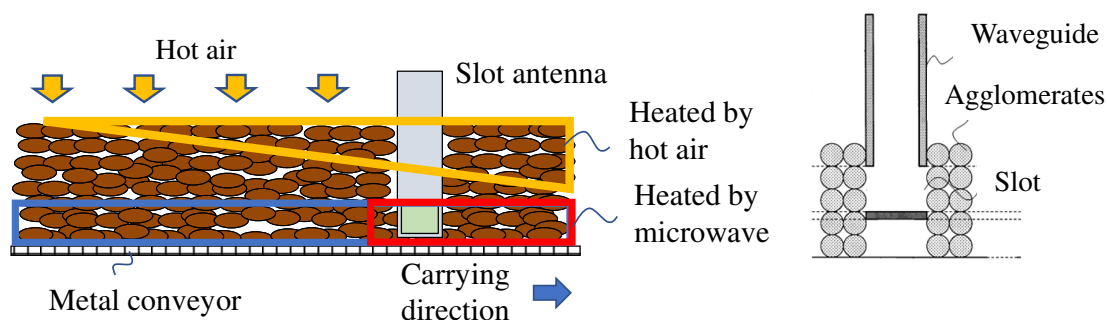


図 2.7 下層の塊成化物の乾燥方法 (左:側面図, 右:断面図)

この構成では、スロットアンテナの近くに金属コンベアが存在するため、放射効率はコンベアの影響を受けて変化することが想定される。同軸ケーブルの端面が金属板の付近にある場合の電界強度について検討された例はあるものの [22]、スロットアンテナの事例は無い。そこで、電磁場解析を使用して、金属コンベアの存在下で塊成化物層に効率的にマイクロ波を照射するための、スロットアンテナの構造を検討した。

### 電磁場解析によるアンテナの設計

一般のスロットアンテナの場合 はじめに、スロットアンテナ単体においてマイクロ波の放射が最大化される条件を検討した。スロットアンテナの開口から電磁波が放射されるメカニズムを図 2.8 に示す。アンテナの内部に  $y$  方向に振動する交流磁界  $H$  があるとき、電磁誘導によって管壁には  $z$  方向の誘導電流  $J$  が流れる。ここで誘導電流  $J$  の一部が開口により遮られると、開口位置で電荷の偏りが生じる。電荷の偏りによって開口には電界  $E$  が発生し、電磁波が外部に放射される。したがって、一般的なスロットアンテナの場合、アンテナ内で磁界が極大となる点に開口を設け、磁界の極小点を含まない程度の開口の大きさ、すなわち管内波長  $\lambda$  の  $1/4$  以下とすることで、最も効率良く電磁波を放射できる。先端が金属板で閉塞されている矩形スロットアンテナの場合、アンテナ内で定在波が生じるため、磁界の極大点はアンテナ先端を起点として管内波長  $\lambda$  の  $1/2$  の周期で現れる (図 2.9)。

金属コンベア近傍に開口を設ける場合 バンド乾燥機に挿入するスロットアンテナの場合、バンド乾燥機内の下層部に多く存在する乾燥不良の塊成化物を加熱するためには、スロットアンテナを乾燥機内のできるだけ下方まで挿入し先端付近に開口を設ける必要がある。このとき、マイク

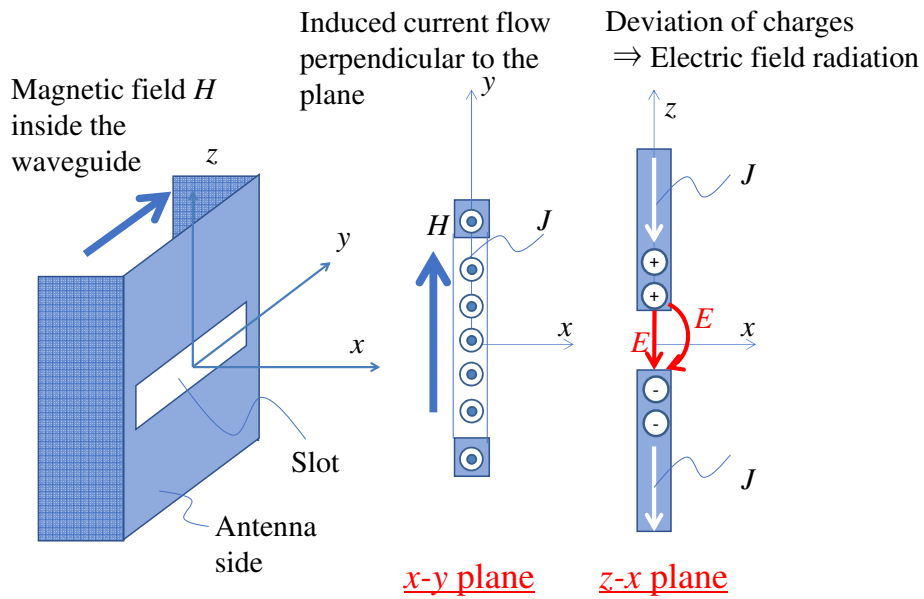


図 2.8 スロットアンテナからの電磁波の放射

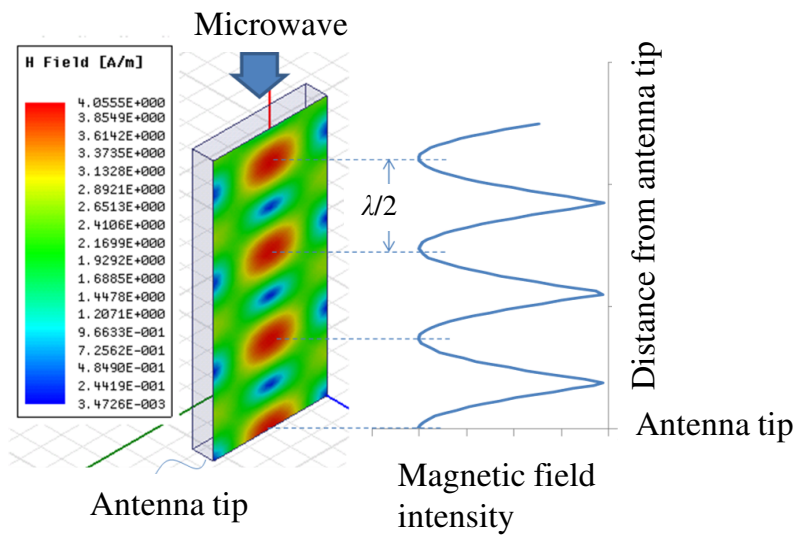


図 2.9 スロットアンテナ内の磁界強度分布

口波の反射率を最小化し、電磁波の放射効率を最大化するスロットアンテナの開口の高さとアンテナの設置高さについて、有限要素法による電磁場解析を用いて検討を行った。

電磁場解析には、ANSYS-HFSSを用いた。図 2.10 に解析モデルを示す。解析空間に、導波空間の断面が矩形のスロットアンテナを設定した。断面の寸法は、長辺が 109.22 mm、短辺が 13.65 mm、管壁の厚みは 5mm とした。アンテナ下端の長辺側側面に周波数が 2.45 GHz のマイクロ波を放射するための長方形の開口を設けた。床面の境界条件は乾燥炉の金属コンベアを模擬するため完全導体とし、その他の境界は放射境界とした。また、塊成化物を模擬した吸収体のブロックをスロットアンテナの側面に接するように配置した。ブロックに与えた複素誘電率は、実部を 33.3、虚部を 3.7 とした。

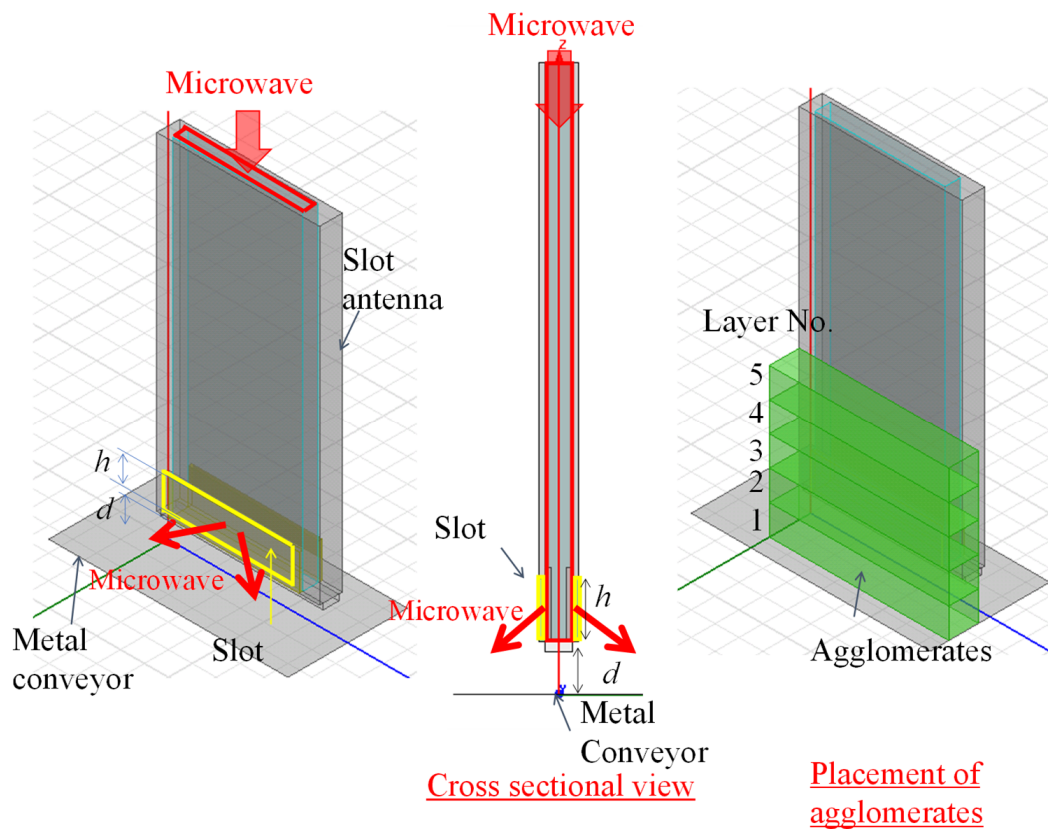


図 2.10 電磁場解析モデル

床面からアンテナ先端までの距離を  $d$ 、アンテナ側面の開口の高さを  $h$  とし、 $d$  を固定した場合に  $h$  に対するマイクロ波の電力反射率  $R$  を計算した。結果を図 2.11 に示す。開口高さ  $h$  に対して反射率  $R$  は周期的に変化する。反射率の極小値が現れる周期は、アンテナ内を伝播するマイクロ波の管内波長  $\lambda$  の  $1/2$  である。したがって、一般的なスロットアンテナと同様に、開口高さと導波管内の磁界分布の関係により、反射率が決まることが推測される。

次に、表 2.1 に示す開口高さ  $h$  と、床面とアンテナ先端間の距離  $d$  の組み合わせに対して同様の電磁場解析を行い、反射率  $R$  と、 $\eta = 100 - R$  で定義する放射効率  $\eta$  を求めた。結果を合わせて表 2.1 に示す。

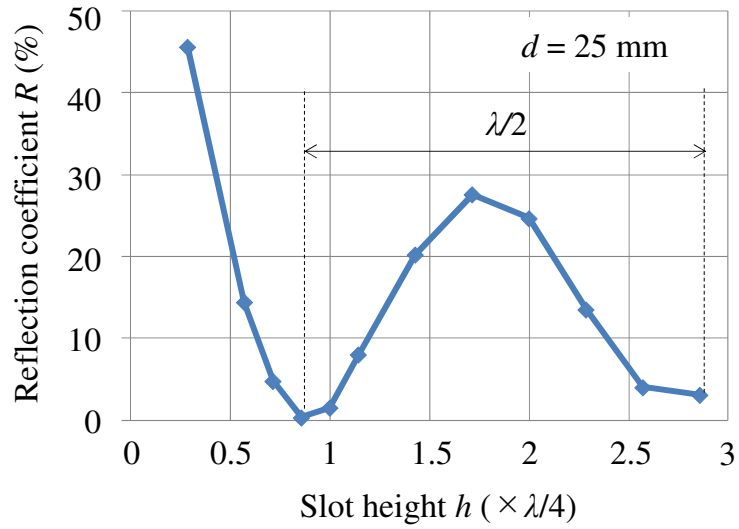


図 2.11 開口高さに対する電力反射率の変化

表 2.1 解析条件と放射効率

条件	A	B	C	D	E	F
$d$ [mm]	25	20	20	10	5	5
$h$ [mm]	30	25	60	15	7	2
$R$ [%]	0.3	6	26	8	3	25
$\eta$ [%]	99.7	94	74	92	97	75

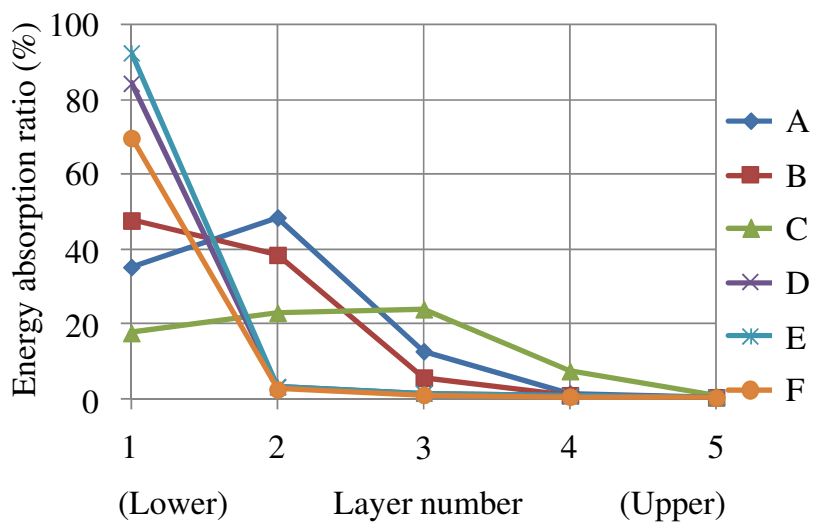


図 2.12 塊成化物層のエネルギー吸収効率

条件 A, B, D, E は放射効率が 90%以上と高い一方, 条件 C と F は 80%以下の低効率となった. さらに図 2.10 に示す塊成化物層の各層に吸収されたエネルギーを計算し, 入射エネルギーに対する各層に吸収されたエネルギーの割合を求めた. 各層の高さは 25 mm とし, 層番号は下から順に 1, 2, ... とした. 結果を図 2.12 に示す. 条件 D, E, F の場合, マイクロ波のエネルギーの大部分は最下層に与えられ, かつ塊成化物層の厚みよりも開口の方が狭いため, 2 層目よりも上の層にはエネルギーはほとんど与えられないという結果が得られた. 条件 A, B, C の場合, 開口は塊成化物層の 2 層目付近に開いているため, ほとんどのマイクロ波のエネルギーは最下層と 2 層目に吸収された. これらの結果から, 任意の塊成化物層を加熱しつつ放射効率を高くするための, アンテナの設置高さや開口高さの組み合わせを得た.

**考察** 表 2.1 に示す 6 つのケースについて, このような放射効率の挙動が得られた理由を考察する. 一般的なスロットアンテナの放射のメカニズムによれば, 開口が磁界の極大点を横切る場合, すなわち開口高さ  $h$  が  $\lambda/2$  の整数倍のときにマイクロ波が最も効率良く外部に放射され, 反射が極小になるはずだが, 図 2.11 では,  $h = \lambda/2$  のときの反射率は, 20%以上と大きい. これは, 乾燥機の下部に金属のコンベアが存在し, アンテナ先端と金属コンベアとの距離をマイクロ波の波長以下まで近づけたことで, 金属コンベアまで減衰せずに到達するマイクロ波が生じ, アンテナ内の電磁界分布が影響を受けたためだと考えられる.

このことを確認するために, 反射率が比較的小さい条件 B の, アンテナ中の H 面 (短辺) の磁界強度分布を計算した. 結果を図 2.13 に示す. アンテナの先端と金属コンベア間の距離  $d$  はマイクロ波の波長よりも短いため, アンテナから放射されたマイクロ波が減衰せずに金属コンベアに到達していることが確認できる. このため, 一般のスロットアンテナではアンテナ先端で磁界が極大となるのに対して, この場合は金属コンベアで磁界強度が極大となっていることが確認できる. さらに, アンテナの先端から金属コンベアの間は塊成化物が入り込む隙間が無く空洞となるため, あたかも金属コンベアまでが一体の導波管であるかのように見なすことができる. このとき, アンテナ先端を短絡する金属板は, 導波管中に挿入された導体棒と同様にふるまい, インダクタンス成分により電流が誘導される. 誘導電流によりアンテナの先端の周りに形成された磁界と, アンテナに伝わってくる磁界とが重ね合わされることにより, アンテナ内部の磁界の極大点は, アンテナ先端ではなくアンテナ先端からやや上方にシフトする. このシフト量は今回解析を行った表 2.1 に示す 6 つのケースでは, 概ねアンテナ先端と金属コンベア間の距離  $d$  と同程度であった. さらにここを起点として上方に磁界の極大点が  $\lambda/2$  の周期で現れ, 磁界の極小点は極大点から  $\lambda/4$  だけ移動した位置に現れる.

これらのことから, 放射効率を最大化するために開口に磁界の極大点を含み, かつ極小点を含まないための, アンテナ先端と金属コンベア間の距離  $d$  と開口高さ  $h$  の関係は, 今回解析を行った範囲では,  $d < h < d + \lambda/4$  と書き表すことができる.

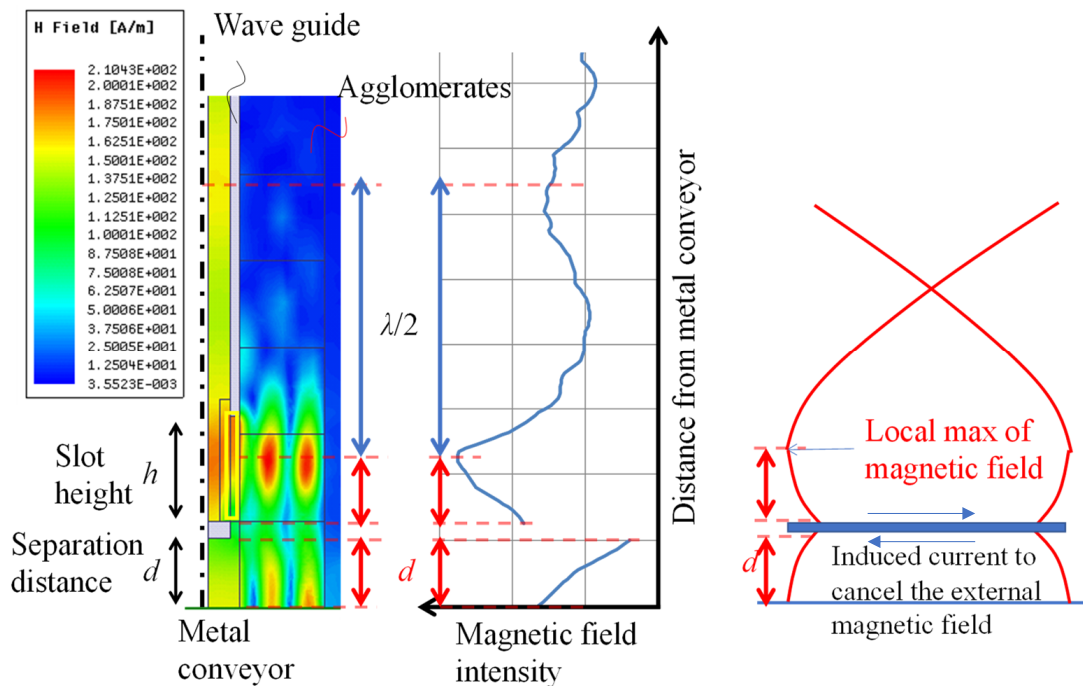


図 2.13 金属コンベア近傍での磁界強度分布

#### 実験による効果の検証

前節で得た不等式  $d < h < d + \lambda/4$  に基づいて、放射効率が高いと想定されるものと低いと想定されるものの両方を含む 4 種類のスロットアンテナを試作し、塊成化物の加熱実験を行った。アンテナの先端と金属コンベア間の距離  $d$  と開口の高さ  $h$  の組み合わせを表 2.2 に示す。

表 2.2 実験に用いたアンテナの条件

条件	G	H	I	J
$d$ [mm]	20	20	10	10
$h$ [mm]	30	60	15	10
$R$ [%]	8.3	75	19	71
$\eta$ [%]	76	21	78	26

条件 G と I は、 $d$  と  $h$  が  $d < h < d + \lambda/4$  の関係を満たす。条件 H の場合は、開口の高さ  $d$  が大きく、開口には磁界の極大点と極小点の両方が含まれる。条件 J の場合、開口には極大値も極小値も含まれない。実験のセットアップを図 2.14 に示す。試作したスロットアンテナを塊成化物層に挿入し、周波数 2.45 GHz のマイクロ波を照射した。入射電力は 250 W とした。反射電力の大きさはスロットアンテナの手前に取り付けたパワーモニタで測定し、入射電力に対する割合を反射率  $R$  として計算した。また、塊成化物に熱電対を埋め込みその温度上昇を測定するとともに、事前に示差走査熱量測定によって求めた比熱を使い、塊成化物に吸収された電力を計算した。

入射電力のうち塊成化物の各層で吸収された電力の割合を図 2.15 に示す。これらの和を実験時の放射効率  $\eta$  と定義し、表 2.2 に示す。反射率も合わせて表 2.2 に示した。表 2.2 によれば、不等



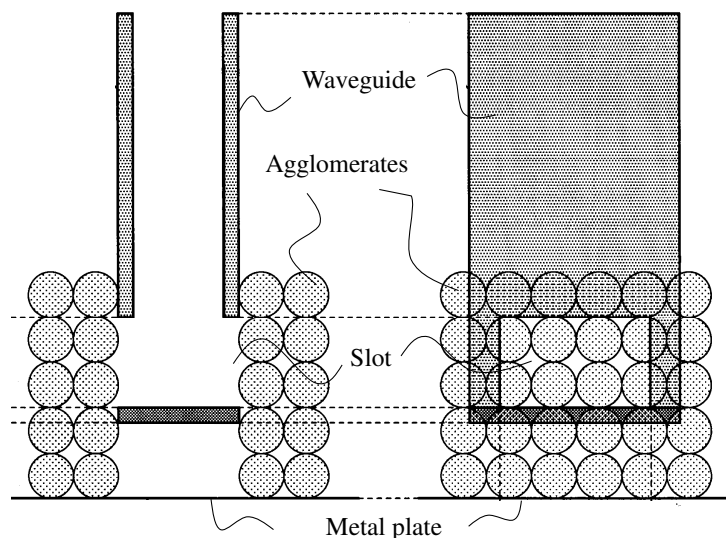


図 2.14 実験装置

式  $d < h < d + \lambda/4$  を満たす条件 G, および I の反射率は, 条件 H および J よりも明らかに低いことが判る. 図 2.15 に示すように, 条件 G と I の場合, 投入したマイクロ波のエネルギーのほとんどを塊成化物層に与えることができ, 特に条件 G の場合は狙いとする最下層に最も多くのエネルギーを与えられる. 条件 J も最下層を加熱できるものの, 放射効率は低い. 逆に, 2 層目や 3 層目を集中的に乾燥させる場合には, 条件 G のようなアンテナを用いれば良い.

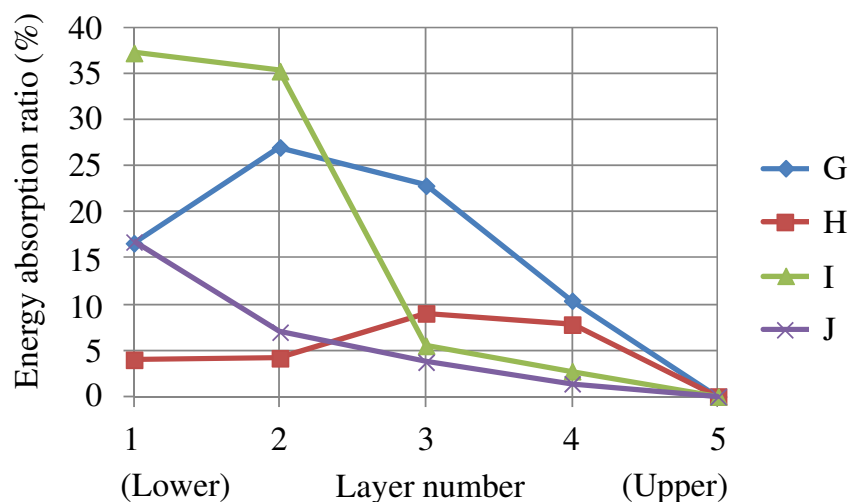


図 2.15 各層の電力吸収割合

以上, 本節では, バンド乾燥機内の下部に存在する塊成化物を, マイクロ波加熱を用いて乾燥するにあたり, 効率良く狙いの塊成化物層にマイクロ波を照射するためのアンテナ構造の検討結果を述べた. バンド乾燥機内では, アンテナの先端と金属コンベアとの距離が短いため, アンテナ内の磁界が金属コンベアの影響を受け, 開口位置と放射効率の関係が一般的なスロットアンテナとは異なる挙動を示す. そこで, 金属コンベアの存在下で効率良くマイクロ波を照射するた

めの、アンテナ先端と金属コンベア間の距離と開口高さの関係を見出し、実験でその確からしさを確認した。

### 2.3.2 連続鋳造プロセスにおける溶鋼保温への適用

転炉や二次精錬工程で成分が調整された溶鋼は、連続鋳造プロセスで冷却・凝固され、スラブとよばれる半製品となる。本節では、連続鋳造プロセスにおいてスラブの品質欠陥の発生を抑制するためにマイクロ波加熱の適用を検討した結果を述べる。

#### 背景と課題

連続鋳造プロセスにおいてスラブを製造する際、溶鋼の側面は鋳型により冷却され凝固が進行する。鋳型の上部は溶鋼が連続的に供給されるため開放されており、鋳型内に投入された溶鋼の上部は空気にさらされている。空気にさらされている部分は放熱が不均一になり、スラブに品質上の欠陥が生じる原因となる。そこで、図 2.16 に示すように、溶鋼の上部にモールドパウダとよばれる保温・潤滑の機能を担う粉末を投入し湯面の保温をすることで、スラブの品質欠陥の発生を抑制することが行われている。さらに、鋳造開始時には Ca-Si 合金を用いて自身が発熱することで保温性を向上させた発熱モールドパウダが使用されており、欠陥の抑制に大きな効果を得ている [23]。

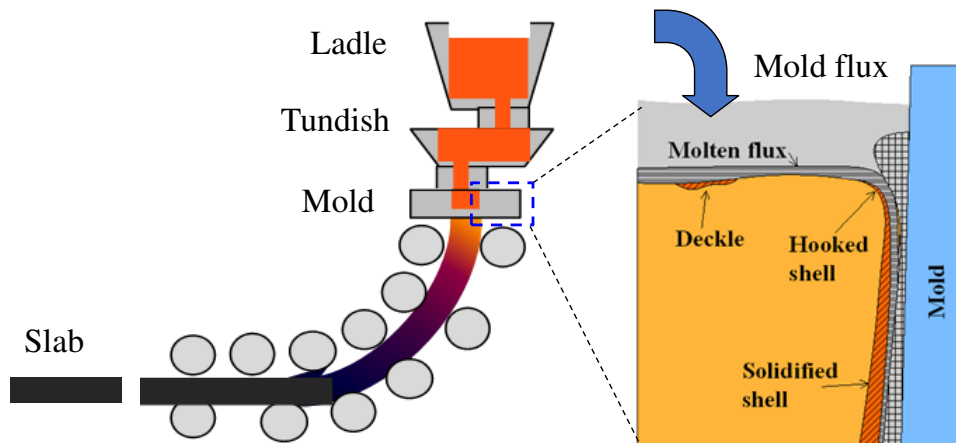


図 2.16 モールドパウダによる溶鋼表面の保温

発熱モールドパウダは鋳造の定常部で使用できないという制約があるため、鋳造の定常部でも溶鋼の保温性を向上させるためには、外部の熱源を用いてモールドパウダを加熱する必要がある。しかしながら、モールドパウダは放熱を抑制するために熱伝導率が低く設計されており、鋳型の上部からバーナー等で加熱を行ったとしても、溶鋼表面まで十分伝わらないという問題がある。また、溶鋼を直接プラズマ加熱する場合、電極を構成する成分が溶鋼中に流出し、溶鋼の成分が変化する懸念がある。一方、マイクロ波には選択加熱と内部加熱の特性があるため、鋳造中の金属



を加熱せずに、鋳型内部の溶鋼との界面近傍のモールドパウダを非接触で加熱し、効率良く溶鋼の保温を行うことが期待できる。

そこで、基礎的な探索としてモールドパウダのマイクロ波加熱特性を調査した。さらに、溶鋼上に載置したモールドパウダにマイクロ波を照射し、溶鋼からの放熱が抑制されることをラボ実験にて確認し、本手法の原理的な実現可能性を示した [7]。

### モールドパウダのマイクロ波加熱特性の評価

**マイクロ波単独での加熱特性評価** 物体のマイクロ波による加熱のされ易さは誘電率・透磁率・導電率によって決まるが、モールドパウダのこれらの物性値の測定例は無く、また加熱特性を調べた事例も無かった。そこで、まず初めに、モールドパウダがマイクロ波によってどの程度加熱されるのかを調査するための実験を行った。実験装置を図 2.17 に示す。内径が 50 mm の MgO の坩堝に、CaO、SiO<sub>2</sub> を主成分とする非発熱モールドパウダを高さ 40 mm まで投入し、一辺が 400 mm の立方体の金属箱であるマイクロ波加熱装置内に設置した。坩堝の周囲は断熱材で覆った。周波数 2.45 GHz のマイクロ波を出力 1.5 kW で照射し、試料の中心に挿入した熱電対で温度を測定した。

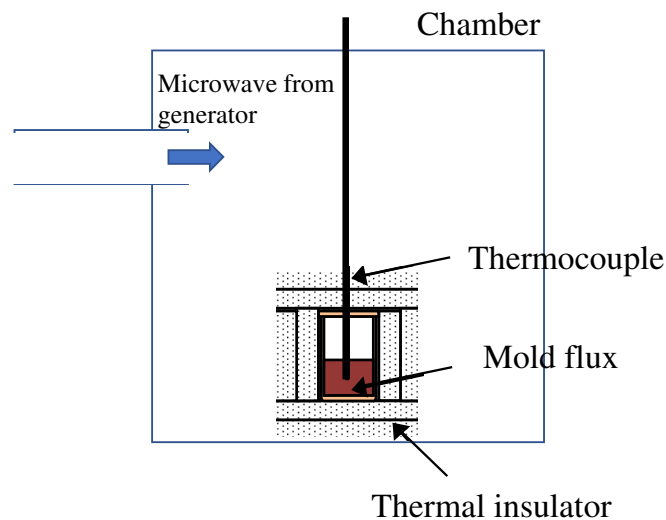


図 2.17 実験装置

図 2.18 に結果を示す。マイクロ波の出力は加熱中一定であったものの、モールドパウダの加熱速度は温度によって大きく変化した。モールドパウダの温度が 25 °C から 300 °C までは、5 °C/分の速度で徐々に昇温した。モールドパウダの温度が 300 °C を超えると、昇温速度が急激に大きくなり、80 °C/分で 1000 °C まで到達した。モールドパウダの温度が 1000 °C を超えると、マイクロ波の照射を止めるまで緩やかに温度の上昇が継続した。

**輻射加熱を併用した場合の加熱特性評価** 図 2.18 に示す昇温特性には、モールドパウダからの放熱の影響が含まれている。そこで次に、放熱の影響をできるだけ小さくした状態で加熱特性を評価するため、図 2.19 に示す加熱炉を製作した。加熱炉は、カンタルヒーターの内側に黒鉛炉壁を有

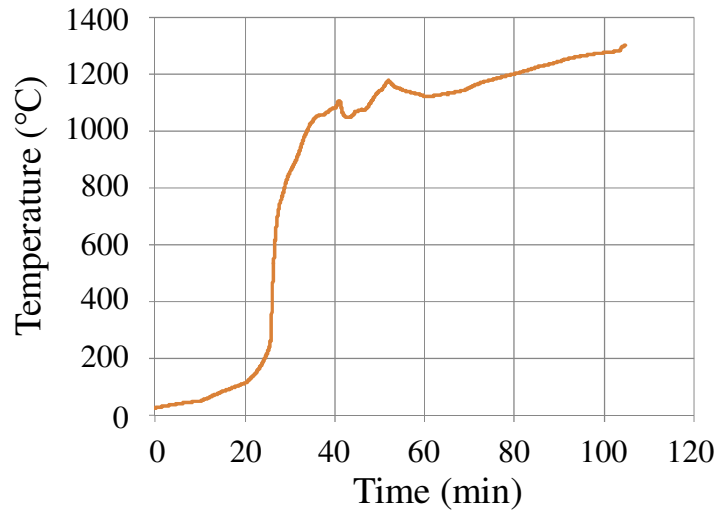


図 2.18 モールドパウダの温度測定結果

する 2 重炉壁構造とした。この構造では、炉内の側面に設置されたカンタルヒーターにより黒鉛炉壁が加熱された後、黒鉛炉壁からの輻射によって内部の試料が加熱される。さらに、上部にはマイクロ波の導波管を介してマイクロ波発振器を接続し、マイクロ波も併用して加熱を行う。このような 2 重炉壁構造とすることで、マイクロ波は黒鉛炉壁内に閉じ込められるため効率良く被加熱物に吸収させることができ、さらに炉壁自体が高温となるため試料からの輻射による放熱を抑制することができる。この 2 重炉壁加熱炉を用いて、ヒーターによる輻射加熱によってモールドパウダを予熱し、所定の温度に到達後、周波数 2.45 GHz のマイクロ波を出力 1.5 kW で照射する実験を行った。予熱温度を A. 室温 (予熱なし), B. 300°C, C. 500°C, D. 800°C, E. 1100°C, F. 1300°C とし、図 2.20 に丸で示すマイクロ波照射直後の 10 秒間の昇温速度を測定した。

各温度でマイクロ波照射後の昇温速度を測定し、室温で測定した昇温速度で規格化した結果を図 2.21 に示す。昇温速度は 800°C で室温の 10 倍程度になった。また、1000°C を超えた後も室温の 8 倍程度の速度で昇温されることが明らかになった。

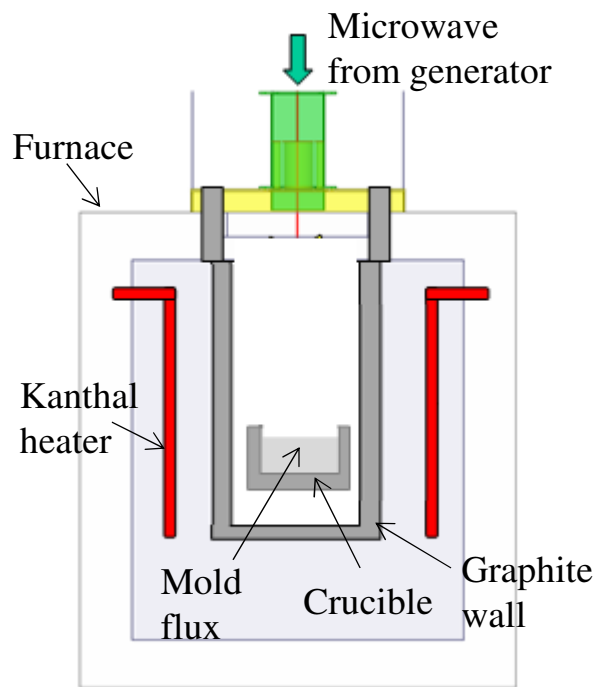


図 2.19 2重炉壁加熱炉

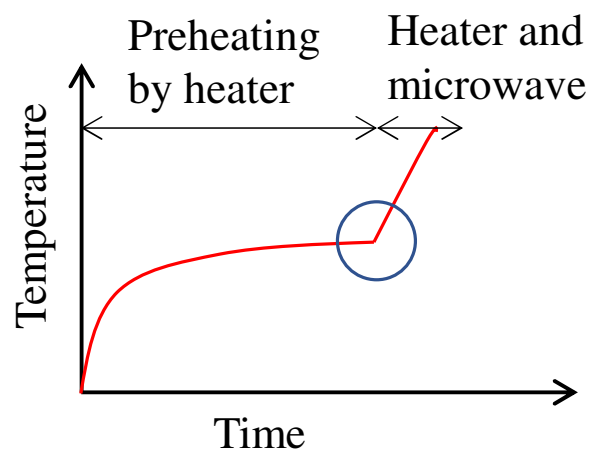


図 2.20 昇温速度の評価方法

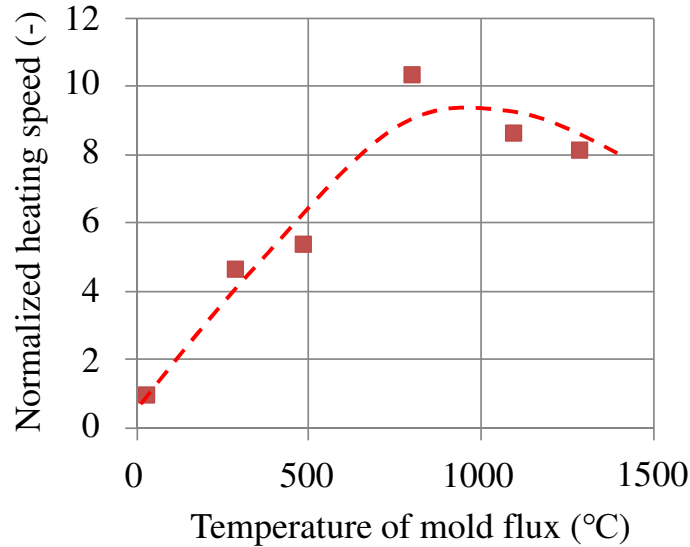


図 2.21 昇温速度の評価結果

モールドパウダの誘電率の推定 このような加熱特性を示す理由は、モールドパウダを構成する成分の内、酸化カルシウム等のイオン結合性の結晶の温度が上昇し、結晶中の Frenkel 欠陥が増加して導電率が大きくなるためだと考えられる [24, 25]。誘電率の虚数部は導電率に比例し [24]、かつモールドパウダは非磁性体であるため、結果的にモールドパウダの誘電率のみが大きくなり、このような加熱特性を示したと推測される。しかしながら、1000°C を超える高温までの誘電率の温度依存性を測定するのは困難であるため、加熱実験で得られたエネルギーバランスと誘電率の室温での実測値から、高温での誘電率の推定を試みた。

図 2.21 で得られた昇温速度の変化が、誘電率の虚数部の変化のみによるものだと仮定すれば、モールドパウダの電力のバランスは、

$$\frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 V = \rho V C_v \frac{dT}{ds} + h(T - T_a) S + \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) S \quad (2.3)$$

と書ける。ここで、 $\omega$  はマイクロ波の角周波数、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $\epsilon_r''$  はモールドパウダの比誘電率の虚数部、 $E$  は電界強度、 $V$  はモールドパウダの体積、 $\rho$  は嵩密度、 $C_v$  は比熱、 $T$  はモールドパウダの温度、 $s$  は時間、 $T_a$  は周囲温度すなわちマイクロ波照射開始時の炉温、 $h$  は熱伝達係数、 $\epsilon$  は放射率、 $\sigma$  はステファンボルツマン定数、 $S$  はモールドパウダの表面積を表す。温度上昇に伴い変化する熱物性値は、文献 [26] に記載の値を使用した。電界強度は一定とした。また、室温でのモールドパウダの誘電率を空洞共振器摂動法 [27] で測定した結果は 0.024 であった。

これらを利用して、比誘電率の虚数部を計算した結果を図 2.22 に示す。モールドパウダの温度が 300°C を超えると、比誘電率の虚部の推定値が大きくなる傾向が得られた。また、図 2.21 に示す昇温速度は 800°C で最大となるのに対して、図 2.22 の誘電率の虚数部は 1100°C で最大となった。溶鋼上に置かれたモールドパウダの温度は 1000°C を超えるが、このときの誘電率の虚数部は室温の 10 倍大きな値が得られた。したがって、1000°C 以上のモールドパウダはマイクロ波の

吸収が大きい物質であると言え、鋳型内でマイクロ波を照射することで、効果的に溶鋼の保温が行えることが期待できる。

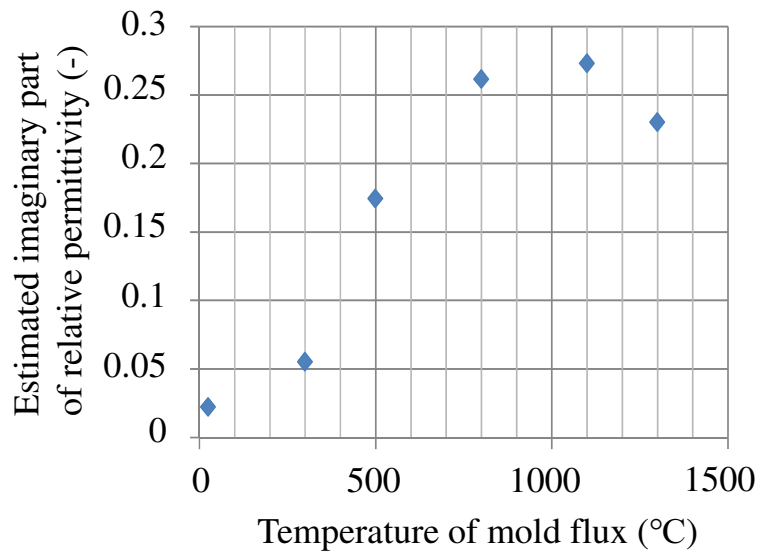


図 2.22 比誘電率の推定結果

### 溶鋼保温の効果検証

マイクロ波でモールドパウダを加熱することにより、溶鋼の保温が行えることを実証するための実験を行った。実験は、図 2.19 に示す 2 重炉壁加熱炉を用いて行った。炭素飽和鉄のインゴットとモールドパウダを、直径 80 mm、高さ 50 mm の黒鉛坩堝に投入した。投入量は、溶融時に溶鋼の厚みが 15 mm、モールドパウダの厚みが 10 mm となるように調整した。坩堝を炉の中央に設置した。図 2.23 に示すように、溶鋼とモールドパウダの界面を  $z$  座標の原点と見なし、高さ -15 mm 及び -5 mm の溶鋼の温度と、5 mm のモールドパウダ層の温度を熱電対で測定した。

図 2.24 に示すように、(I) インゴットとモールドパウダをヒーターを使用して 1250 °C に加熱し、(II) 十分に溶けるまで温度を一定に保った。(III) ヒーターを止めると溶鋼とモールドパウダの温度が下がり始めるため、(IV) 温度低下中に試料にマイクロ波を照射し、降温速度の変化を観測した。溶鋼は 1153 °C で凝固するが、この際反応熱が生じマイクロ波の効果と切り分けができなくなるため、溶鋼温度が 1153 °C 以下になる前にマイクロ波の照射を停止した。

実験結果を図 2.25 に示す。予熱は 146 分かけて行い、その後ヒーターを停止した。ヒーターを停止すると、溶鋼とモールドパウダの両方の温度が低下し始めた。ここにマイクロ波を出力 1.5 kW で 150 分から 155 分の間に照射すると、図 2.25 中に破線で示すように温度の傾きが変化した。

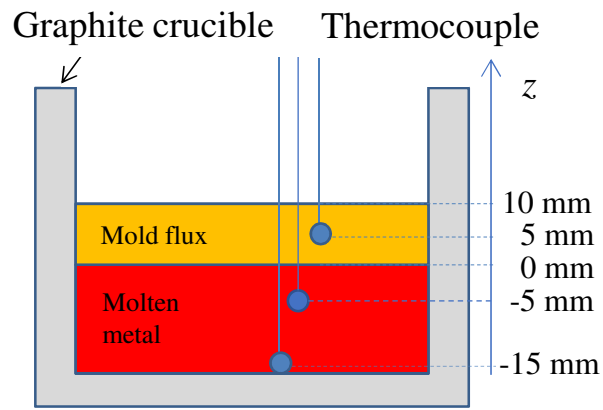


図 2.23 温度の測定位置

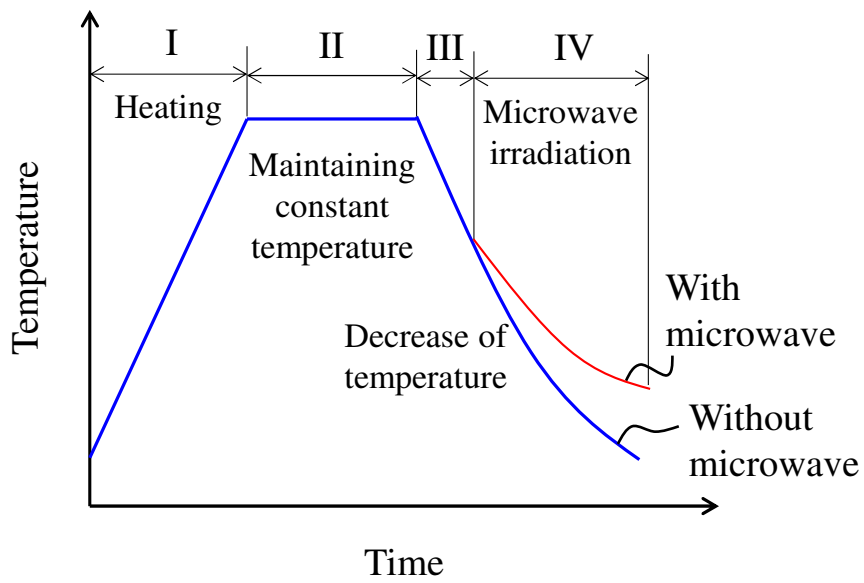


図 2.24 想定される温度変化の挙動

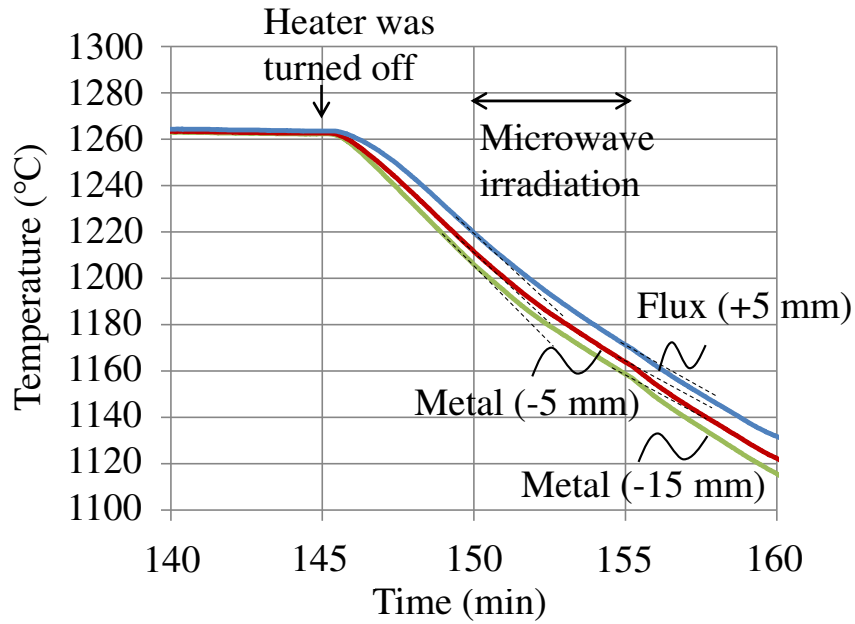


図 2.25 温度測定結果

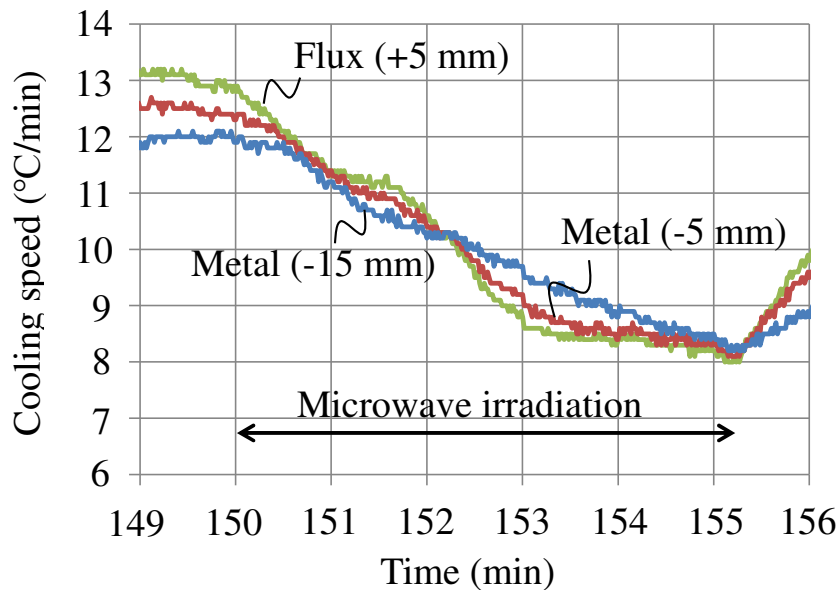


図 2.26 降温速度

より詳細に分析するため、1分毎の温度変化の傾きを計算し、図 2.26 に示した。縦軸の値が大きい程、温度の低下速度が速いことを意味する。マイクロ波の照射前のモールドパウダの降温速度は  $13^{\circ}\text{C}/\text{分}$  であり、溶鋼の降温速度よりも大きかった。これは、モールドパウダ層から炉内への放熱が大きく、溶鋼から黒鉛坩堝への伝熱よりも溶鋼からモールドパウダへの伝熱が支配的であり、高さ方向にほぼ1次元の伝熱プロセスだと考えることができることを示している。ここにマイクロ波を照射すると、モールドパウダ層の降温速度は低下し、これに伴って溶鋼層の降温速度も次第に低下し、152分を境にこれらの大小関係は逆転した。さらにマイクロ波を停止すると降

温速度は上昇し始め、再びモールドパウダ層からの放熱が溶鋼層からの放熱よりも大きくなった。これらの結果から、モールドパウダがマイクロ波を吸収して放熱が抑制されたため、溶鋼層からモールドパウダ層への熱流束も低減され、その結果溶鋼表面からの放熱が抑制されることを確認できたと結論付けられる。

以上本節では、連続鋳造プロセスにおいて溶鋼表面を保温するため、モールドパウダをマイクロ波加熱する手法を概説した。モールドパウダは、温度が  $300^{\circ}\text{C}$  を超えると、マイクロ波の優れた吸収体となる。さらに、溶鋼上のモールドパウダをマイクロ波で加熱することにより、溶鋼からの放熱を抑制できることが示された。

## 2.4 マイクロ波による計測の原理

レーダ (Radar) は、Radio Detection and Ranging という英語の頭文字をとったものであり、その名の通り、電波をターゲットに照射しその反射波を受信することで、ターゲットの距離や速度、方位を測定するものである。波長が  $1\text{mm}$  から  $1\text{m}$  のマイクロ波帯の電磁波を使うことで、可視光や赤外光に比べて粉塵や雨滴等の粒子で散乱されにくく、これらの環境を透過し人間の視力の及ばない遠方まで測定が可能であるという特長を有している。鉄鋼業を含む工業計測にレーダが使われ始めたのは、安価なマイクロ波半導体デバイスが商業化された 1970 年代後半のことである [28]。以下に、本論文の第 3 章で言及するものを中心に、代表的なレーダ方式を概説する。

### パルスレーダ

最も単純なレーダはパルスレーダ [29] で、アンテナからパルスを送信し、ターゲットからの反射パルスの遅延時間を測定することで、ターゲットまでの距離を推定する (図 2.27)。また、ドップラシフトから速度を推定することもできる。原理的に大きな送信出力と短パルスの両立が困難で、距離分解能が低いという難点から、高々数  $10\text{m}$  までの距離が測定範囲となる工業計測では、パルスレーダが用いられている事例は少ない。

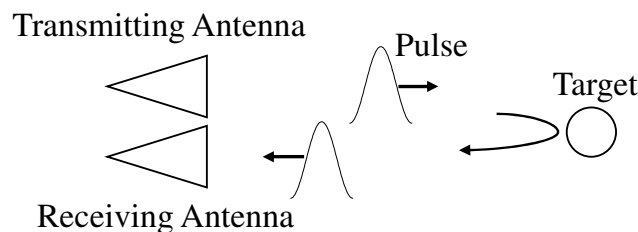


図 2.27 パルスレーダ

### CW ドップラレーダ

CW (Continuous Wave) ドップラレーダ [29] は、周波数  $f$  が一定の無変調連続波をターゲットに照射し、ターゲットがレーダの視線方向に速度成分を有している場合に生じるドップラシフト



を検出し、ターゲットの速度を推定するものである。図 2.28 に、送信と受信のアンテナが共通のモノスタティックな場合の装置構成を示す。CW ドップラレーダでは、送信波とターゲットからの反射波をミキサで混合する。ミキサは2つの入力信号の差の周波数をもつ信号を出力する素子であるため、ミキサからの出力信号の周波数を FFT(Fast Fourier Transform) 等で推定すれば、これがドップラ周波数  $f_d$  に相当し、ここからターゲットの視線方向速度  $v$  は

$$v = \frac{cf_d}{2f} \quad (2.4)$$

と推定される。ミキサからは、送信波と反射波の周波数が異なる場合のみ信号が出力される。つまり、検出できるのは反射波にドップラシフトがある場合、言い換えればターゲットが動いている場合に限られ、静止しているターゲットは検知できない。また、ターゲットの距離に関する情報を得ることはできない。工業計測では、流量計やガス流速計等に利用されている [30]。

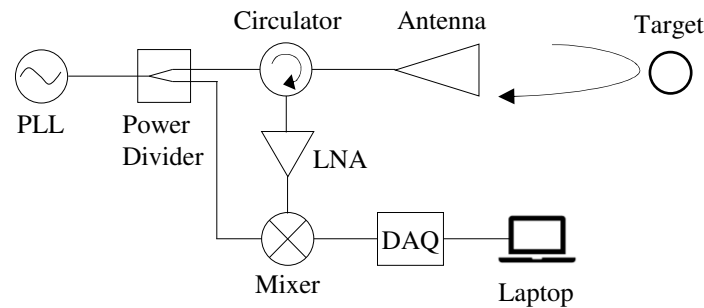


図 2.28 CW ドップラレーダ

## FMCW レーダ

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) レーダ [29] は、図 2.28 と同じ装置構成で実現されるが、送信波の周波数を図 2.29 のように変調する。  $F$  を帯域幅、  $T$  を掃引時間とする。こうすると、ターゲットとアンテナの間の往復の伝搬に要する受信波の時間遅れ  $\Delta t$  が、送信波と受信波の周波数差  $\Delta f$  に比例するため、ミキサから出力された信号の周波数を FFT 等で解析することで、受信波の時間遅れは、

$$\Delta t = \frac{T}{F} \Delta f \quad (2.5)$$

と推定できる。電波が光速  $c$  で伝搬することを考慮すれば、距離  $R$  は、

$$R = \frac{cT}{2F} \Delta f \quad (2.6)$$

と推定される。

さらに、図 2.29 の送信波形を複数回連続的に送信 (連続チャープパルス) すれば、チャープ間の位相差からターゲットの速度を推定できる。チャープ間の位相差も FFT で推定できるため、各パルス毎の FFT から距離を推定した結果を並べ、各距離毎にさらに FFT することで、距離と速度、

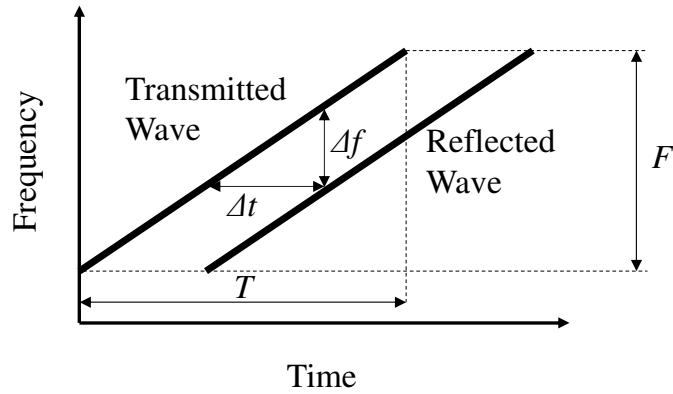


図 2.29 FMCW レーダの送信波形

言い換えればレンジ・ドップラ推定が行える (図 2.30). これを Fast Chirp レーダ [31] とよぶ. また, 各パルス内のサンプリングを Fast-time, パルス毎のサンプリングを Slow-time と呼称する.

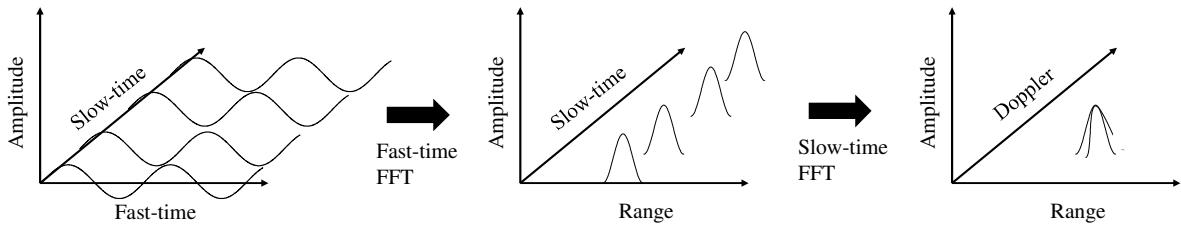


図 2.30 Fast Chirp レーダ

ここまで, 本論文で言及する代表的なレーダ方式と, レンジ・ドップラ推定の方法を述べた. この他, PMCW(Phase Modulated Continuous Wave) レーダ [32], OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) レーダ [33] 等のデジタルレーダとよばれる方式も近年注目されている.

レンジ・ドップラ推定に加えて, 複数のアンテナをアレー化すれば, ターゲットの方位推定 (到来方向推定) も可能である. アレー信号処理に基づく到来方向推定の高分解能化 [34, 35] や, 仮想素子の概念を用いた MIMO(Multiple-Input and Multiple-Output) レーダ [36] による高分解能センシングの研究 [37, 38] が盛んに行われている.

## 2.5 鉄鋼プロセスにおけるマイクロ波計測の適用事例

鉄鋼業においては 1970 年代の後半から, マイクロ波の高い粉塵透過性を利用して, プロセスの状態を可視化するためにレーダが使われてきた. ここではその事例を述べる.

### 高炉装入物プロフィールメータ

高炉では, 炉の上部から旋回シュートを用いて焼結鉱とコークスを交互に装入する. 炉の下部からは熱風が吹き込まれコークスの燃焼熱によって酸化鉄が溶融還元されるが, 還元反応を効率

良く進行させるには、装入物の分布を適正化し熱風の通気性を良好に保つ必要がある。そのためには、焼結鉱とコークスの堆積形状を測定し、旋回シュートによる装入の条件にフィードバックする必要があるが、炉頂部分は高温かつ粉塵の飛散している環境であるため、カメラやレーザ距離計は使用できない。そこで、図 2.31 に示すようにレーダを用いた装入物分布測定が行われており、これは高炉プロフィールメータとよばれている。

初期のプロフィールメータは、FMCW レーダを炉の径方向に機械駆動することで装入物の径方向断面の堆積形状を測定するものであった [39]。近年は MIMO レーダを適用することで、装入物表面全体の形状を高速に測定できる 3 次元プロフィールメータが開発され、実際の高炉操業に用いられているとの報告がある [40, 41]。

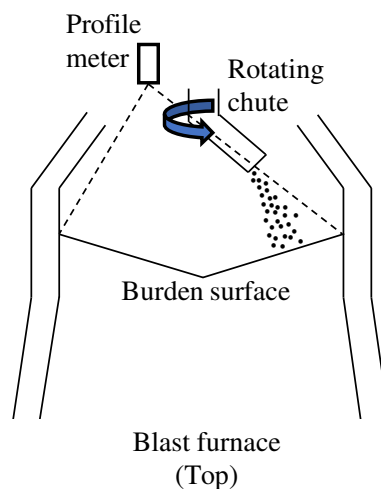


図 2.31 高炉プロフィールメータ

### 高炉レースウェイ深度計測

高炉の下部からは熱風が吹き込まれる。熱風の吹き込み口は羽口とよばれるが、羽口の先には高温の溶融物やコークスが熱風により押し退けられ、レースウェイとよばれる空間ができる。レースウェイの大きさ、特に羽口に正対する面までの距離をレースウェイ深度といい、レースウェイ深度は高炉の操業状態を知る上での手掛かりとなるため、連続測定が望まれていた。羽口からは微粉炭が吹き込まれるため、これを透過してレースウェイ深度を計測するために FMCW レーダが使用され、操業中のレースウェイ深度の変化が測定できるようになったとの報告が成されている [42]。さらに、レーダのアンテナは高炉の外に設置する必要があるが、マイクロ波はブローパイプや羽口といった狭い筒状の空間を経てレースウェイに到達する。そこで、ブローパイプや羽口での反射による減衰を抑えマイクロ波を効率よく導波するため、ブローパイプの直径を考慮した高効率アンテナの設計も行われている [43]。

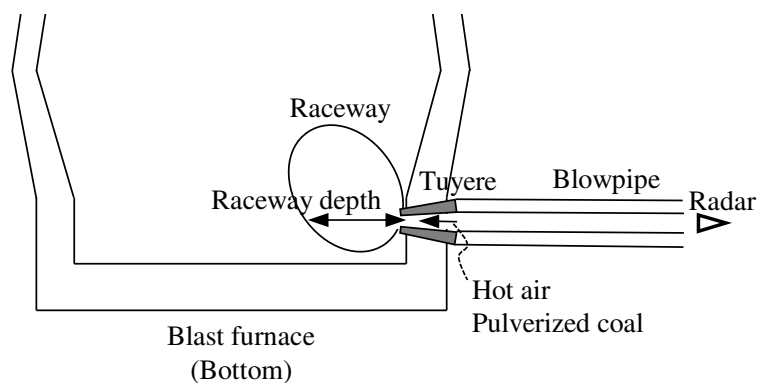


図 2.32 レースウェイ深度計測

### 転炉溶銑レベル計

製鋼工程においてもレーダは用いられている。転炉では、高炉で得られた溶銑を炉に装入し、上部から筒状のランスを用いて酸素を吹き付け、不純物を取り除く。ランスと転炉に装入された溶銑表面との間の距離は、酸素ジェットが溶銑に入り込む深さや、溶銑の攪拌の度合いを決め、精錬反応の効率を左右する重要な要素のひとつである。ランスの高さを溶銑表面の位置に合わせて適正化するために、装入された溶銑の高さを FMCW レーダを用いて測定する事例が報告されている [44].

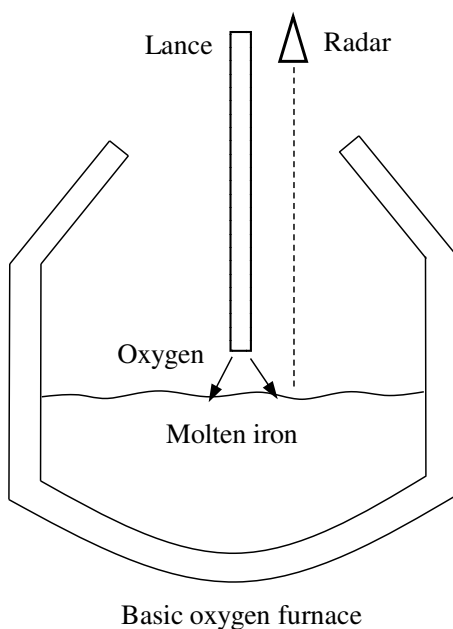


図 2.33 転炉溶銑レベル計

## 加熱炉内の鋼板位置検出

下工程においては、加熱炉内の鋼板の蛇行を制御するための鋼板位置測定にレーダが用いられている。鋼板の両側に設置されたアンテナから鋼板エッジまでの距離を測定し、炉内での板位置を検出する。M 系列符号によるスペクトル拡散レーダを用いた粗距離算出、2つの周波数の位相差を用いた中距離算出、受信波の位相による高精度距離算出の3つのステップを組み合わせることで、アンビギュイティを取り除きつつ高精度な位置検出を可能にしたとの報告が成されている[45]。また、マイクロ波は耐火煉瓦を透過できるためアンテナを炉壁中に埋め込むことが可能であり、簡単な空冷のみで装置保護が行えるという利点も述べられている。

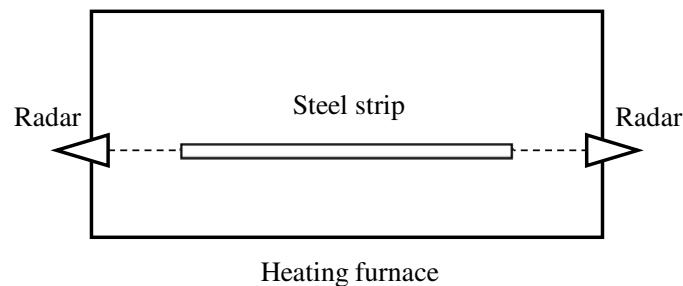


図 2.34 鋼板位置検出

## 2.6 まとめ

本章では、鉄鋼製造プロセス、及びマイクロ波による加熱と計測の原理を概説するとともに、鉄鋼製造プロセスにおけるマイクロ波加熱とマイクロ波計測技術の適用事例を述べた。

マイクロ波加熱については、鉄鋼プロセスにおいて唯一実用化されている耐火物乾燥の事例を述べた。マイクロ波加熱は選択加熱・内部加熱という特徴を有する一方、単位熱量当たりのコストは高くなりがちなため、加熱対象と得られる効果を適切に見極める必要がある。また、マイクロ波加熱の新たな適用先として、鉄鋼原料の乾燥プロセスと連続鋳造プロセスへの適用を検討した結果を概説した。

マイクロ波計測技術は、主にこれまで高温粉塵環境のプロセスを可視化するために利用されてきた。しかしながら、温度や粉塵以外にも、火炎・ミスト・周囲の明るさ変化がある等、マイクロ波計測の利用が適していると考えられるプロセスは他にも多くある。また、プロセス計測以外にも適用先はあると考えられ、さらなるニーズの発掘が求められる。

本章に続く第3章、及び第4章では、マイクロ波計測の新たな展開先を検討し、その技術課題と解決手段を提案する。

# 第3章 CW ドップラレーダによる変位推定における振動外乱除去方法

## 3.1 緒言

近年、橋梁等のインフラ構造物の老朽化が問題となっており、構造物の振動状態を監視し劣化の予兆を検知する技術の研究が行われている [46]. 鉄鋼業においても、各種配管、クレーン、コンベアといった設備の老朽化が課題となっており、振動等の設備の状態を監視し劣化の状況や故障の予兆を検知する手法が求められている [47]. 振動状態の監視方法には、加速度センサや歪みゲージ等の接触式センサや、非接触のレーザドップラ振動計 (LDV) を用いたものがあるが、これらの計測装置はいずれも点計測、すなわち設備の部分的なモニタリングに限られており、大規模な設備全体の監視には不向きである. 高速度カメラを用いて装置全体を監視する方法も提案されているが [48], 屋外に設置されている設備を監視する場合、夜間や雨天時には使用できないという課題もある.

これらの課題を解決する手段のひとつはミリ波レーダを用いることである. ミリ波レーダは周囲の明るさや雨滴等の影響を受けにくく、屋外設備の監視に適している方法だと考えられる. 鉄鋼業においては、古くから高温粉塵環境での距離計測にマイクロ波距離計が用いられているが、設備監視にマイクロ波が利用された事例は報告されていない [9, 10]. また、近年のレーダ信号処理の手法を用いることで、従来にない外乱に強い振動計測の実現も期待される. 例えば製鉄所は、大型の重機やクレーンが構内を移動しているような環境であり、センサを設置しているプラットフォームそのものが測定対象と同時に振動しているという状況が考えられる. このような場合、レーダで観測される変位は、測定対象の変位に加えてレーダそのものの振動による変位が重畳されたものとなることから、測定対象の変位のみを抽出する手法が求められる.

呼吸や心拍等のバイタルサインの計測においては、レーダの振動の影響を取り除く方法がいくつか提案されている. 例えば、測定点と送信機とは異なる動きの無い位置に受信機を設置し、送信機からの直接波と測定点からの反射波を受信し、2つの受信波に共通する送信機の振動成分を除去する方法が提案されているが [49], 屋外での測定では、固定点を作り出すのが困難な場合が想定される. また、人体を挟み込むように2つのドップラレーダを設置し、2つのレーダの出力をミキシングすることで、複数の振動成分から2つのレーダの共通成分である体全体の動きのみを取り除く方法も提案されているが [50], これは共通成分を除去するアプローチであり、単にこの手法を構造物の振動監視にそのまま適用しただけでは、2つのセンサに共通する構造物の振動成分が除去されてしまい、対象物の振動状態を推定できない. あるいは SAR (Synthetic Aperture Radar)

においては、プラットフォームである航空機の動揺補正法が提案されているが[51]、ターゲットとプラットフォームの両者が同程度のオーダーの振幅・振動数で振動している場合を対象としたものは見当たらない。

そこで本研究では、鉄鋼製造プロセスにおけるマイクロ波計測技術の新たな展開のひとつとして、ミリ波レーダの設備監視への適用について述べるとともに、プラットフォームの振動という課題に対して、2つのCWドップラレーダでターゲットの振動を測定し、ベースバンド信号のクロススペクトルを推定することでプラットフォームの振動を取り除き、ターゲットの振動のみを取り出す方法を提案する[52, 53]。本章では提案法の原理を述べるとともに、本手法に基づいた基礎実験を行い、ターゲットとプラットフォームが正弦的に振動しており、ターゲットの振動数が2つのプラットフォームの振動数の任意の整数倍の和もしくは差と異なる場合には、ターゲットの振幅と振動数を正しく推定できることを確認し、本手法の有効性を示す。

### 3.2 構造物の振動測定を行う上での課題

まず、図 3.1 に示すように、1つのCWドップラレーダでレーダの視線方向に正弦的に振動しているターゲットを測定する場合を考える。

送信波  $T(t)$  を、

$$T(t) = \cos(2\pi ft + \phi_1) \quad (3.1)$$

とする。ただし  $f$  は搬送波の周波数、 $\phi_1$  は初期位相で、振幅は1とした。受信波  $R(t)$  は、ターゲットの視線方向速度  $v$  に依存するドップラシフト  $f_d$  を受け、

$$\begin{aligned} R(t) &= \cos(2\pi ft - 2\pi f_d t + \phi_2) \\ &= \cos\left(2\pi ft - 2\pi \frac{2vf}{c}t + \phi_2\right) \\ &= \cos\left(2\pi ft - \frac{4\pi vt}{\lambda} + \phi_2\right) \\ &= \cos\left(2\pi ft - \frac{4\pi \frac{dx}{dt}t}{\lambda} + \phi_2\right) \\ &= \cos\left(2\pi ft - \frac{4\pi d_t(t)}{\lambda} + \phi_2\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

となる。よって、これらをミキシングしたあとのベースバンド信号は、

$$B(t) = A \cos\left(\frac{4\pi d_t(t)}{\lambda} + \phi\right) \quad (3.3)$$

となる。複素検波の場合、その複素ベースバンド信号は、

$$B(t) = A \exp\left\{j\left(\frac{4\pi d_t(t)}{\lambda} + \phi\right)\right\} \quad (3.4)$$

となる [54, 55]. ここで,  $A$  は振幅,  $\lambda$  は搬送波の波長,  $\phi$  は初期位相とレーダとターゲットの距離によって与えられる位相の和であり, さらにターゲットの振動の振幅を  $m_t$ , 角振動数を  $\omega_t$ , 振動の初期位相を  $\phi_t$  として, ターゲットの変位は  $d_t(t) = m_t \sin(\omega_t t + \phi_t)$  で表されるとした.

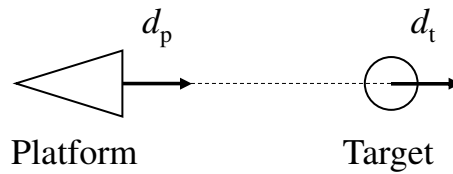


図 3.1 CW ドップラレーダによる振動測定

例えば, ターゲットが振動数 5 Hz, 振幅 1 mm で視線方向に振動しているとして, キャリア周波数を 24 GHz, サンプルング点数を 1024 点, 観測時間を 10 秒としたときのベースバンド信号のフーリエスペクトルを計算し, 図 3.2 に示す. 図 3.2 には, ターゲットの振動数に相当する 5 Hz に大きなピークが現れており, ここから容易にターゲットの振動数を推定することが可能である.

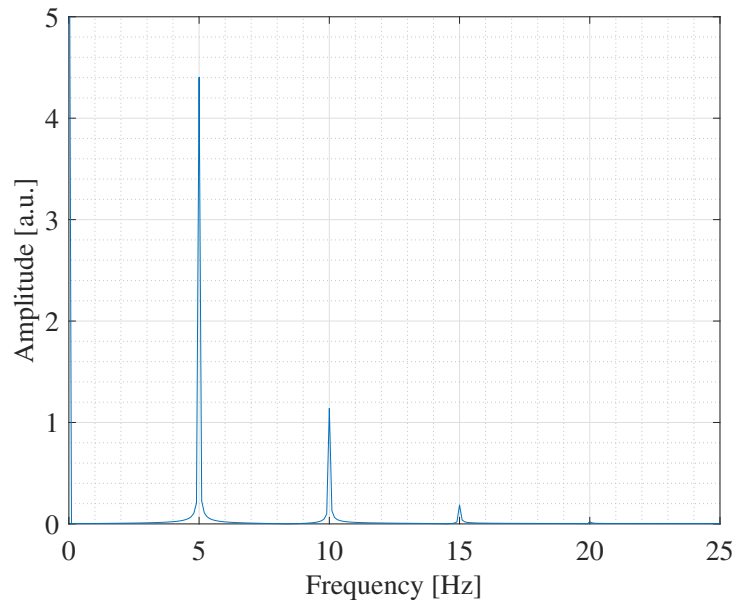


図 3.2 ターゲットのみが振動している場合のフーリエスペクトル

ところで, 前節で述べたように, 製鉄所においては大型の重機やクレーンがセンサの近傍を移動しているような状況が考えられる. この場合, レーダを設置しているプラットフォームにはこれらの移動に伴う振動が外乱として加えられ, レーダで測定される変位は, ターゲットの変位に加えてレーダそのものの振動による変位が重畳されたものとなる. 例えば, プラットフォームが外乱を受けて正弦的に振動しており, プラットフォームの振動の振幅を  $m_p$ , 角振動数を  $\omega_p$ , 振動の初期位相を  $\phi_p$  としたときに, その変位が  $d_p(t) = m_p \sin(\omega_p t + \phi_p)$  で表されるとすると, 複素ベースバンド信号は 2 つの振動成分が含まれたものとなり,

$$B(t) = A \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi d_t(t)}{\lambda} - \frac{4\pi d_p(t)}{\lambda} + \phi \right) \right\} \quad (3.5)$$



と表される。複素ベースバンド信号のフーリエスペクトルから、2つの振動成分の振幅と振動数を推定することは可能であるものの [56, 57], 2つの振動成分のうちどちらがプラットフォームでどちらがターゲットのものであるのかを信号のみから決めることは困難である。

例えば、先の例と同様に振動数 5 Hz, 振幅 1 mm のターゲットの振動に加え、プラットフォームが振動数 3 Hz, 振幅 1 mm で視線方向に振動しているとして、キャリア周波数を 24 GHz, サンプルリング点数を 1024 点, 観測時間を 10 秒としたときのベースバンド信号のフーリエスペクトルを計算し、図 3.3 に示す。図 3.3 には、ターゲットの振動数に相当する 5 Hz に加え、プラットフォームの振動数の 3 Hz 成分、さらにこれらの整数倍の和と差に相当する複数のピークが現れており、ここからどのピークがターゲットの振動を表すものかを識別するのは困難である。

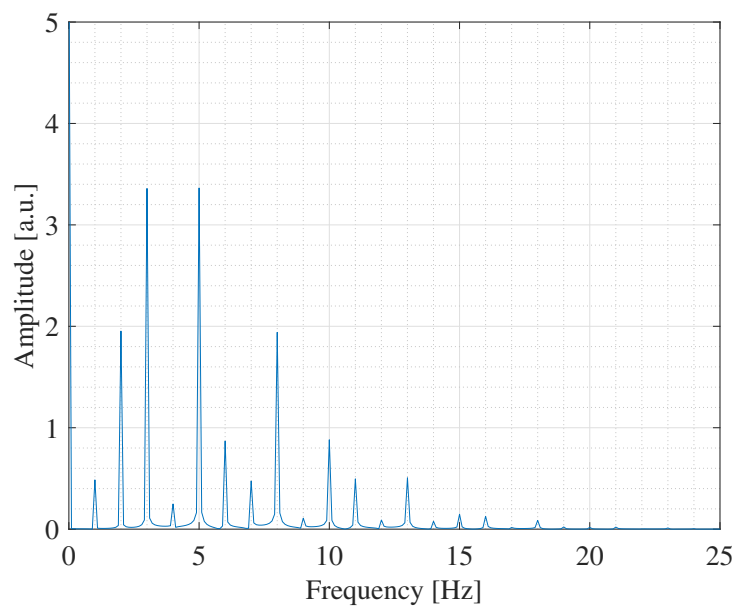


図 3.3 ターゲットとプラットフォームがともに振動している場合のフーリエスペクトル

このような課題に対して、次節では、2つのセンサで得られた信号のクロススペクトルを求めることで、ターゲットのみの振動の情報を抽出する方法を提案する。

### 3.3 CW ドップラレーダによる振動状態の推定と外乱除去の方法

#### 3.3.1 提案手法

前節で述べたように、ターゲットとプラットフォームがともに振動している場合には、単一のベースバンド信号のみからターゲットとプラットフォームの振動を識別するのは困難である。そこで本研究では、図 3.4 に示すように、2つの CW ドップラレーダを用いてターゲットの振幅と振動数を推定する方法を提案する [52, 53]。プラットフォームの振動方向と視線方向の成す角をそれぞれ  $\theta_{p1}, \theta_{p2}$ , ターゲットの振動方向と視線方向の成す角をそれぞれ  $\theta_{t1}, \theta_{t2}$  とする。また、2つのプラットフォーム、およびターゲットの変位はそれぞれ  $d_{p1}(t) = m_{p1} \sin(\omega_{p1}t + \phi_{p1})$ ,  $d_{p2}(t) = m_{p2} \sin(\omega_{p2}t + \phi_{p2})$ ,

$d_t(t) = m_t \sin(\omega_t t + \phi_t)$  で表され、各々正弦的に振動しているとする。このとき、2つのCWドップラレーダの複素ベースバンド信号は各々、

$$\begin{aligned}
 B_1(t) &= A_1 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi \cos \theta_{t1}}{\lambda_1} d_t(t) - \frac{4\pi \cos \theta_{p1}}{\lambda_1} d_{p1}(t) + \phi_1 \right) \right\} \\
 &= A_1 \exp(j\phi_1) \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k \left( \frac{4\pi m_t \cos \theta_{t1}}{\lambda_1} \right) \exp \{ jk (\omega_t t + \phi_t) \} \\
 &\quad \times \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l \left( \frac{4\pi m_{p1} \cos \theta_{p1}}{\lambda_1} \right) \exp \{ -jl (\omega_{p1} t + \phi_{p1}) \}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 B_2(t) &= A_2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi \cos \theta_{t2}}{\lambda_2} d_t(t) - \frac{4\pi \cos \theta_{p2}}{\lambda_2} d_{p2}(t) + \phi_2 \right) \right\} \\
 &= A_2 \exp(j\phi_2) \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m \left( \frac{4\pi m_t \cos \theta_{t2}}{\lambda_2} \right) \exp \{ jm (\omega_t t + \phi_t) \} \\
 &\quad \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left( \frac{4\pi m_{p2} \cos \theta_{p2}}{\lambda_2} \right) \exp \{ -jn (\omega_{p2} t + \phi_{p2}) \}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

と表すことができる。ここで  $k, l, m, n$  は整数であり、 $J_n$  は第1種  $n$  次のベッセル関数である。

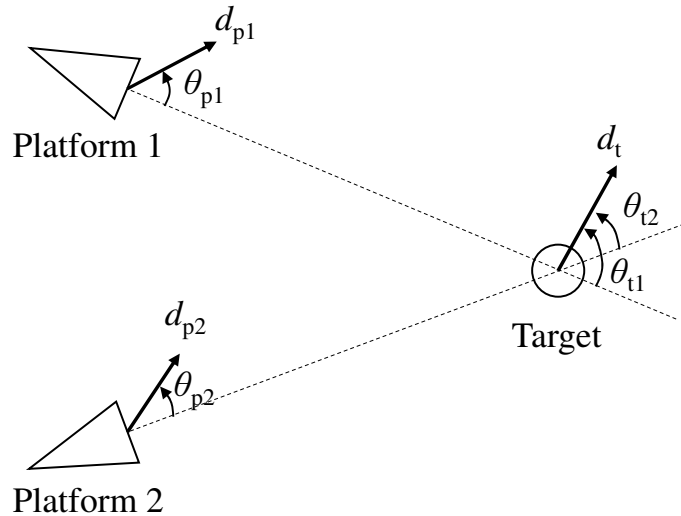


図 3.4 2つのCWドップラレーダによる振動測定

ここで、2つのCWドップラレーダが十分離れていれば、これらに加わる振動外乱は異なる時間に異なる振幅、あるいは異なる振動数で現れると仮定できる。したがって、2つのCWドップラレーダで得られる2つの複素ベースバンド信号のうち、共通する振動成分がターゲットの振動を表すものだと考えることができる。共通する成分を取り出すための方法には、2つの信号のクロススペクトルを推定する方法がある。クロススペクトルは図 3.5 に示すように、2つの複素ベースバンド信号の相互相関関数のフーリエ変換、もしくは2つの複素ベースバンド信号のフーリエスペクトル同士の積  $\mathcal{F}^*\{B_1(t)\}\mathcal{F}\{B_2(t)\}$  として計算される。ただし  $\mathcal{F}$  はフーリエ変換を表し、 $*$  は

複素共役を表す。

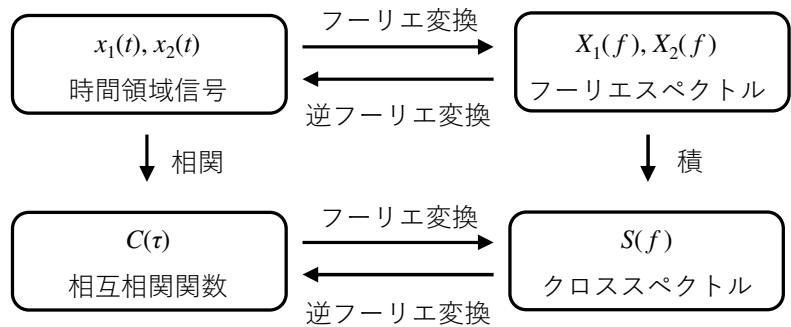


図 3.5 時間領域信号とクロススペクトルの関係

### 振動数の推定方法

例えば、2つのドップラレーダを、ターゲットを挟み込むように設置し、ターゲットが振動数 5 Hz、プラットフォーム 1 が 3 Hz、プラットフォーム 2 が 4 Hz、振幅はいずれも 1 mm で振動しており、それぞれの振動方向と視線方向が一致しているとした場合の 2つの複素ベースバンド信号のフーリエスペクトルを図 3.6 及び図 3.7 に示す。またこれらの積からクロススペクトルを計算した結果を図 3.8 に示す。キャリア周波数は 24 GHz、観測時間は 10 秒、測定点数は 1024 点とした。図 3.6 及び図 3.7 のフーリエスペクトルにはターゲットの振動数の 5 Hz 成分以外に、プラットフォームの振動数やこれらの整数倍の和・差の成分も現れ、ターゲットとプラットフォームの振動を識別することはできない。一方、図 3.8 のクロススペクトルではターゲットの振動数である 5 Hz に大きなピークが立っている。このことを利用すればプラットフォームの振動を取り除き、ターゲットのみの振動数を推定することが可能となる。

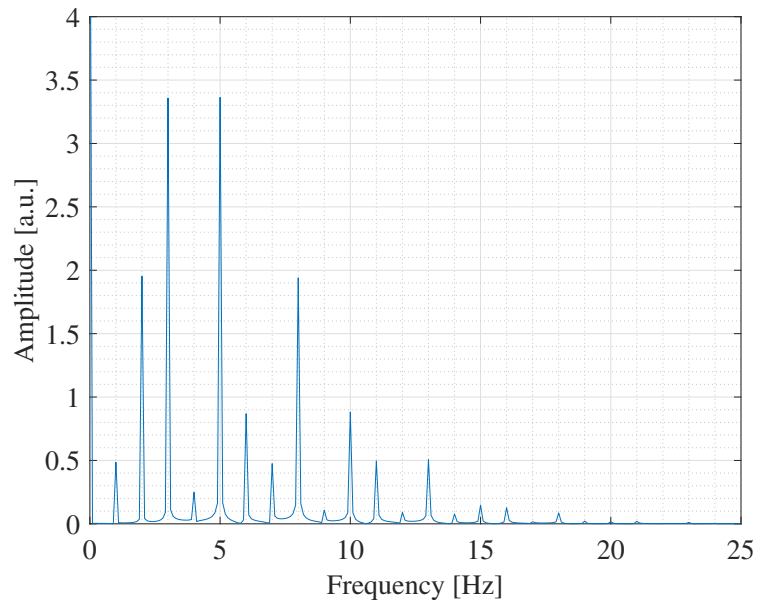


図 3.6 プラットフォーム 1 のフーリエスペクトル

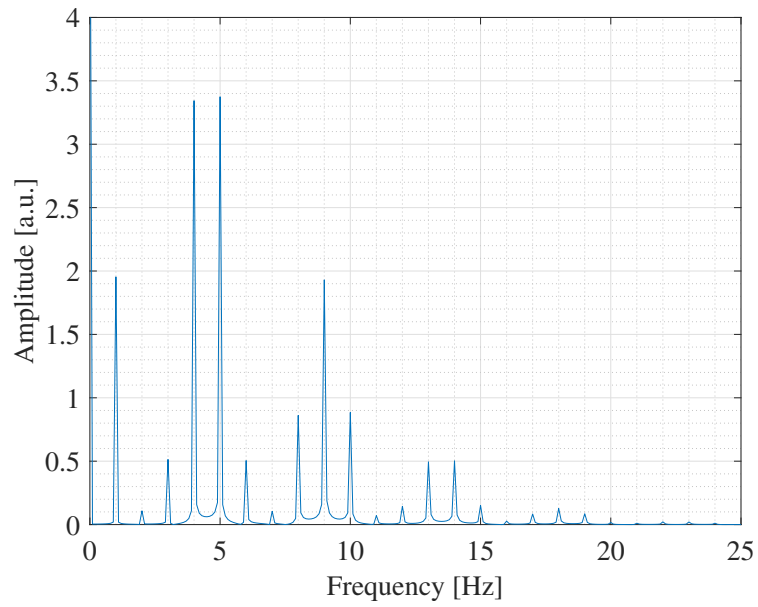


図 3.7 プラットフォーム 2 のフーリエスペクトル

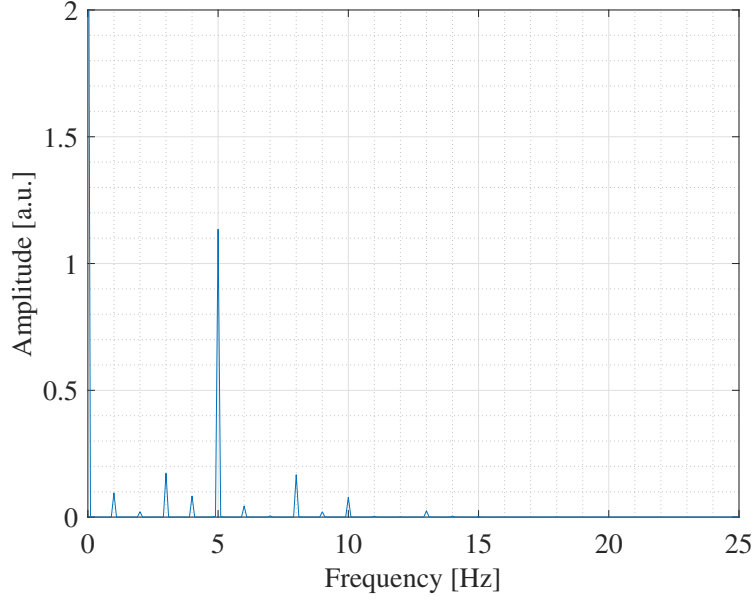


図 3.8 クロススペクトル

#### 振幅の推定方法

次にターゲットの振幅を推定する方法を述べる．ターゲットの振動を表すクロススペクトルのピークの大きさ  $P_1$  は，式 (3.6)，式 (3.7) において  $k = 1$ ， $l = 0$ ， $m = 1$ ， $n = 0$  の場合の，式 (3.6) と式 (3.7) の振幅の積に相当し，

$$\begin{aligned}
 P_1 = & A_1 A_2 J_1 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1} \right) J_0 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_{p1} \cos \theta_{p1} \right) \\
 & \times J_1 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2} \right) J_0 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_{p2} \cos \theta_{p2} \right) \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

と表される．式 (3.8) にはターゲットの振幅とプラットフォームの振幅がともに含まれており， $P_1$  のみからターゲットの振幅を推定するのは困難である．そこで，ターゲットの振動数の 2 倍の振動数に相当する 2 次のピークも利用することを考える．2 次のピークの大きさ  $P_2$  は，式 (3.6)，式 (3.7) において  $k = 2$ ， $l = 0$ ， $m = 2$ ， $n = 0$  の場合の，式 (3.6) と式 (3.7) の振幅の積に相当し，

$$\begin{aligned}
 P_2 = & A_1 A_2 J_2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1} \right) J_0 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_{p1} \cos \theta_{p1} \right) \\
 & \times J_2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2} \right) J_0 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_{p2} \cos \theta_{p2} \right) \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

と表される．これらの比  $P_1/P_2$  を計算すると，式 (3.10) が得られる．

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{J_1 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1} \right) J_1 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2} \right)}{J_2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1} \right) J_2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2} \right)} \quad (3.10)$$

式 (3.10) にはプラットフォームの振動は含まれず、ターゲットの振動に関する情報のみが含まれているため、一方のプラットフォームのキャリア周波数を変えて式 (3.10) を取得すれば、未知パラメータであるターゲットの視線方向の振幅  $m_t \cos \theta_{t1}$  および  $m_t \cos \theta_{t2}$  を、それぞれ最小二乗法等で推定することも可能である。例えば、図 3.8 に示すプラットフォーム 1 とプラットフォーム 2 のキャリア周波数が共に 24 GHz の場合に、クロススペクトルの 5 Hz 成分と 10 Hz 成分の比から式 (3.10) を計算すると、

$$\frac{J_1(1005.3m_t \cos \theta_{t1}) J_1(1005.3m_t \cos \theta_{t2})}{J_2(1005.3m_t \cos \theta_{t1}) J_2(1005.3m_t \cos \theta_{t2})} = 14.57 \quad (3.11)$$

となる。プラットフォーム 1 のキャリア周波数を 25 GHz、プラットフォーム 2 のキャリア周波数を 24 GHz とした場合には、式 (3.10) は

$$\frac{J_1(1047.2m_t \cos \theta_{t1}) J_1(1005.3m_t \cos \theta_{t2})}{J_2(1047.2m_t \cos \theta_{t1}) J_2(1005.3m_t \cos \theta_{t2})} = 13.92 \quad (3.12)$$

となることから、式 (3.11) と式 (3.12) の連立方程式を満たすターゲットの視線方向の振幅  $m_t \cos \theta_{t1}$  を最小二乗法で推定すると、推定値として 1.09 mm が得られる。同様に、プラットフォーム 1 のキャリア周波数を 24 GHz、プラットフォーム 2 のキャリア周波数を 26 GHz とした場合には、式 (3.10) は

$$\frac{J_1(1005.3m_t \cos \theta_{t1}) J_1(1089.1m_t \cos \theta_{t2})}{J_2(1005.3m_t \cos \theta_{t1}) J_2(1089.1m_t \cos \theta_{t2})} = 13.35 \quad (3.13)$$

となり、式 (3.11) と式 (3.13) の連立方程式よりターゲットの視線方向の振幅  $m_t \cos \theta_{t2}$  の推定値は 0.99 mm が得られる。

次に、ターゲット、プラットフォーム 1、2 の振動数をそれぞれ 5、3、4 Hz、キャリア周波数を 22 から 26 GHz とし、SN 比が 10 dB となるようにノイズを加えた上、ターゲットの視線方向振幅が 1、2、3 mm の場合の式 (3.10) を計算した。さらに、それぞれターゲットの振幅をパラメータとして、最小二乗法で式 (3.10) をフィッティングした。結果を図 3.9、図 3.10、図 3.11 に示す。ここから得られる振幅の推定値はそれぞれ 0.9925 mm、1.9919 mm、2.9931 mm であり、それぞれ振幅を正しく推定できていることが判る。

以上述べたように、CW ドップラレーダの場合、プラットフォームの振動外乱の存在下では、単一のベースバンド信号からターゲットの振動数と振幅を直接推定するのは困難であるが、異なる位置に設置され、各々異なる外乱を受ける 2 つのレーダを用いることができれば、ターゲットの振動数が 2 つのプラットフォームの振動数の任意の整数倍の和もしくは差と異なるという条件が成り立つ場合には、2 つのベースバンド信号のクロススペクトルを用いることで、ターゲットのみの振動数を推定することが可能である。また、クロススペクトルの 1 次と 2 次のピークを用いることで式 (3.10) に基づいてターゲットのみの振幅を推定することが可能である。ターゲット、プラットフォームの振動が正弦的でない場合でも、任意の振動は複数の振動成分の重ね合わせで記述できることを考慮すれば、同様のことが成り立つと考えられる。

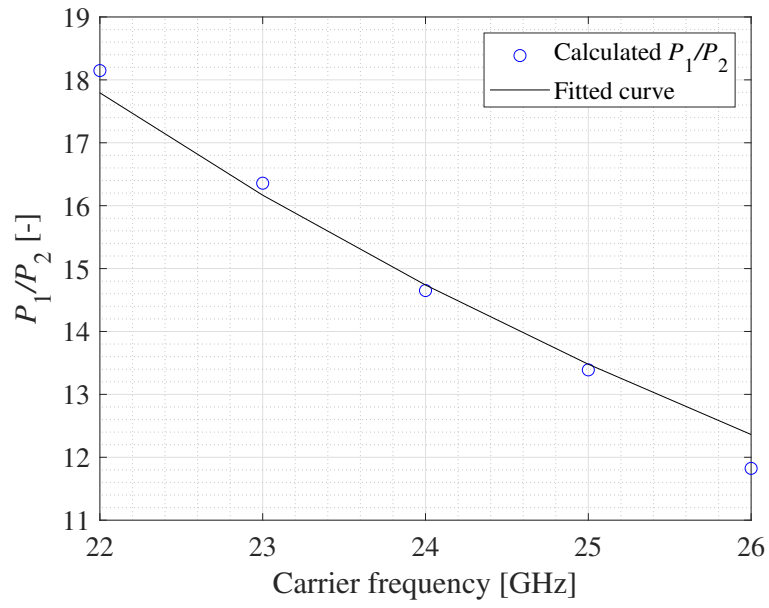


図 3.9 振幅が 1 mm の場合の式 (3.10) の計算結果

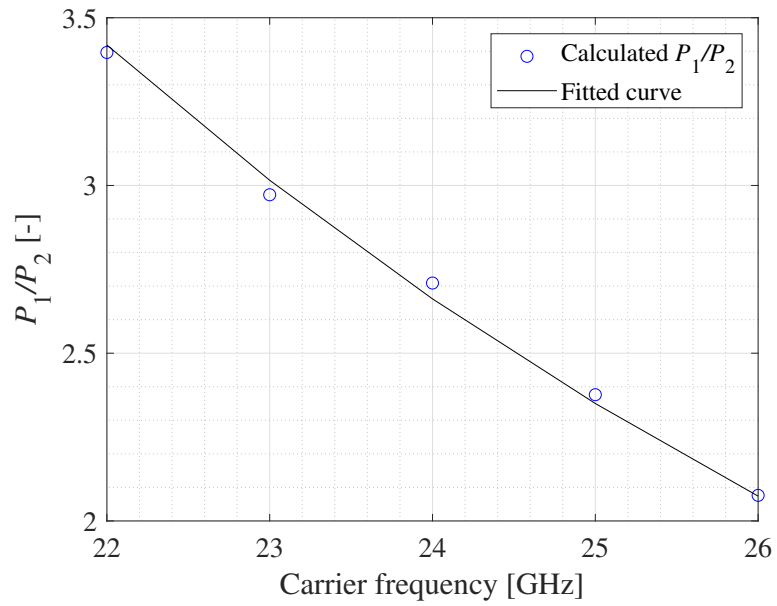


図 3.10 振幅が 2 mm の場合の式 (3.10) の計算結果

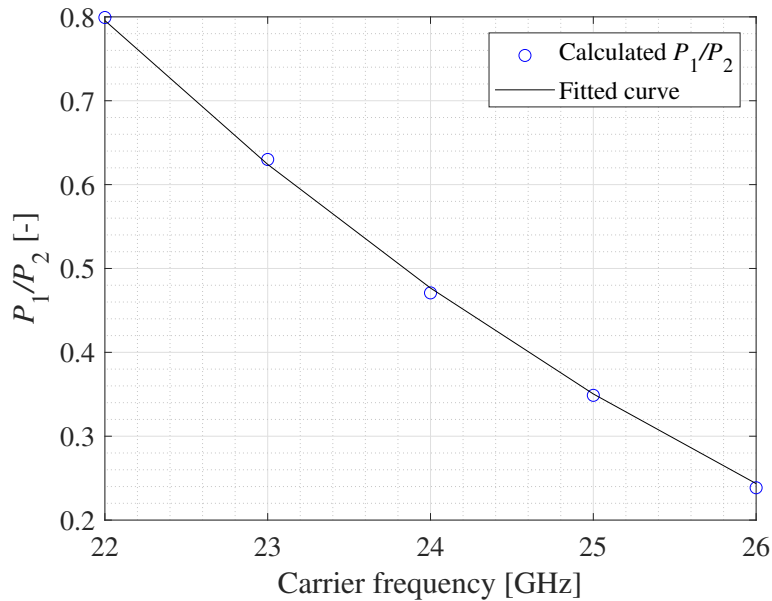


図 3.11 振幅が 3 mm の場合の式 (3.10) の計算結果

### 3.3.2 最適なキャリア周波数の探索

ターゲットの振動を表すクロススペクトルのピークの大きさは、前節で述べた通り、式 (3.8) で与えられる。ターゲットの振動を抽出するには、クロススペクトルのうちターゲットを表すピークは、他のピークやノイズに比べて十分大きいことが望ましい。式 (3.8) によれば、ターゲットの振動を表すクロススペクトルのピークの大きさはターゲット、及びプラットフォームの振幅と CW ドップラレーダの搬送波の波長の比で決められることから、本節では最適なキャリア周波数の探索を行った。

#### ターゲットのみが振動している場合

簡単のため、まずはターゲットのみが振動しているとし、振動方向と 2 つのレーダの視線方向は一致していると仮定する。また、 $A_1, A_2$  はともに 1 で、 $\lambda_1 = \lambda_2$  とする。このとき式 (3.10) は、 $\left\{ J_1 \left( \frac{4\pi m_t}{\lambda_1} \right) \right\}^2$  となり、第 1 種 1 次のベッセル関数が最大点の近傍となるように、想定される  $m_t$  のおおよその大きさに応じて、 $\lambda_1$  を決めれば良いと考えられる。このよう点は  $\frac{m_t}{\lambda_1} = 0.1465$  付近である。また、クロススペクトルのピークの大きさはターゲットの振動数には依存しないため、ターゲットの振動数は最適なキャリア周波数の選定には影響しないと考えられる。このことを確かめるため、ターゲットの振幅と振動数が表 3.1 に示す 3 つの場合に、それぞれのキャリア周波数を変えた場合のクロススペクトルを計算した。このとき、2 つの CW ドップラレーダのキャリア周波数は同一とした。結果を図 3.12, 図 3.13, 図 3.14 に示す。

図 3.12(条件 1) におけるクロススペクトルのピークは、ターゲットの振動数である 5 Hz においてキャリア周波数が 44 GHz のとき最大となり、 $\frac{m_t}{\lambda_1} = 0.1465$  から計算される結果と一致する。図 3.14(条件 3) もターゲットの振動数が変わったため、クロススペクトルのピークの現れる周波数



表 3.1 計算条件

条件	1	2	3
$m_t$ [mm]	1	5	1
$f_t$ [Hz]	5	5	10

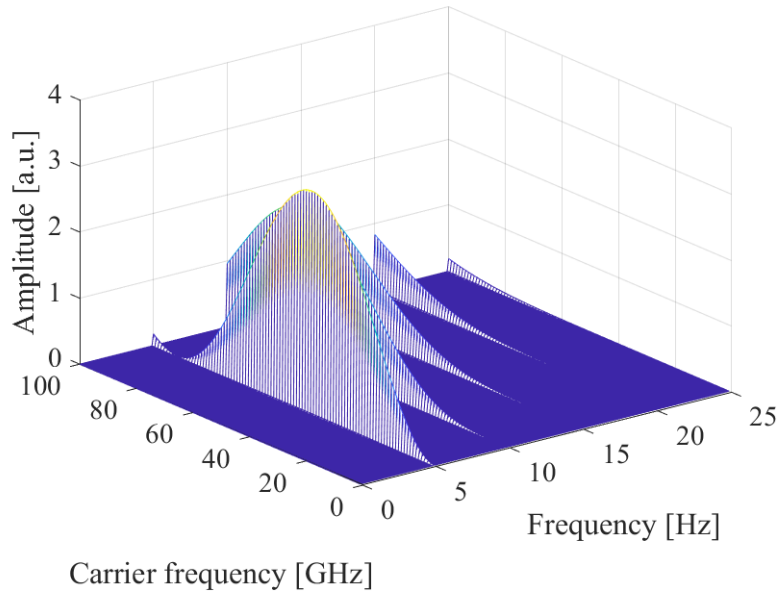


図 3.12 キャリア周波数に対するクロススペクトル (条件 1)

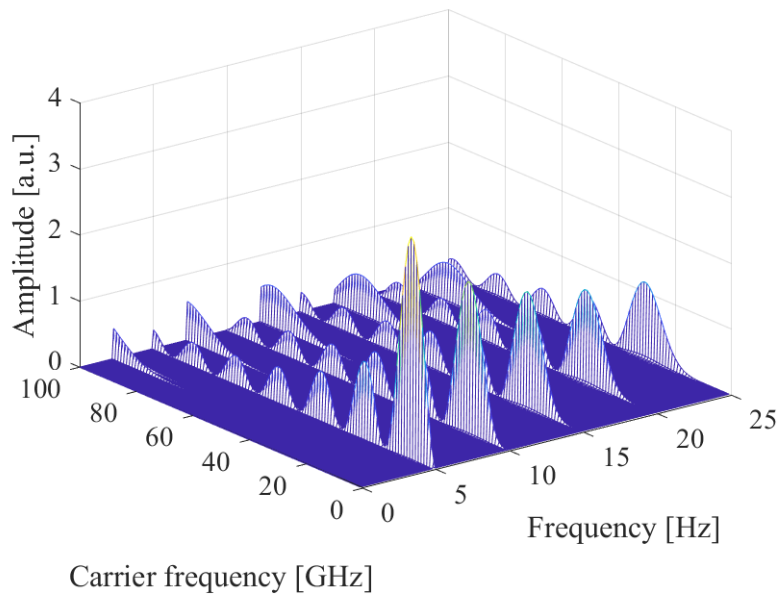


図 3.13 キャリア周波数に対するクロススペクトル (条件 2)

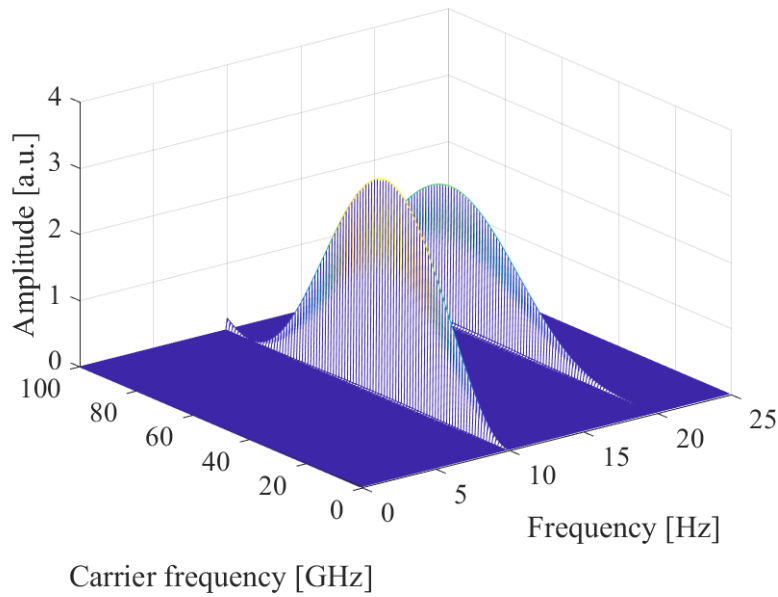


図 3.14 キャリア周波数に対するクロススペクトル (条件 3)

が 10 Hz に移動しただけであり，キャリア周波数の最適値は同じく 44 GHz である．図 3.13(条件 2) の場合，ターゲットの振幅が 5 mm であるのに対応して，クロススペクトルのピークはキャリア周波数が 9 GHz のとき最大となった．これも  $\frac{m_t}{\lambda_1} = 0.1465$  から計算される結果と一致する．以上より，ターゲットのみが振動している場合には，第 1 種 1 次のベッセル関数が最大点の近傍となるように，すなわち  $\frac{m_t}{\lambda_1} = 0.1465$  となるように，事前に想定されるターゲットの振幅に応じてキャリア周波数を選べばよいことが確認できた．また，ターゲットの振動数はキャリア周波数の選択には影響を与えないことも確認できた．

ターゲットのみが振動しており，視線方向と振動方向が異なる場合には，式 (3.8) より，

$$J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda_1}m_t \cos \theta_{t1}\right) J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda_2}m_t \cos \theta_{t2}\right)$$

が最大となるようにキャリア周波数を選べばよい．つまり，監視すべきターゲットの振動方向と振幅に応じてセンサの視線方向を決定し，さらに  $\frac{m_t}{\lambda_1} \cos \theta_{t1} = \frac{m_t}{\lambda_2} \cos \theta_{t2} = 0.1465$  付近となるように，キャリア周波数を各々決定すれば良い．したがって，ターゲットの振動方向に対してセンサの視線方向が傾いている場合には，最適なキャリア周波数は高周波数側にシフトする．

#### ターゲットとプラットフォームがともに振動している場合

ターゲットとプラットフォームがともに振動している場合には，式 (3.8) の通り，クロススペクトルのピークの大きさにプラットフォームの振動に起因する 0 次ベッセル関数が掛かってくる．クロススペクトルがターゲットの振動数でピークを持つためには，少なくともこれらの 0 次ベッセ

ル関数が0とならないようにキャリア周波数を選ぶ必要がある。すなわち、

$$J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda_1}m_{p1}\cos\theta_{p1}\right) \neq 0 \quad (3.14)$$

$$J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda_2}m_{p2}\cos\theta_{p2}\right) \neq 0 \quad (3.15)$$

を満たす必要がある。

第1種0次のベッセル関数  $J_0(x)$  のゼロ点は、 $x = 2.405, 5.520, \dots$  に現れる。また、 $x = 0$  で最大値を取る。したがって、 $\frac{4\pi}{\lambda_1}m_{p1}\cos\theta_{p1} < 2.405$ ,  $\frac{4\pi}{\lambda_2}m_{p2}\cos\theta_{p2} < 2.405$  を満たす範囲で、プラットフォームの振動方向と振幅に応じてキャリア周波数を決めるのが望ましく、次いで  $2.405 < \frac{4\pi}{\lambda_1}m_{p1}\cos\theta_{p1} < 5.520$ ,  $2.405 < \frac{4\pi}{\lambda_2}m_{p2}\cos\theta_{p2} < 5.520$  を満たすように決めれば良い。

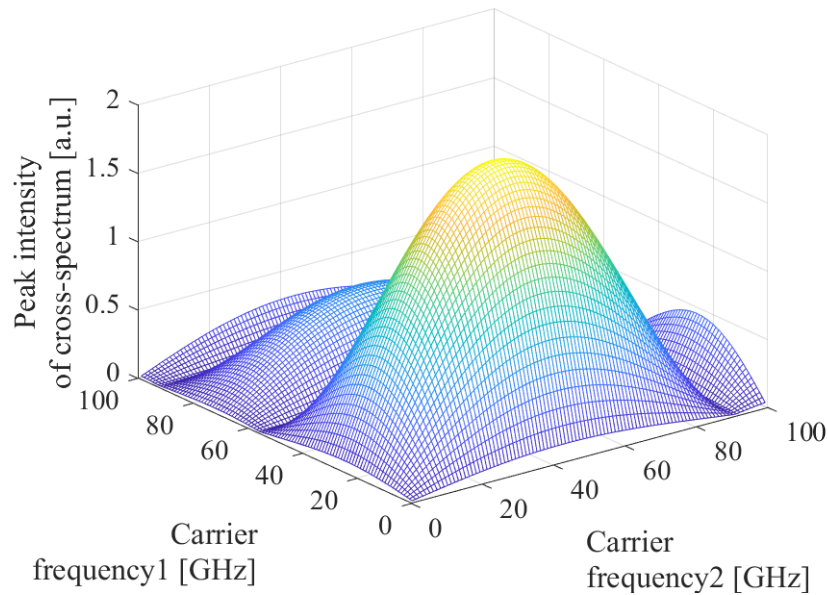


図 3.15 キャリア周波数に対するクロススペクトルのピーク強度 ( $m_t = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p2} = 0 \text{ mm}$ )

以上を踏まえ、レーダの視線方向と振動方向が一致すると仮定して、ターゲット、プラットフォームの振幅に対して、クロススペクトルのピーク強度が最大となるキャリア周波数を探索した。 $m_t = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p2} = 0 \text{ mm}$  のときの、クロススペクトルのターゲットの振動に相当するピークの大きさを、各々のプラットフォームのキャリア周波数を変えて計算した結果を図 3.15 に示す。プラットフォーム 2 は振動していないため、ピークが最大となるキャリア周波数 2 は 44 GHz である。一方、プラットフォーム 1 は振動しているため、ピークの最大値を与えるキャリア周波数 1 は  $J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda_1}m_{p1}\cos\theta_{p1}\right)$  分だけ低周波数側にシフトし、26 GHz となった。同様に、 $m_t = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p2} = 1 \text{ mm}$  とした場合 (図 3.16) には、キャリア周波数 2 の最適値も 26 GHz となる。

以上述べたように、本節では測定に用いる CW ドップラレーダの最適なキャリア周波数について

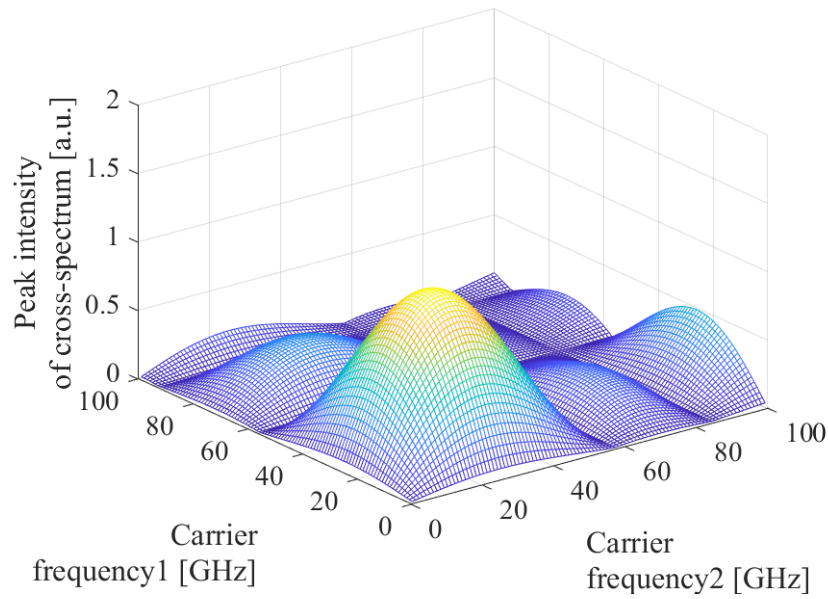


図 3.16 キャリア周波数に対するクロススペクトルのピーク強度 ( $m_t = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $m_{p2} = 1 \text{ mm}$ )

て検討した．クロススペクトルにおいてターゲットの振動数を表すピークの大きさはベッセル関数で決まり，予想されるターゲット，プラットフォームの振幅と，視線方向と振動方向の成す角から，ベッセル関数のゼロ点近傍を避けつつ，極力ピークが大きくなるような周波数を使うべきであるとの指針を得た．そのような周波数は，例えばターゲット，プラットフォームの視線方向の振幅がともに  $1 \text{ mm}$  程度であれば， $26 \text{ GHz}$  付近となる．

### 3.3.3 電波の広がりの影響

ここまでは，アンテナから放射された電波がその視線方向上のターゲットの1点から反射されると仮定して検討を進めてきた．実際には，アンテナから放射される電波は一定の広がりを持つため，得られる受信信号は，ビーム内に存在する複数の反射点からの反射波の足し合わせになる．本節では，ビームの広がりがターゲットの振動の振幅と振動数の推定に与える影響を検討した [58]．

まず，図 3.17 に示すようにターゲットが十分大きく一様に振動している状況を仮定する．図 3.17 には，簡単のため一方のプラットフォームのみを記載した．ターゲット・プラットフォームの振動方向と視線方向の成す角は図 3.4 と同様に与える．ターゲット上のレーダの視線方向と一致する点を原点とし，レーダから原点までの距離を  $R_1$  とする．このときの，ターゲット上の点  $(x, y)$  からの反射を考える．レーダと点  $(x, y)$  を結ぶ線分と視線方向の成す角を  $\theta$  とおくと，点  $(x, y)$  での変位は，

$$d(x, y) = \frac{d_t \cos \theta_{t1}}{\cos \theta} \quad (3.16)$$

と与えられる。この点からの反射によって与えられるベースバンド信号は、

$$B_1(t, x, y) = \exp j \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{R_1 + d_t \cos \theta_{t1} - d_{p1} \cos \theta_{p1}}{\cos \theta} \right) \right\} \quad (3.17)$$

となる。ただし、

$$\cos \theta = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + x^2 + y^2}} \quad (3.18)$$

である。

各点の反射信号の重ね合わせにより得られるベースバンド信号は、送信と受信の両方の影響を考慮すると、式 (3.17) をアンテナの放射パターンで決まる強度分布  $I_1(x, y)$  の 2 乗で重み付き平均したものとなる。ターゲットの RCS(Radar Cross-Section) が一様だと仮定すると、重み付き平均されたベースバンド信号は、

$$B_1(t) = \iint_S I_1^2(x, y) B_1(t, x, y) dx dy \quad (3.19)$$

となる。また、もう一方のプラットフォームについても同様である。

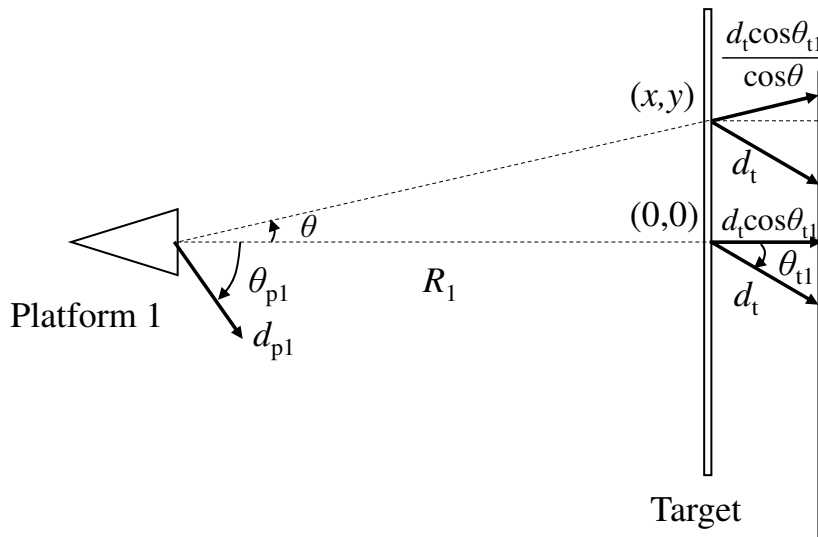


図 3.17 電波の広がりを考慮した場合の振動測定

長辺が  $a$ 、短辺が  $b$  の矩形ホーンアンテナからの放射パターンを考えると、方位角方向は、

$$f(u) = \frac{2a}{\pi} \frac{\cos u}{1 - \left(\frac{2u}{\pi}\right)^2} \quad (3.20)$$

$$u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \psi \quad (3.21)$$

仰角方向は,

$$f(v) = b \frac{\sin v}{v} \quad (3.22)$$

$$v = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \phi \quad (3.23)$$

となる. これらの半値全幅を変えた場合に式 (3.19) で表されるベースバンド信号からクロススペクトルを計算し, ターゲットの振幅と振動数の推定を行った. キャリア周波数は 24 GHz, ターゲットと 2 つのプラットフォームの振動数はそれぞれ 5 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 振幅はいずれも 1 mm, それぞれの振動方向と視線方向は一致しているとした. 式 (3.19) の積分範囲は,  $x, y$  とも -10 m から 10 m とした. また, 基準距離は  $R_1 = R_2 = 1$  m とした.

半値全幅が 0 度, 15 度, 30 度, 45 度, 60 度の場合のクロススペクトルの計算結果を図 3.18 から図 3.22 に示す.

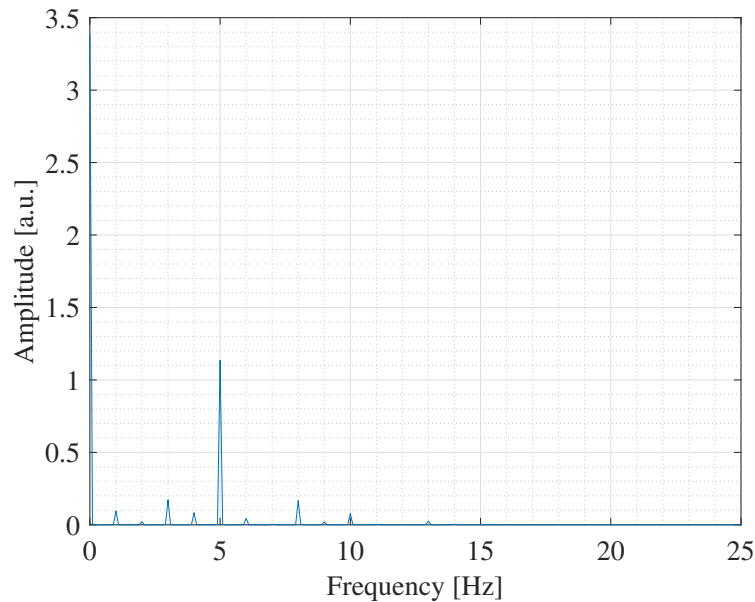


図 3.18 半値全幅が 0 度の場合のクロススペクトル

半値全幅が大きくなるにつれて, 5 Hz 以外のピークが相対的に徐々に大きくなる傾向が確認できるが, 半値全幅が 0 度から 60 度までのいずれにおいてもクロススペクトルの 5 Hz 成分が最も大きく, ターゲットの振動数は正しく推定できる.

次に, 得られたクロススペクトルからターゲットの振幅推定を行った. 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定値を図 3.23 に示す. また, 真値からのずれの絶対値を図 3.24 に示す. 半値全幅が 40 度を超えると, 斜め反射成分の影響を受け振幅の推定誤差が大きくなることが判る.

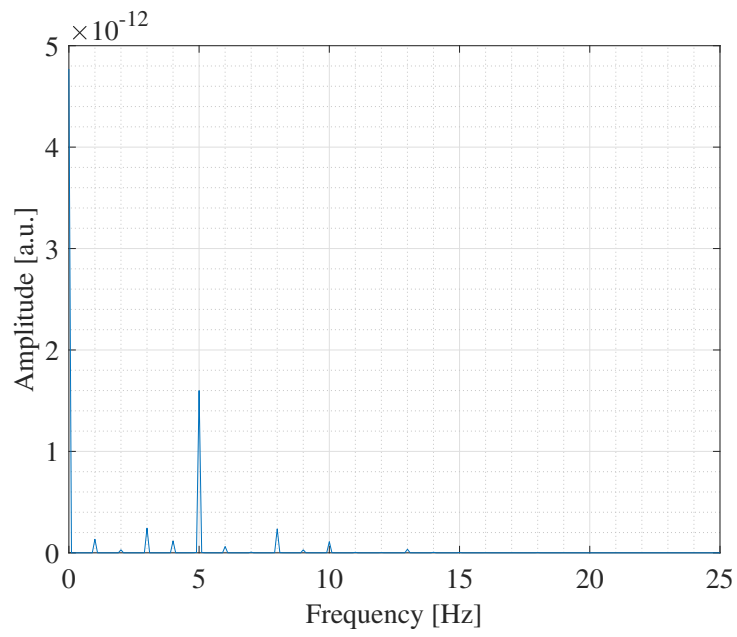


図 3.19 半値全幅が 15 度の場合のクロススペクトル

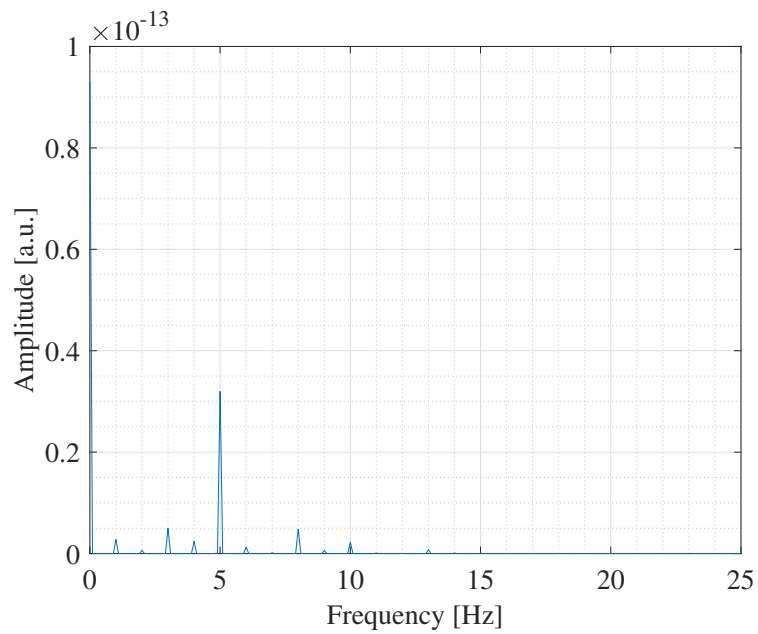


図 3.20 半値全幅が 30 度の場合のクロススペクトル

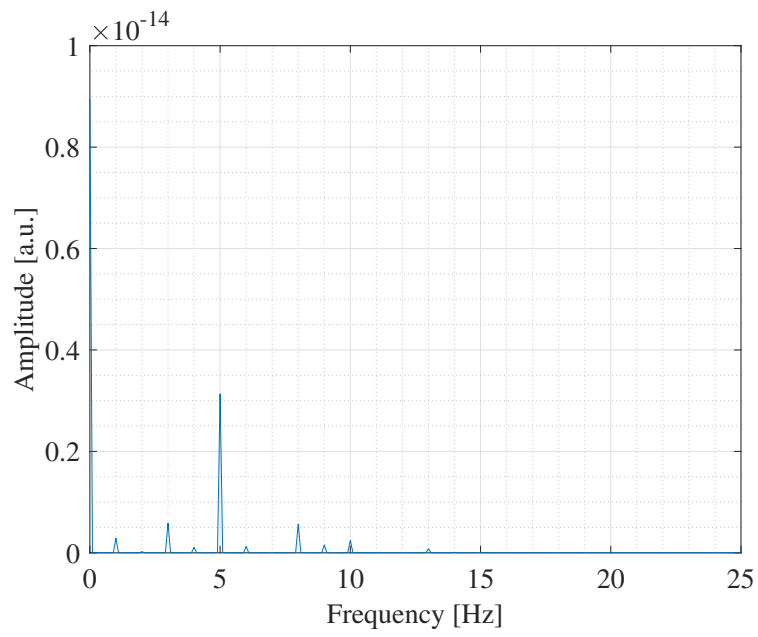


図 3.21 半値全幅が 45 度の場合のクロススペクトル

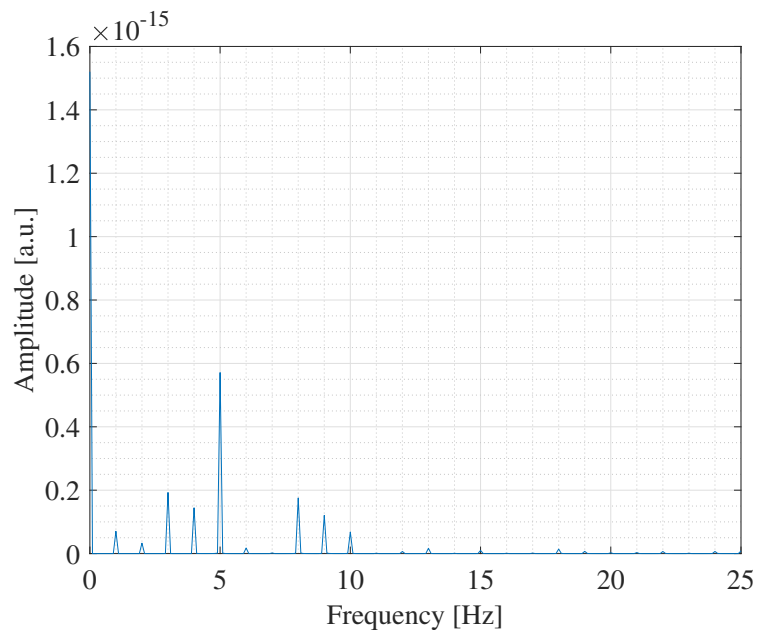


図 3.22 半値全幅が 60 度の場合のクロススペクトル



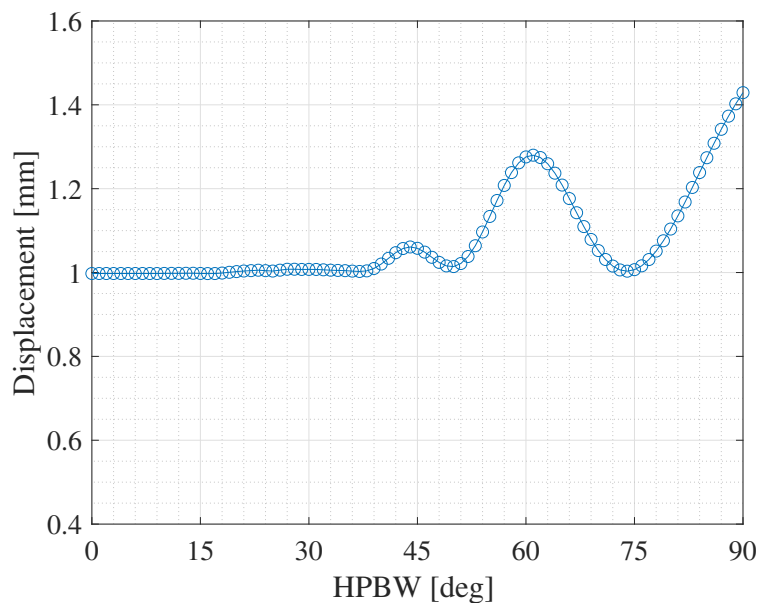


図 3.23 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定値

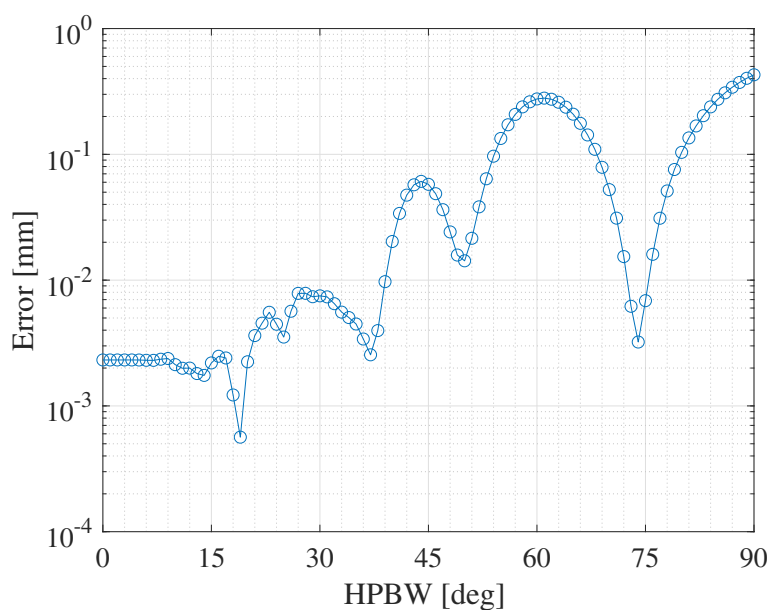


図 3.24 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定誤差

以上述べたように、本節では、電波の広がり を考慮した場合のベースバンド信号を定式化し、振幅と振動数推定に与える影響を検討した。振動数、振幅ともに、半値全幅が40度程度までは概ね正しく推定できることが分かった。したがって、測定に用いるアンテナは指向性が40度以下のものを選定する必要があるが、一般的なホーンアンテナ等を用いればこの制約は容易に達成できると考えられる。ただし、これらの結果は基準距離を1mとして得たものである。距離が離れるほど式(3.19)の積分範囲は広がるため、振幅の推定誤差が大きくなることが想定される。距離に応じてより高い指向性のアンテナを用いるのが望ましい。

### 3.4 原理検証と精度の評価

#### 3.4.1 実験による提案手法の原理検証

提案手法の原理を検証するため、CW ドップラレーダを試作して実験を行った。装置構成を図 3.25 に示す。送信出力は 10 dBm とした。レーダの前方 500 mm に、縦 80 mm、横 55 mm、厚さ 10 mm のアルミ板を設置し、振動モータを接触させて振動数 50 Hz で振動を与えた。まず、プラットフォームに振動を与えず、従来法 [54] でターゲットの振動数と振幅を推定し、本手法との比較対象とした。次に、1 台のセンサを用いて 2 つの異なる外乱を与えられたセンサの出力を模擬するため、レーダを手で叩いて振動させた場合と、振動モータを接触させて振動させた場合の 2 回の測定を行った。キャリア周波数は 24 GHz とした。CW ドップラレーダの I、Q チャネルのベースバンド出力は、AD 変換機でサンプリングした。サンプリング周波数は 8 kHz、サンプリング点数は 8192 点とした。レーダの制御とデータの取得は AD 変換機に接続したコンピュータ上で、Labview で製作したソフトウェアを用いて行った。この実験を、ターゲットの振動の振幅を変えて 2 回行った。

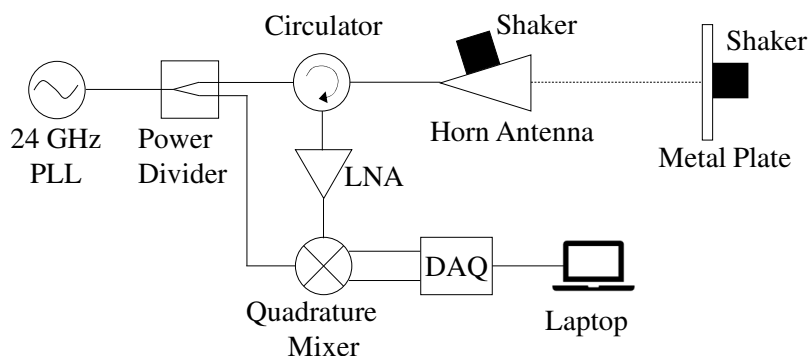


図 3.25 実験装置のブロック図

#### 1 回目の実験結果

ターゲットのみを振動させた場合のフーリエスペクトルを図 3.26 に示す。フーリエ変換の際には、Hanning の窓関数を掛けた上、サンプリング点数の 8 倍のデータ長になるようにゼロパディングを行った。ターゲットの振動数である 50 Hz に近い 49.93 Hz にピークが現れ、その 2 倍と 3 倍の振動数にもピークが確認できる。ここから従来法 [54] を用いてターゲットの振幅を推定した結果、 $439.9 \mu\text{m}$  であった。

次に、外乱を与えた場合のフーリエスペクトルをそれぞれ図 3.27、図 3.28 に示す。いずれもターゲットの振動数である 50 Hz 以外に複数のピークが現れ、フーリエスペクトルのみからターゲットの振動数と振幅を推定するのは困難である。

プラットフォームに外乱を与えた場合、すなわち図 3.27、図 3.28 のフーリエスペクトルから、クロススペクトルを求めた結果を図 3.29 に示す。ターゲットの振動数付近の 49.93 Hz のピークが強く残ることから、振動数の推定が可能であることが確認できた。また、提案法に基づいて 1 次

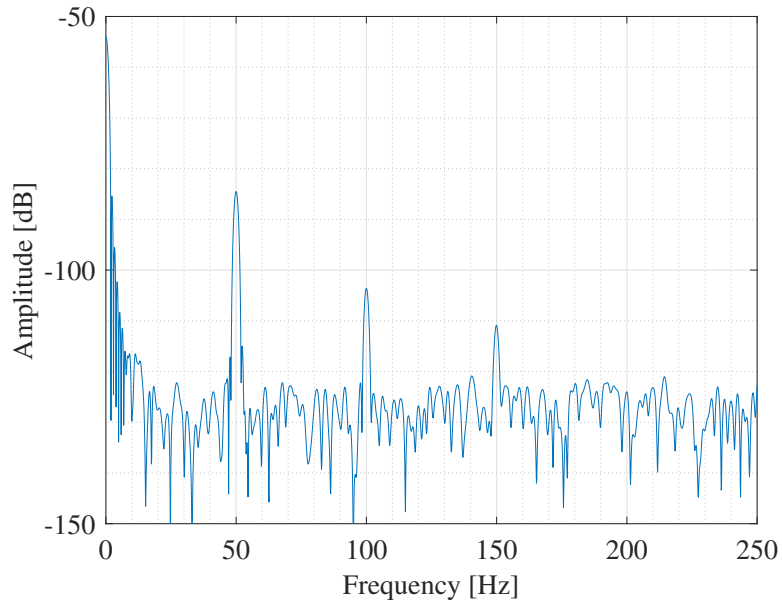


図 3.26 ターゲットのみが振動している場合のフーリエスペクトル

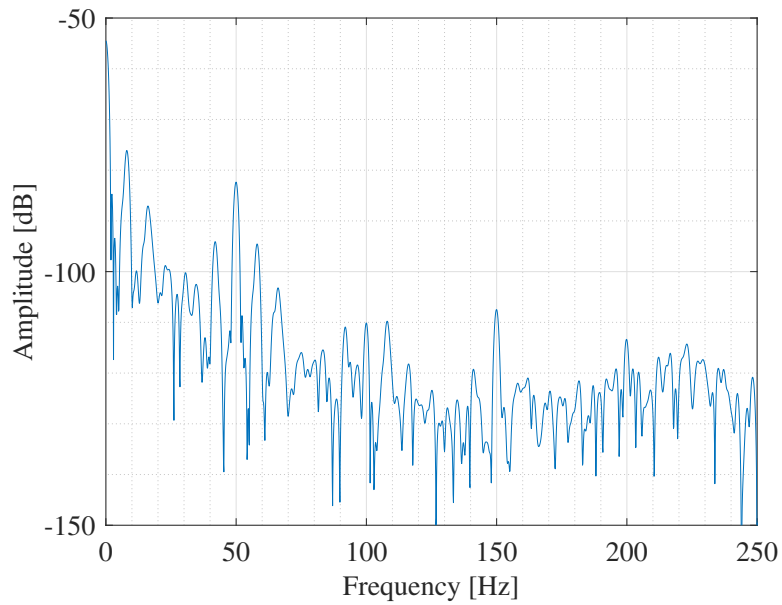


図 3.27 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)

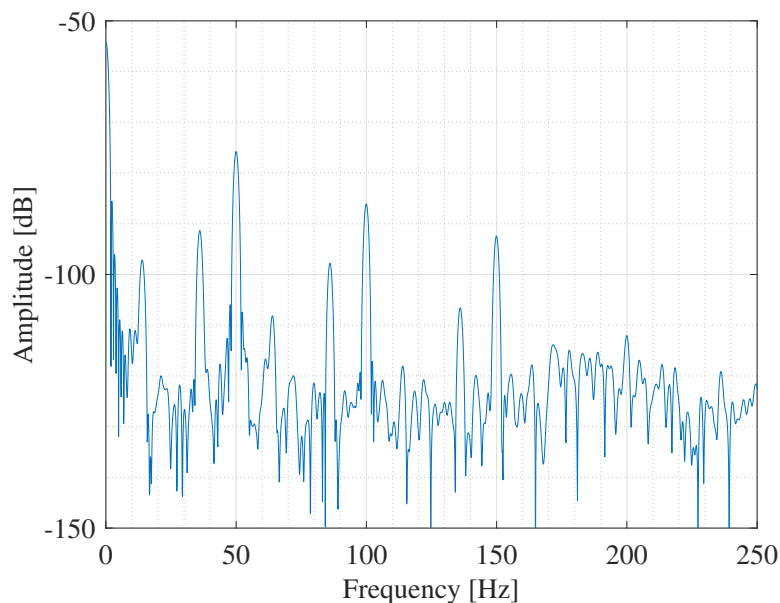


図 3.28 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

のピークと 2 次のピークの強度比を計算し，振幅を推定した結果は  $440.5 \mu\text{m}$  となり，外乱が無い場合に従来法から推定した振幅と概ね一致することも確認できた。

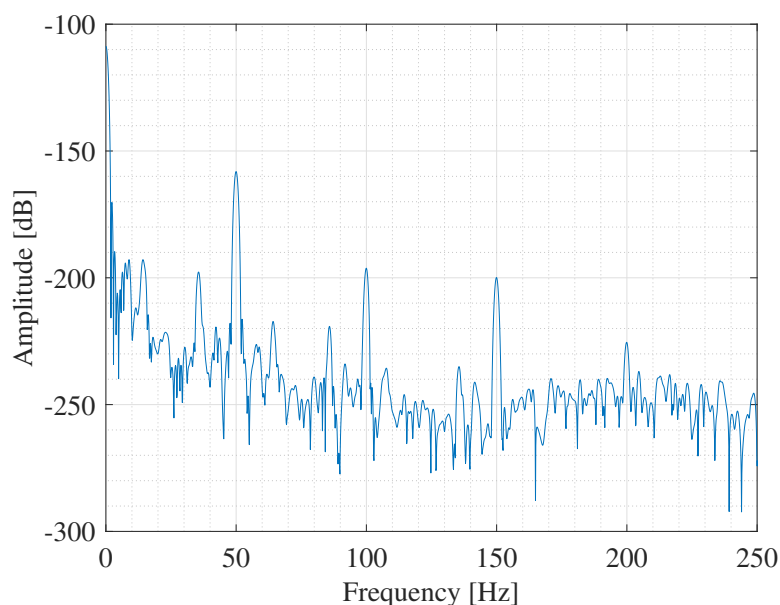


図 3.29 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のクロススペクトル

## 2 回目の実験結果

ターゲットの振幅を変え，1 回目と同様に，プラットフォームの外乱が無い場合と，2 つの異なる外乱を与えた場合の測定を行った．それぞれのフーリエスペクトルを図 3.30，図 3.31，図 3.32

に示す。また、外乱がある場合のクロススペクトルを図 3.33 に示す。従来法により推定した振動数と振幅は、それぞれ、49.93 Hz, 614.8  $\mu\text{m}$  であった。提案法で推定した振動数と振幅は、それぞれ、50.05 Hz, 633.6  $\mu\text{m}$  であり、両者は概ね一致した。

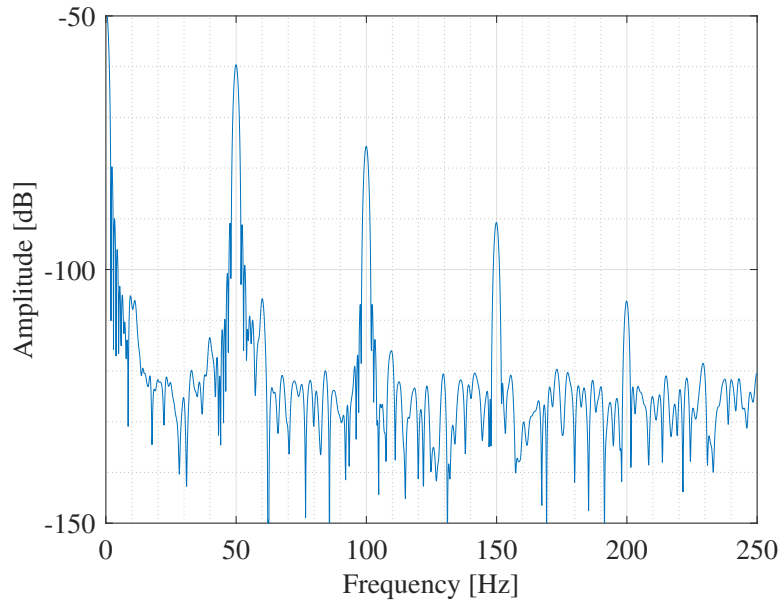


図 3.30 ターゲットのみが振動している場合のフーリエスペクトル

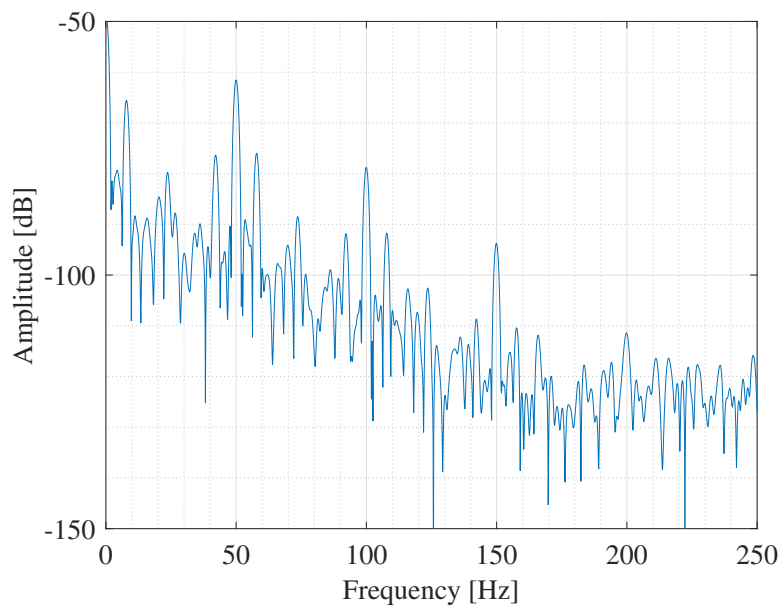


図 3.31 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)

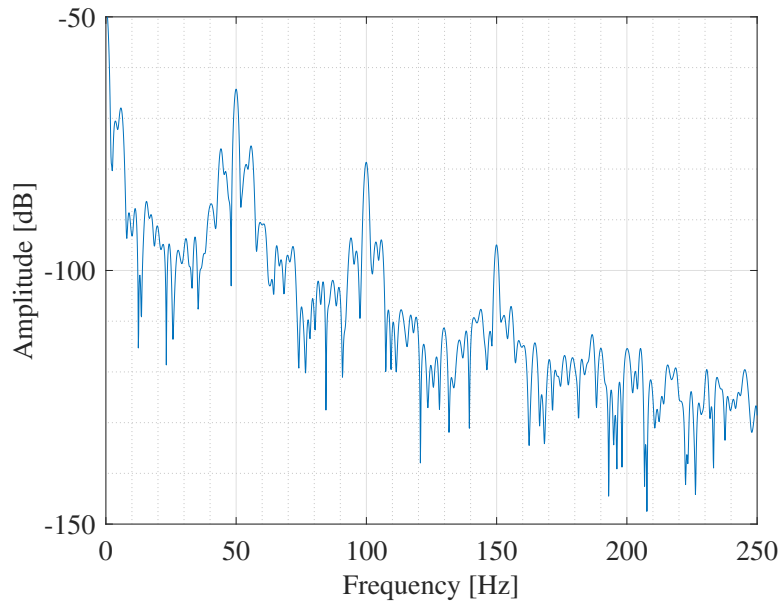


図 3.32 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

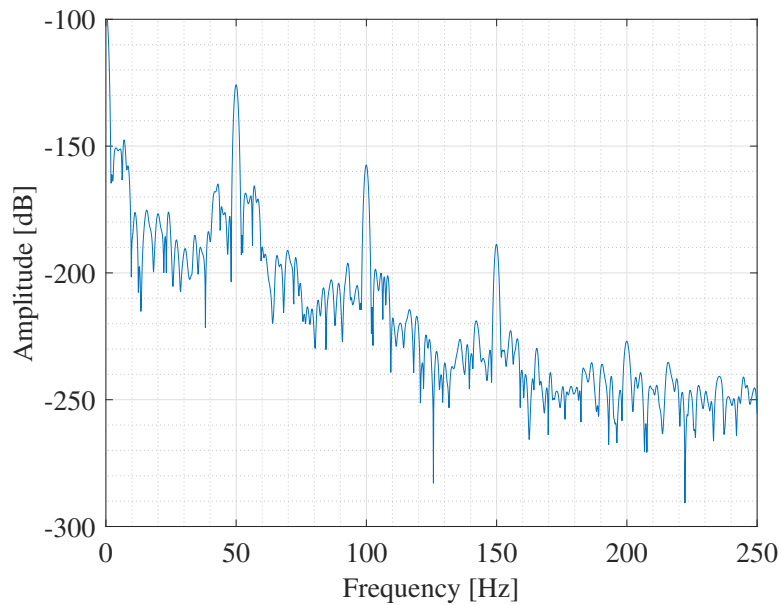


図 3.33 ターゲットとプラットフォームが振動している場合のクロススペクトル

これらの結果から、2つのプラットフォームの外乱が異なる場合には、提案法を用いてクロススペクトルからターゲットのみの振動数と振幅を推定できることが示された。また提案法で得られた振動数と振幅の推定値は、従来法で得られる値と一致することも確認された。

## キャリア周波数と振幅の関係

次に、ターゲットの振幅  $m_t$  とキャリア周波数の両者を、それぞれ  $460 \mu\text{m}$  から  $710 \mu\text{m}$ , 23 GHz から 25 GHz の範囲で変えて、複数回の測定を行い、クロススペクトルの 1 次と 2 次のピーク比 (式 (3.10)) を取得した。これを  $\frac{m_t}{\lambda}$  に対してプロットした。測定結果と理論値を合わせて、図 3.34 に示す。狭い範囲ではあるが、 $\frac{m_t}{\lambda}$  に応じて、ピーク比の測定値は理論値と概ね一致することが確認できた。

以上本節では、提案する CW ドップラレーダによるターゲットの振動状態推定における外乱除去方法の原理検証を行った。提案法によりターゲットの振幅と振動数の推定が行えることを確認し、推定値は従来法と一致することを確認した。また、キャリア周波数とターゲットの振幅を変えた場合のクロススペクトルのピーク強度比の挙動が、理論値と一致することを確認し、提案手法の原理の確からしさを示した。

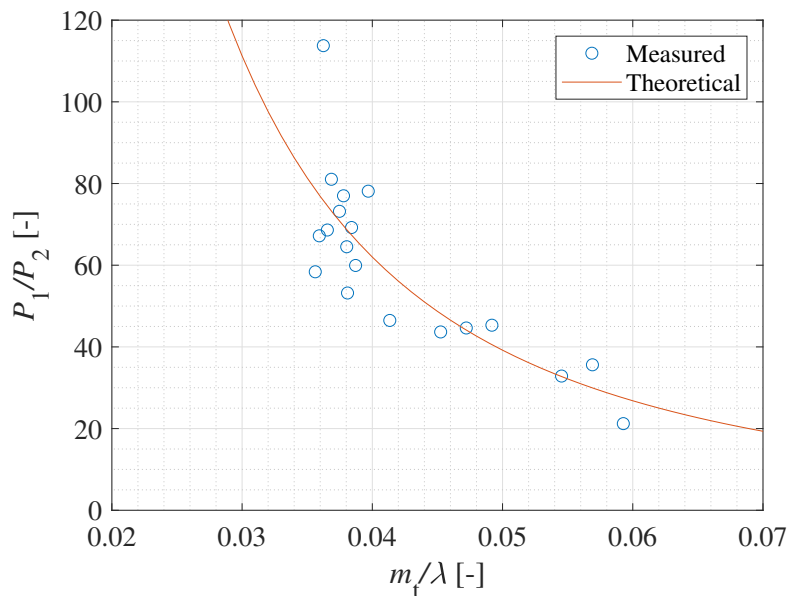


図 3.34 クロススペクトルの 1 次と 2 次のピークの比

### 3.4.2 クラメル・ラオの下限

前節では、提案法の原理の確からしさを実験で確認した。実用上、本手法によってどの程度の精度でターゲットの振動数と振幅を推定できるのかを定量化することも重要である。本節では、クラメル・ラオの下限 (CRLB)[59] を導出し、本手法による推定精度の限界を明らかにする。

CRLB は、観測信号をモデル化して得られる確率密度関数の自然対数を取り、その 2 階微分の期待値からフィッシャー情報行列を求め、その逆行列の対角成分から得ることができる。  $w(n)$  を分散が  $\sigma^2$  のホワイトガウシアンノイズとして、信号モデル  $s$  が複素数の場合の確率密度関数  $P[Y; \theta]$

は,

$$\begin{aligned}
P[Y; \theta] &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{K}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{K-1} \|y - s\|^2 \right\} \\
&= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{K}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{K-1} (y - s)(y^* - s^*) \right\}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

である。ただし、 $\|\cdot\|$  はユークリッドノルムを表す。また,

$$P[w(n)] = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \{w(n)\}^2 \right] \tag{3.25}$$

である。

フィッシャー情報行列の  $i, j$  成分は,

$$\begin{aligned}
I_{i,j} &= -E \left[ \frac{\partial^2 \ln P}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \\
&= -E \left[ \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ (y - s) \frac{\partial^2 s^*}{\partial \theta_i \partial \theta_j} - \frac{\partial s^*}{\partial \theta_i} \frac{\partial s}{\partial \theta_j} + (y^* - s^*) \frac{\partial^2 s}{\partial \theta_i \partial \theta_j} - \frac{\partial s}{\partial \theta_i} \frac{\partial s^*}{\partial \theta_j} \right\} \right] \\
&= \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \frac{\partial s^*}{\partial \theta_i} \frac{\partial s}{\partial \theta_j} + \frac{\partial s}{\partial \theta_i} \frac{\partial s^*}{\partial \theta_j} \right\}
\end{aligned} \tag{3.26}$$

と計算される。したがって、フィッシャー情報行列の各要素は、信号モデルを未知母数で1階微分したものと、その複素共役から計算できる。以降、ターゲットの振動数推定と振幅推定の信号をモデル化し、CRLBを導出する。

### 振動数推定の CRLB

クロススペクトルからターゲットの振動数を推定する問題は、2つのベースバンド信号の相互相関関数の周波数を推定する問題と考えることができる。そこで、式(3.6)と式(3.7)のベースバンド信号を以下のように書き換える。

$$\begin{aligned}
B_1(t) &= A_1 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi \cos \theta_{t1}}{\lambda_1} d_t(t) - \frac{4\pi \cos \theta_{p1}}{\lambda_1} d_{p1}(t) + \phi_1 \right) \right\} \\
&= A_1 \exp j \{ \alpha_1 \sin(\omega_t t + \phi_t) + \beta_1 \sin(\omega_{p1} t + \phi_{p1}) + \phi_1 \}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
B_2(t) &= A_2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi \cos \theta_{t2}}{\lambda_2} d_t(t) - \frac{4\pi \cos \theta_{p2}}{\lambda_2} d_{p2}(t) + \phi_2 \right) \right\} \\
&= A_2 \exp j \{ \alpha_2 \sin(\omega_t t + \phi_t) + \beta_2 \sin(\omega_{p2} t + \phi_{p2}) + \phi_2 \}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

ただし、 $d_t(t) = m_t \sin(\omega_t t + \phi_t)$ ,  $d_{p1}(t) = m_{p1} \sin(\omega_{p1} t + \phi_{p1})$ ,  $d_{p2}(t) = m_{p2} \sin(\omega_{p2} t + \phi_{p2})$  であり、 $\alpha_1 = \frac{4\pi \cos \theta_{t1}}{\lambda_1} m_t$ ,  $\alpha_2 = \frac{4\pi \cos \theta_{t2}}{\lambda_2} m_t$ ,  $\beta_1 = \frac{4\pi \cos \theta_{p1}}{\lambda_1} m_{p1}$ ,  $\beta_2 = \frac{4\pi \cos \theta_{p2}}{\lambda_2} m_{p2}$  とした。



さらに、離散化した相互相関関数  $C(k)$  は、

$$\begin{aligned}
C(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} B_1(k+n) B_2^*(n) \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_1 A_2 \exp j [\alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} + \phi_1 \\
&\quad - \alpha_2 \sin(\omega_t n + \phi_t) - \beta_2 \sin(\omega_{p2} n + \phi_{p2}) - \phi_2] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A \exp j [\alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
&\quad - \alpha_2 \sin(\omega_t n + \phi_t) - \beta_2 \sin(\omega_{p2} n + \phi_{p2}) + \phi] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A \exp j \gamma
\end{aligned} \tag{3.29}$$

と表される。ただし、 $\gamma = \alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} - \alpha_2 \sin \{\omega_t n + \phi_t\} - \beta_2 \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} + \phi$  とした。

以下、フィッシャー情報行列の各要素を求めるため、 $C(k)$  を信号モデルと見なし、未知母数

$$\theta = [A, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \phi, \omega_t, \omega_{p1}, \omega_{p2}, \phi_t, \phi_{p1}, \phi_{p2}]$$

による 1 階微分を計算する。

$$\frac{\partial C}{\partial A} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp j \gamma \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha_1} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \exp j \gamma \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha_2} = -jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \exp j \gamma \tag{3.32}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \beta_1} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \exp j \gamma \tag{3.33}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \beta_2} = -jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \exp j \gamma \tag{3.34}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \phi} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp j \gamma \tag{3.35}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \omega_t} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \exp j \gamma \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \omega_{p1}} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_1(k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \exp j \gamma \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \omega_{p2}} = -jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_2 n \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \exp j\gamma \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \phi_t} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \exp j\gamma \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \phi_{p1}} = jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_1 \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \exp j\gamma \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \phi_{p2}} = -jA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_2 \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \exp j\gamma \quad (3.41)$$

フィッシャー情報行列は対称行列であるため、ここから式 (3.26) に基づいてフィッシャー情報行列の上三角成分を求め、得られたフィッシャー情報行列の逆行列の (7,7) 成分が、ターゲットの角振動数  $\omega_t$  の推定値の分散の下限、すなわち CRLB を表す。フィッシャー情報行列の上三角成分の導出は付録 1 に記載した。

### 振幅推定の CRLB

次に、ターゲットの振幅を推定する際の CRLB を求める。振幅はターゲットの振動数が正しく推定されたとして、クロススペクトルにおける 1 次と 2 次のピークの比から推定する。このとき推定すべきパラメータは 1 つである。確率密度関数は式 (3.10) を利用して、

$$\begin{aligned} P[y; m_t] &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \left\{ y - \frac{J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1}\right) J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2}\right)}{J_2\left(\frac{4\pi}{\lambda_1} m_t \cos \theta_{t1}\right) J_2\left(\frac{4\pi}{\lambda_2} m_t \cos \theta_{t2}\right)} \right\}^2 \right] \\ &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \left\{ y - \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (3.42)$$

となる。ただし、 $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_1} \cos \theta_{t1}$ 、 $\beta = \frac{4\pi}{\lambda_2} \cos \theta_{t2}$  で、 $y = \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} + w$  である。 $w$  は平均 0、分散  $\sigma^2$  のホワイトガウシアンノイズである。

以下、CRLB を計算するため、式 (3.42) の自然対数をとる。

$$\ln P[y; m_t] = \ln \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ y - \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right\}^2 \quad (3.43)$$

次に、 $m_t$  による 2 階微分を計算する。

$$\frac{\partial}{\partial m_t} \ln P[y; m_t] = \frac{1}{\sigma^2} \left\{ y - \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right\} \frac{\partial}{\partial m_t} \left[ \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right] \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial m_t^2} \ln P[y; m_t] &= \frac{1}{\sigma^2} \left[ \left\{ y - \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right\} \frac{\partial^2}{\partial m_t^2} \left[ \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right] \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \frac{\partial}{\partial m_t} \left[ \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right] \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (3.45)$$

この期待値は,

$$E \left[ \frac{\partial^2}{\partial m_t^2} \ln P[y; m_t] \right] = -\frac{1}{\sigma^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial m_t} \left[ \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right] \right\}^2 \quad (3.46)$$

となり, この符号を反転したものの逆数が振幅推定の分散  $\text{var}(m_t)$  の下限, すなわち CRLB となる.

第 1 種ベッセル関数  $J_\nu(z)$  の微分は,

$$\frac{\partial J_\nu(z)}{\partial z} = \frac{\nu}{z} J_\nu(z) - J_{\nu+1}(z) \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial J_\nu(z)}{\partial z} = J_{\nu-1}(z) - \frac{\nu}{z} J_\nu(z) \quad (3.48)$$

で与えられることを利用すれば,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial m_t} \left( \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right) &= \frac{1}{J_2(\alpha m_t)^2 J_2(\beta m_t)^2} \left[ \frac{6}{m_t} J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t) J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t) \right. \\ &\quad \left. - \alpha J_1(\beta m_t) J_2(\beta m_t) \left\{ J_1(\alpha m_t)^2 + J_2(\alpha m_t)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. - \beta J_1(\alpha m_t) J_2(\alpha m_t) \left\{ J_1(\beta m_t)^2 + J_2(\beta m_t)^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

であるから, 式 (3.49) を式 (3.46) に代入して,

$$\begin{aligned} \text{var}(m_t) &\geq \frac{1}{I(m_t)} = \frac{1}{-E \left[ \frac{\partial^2}{\partial m_t^2} \ln P[y; m_t] \right]} = \frac{\sigma^2}{\left\{ \frac{\partial}{\partial m_t} \left[ \frac{J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t)}{J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t)} \right] \right\}^2} \\ &= \frac{\sigma^2 J_2(\alpha m_t)^4 J_2(\beta m_t)^4}{\left[ \frac{6}{m_t} J_1(\alpha m_t) J_1(\beta m_t) J_2(\alpha m_t) J_2(\beta m_t) - \alpha J_1(\beta m_t) J_2(\beta m_t) \{ J_1(\alpha m_t)^2 + J_2(\alpha m_t)^2 \} - \beta J_1(\alpha m_t) J_2(\alpha m_t) \{ J_1(\beta m_t)^2 + J_2(\beta m_t)^2 \} \right]^2} \end{aligned} \quad (3.50)$$

が得られる.

$\alpha = \beta$  を仮定し, 2 次のピークで SN 比を定義すれば,  $\text{SNR} = \frac{J_2(\alpha m_t)^2}{\sigma^2}$  であることから, 式 (3.50) は

$$\text{var}(m_t) \geq \frac{J_2(\alpha m_t)^{10}}{\text{SNR} \times \left[ \frac{6}{m_t} J_1(\alpha m_t)^2 J_2(\alpha m_t)^2 - 2\alpha J_1(\alpha m_t) J_2(\alpha m_t) \{ J_1(\alpha m_t)^2 + J_2(\alpha m_t)^2 \} \right]^2} \quad (3.51)$$

と書き表すこともできる.

以上述べたように, 本節では提案手法によるターゲットの振動数と振幅の推定精度の理論限界を明らかにした. 次節では CRLB とシミュレーションで得られた分散との比較を行って, これらの妥当性を検証する.

### 3.4.3 精度の検証

本節では、所定の SN 比となるようにベースバンド信号にノイズを加えてシミュレーションを行い、ターゲットの振幅と振動数を推定する際の分散を評価する。これを前節で得られた CRLB と比較することで、CRLB の妥当性を検証する。

計算条件は、キャリア周波数を 24 GHz、サンプリング点数を 1024 点、観測時間を 10 秒とし、ターゲットと 2 つのプラットフォームの振動の振幅を 1 mm、振動数はそれぞれ 5, 3, 4 Hz とした。SN 比を 0 から 30 dB として、式 (3.51) で得られる振幅推定の CRLB、及び式 (A.1) から式 (A.78) の逆行列から得られる振動数推定の CRLB を計算した。合わせて、同じ SN 比となるように式 (3.6)、式 (3.7) にノイズを加え、3.3 節に述べた手法でターゲットの振幅と振動数推定を行い、1000 回の試行の分散を評価した。振幅推定の結果を図 3.35 に示す。

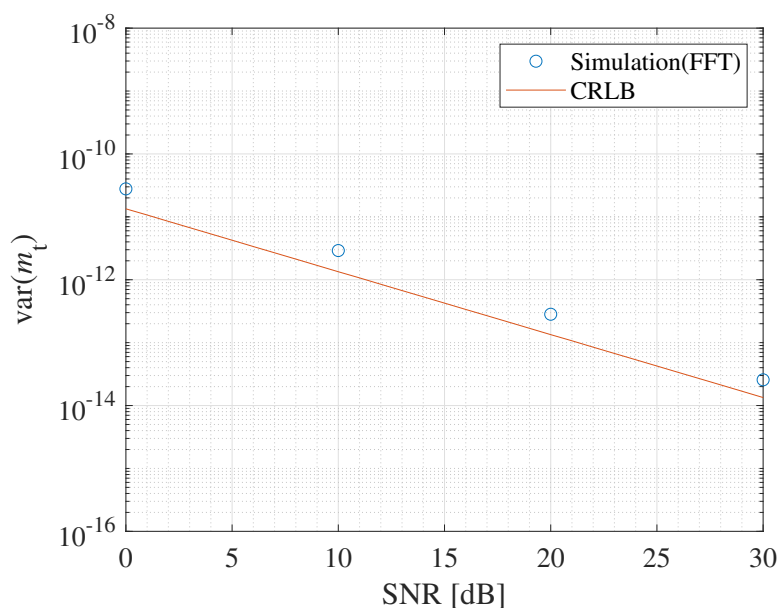


図 3.35 振幅推定の分散

図 3.35 においてシミュレーションで得られた分散と CRLB はオーダーが概ね一致する。したがって、前節で得られた振幅推定の CRLB は妥当であると考えられる。

同様に、ターゲットの振動数推定についても CRLB とシミュレーションの比較を行った。振動数推定においては、SN 比が高い領域でフーリエ変換の分解能の下限により推定ばらつきが小さくならない懸念があったため、最尤推定法を用いて相互相関関数の周波数を推定するシミュレーションも合わせて行った。結果を図 3.36 に示す。

図 3.36 においても SN 比が 0 から 30 dB の範囲で、CRLB とシミュレーションで得られた分散は一致する。したがって、振動数推定においても前節で得られた CRLB は妥当であると考えられる。

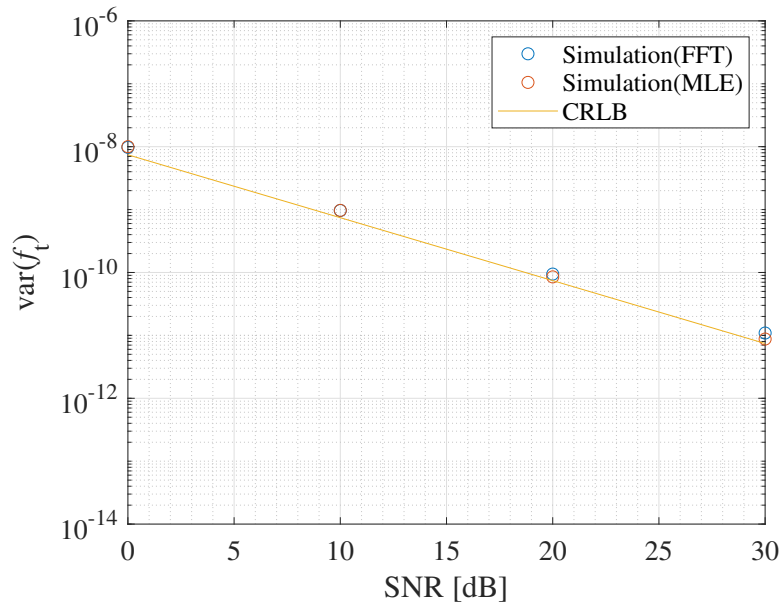


図 3.36 振動数推定の分散

### 3.5 まとめ

本章では，ミリ波レーダを用いて構造物の振動状態を測定するにあたり，レーダを設置しているプラットフォームそのものも振動外乱を受けている場合に，この外乱を除去した上でターゲットの振動の振幅と振動数を推定する方法を述べた。

まず，2つのCWドップラレーダでターゲットの振動を測定し，2つのベースバンド信号のクロススペクトルを計算することでプラットフォームの振動を取り除き，ターゲットの振動のみを取り出す方法を提案した．シミュレーションと実験により提案手法が正しく動作することを確認した．また，予めターゲットとプラットフォームの振動の振幅のオーダーが判っている場合のキャリア周波数の選び方を検討し，実際にレーダを設計する上で必要となる設計指針のひとつを示した．次いで，実用上，本手法によって達成可能なターゲットの振動数と振幅の推定精度を定量化するためにCRLBを導出し，シミュレーションとの比較によりこれらの妥当性を確認した．

# 第4章 FMCWレーダによる変位推定における振動外乱除去方法

## 4.1 緒言

前章では、2つのCWドップラレーダでターゲットの振動を測定し、ベースバンド信号のクロススペクトルを推定することでプラットフォームの振動を取り除き、ターゲットの振動のみを取り出す方法を提案した。CWドップラレーダの場合、ターゲットの距離に関する情報は得られないため、レーダの視野内に複数の振動する物体がある場合や、マルチパスの影響を受ける場合には、本来の測定したいターゲットのみの振動状態を抽出するのが困難な場合も考えられる。

そこで本章では、クロススペクトルに基づく振動外乱除去方法をFMCWレーダに適用する方法を述べる[60]。FMCWレーダを用いれば、測定すべきターゲットからの信号を距離に基づいて分離することが容易になると考えられる。また、FMCWレーダの場合、CWドップラレーダとは異なり、チャープパルス列のベースバンド信号の時間領域における位相から変位を推定できるため、ベースバンド信号ではなく、推定された時間変動する変位に対してフーリエスペクトル、およびクロススペクトルを求めることで、式(3.10)を用いずとも、容易にターゲットの振動数と振幅を直接推定できると考えられる。

## 4.2 FMCWドップラレーダによる振動状態の推定と外乱除去の方法

### 4.2.1 提案手法

FMCWレーダにおける外乱除去の手法を述べる。

鋸波チャープを用いるFast Chirpレーダを考えると、送信波は、

$$S_T(t) = \exp j \left( 2\pi f_0 t + \frac{\pi F}{T} t^2 + \Phi_1 \right) \quad (4.1)$$

受信波は、

$$S_R(t) = \exp j \left\{ 2\pi f_0 (t - \tau) + \frac{\pi F}{T} (t - \tau)^2 + \Phi_2 \right\} \quad (4.2)$$

と表すことができる。ただし、時間を $t$ 、帯域幅を $F$ 、チャープ周期を $T$ 、チャープのスタートの周波数を $f_0$ とした。 $\tau$ は往復の伝搬に要する時間で、基準距離 $R_0$ での振動による変位を $x(t)$ とすれば、

$$\tau = \frac{2\{R_0 + x(t)\}}{c} \quad (4.3)$$

である。ただし、光速を  $c$  とした。ここからベースバンド信号は、

$$S_B(t) = S_T(t) \times S_R^*(t) = \exp j \left( 2\pi \frac{B}{T} \tau t + 2\pi f_0 \tau + \phi \right) \quad (4.4)$$

となる。ここで、 $\tau^2 \ll \tau t$  より、 $\tau^2$  の項は無視し、1回のスweepの間のターゲットの振動が十分小さく、ドップラも無視できるとした。

ターゲットは角振動数  $\omega_t$  で正弦的に振動しており、チャープ周期  $T$  がこの振動に対して十分短い、すなわち  $\omega_t \ll \frac{1}{T}$  が成り立つ場合、ターゲットの変位は離散的に取り扱うことができ、これを  $d_t(iT)$  と表すと、 $i$  番目のチャープのベースバンド信号は以下のように定式化される [61, 62].

$$S_B(iT + t) = \exp j \left\{ \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c d_t(iT)}{c} \right\} \quad (4.5)$$

ただし、チャープの中心周波数を  $f_c$  とした。また、以降、正弦的に振動する2つのプラットフォームの角振動数  $\omega_{p1}$ ,  $\omega_{p2}$  に対しても同様に、 $\omega_{p1} \ll \frac{1}{T}$ ,  $\omega_{p2} \ll \frac{1}{T}$  が成り立つとする。

次に、図 3.4 に示すように2つのレーダで1つのターゲットを観測する場合を考える。視線方向と振動方向の成す角度を図 3.4 と同様にとれば、各プラットフォームでのベースバンド信号はそれぞれ式 (4.6), 式 (4.7) となる。

$$\begin{aligned} S_{B1}(iT + t) &= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c d_t(iT) \cos \theta_{t1}}{c} - \frac{4\pi f_c d_{p1}(iT) \cos \theta_{p1}}{c} \right) \right\} \\ &= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c m_t \sin(\omega_t iT + \phi_t) \cos \theta_{t1}}{c} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{4\pi f_c m_{p1} \sin(\omega_{p1} iT + \phi_{p1}) \cos \theta_{p1}}{c} \right) \right\} \\ &= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} \right) \right\} \\ &\quad \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k \left( \frac{4\pi f_c m_t \cos \theta_{t1}}{c} \right) \exp \{ jk(\omega_t iT + \phi_t) \} \\ &\quad \times \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l \left( \frac{4\pi f_c m_{p1} \cos \theta_{p1}}{c} \right) \exp \{ -jl(\omega_{p1} iT + \phi_{p1}) \} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}
S_{B2}(iT + t) &= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c d_t(iT) \cos \theta_{t2}}{c} - \frac{4\pi f_c d_{p2}(iT) \cos \theta_{p2}}{c} \right) \right\} \\
&= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c m_t \sin(\omega_t iT + \phi_t) \cos \theta_{t2}}{c} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{4\pi f_c m_{p2} \sin(\omega_{p2} iT + \phi_{p2}) \cos \theta_{p2}}{c} \right) \right\} \\
&= \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi F R_0}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} \right) \right\} \\
&\quad \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m \left( \frac{4\pi f_c m_t \cos \theta_{t2}}{c} \right) \exp \{ jm (\omega_t iT + \phi_t) \} \\
&\quad \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left( \frac{4\pi f_c m_{p2} \cos \theta_{p2}}{c} \right) \exp \{ -jn (\omega_{p2} iT + \phi_{p2}) \} \tag{4.7}
\end{aligned}$$

式 (4.6), 式 (4.7) の位相, すなわちそれぞれ

$$\frac{4\pi f_c m_t \sin(\omega_t iT + \phi_t) \cos \theta_{t1}}{c} - \frac{4\pi f_c m_{p1} \sin(\omega_{p1} iT + \phi_{p1}) \cos \theta_{p1}}{c}$$

および

$$\frac{4\pi f_c m_t \sin(\omega_t iT + \phi_t) \cos \theta_{t2}}{c} - \frac{4\pi f_c m_{p2} \sin(\omega_{p2} iT + \phi_{p2}) \cos \theta_{p2}}{c}$$

で表される項を Slow-time 方向に追っていくと, ターゲットとプラットフォームが合成された変位が得られる. 得られた変位をフーリエ変換し, Slow-time のサンプリング点数で規格化した後振幅を 2 倍すれば, 縦軸の大きさが変位を構成する各振動成分の視線方向の振幅に相当する, 片側振幅スペクトル [63] が得られる. しかしながら, 片側振幅スペクトルを構成する振動成分のうちどれがターゲットのものであるかを特定するのは困難である. そこで, CW ドップラレーダの場合と同様に 2 つの振動波形のクロススペクトルを求めれば, 2 つの振動波形に共通するターゲットの振動成分のみを抽出することができ, ここからターゲットの振動数を推定することが可能となる. クロススペクトルは 2 つの振動波形のフーリエスペクトルの積であるため, 先に求めた片側振幅スペクトル同士を掛け合わせその平方根を取れば, 縦軸の大きさがターゲットの振動の視線方向振幅の相乗平均に相当するスペクトルが得られる. このピーク値を読み取ることでターゲットの視線方向振幅の相乗平均が推定可能である. あるいはクロススペクトルを用いてターゲットの振動の振動数を推定した後, 片側振幅スペクトルにおいてターゲットの振動を表すピークの大きさを読み取れば, それぞれの視線方向振幅, すなわち  $m_t \cos \theta_{t1}$  と  $m_t \cos \theta_{t2}$  を個別に推定できる.

#### ターゲットが 1 つの場合の数値シミュレーション

これらの原理を確認するため, 数値シミュレーションを行った. まず, レーダ反射断面積  $1 \text{ m}^2$  のターゲット 1 つが, 距離  $5 \text{ m}$  にて振動数  $5 \text{ Hz}$ , 振幅  $1 \text{ mm}$  で振動しているとした. 外乱としてプラットフォーム 1 が振動数  $3 \text{ Hz}$ , プラットフォーム 2 が振動数  $4 \text{ Hz}$ , いずれも振幅  $1 \text{ mm}$  で振動しているとした. レーダ条件は  $f_0 = 24.05 \text{ GHz}$ ,  $F = 200 \text{ MHz}$ ,  $T = 1 \text{ ms}$ , 送信出力  $10 \text{ dBm}$ ,



アンテナ利得 20 dBi, Fast-time 方向のサンプリング点数 1024 点, Slow-time 方向のチャープ数 8192 点とした. また,  $\theta_{t1} = 15^\circ$ ,  $\theta_{t2} = 30^\circ$ ,  $\theta_{p1} = \theta_{p2} = 0^\circ$  とした.

図 4.1, 図 4.2 にそれぞれプラットフォーム 1 と 2 のベースバンド信号を Fast-time 方向にフーリエ変換した結果, 図 4.3, 図 4.4 に Fast-time のピークの位相  $\phi_{\text{fast}}(iT)$  から,  $d(iT) = \phi_{\text{fast}}(iT)c/4\pi f_c$  により求めた変位の Slow-time 方向の変化, 図 4.5, 図 4.6 にこれらの変位のフーリエスペクトル, 図 4.7 にクロススペクトルを示す.

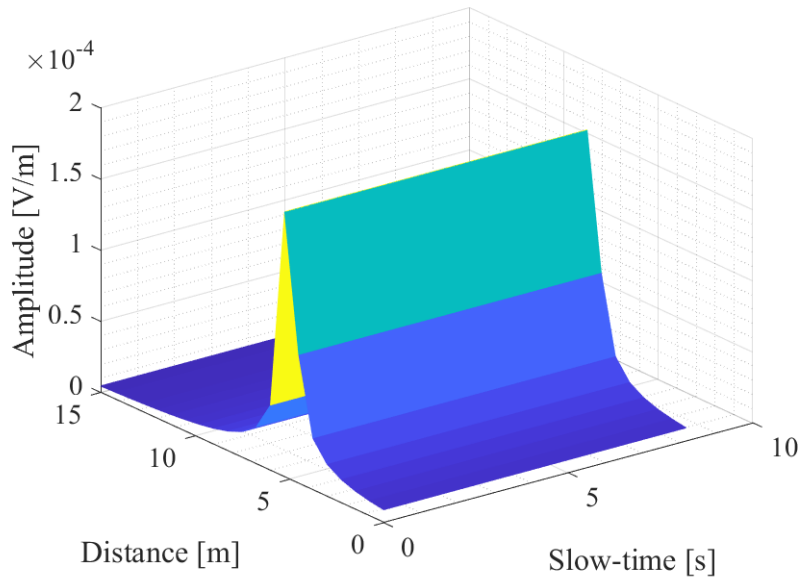


図 4.1 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 1)

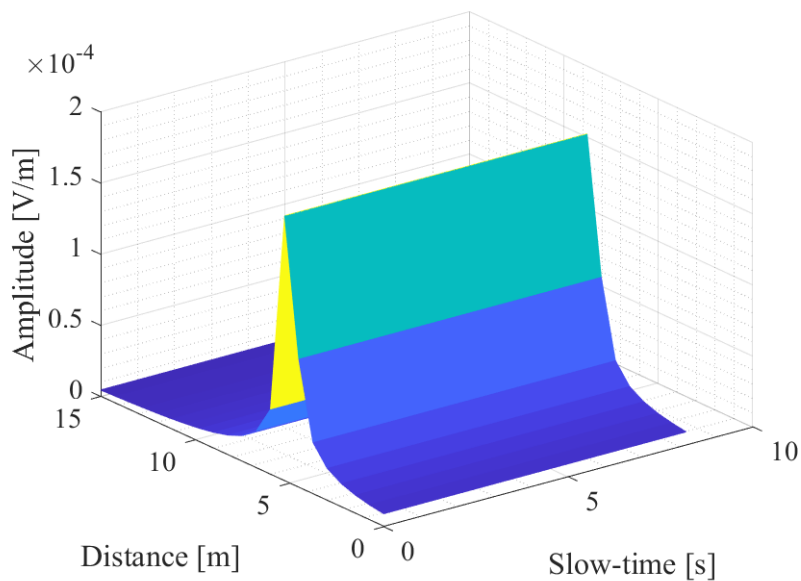


図 4.2 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 2)

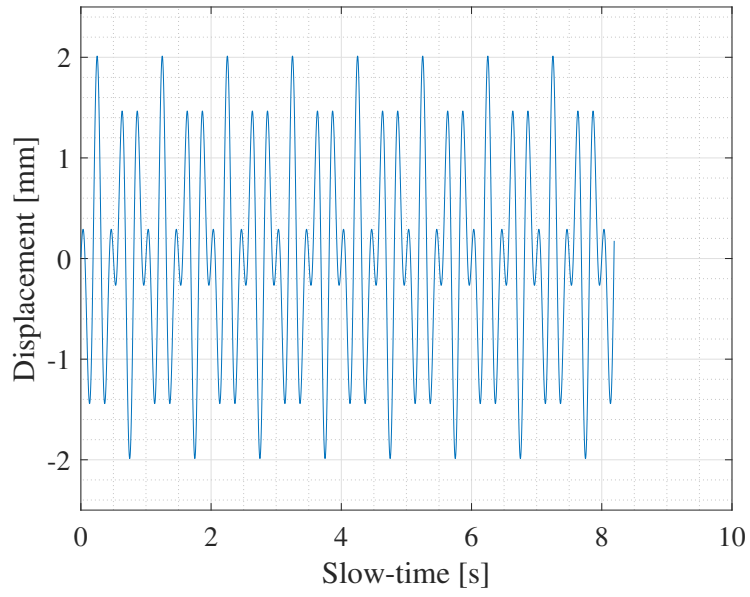


図 4.3 変位の推定結果 (プラットフォーム 1)

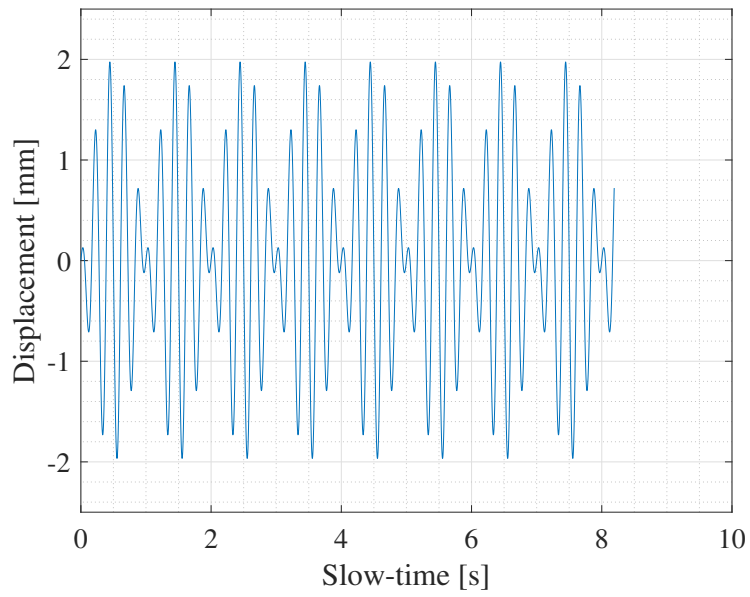


図 4.4 変位の推定結果 (プラットフォーム 2)

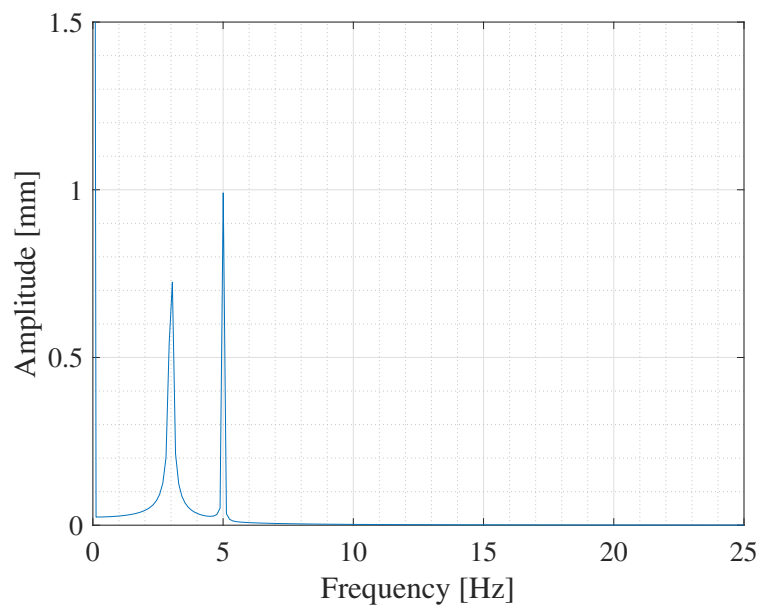


図 4.5 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)

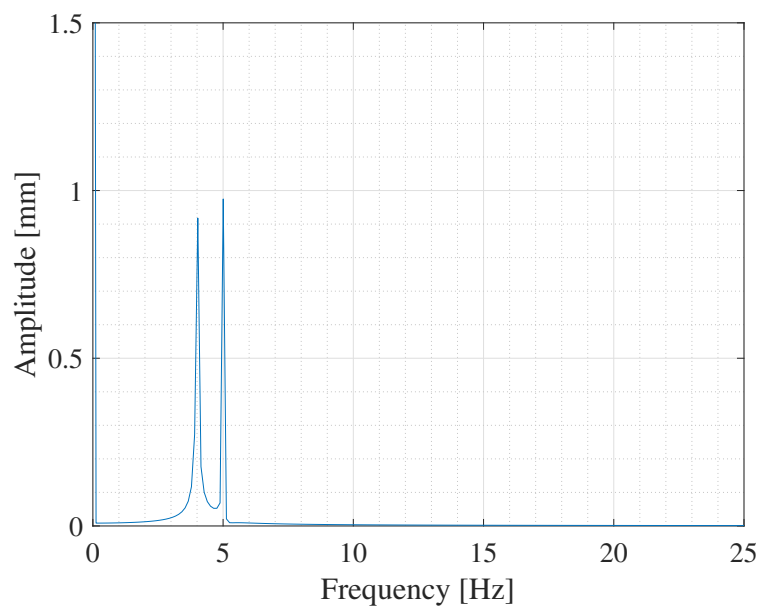


図 4.6 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

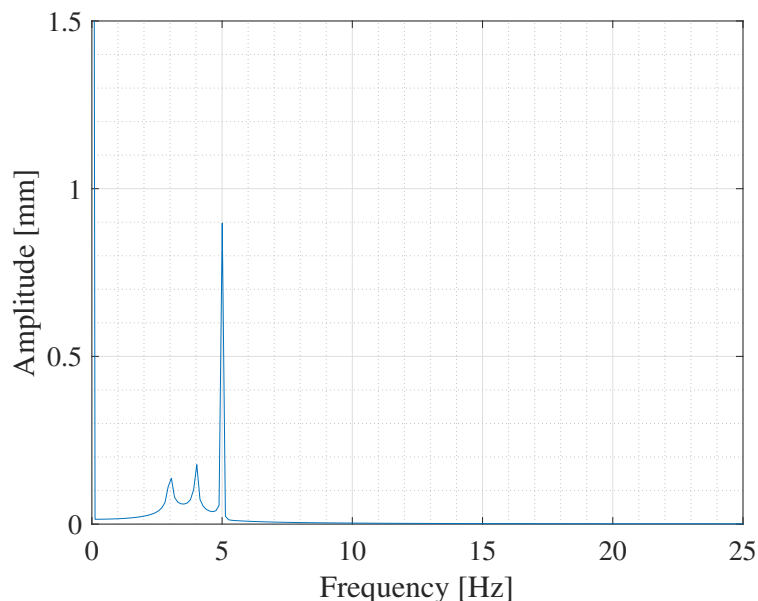


図 4.7 2つの変位のクロススペクトル

図 4.1, 図 4.2 に示すベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換によれば, ターゲットの存在する距離 5 m にピークが現れている. これらの変位は微小であるため, ピークの位置は Slow-time 方向にはほとんど変化しない. このピークの位相変化に注目すると, 図 4.3, 図 4.4 の通り Slow-time 方向の変化が明確に検出されている. これはターゲットとプラットフォームの振動が合成されたものになっており, 図 4.5, 図 4.6 にはこれらの複数の振動成分が確認できる. ここからクロススペクトルを求めると図 4.7 に示す通り, 共通するターゲットの振動数である 5 Hz 成分のピークのみが強く残り, ターゲットの振動数を推定することができる. さらに変位のフーリエスペクトルに戻り, ターゲットの振動数に相当する振動成分を読み取れば, ターゲットの視線方向の振幅はそれぞれ  $929.2 \mu\text{m}$ ,  $814.6 \mu\text{m}$  と推定される.

#### ターゲットが 2つの場合の数値シミュレーション

次に, 距離でターゲットの振動を分離できることを確認するため, 前節で検討した距離 5 m に存在するターゲットの後方, 距離 10 m に, レーダ反射断面積  $20 \text{ m}^2$  のターゲットが, 振動数 5.5 Hz, 振幅 1 mm で振動している場合を想定し, 距離 10 m に位置するターゲットの変位推定を行う数値シミュレーションを行った. 外乱とレーダの条件は前節と同じとした.

図 4.8, 図 4.9 にそれぞれプラットフォーム 1 と 2 のベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換, 図 4.10, 図 4.11 に Fast-time のピークの位相から求めた変位の Slow-time 方向の変化, 図 4.12, 図 4.13 に変位のフーリエスペクトル, 図 4.14 にクロススペクトルを示す.

図 4.8, 図 4.9 に示すベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換には, ターゲットの存在する距離 5 m と 10 m にピークが現れている. 測定すべき 10 m のターゲットのピークの位相変化からは, 図 4.10, 図 4.11 の通り Slow-time 方向の変化が検出されており, 図 4.12, 図 4.13 には

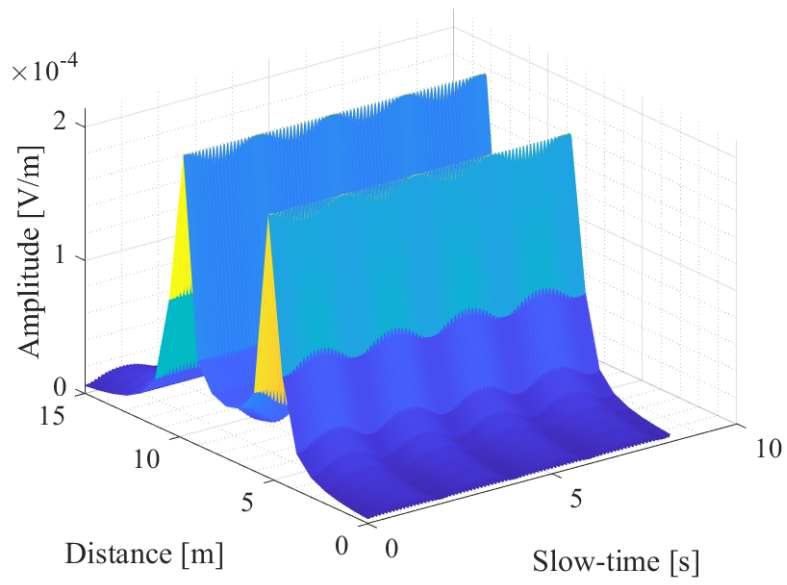


図 4.8 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 1)

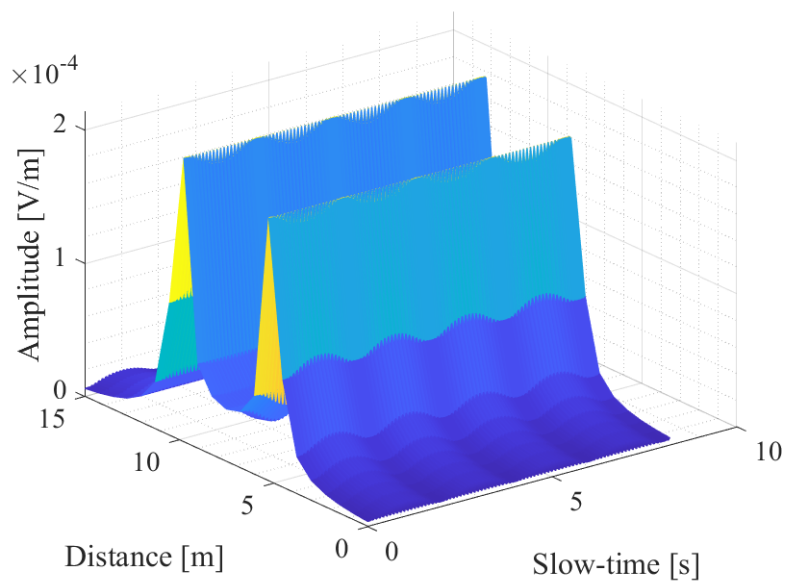


図 4.9 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 2)

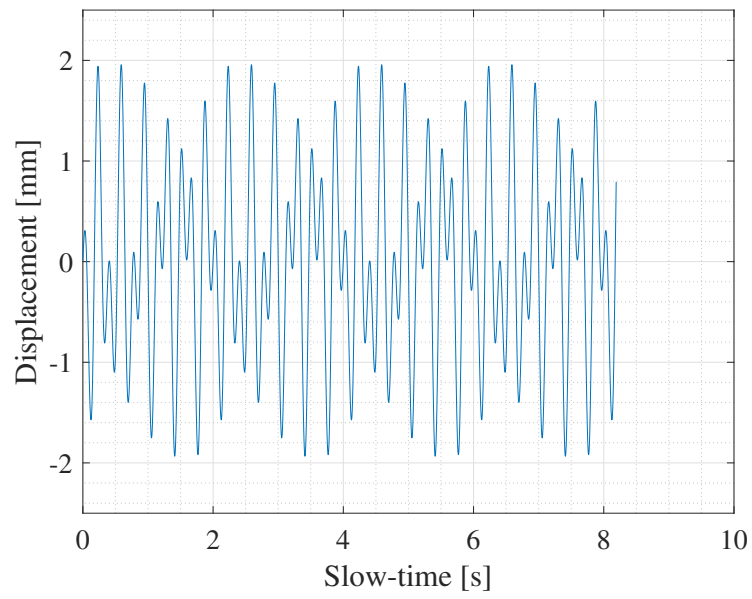


図 4.10 変位の推定結果 (プラットフォーム 1)

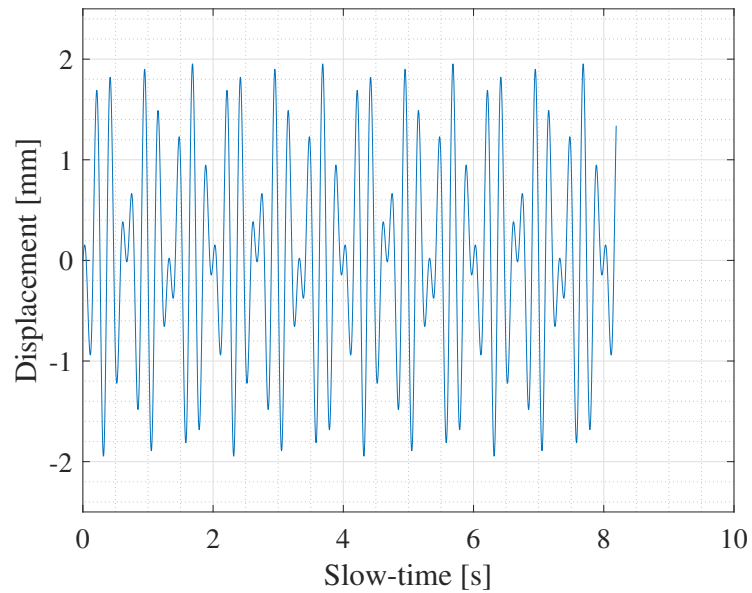


図 4.11 変位の推定結果 (プラットフォーム 2)

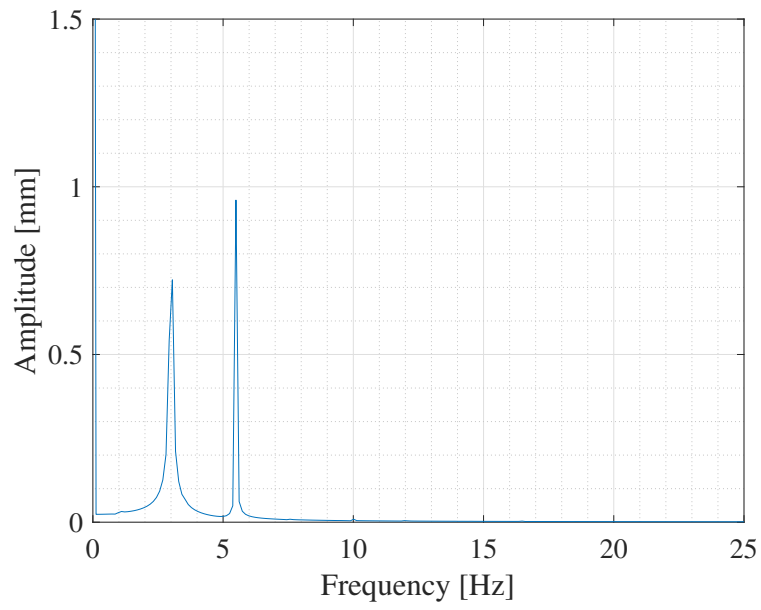


図 4.12 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)

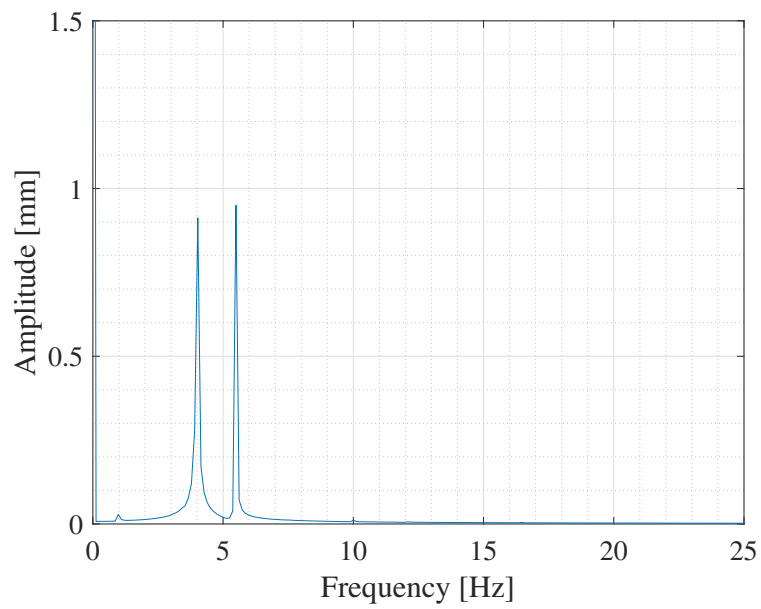


図 4.13 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

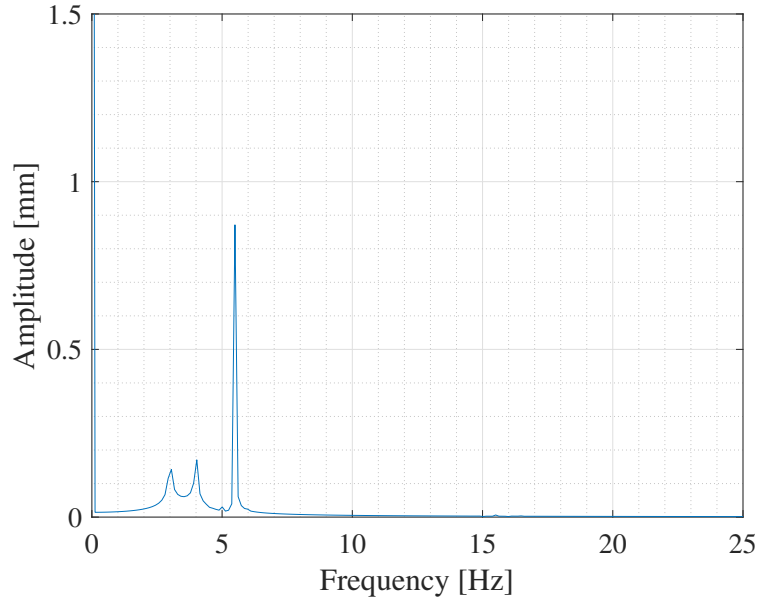


図 4.14 2つの変位のクロススペクトル

ターゲットとプラットフォームの振動に起因する複数の振動成分が確認できる。また、5 m の物体の振動である 5 Hz 成分は観測されていないことから、測定すべき 10 m のターゲットの変位のみを距離に基づいて分離できていることが確認できる。ここからクロススペクトルを求めると図 4.14 に示す通り、ターゲットの振動数である 5.5 Hz 成分のピークのみが強く残り、ターゲットの振動数を推定することができる。さらに変位のフーリエスペクトルの 5.5 Hz 成分から、ターゲットの視線方向の振幅はそれぞれ  $927.1 \mu\text{m}$ ,  $818.6 \mu\text{m}$  と推定される。

以上本節では、振動外乱除去手法を FMCW レーダの場合に拡張し原理を述べるとともに、レーダの視野内に複数のターゲットがある場合でも、距離に基づいて測定すべきターゲットの振動を抽出できることを、数値シミュレーションで示した。

#### 4.2.2 電波の広がりの影響

CW ドップラレーダの場合と同様に、電波の広がりを考慮した場合の振幅と振動数の推定に与える影響を検討する。図 3.17 と同じ状況を考えて、点  $(x, y)$  からの反射により与えられるベースバンド信号は、

$$S_{B1}(iT + t, x, y) = \exp j \left[ \frac{\sqrt{R_1^2 + x^2 + y^2}}{R_1} \left\{ \frac{4\pi F R_1}{cT} t + \frac{4\pi f_0 R_1}{c} + \frac{4\pi f_c d_t(iT) \cos \theta_t}{c} - \frac{4\pi f_c d_{p1}(iT) \cos \theta_{p1}}{c} \right\} \right] \quad (4.8)$$

であり、これをアンテナの放射パターンで重み付き平均した

$$S_{B1}(iT + t) = \iint_S I_1^2(x, y) S_{B1}(iT + t, x, y) dx dy \quad (4.9)$$



が、全ての点の重ね合わせにより得られるベースバンド信号である。

CW ドップラレーダの場合と同様に矩形ホーンアンテナからの放射パターンを考え、ターゲットの振幅と振動数の推定を行った。中心周波数は 24.15 GHz, 帯域幅は 200 MHz, ターゲットと2つのプラットフォームの振動数はそれぞれ 5 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 振幅はいずれも 1 mm, それぞれの振動方向と視線方向は一致しているとした。Slow-time のサンプリング周期は 40 ms とした。式 (4.9) の積分範囲は,  $x, y$  とも -20 m から 20 m とした。また, 基準距離は  $R_1 = R_2 = 5$  m とした。

半値全幅が 0 度, 15 度, 30 度, 45 度, 60 度の場合の変位のクロススペクトルの計算結果を図 4.15 から図 4.19 に示す。

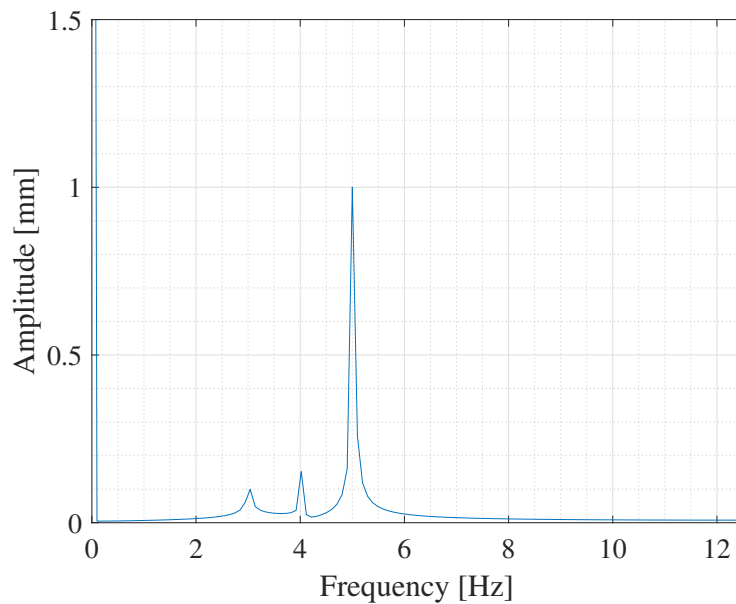


図 4.15 半値全幅が 0 度の場合のクロススペクトル

半値全幅が 0 度から 60 度までのいずれにおいてもクロススペクトルの 5 Hz 成分が最も大きく, ターゲットの振動数は正しく推定できる。また, 5 Hz 成分のピークの大きさはおおよそ 1 mm であり, ターゲットの振幅も正しく推定できている。

次に, 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定値を図 4.20 に示す。また, 真値からのずれの絶対値を図 4.21 に示す。半値全幅が 35 度を超えると, 斜め反射成分の影響を受け振幅の推定誤差が大きくなる傾向が読み取れる。

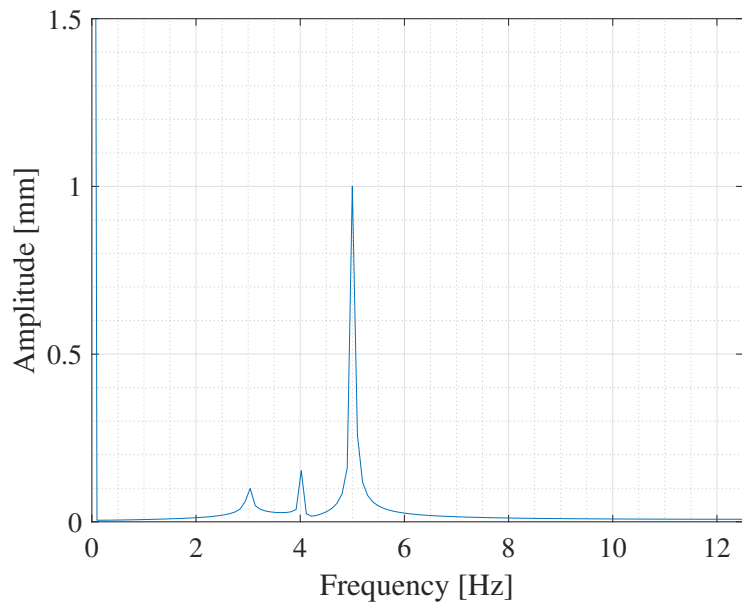


図 4.16 半値全幅が 15 度の場合のクロススペクトル

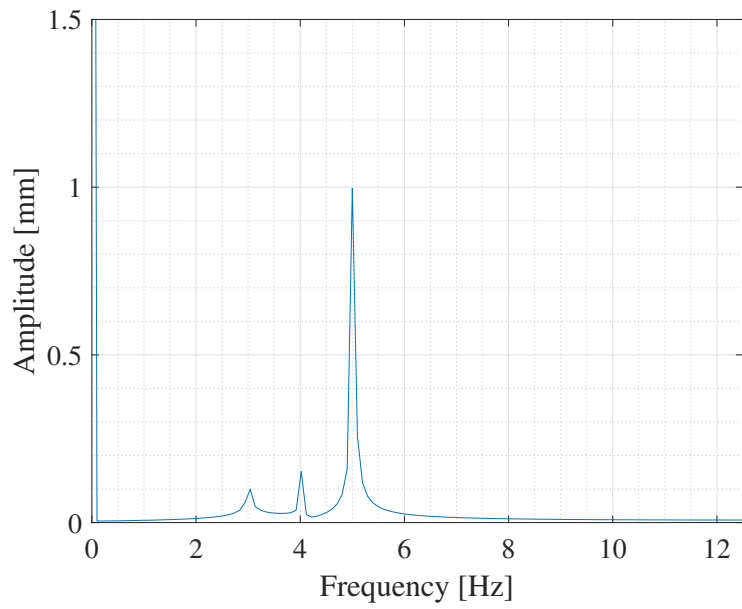


図 4.17 半値全幅が 30 度の場合のクロススペクトル

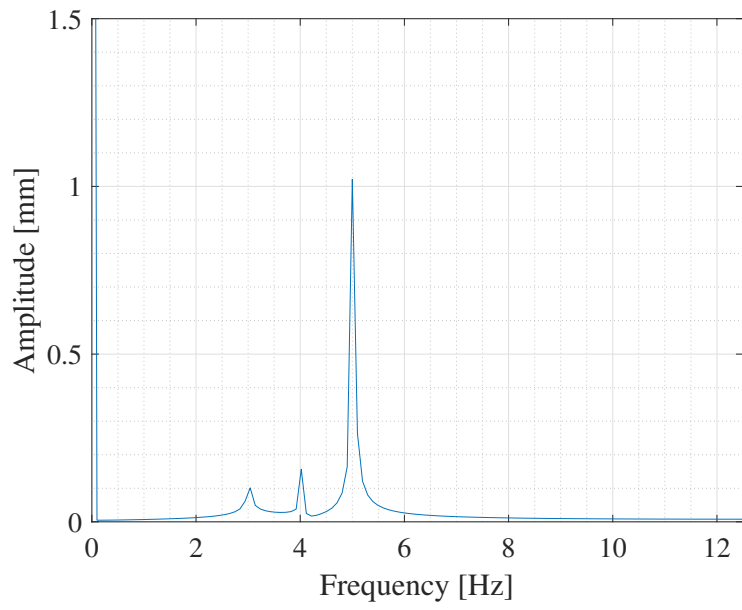


図 4.18 半値全幅が 45 度の場合のクロススペクトル

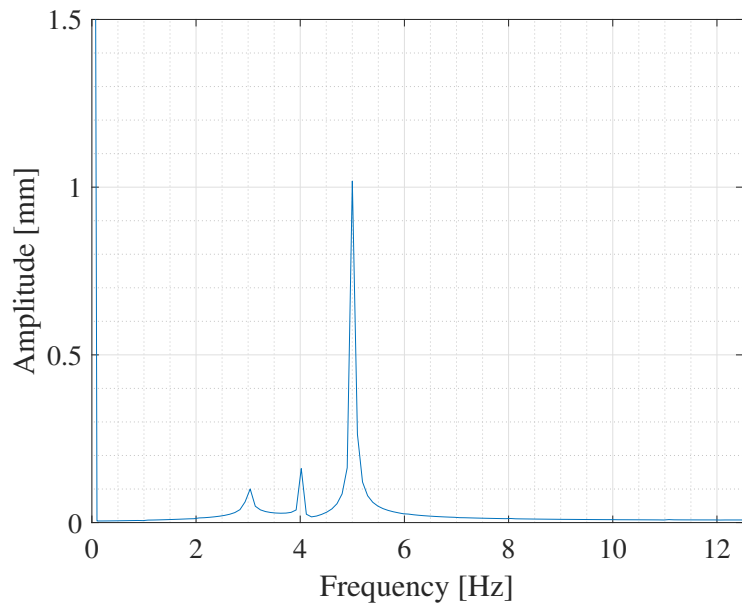


図 4.19 半値全幅が 60 度の場合のクロススペクトル

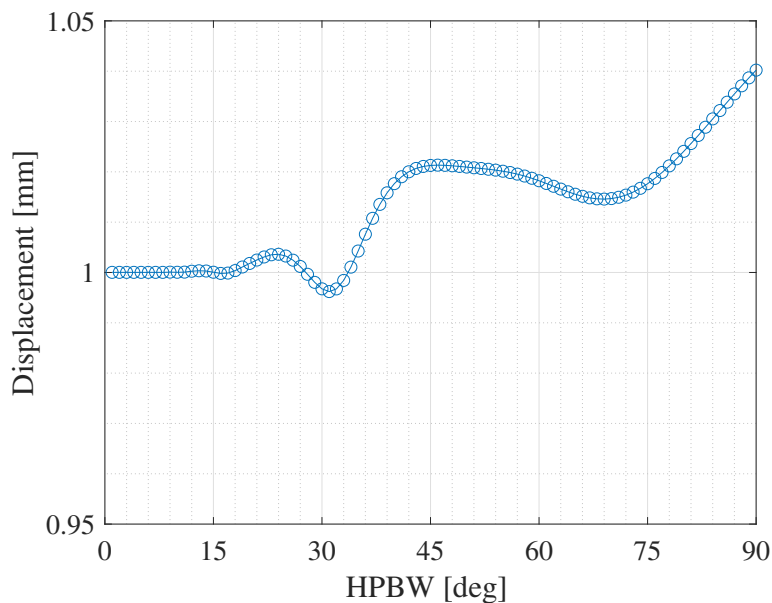


図 4.20 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定値

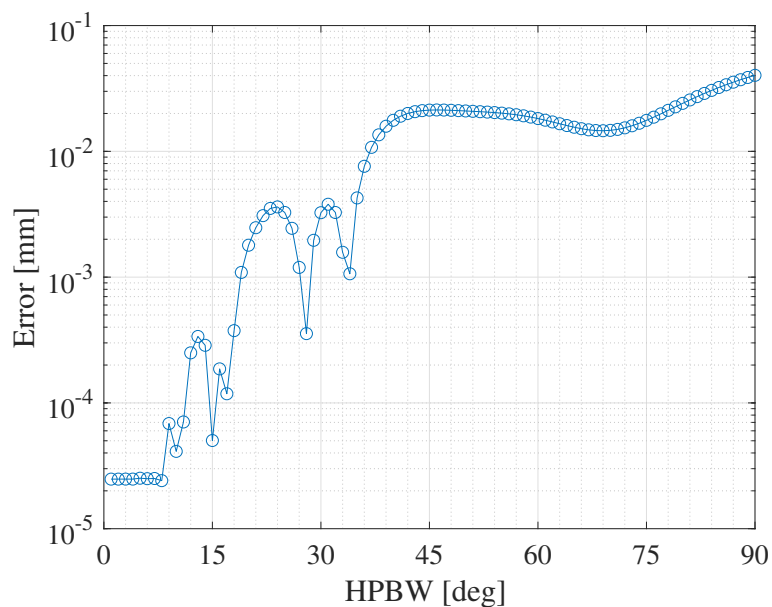


図 4.21 半値全幅に対するターゲットの振幅の推定誤差

以上述べたように、本節では、電波の広がりを考慮した場合のベースバンド信号を定式化し、振幅と振動数推定に与える影響を検討した。振動数、振幅ともに、半値全幅が35度程度までは概ね正しく推定できることが分かった。したがって、測定に用いるアンテナは指向性が35度以下のものを選定する必要があるが、CW ドップラレーダの場合と同様、一般的なホーンアンテナ等を用いればこの制約は容易に達成できると考えられる。ただし、これらの結果は基準距離を5mとして得たものである。距離が離れるほど式(4.9)の積分範囲は広がるため、振幅の推定誤差が大きくなることが想定される。距離に応じてより高い指向性のアンテナを用いるのが望ましい。

## 4.3 原理検証と精度の評価

### 4.3.1 実験による提案手法の原理検証

#### 実験装置

提案法の原理を検証するための実験を行った。装置のブロック図を図 4.22 に示す。FMCW レーダには、Texas Instruments の IWR1642BOOST を使用し、DCA1000EVM を経由してベースバンド信号をコンピュータに取り込んだ。センサからターゲットまでの距離は 1m とした。ターゲットは縦 40 mm、横 150 mm、厚み 1 mm の金属板とした。ターゲット、レーダのそれぞれに振動モータを固定し、正弦的な振動を与えた。ターゲットの振動数は 50 Hz とした。ターゲットの振幅は、レーダに振動外乱を与えずに FMCW レーダを用いて従来法 [61] で推定した。推定値は、以降で詳細を述べる通り  $617.2 \mu\text{m}$  であった。

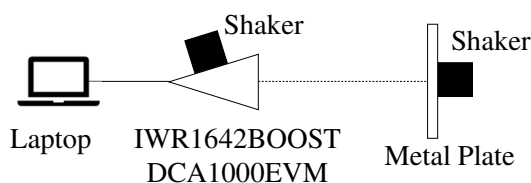


図 4.22 実験装置のブロック図

チャープシーケンスを図 4.23 に示す。Fast-time 方向には、周波数を 77.0999 GHz から 80.5112 GHz まで掃引し、ベースバンド信号をサンプリング周波数 5 MHz で 1024 点取得した。Slow-time 方向には、周期  $1240 \mu\text{s}$  で 255 回分のチャープをサンプリングした。実験では、ターゲットのみが振動している場合と、ターゲットに加えてレーダを固定しているプラットフォームにターゲットとは異なる振動数の振動を与えた場合の測定を行った。プラットフォームに振動を与えた場合はプラットフォームの振動数を変えて 2 回測定を行い、異なる位置に設置された 2 台のセンサを模擬した。

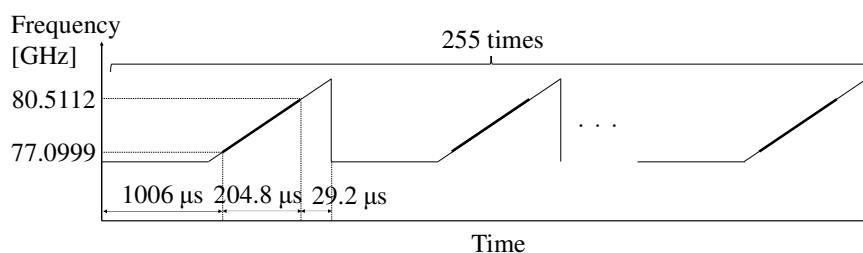


図 4.23 FMCW レーダのチャープシーケンス

#### 結果と考察

ターゲットのみが振動している場合の、ベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換を図 4.24 に示す。さらに Slow-time 方向にもフーリエ変換した結果を図 4.25 に示す。

図 4.24 には、Slow-time にわたってターゲットの存在する距離 1 m に大きなピークが現れている。図 4.25 には、距離 1 m、振動数 50 Hz 付近に大きなピークがあり、ここからターゲットの振動数を推定することができる。図 4.24 においてターゲットの存在する距離の位相を Slow-time 方向に読み取ることで、図 4.26 の通り正弦的に振動するターゲットの変位を得ることができる。ターゲットの振動の振動数と振幅は変位のフーリエ変換を示す図 4.27 より、それぞれ、50.4 Hz、617.2  $\mu\text{m}$  と読み取れる。

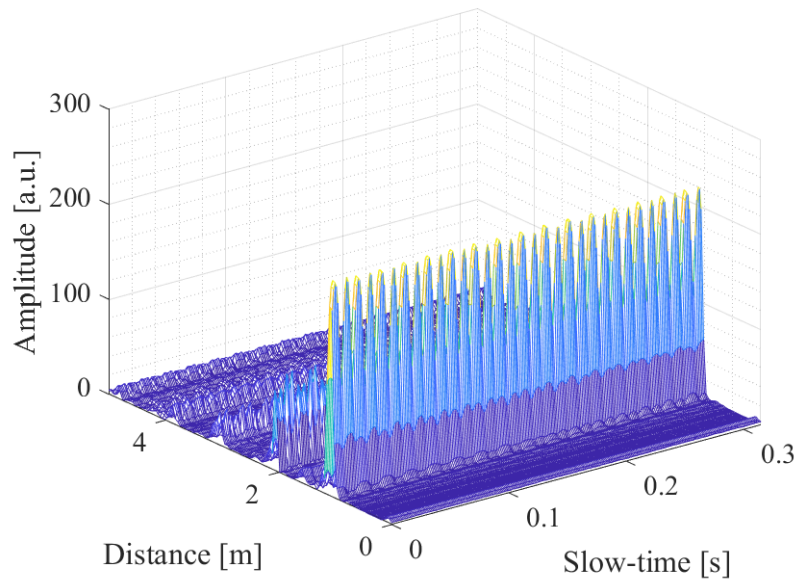


図 4.24 ベースバンド信号の 1D-FFT

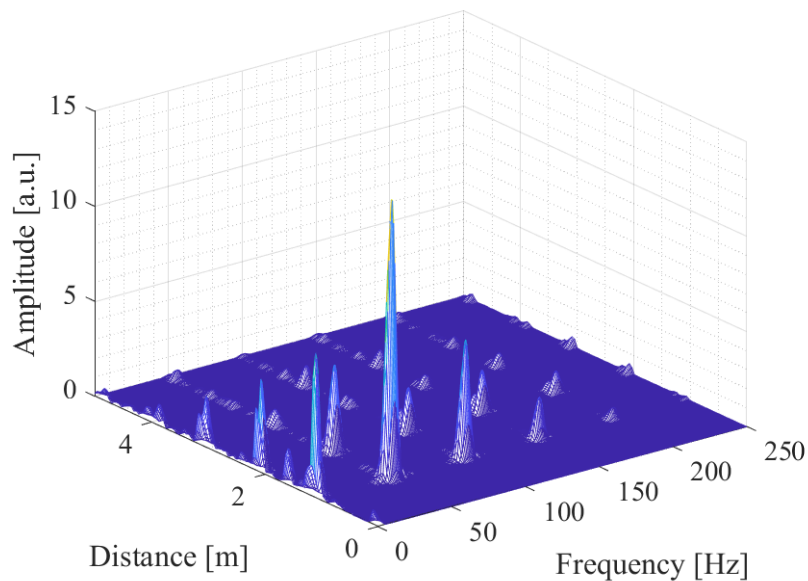


図 4.25 ベースバンド信号の 2D-FFT

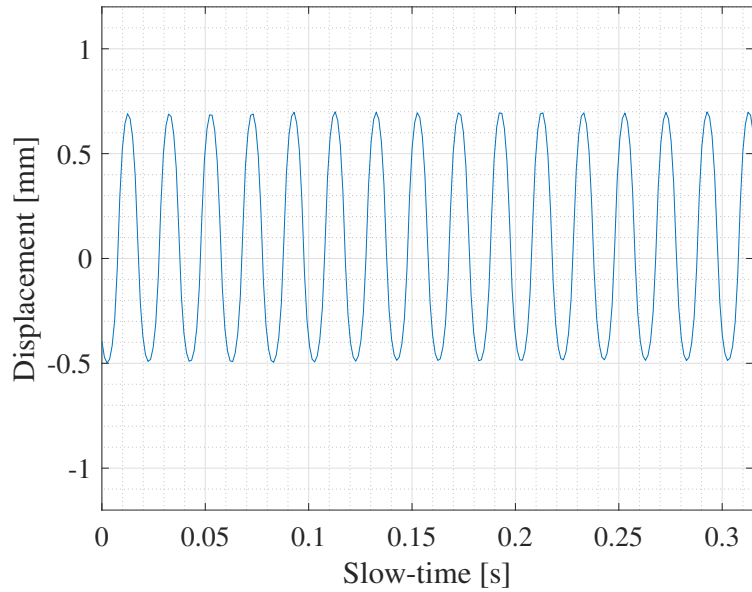


図 4.26 変位の推定結果

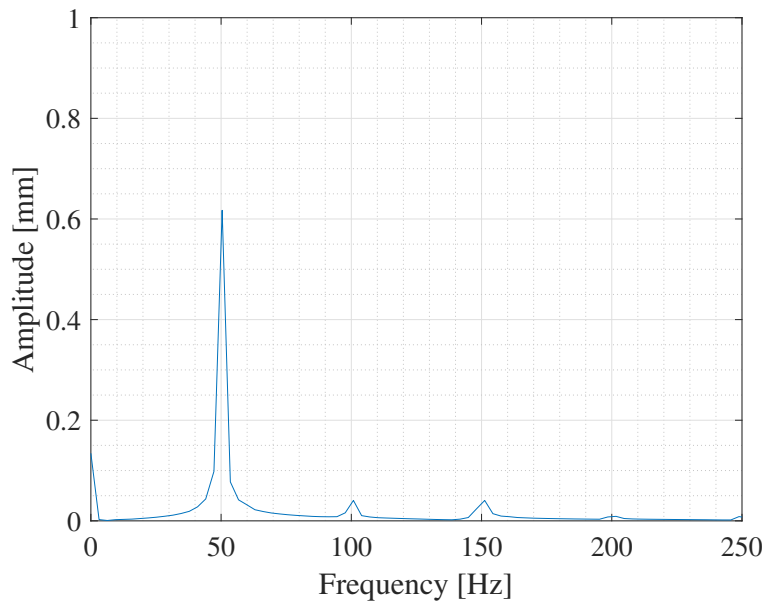


図 4.27 変位のフーリエスペクトル

次に、プラットフォームも振動している場合の結果を示す．ターゲットのみが振動している場合と同様に、ベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換を図 4.28, 図 4.29 に、Slow-time 方向にもフーリエ変換した結果を図 4.30, 図 4.31 に、図 4.28 および図 4.29 のピークから変位を推定した結果を図 4.32, 図 4.33 に、変位のフーリエスペクトルを図 4.34, 図 4.35 に示す．図 4.28, 図 4.29 はいずれもターゲットの存在する距離 1 m に大きなピークが現れている．また、2 m 付近には多重反射と思われるピークも現れている．図 4.30, 図 4.31 には複数の振動数のピークが現れており、これだけではターゲットの振動数を推定するのは困難である．図 4.28, 図 4.29 の 1 m の

ピークに着目し位相を Slow-time 方向に読み取れば，所望のターゲットからの信号のみを距離で分離し変位 (図 4.32, 図 4.33) を得ることができる．これは，ターゲットとプラットフォームの変位が合成されたものになっており，変位のフーリエスペクトル (図 4.34, 図 4.35) にはターゲットの振動数である 50 Hz の他に，10 Hz, 62 Hz, 69 Hz 等に複数の振動成分が確認できる．したがってフーリエスペクトルのみからターゲットの振動成分を特定し，ターゲットの振動数と振幅を推定するのは困難である．

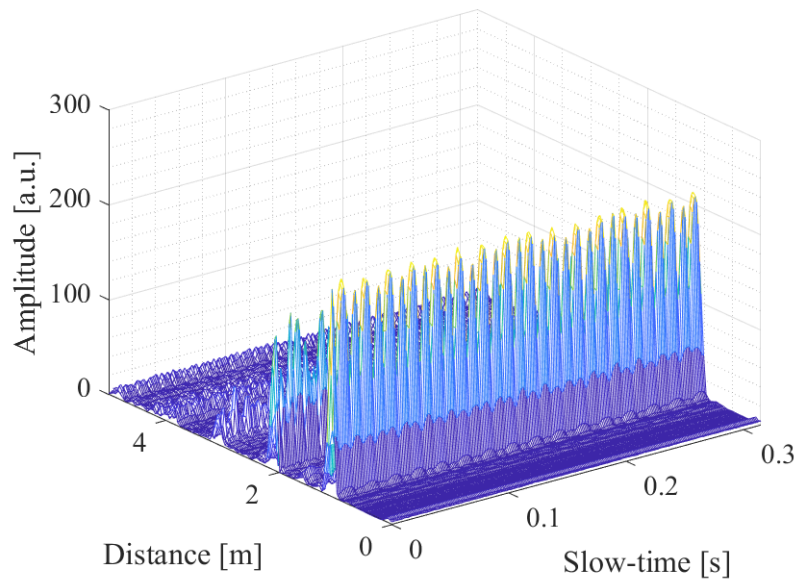


図 4.28 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 1)

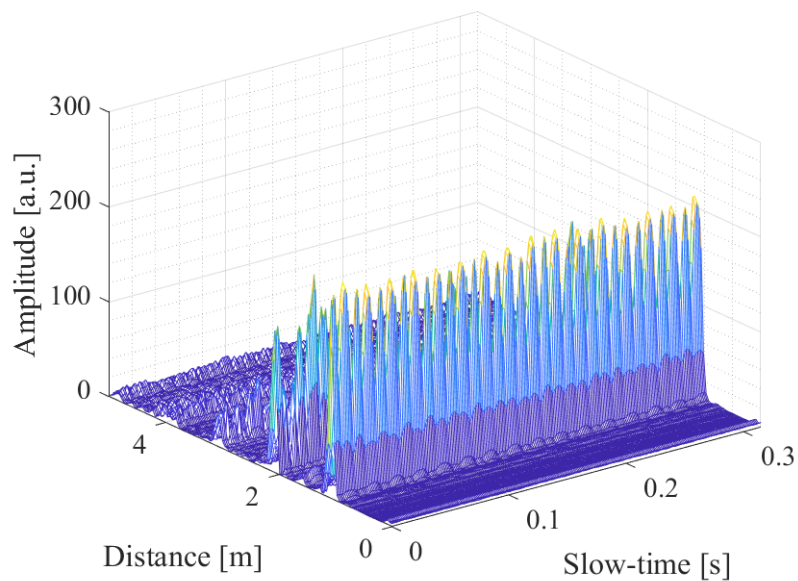


図 4.29 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 2)



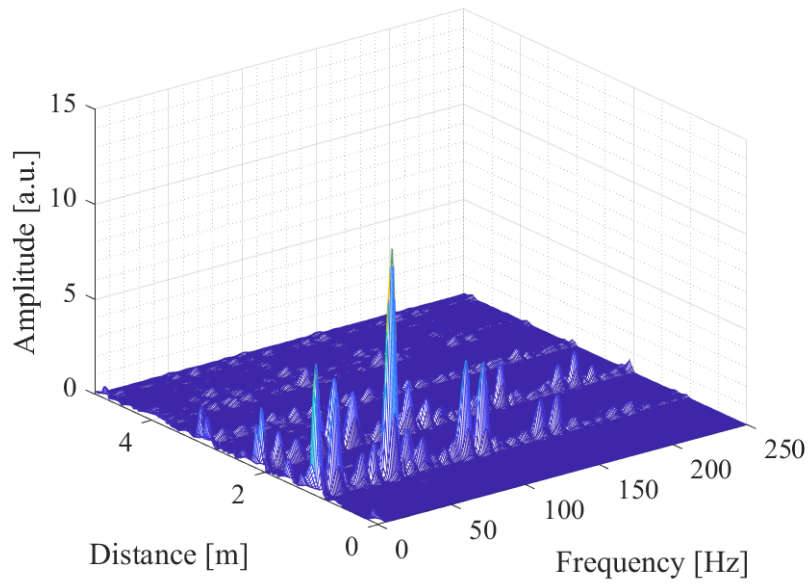


図 4.30 ベースバンド信号の 2D-FFT (プラットフォーム 1)

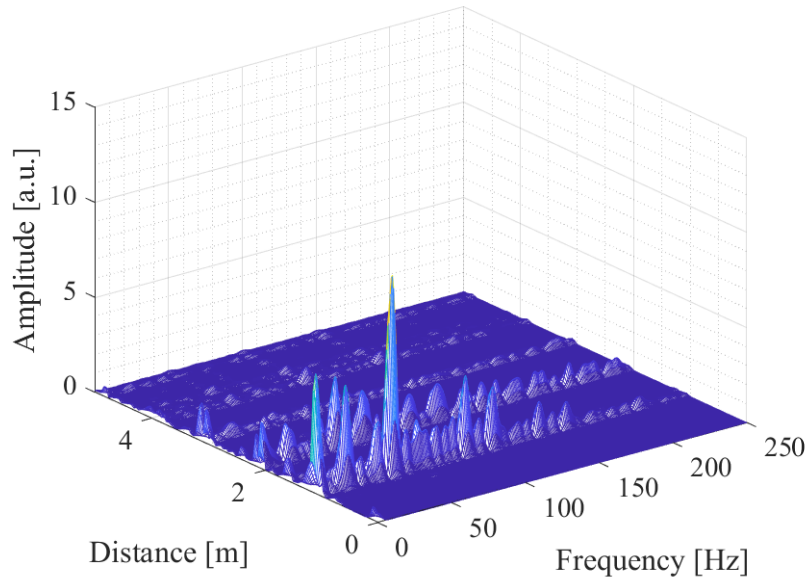


図 4.31 ベースバンド信号の 2D-FFT (プラットフォーム 2)

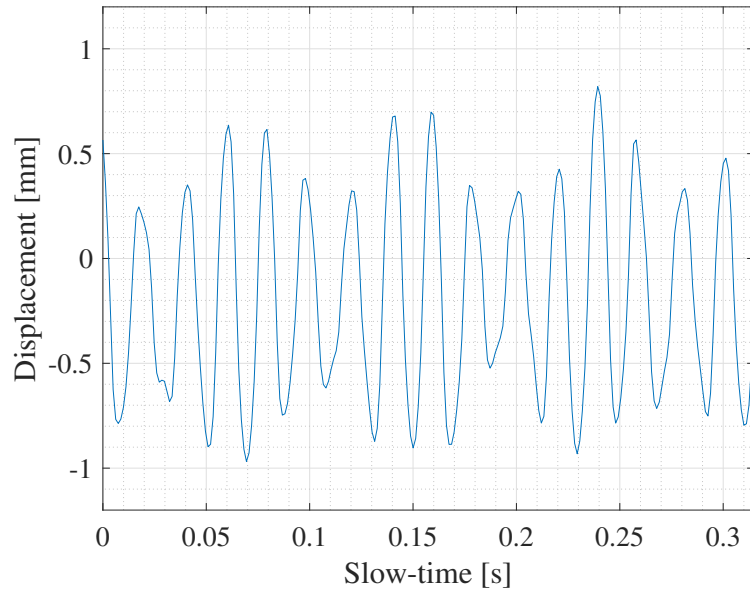


図 4.32 変位の推定結果 (プラットフォーム 1)

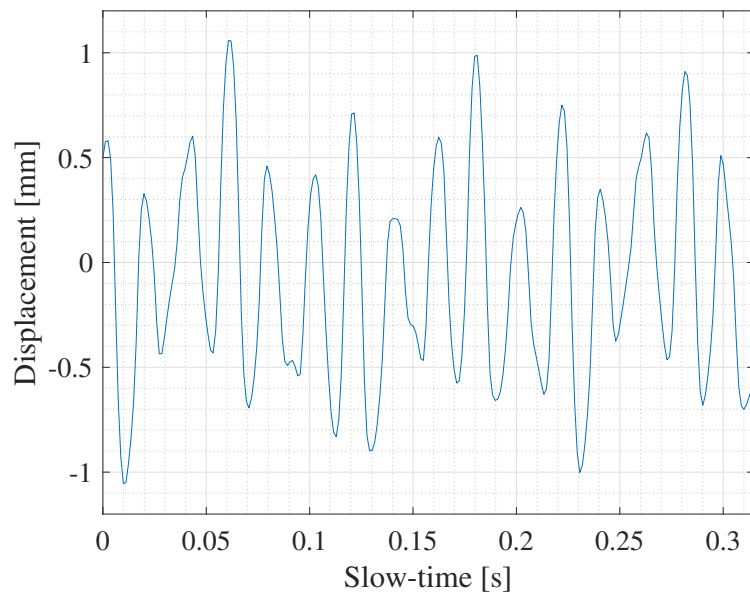


図 4.33 変位の推定結果 (プラットフォーム 2)

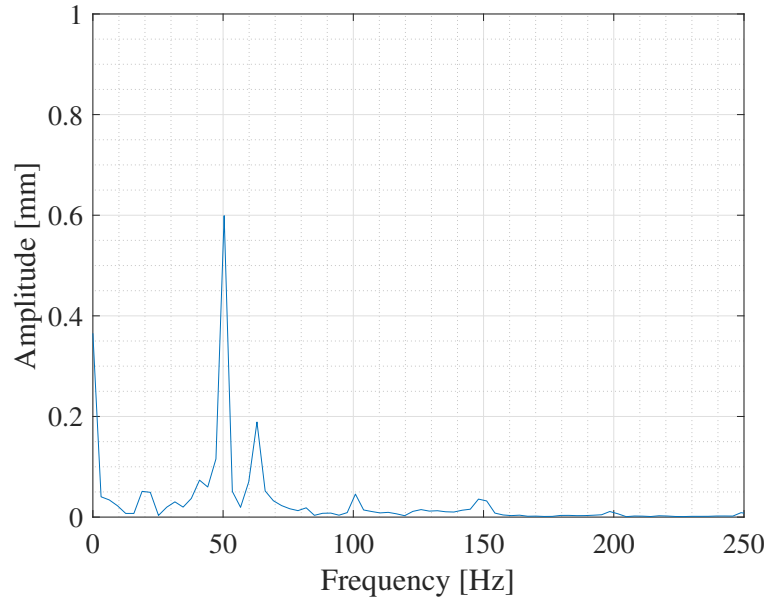


図 4.34 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)

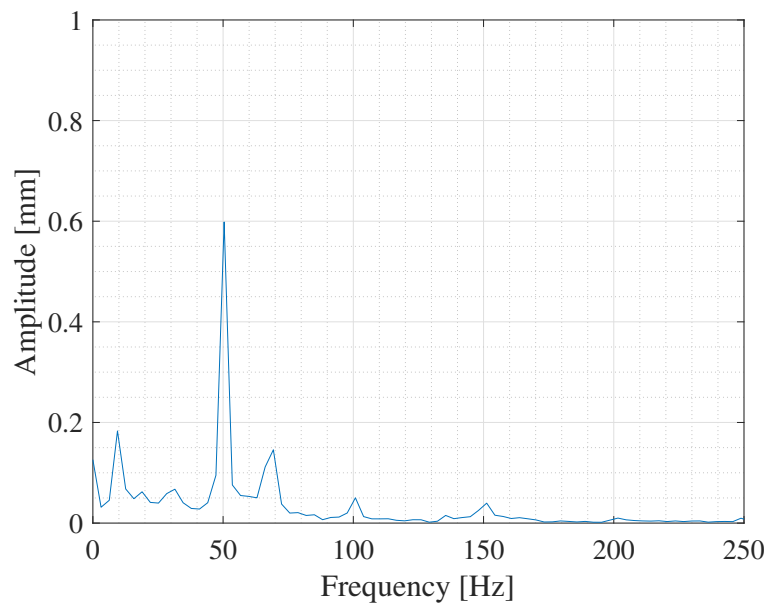


図 4.35 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

得られた変位のフーリエスペクトルからクロススペクトルを求めた結果を図 4.36 に示す。クロススペクトルでは、50 Hz 付近のピークのみが強く残り、それ以外の成分は抑圧されていることから、ターゲットの振動数を推定することが可能である。これは 50.4 Hz であった。さらに変位のフーリエスペクトルにおいて 50.4 Hz 成分のピーク値を読み取ると、2つのプラットフォームで得られたターゲットの視線方向振幅はそれぞれ  $599.1 \mu\text{m}$ 、 $598.5 \mu\text{m}$  であり、ターゲットのみが振動している場合の推定値と一致した。

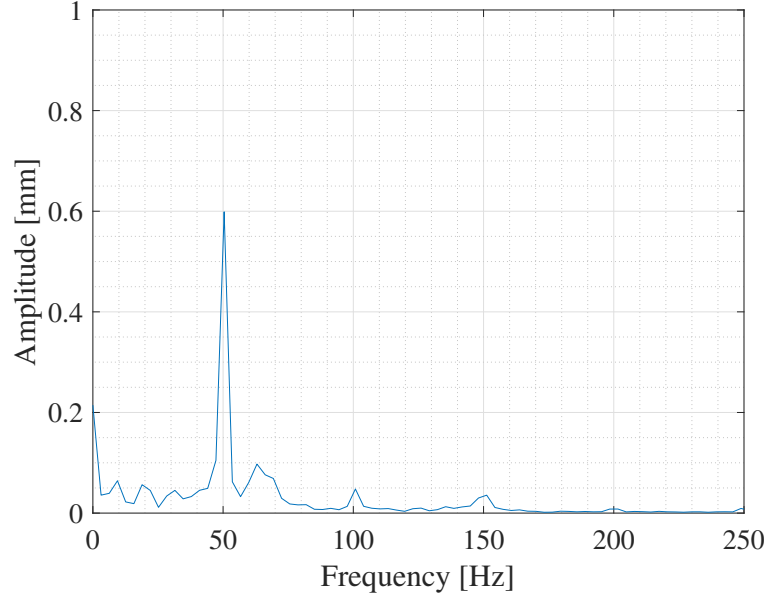


図 4.36 変位のクロススペクトル

以上の結果から、FMCW レーダのプラットフォームが振動している場合にも、提案法に基づいて2つのセンサのクロススペクトルを求めることで、ターゲットのみの振動状態を正しく推定できることが示された。

### 4.3.2 クラメール・ラオの下限

CW ドップラレーダの場合と同様、本節では、クラメール・ラオの下限 (CRLB)[59] を導出し、本手法による推定精度の理論限界を明らかにする。

#### 振動数推定の CRLB

FMCW レーダの場合においても、ターゲットの振動数推定は、2つのベースバンド信号の Slow-time 方向の相互相関関数の周波数を推定する問題に置き換えられる。ベースバンド信号を表す式 (4.6), 式 (4.7) を離散化したものを、それぞれ

$$y_1(l, n) = A_1 \exp j \{ \omega_1 l + \alpha_1 \sin(\omega_t n + \phi_t) + \beta_1 \sin(\omega_{p1} n + \phi_{p1}) + \phi_1 \} \quad (4.10)$$

$$y_2(l, n) = A_2 \exp j \{ \omega_2 l + \alpha_2 \sin(\omega_t n + \phi_t) + \beta_2 \sin(\omega_{p2} n + \phi_{p2}) + \phi_2 \} \quad (4.11)$$

とする。  $l$  は Fast-time 方向のサンプリング、  $n$  は Slow-time 方向のサンプリングを表す。また、  $\omega_1 = \frac{4\pi FR_1}{cT_1}$ ,  $\omega_2 = \frac{4\pi FR_2}{cT_2}$ ,  $\alpha_1 = \frac{4\pi f \cos \theta_{t1}}{c} m_t$ ,  $\alpha_2 = \frac{4\pi f \cos \theta_{t2}}{c} m_t$ ,  $\beta_1 = \frac{4\pi f \cos \theta_{p1}}{c} m_{p1}$ ,  $\beta_2 = \frac{4\pi f \cos \theta_{p2}}{c} m_{p2}$ ,  $\phi_1 = \frac{4\pi f_0 R_1}{c}$ ,  $\phi_2 = \frac{4\pi f_0 R_2}{c}$  とした。

これらの Slow-time 方向の相互相関関数は,

$$\begin{aligned}
C(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_1(k+n) y_2^*(n) \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_1 A_2 \exp j [\omega_1 l + \alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} + \phi_1 \\
&\quad - \omega_2 l - \alpha_2 \sin \{\omega_t n + \phi_t\} - \beta_2 \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} - \phi_2] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A \exp j [\omega l + \alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
&\quad - \alpha_2 \sin \{\omega_t n + \phi_t\} - \beta_2 \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} + \phi] \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A \exp j \gamma
\end{aligned} \tag{4.12}$$

と表される. ただし,  $A = A_1 A_2$ ,  $\omega = \omega_1 - \omega_2$ ,  $\phi = \phi_1 - \phi_2$ ,  $\gamma = \omega l + \alpha_1 \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} + \beta_1 \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} - \alpha_2 \sin \{\omega_t n + \phi_t\} - \beta_2 \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} + \phi$  とした. これは, CW ドップラレーダの場合の相互相関関数, 式 (3.29) に, 未知母数  $\omega$  が 1 つ増えた形をしている.

式 (4.12) を信号モデルと見なせば, 確率密度関数は,

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{KL}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \|y - C\|^2 \right\} \\
&= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{KL}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} (y - C)(y^* - C^*) \right\}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

であり, フィッシャー情報行列の各要素は,

$$\begin{aligned}
I_{i,j} &= -E \left[ \frac{\partial^2 \ln P}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \\
&= -E \left[ \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ (y - C) \frac{\partial^2 C^*}{\partial \theta_i \partial \theta_j} - \frac{\partial C^*}{\partial \theta_i} \frac{\partial C}{\partial \theta_j} + (y^* - C^*) \frac{\partial^2 C}{\partial \theta_i \partial \theta_j} - \frac{\partial C}{\partial \theta_i} \frac{\partial C^*}{\partial \theta_j} \right\} \right] \\
&= \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \frac{\partial C^*}{\partial \theta_i} \frac{\partial C}{\partial \theta_j} + \frac{\partial C}{\partial \theta_i} \frac{\partial C^*}{\partial \theta_j} \right\}
\end{aligned} \tag{4.14}$$

となる. これを求めるため,  $C(k)$  の未知母数

$$\theta = [A, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \phi, \omega_t, \omega_{p1}, \omega_{p2}, \phi_t, \phi_{p1}, \phi_{p2}, \omega]$$

による 1 階微分を計算するが,  $\gamma$  の中で  $\omega l$  は独立に存在するため, 12 番目までの未知母数による微分は, CW ドップラレーダの場合の式 (3.30) から式 (3.41) までと同じ形で表すことができる.

$C(k)$  の  $\omega$  による 1 階微分は,

$$\frac{\partial C}{\partial \omega} = jlA \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp j\gamma \quad (4.15)$$

となる.

式 (3.30) から式 (3.41) と式 (4.15) を用いて, 式 (4.14) に基づいてフィッシャー情報行列の上三角成分を求めるに際し,  $I_{1,1}$  から  $I_{12,12}$  成分までは, 式 (A.1) から式 (A.78) に対して,  $l$  に対する総和  $\sum_{l=0}^{L-1}$  を取ったものになる.  $\gamma$  の中で  $\omega l$  は独立に存在することから, 微分により  $l$  は消え, これらは単に  $L$  倍されるだけとなる. したがって, ここでは, 13 番目の未知母数  $\omega$  に関わり追加された要素のみを記載する.

$$I_{1,13} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.16)$$

$$I_{2,13} = \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.17)$$

$$I_{3,13} = -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.18)$$

$$I_{4,13} = \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.19)$$

$$I_{5,13} = -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned}
I_{6,13} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,13} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1(k+n) \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& - \alpha_2 n \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1(k+n) \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \\
& - \alpha_2 n \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \left. \right] \quad (4.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{8,13} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{9,13} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos\{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos\{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{10,13} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& - \alpha_2 \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \\
& - \alpha_2 \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \left. \right] \quad (4.25)
\end{aligned}$$

$$I_{11,13} = \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\ \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.26)$$

$$I_{12,13} = -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p1} \} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\ \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p1} \} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (4.27)$$

$$I_{13,13} = \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{l=0}^{L-1} l^2 \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right] \quad (4.28)$$

CW ドップラレーダの場合と同様，これらの式を簡約化するのは困難だが，パラメータを与えて数値的にフィッシャー情報行列を求めることは可能である．得られたフィッシャー情報行列の逆行列の (7,7) 成分が，ターゲットの角振動数  $\omega_t$  の推定値の分散の下限，すなわち CRLB を表す．

### 振幅推定の CRLB

次に，ターゲットの振幅を推定する際の CRLB を求める．振幅はベースバンド信号の Slow-time 方向の位相の変化を基に推定する．単一のベースバンド信号から振幅を推定する際の CRLB は文献 [61] に記載があり，これをプラットフォームも振動している場合に拡張する．

まず，ベースバンド信号を表す式 (4.6) を式 (4.10) と同様に離散化する．確率密度関数は，

$$P = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{NL}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{N-1} \|y_1(l, n) - A_1 \exp j\delta\|^2 \right\} \quad (4.29)$$

となる．ただし， $\delta = \omega_1 l + \alpha_1 \sin(\omega_t n + \phi_t) + \beta_1 \sin(\omega_{p1} n + \phi_{p1}) + \phi_1$  とした．ここから，フィッシャー行列の各要素は，

$$I_{i,j} = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{\partial s^*}{\partial \theta_i} \frac{\partial s}{\partial \theta_j} + \frac{\partial s}{\partial \theta_i} \frac{\partial s^*}{\partial \theta_j} \right\} \quad (4.30)$$

であるので，未知母数

$$\theta = [A_1, \omega_1, \phi_1, \alpha_1, \omega_t, \phi_t, \beta_1, \omega_{p1}, \phi_{p1}]$$

により式 (4.10) を微分すると，それぞれ，

$$\frac{\partial s}{\partial A_1} = \exp j\delta \quad (4.31)$$



$$\frac{\partial s}{\partial \omega_1} = jA_1 l \exp j\delta \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \phi_1} = jA_1 \exp j\delta \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \alpha_1} = jA_1 \sin(\omega_t n + \phi_t) \exp j\delta \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \omega_t} = jA_1 \alpha_1 n \cos(\omega_t n + \phi_t) \exp j\delta \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \phi_t} = jA_1 \alpha_1 \cos(\omega_t n + \phi_t) \exp j\delta \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \beta_1} = jA_1 \sin(\omega_{p1} n + \phi_{p1}) \exp j\delta \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \omega_{p1}} = jA_1 \beta_1 n \cos(\omega_{p1} n + \phi_{p1}) \exp j\delta \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \phi_{p1}} = jA_1 \beta_1 \cos(\omega_{p1} n + \phi_{p1}) \exp j\delta \quad (4.39)$$

となる．これらを式 (4.30) に代入しフィッシャー情報行列を求めると，

$$I = \begin{pmatrix} \frac{NL}{\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1^2 NL(L-1)(2L-1)}{6\sigma^2} & \frac{A_1^2 NL(L-1)}{2\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1^2 NL(L-1)}{2\sigma^2} & \frac{A_1^2 NL}{\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 NL}{2\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 \alpha_1^2 NL(N-1)(2N-1)}{12\sigma^2} & \frac{A_1^2 \alpha_1^2 NL(N-1)}{4\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 \alpha_1^2 NL(N-1)}{4\sigma^2} & \frac{A_1^2 \alpha_1^2 NL}{2\sigma^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 NL}{2\sigma^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 \beta_1^2 NL(N-1)(2N-1)}{12\sigma^2} & \frac{A_1^2 \beta_1^2 NL(N-1)}{4\sigma^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_1^2 \beta_1^2 NL(N-1)}{4\sigma^2} & \frac{A_1^2 \beta_1^2 NL}{2\sigma^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

となる．この逆行列は，

$$I^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma^2}{LN} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\sigma^2}{A_1^2 L(L^2-1)N} & -\frac{6\sigma^2}{A_1^2 L(L+1)N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6\sigma^2}{A_1^2 L(L+1)N} & \frac{2(2L-1)\sigma^2}{A_1^2 L(L+1)N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2\sigma^2}{A_1^2 LN} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{24\sigma^2}{A_1^2 \alpha^2 LN(N^2-1)} & -\frac{12\sigma^2}{A_1^2 \alpha^2 LN(N+1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12\sigma^2}{A_1^2 \alpha^2 LN(N+1)} & \frac{4(2N-1)\sigma^2}{A_1^2 \alpha^2 LN(N+1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2\sigma^2}{A_1^2 LN} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{24\sigma^2}{A_1^2 \beta^2 LN(N^2-1)} & -\frac{12\sigma^2}{A_1^2 \beta^2 LN(N+1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12\sigma^2}{A_1^2 \beta^2 LN(N+1)} & \frac{4(2N-1)\sigma^2}{A_1^2 \beta^2 LN(N+1)} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

と計算されることから、 $\alpha_1$  の分散は、この (4,4) 成分より、

$$\text{var}(\alpha_1) \geq \frac{2\sigma^2}{A_1^2 LN} \quad (4.42)$$

となる。さらに、 $\text{SNR} = \frac{A_1^2}{\sigma^2}$ 、 $\alpha_1 = \frac{4\pi f \cos \theta_{t1}}{c} m_t$  であることから、ターゲットの視線方向振幅の分散の下限  $\text{var}(m_t \cos \theta_t)$  は、

$$\text{var}(m_t \cos \theta_t) \geq \frac{c^2}{8\pi^2 f^2 LN \times \text{SNR}} \quad (4.43)$$

と与えられる。

以上述べたように、本節では提案手法によるターゲットの振動数と振幅の推定精度の理論的な限界を明らかにした。次節では、CRLB とシミュレーションで得られた分散との比較を行い、これらの妥当性を検証する。

### 4.3.3 精度の検証

本節では、所定の SN 比となるようにベースバンド信号にノイズを加えてシミュレーションを行い、ターゲットの振幅と振動数を推定する際の分散を評価する。これを前節で得られた CRLB と比較することで、CRLB の妥当性を検証する。

計算条件は、中心周波数を 24 GHz、帯域幅を 200 MHz、チャープ周期を 40 ms、Fast time のサンプリング点数を 1024 点、Slow-time のサンプリング点数を 256 点とし、ターゲットと 2 つのプラットフォームの振動の振幅を 1 mm、振動数はそれぞれ 5, 3, 4 Hz とした。FFT 処理利得を考慮した SN 比を 0 から 30 dB とし、前節に示す CRLB を計算した。合わせて、同じ SN 比となるように式 (4.6)、式 (4.7) にノイズを加え、4.2 節に述べた手法でターゲットの振幅と振動数の推定を行い、1000 回の試行の分散を評価した。結果を図 4.37 に示す。

図 4.37 においてシミュレーションで得られた分散と CRLB はオーダーが概ね一致する。したがって、前節で得られた振幅推定の CRLB は妥当であると考えられる。

同様に、ターゲットの振動数推定についても CRLB と、フーリエ変換及び最尤推定法による 2 つのシミュレーションの比較を行った。結果を図 4.38 に示す。

図 4.38 において SN 比が 0 から 20 dB の範囲では、CRLB とシミュレーションで得られた分散は一致する。フーリエ変換によってクロススペクトルから振動数を推定した場合、SN 比が 30 dB において CRLB よりも分散が大きくなる傾向が確認された。これは、フーリエ変換の分解能の下限に達したためだと考えられる。一方、最尤推定法による振動数推定の分散は、SN 比が 0 から 30 dB の範囲で CRLB と一致することから、振動数推定においても前節で得られた CRLB は妥当であると考えられる。

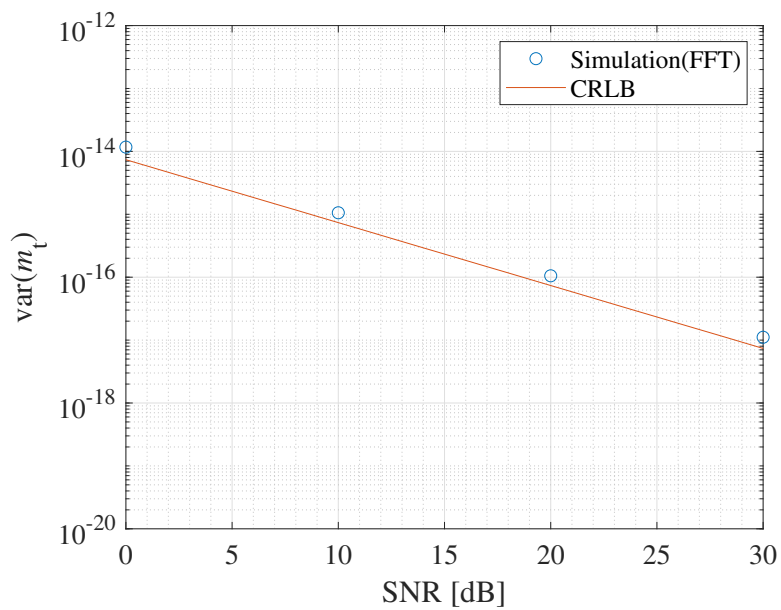


図 4.37 振幅推定の分散

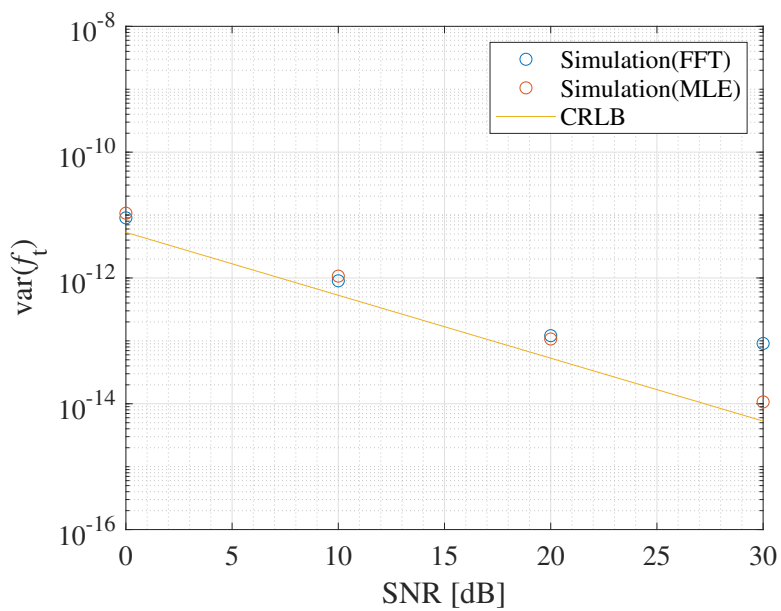


図 4.38 振動数推定の分散

## 4.4 スケールアップ試験

前節の原理検証試験は、レーダの視野内にターゲットが1つだけ存在する理想的な環境下で行われた。本手法を実環境に適用する場合、振動状態を推定したいターゲットのみならず、その周囲の物体からの反射信号もレーダで受信されることになる。FMCWレーダを用いる利点のひとつは、ターゲットからの反射と周囲の物体からの反射とを距離に基づいて分離した上で振動推定が行えることである。そこで本節では、より実環境に近いスケールアップ試験として、屋外で二輪車をターゲットとして測定を行い、本手法の有効性を確認する。

### 実験装置

実験におけるレーダとターゲットの位置関係を図 4.39 に示す。原理検証実験と同様に、FMCWレーダには Texas Instruments の IWR1642BOOST を使用し、DCA1000EVM を経由してベースバンド信号をコンピュータに取り込んだ。二輪車のエンジン稼働中の振動を測定対象とし、レーダには振動モータを接触させて正弦的な振動を外乱として与えた。

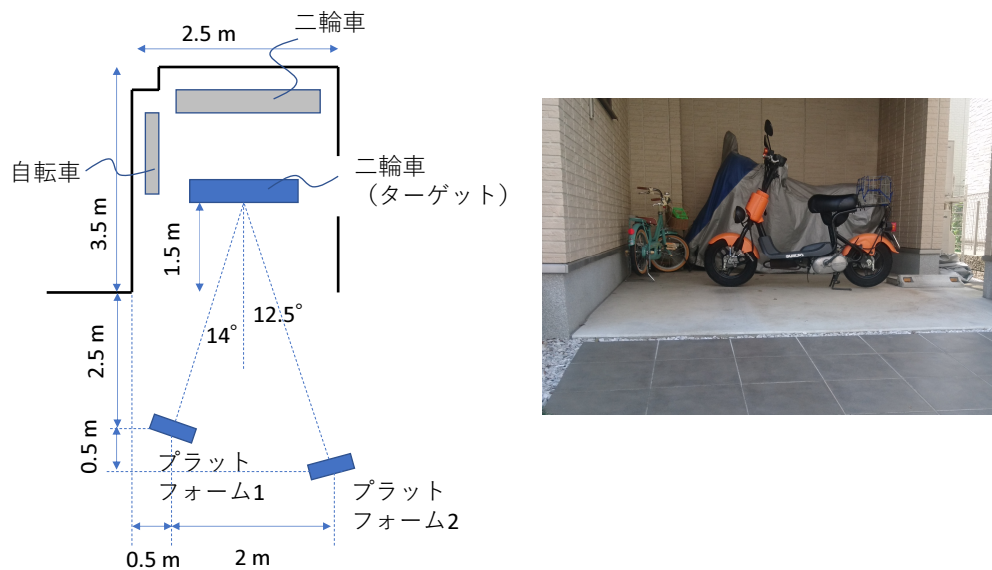


図 4.39 レーダと測定対象の位置関係

正解とするターゲットの振動数と振幅は、レーダに振動外乱を与えずに、プラットフォーム1と2の中間地点からFMCWレーダを用いて従来法 [61] で推定した。変位の推定結果を図 4.40 に、このフーリエスペクトルを図 4.41 に示す。図 4.41 より、振動数 16.8 Hz, 20.9 Hz, 41.5 Hz に、それぞれ振幅が  $37.34 \mu\text{m}$ ,  $11.34 \mu\text{m}$ ,  $41.5 \mu\text{m}$  の振動成分が確認できる。これらの振動数は、エンジンの振動数とその2倍の振動数成分、車体の共振周波数に相当するものだと考えられる。

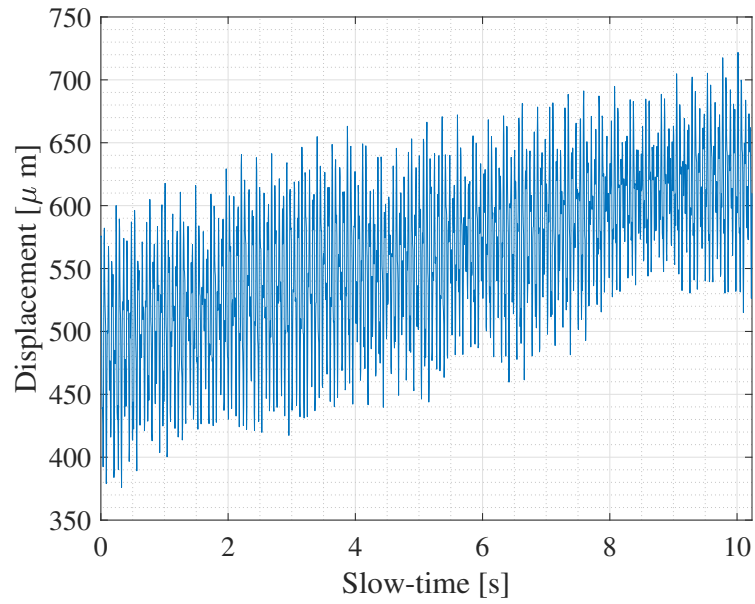


図 4.40 外乱が無い場合のターゲットの変位推定結果

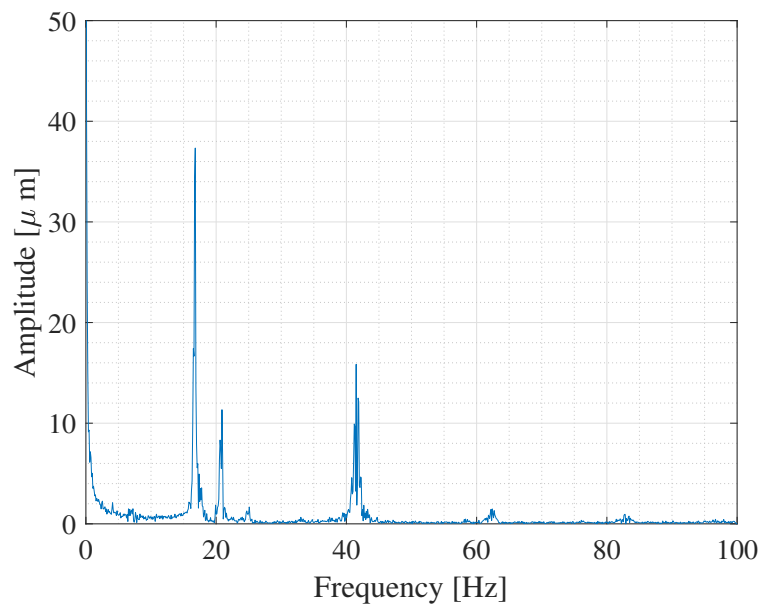


図 4.41 外乱が無い場合のターゲットの変位のフーリエスペクトル

チャープシーケンスを図 4.42 に示す. Fast-time 方向には, 周波数を 77.0999 GHz から 80.5112 GHz まで掃引し, ベースバンド信号をサンプリング周波数 5 MHz で 1024 点取得した. Slow-time 方向には, 周期 5 ms で 2048 回分のチャープをサンプリングした.

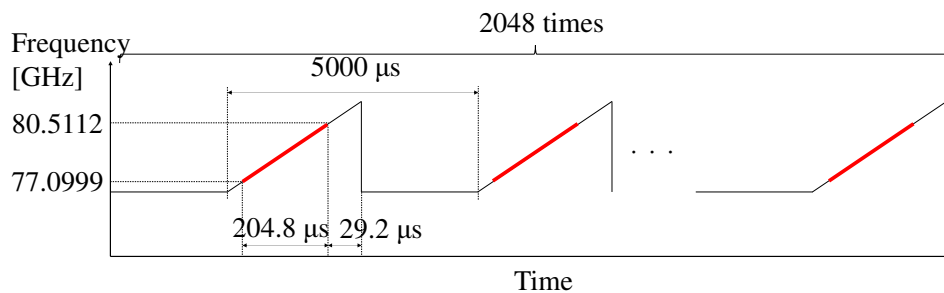


図 4.42 FMCW レーダのチャープシーケンス

## 結果と考察

プラットフォームに外乱を与えつつ測定を行い、ベースバンド信号を取得した。ベースバンド信号の Fast-time 方向のフーリエ変換を図 4.43, 図 4.44 に示す。図 4.43, 図 4.44 においては、ターゲットを含む複数の距離にピークが確認できる。事前の検討で、プラットフォーム 1 においては距離 4.572 m, プラットフォーム 2 においては距離 5.099 m のピークがターゲットを表すことを確認しており、これらのピークの位相を Slow-time 方向に見て変位を推定した結果を図 4.45, 図 4.46 に、変位のフーリエスペクトルを図 4.47, 図 4.48 に示す。図 4.47, 図 4.48 には複数の振動数のピークが現れており、また外乱と思われる振動成分が最も大きいため、これだけではターゲットの振動数を推定するのは困難である。

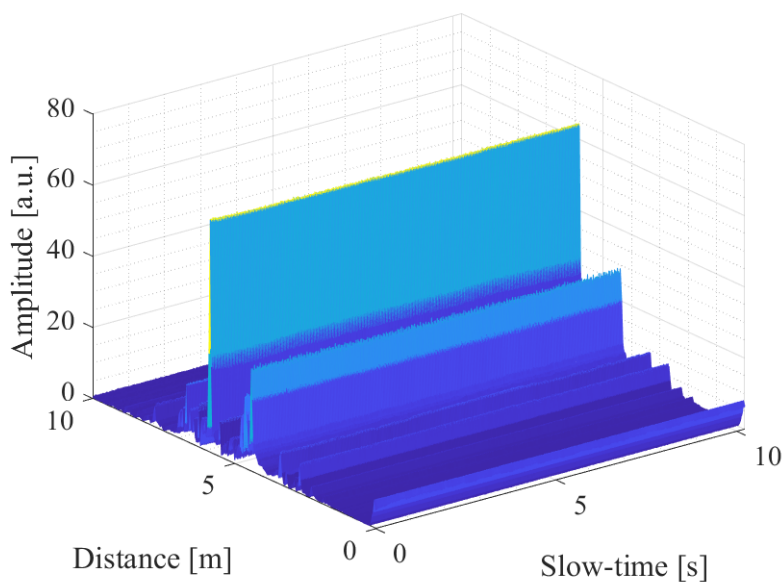


図 4.43 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 1)

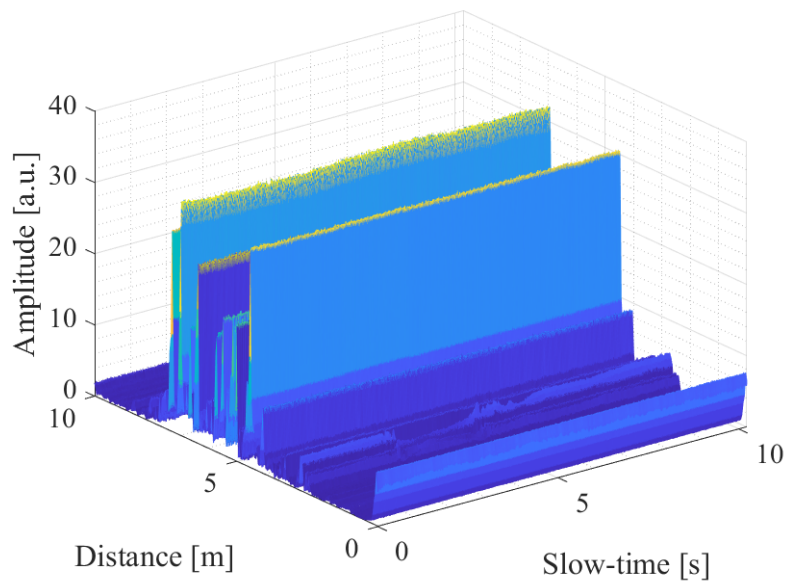


図 4.44 ベースバンド信号の 1D-FFT (プラットフォーム 2)

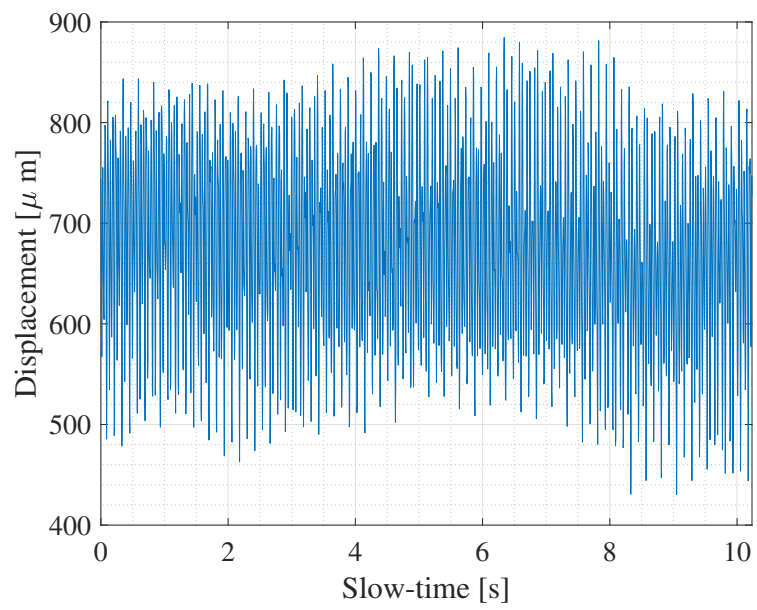


図 4.45 変位の推定結果 (プラットフォーム 1)

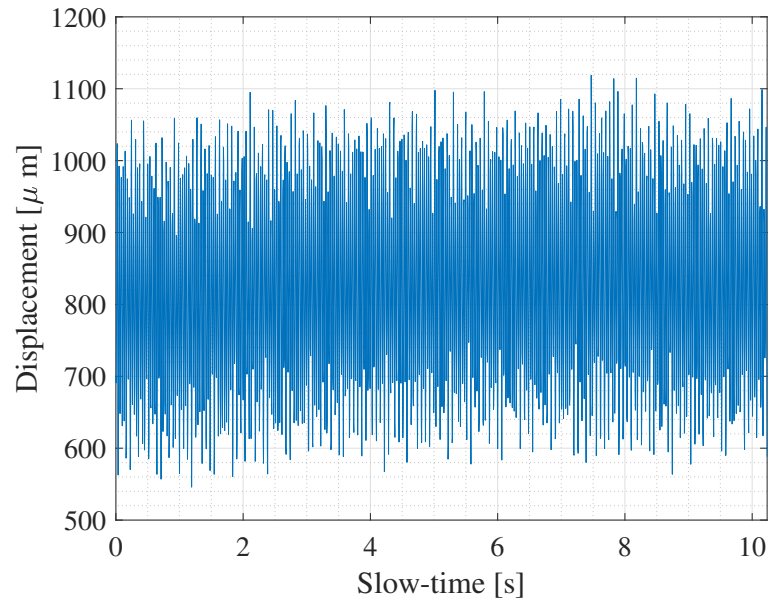


図 4.46 変位の推定結果 (プラットフォーム 2)

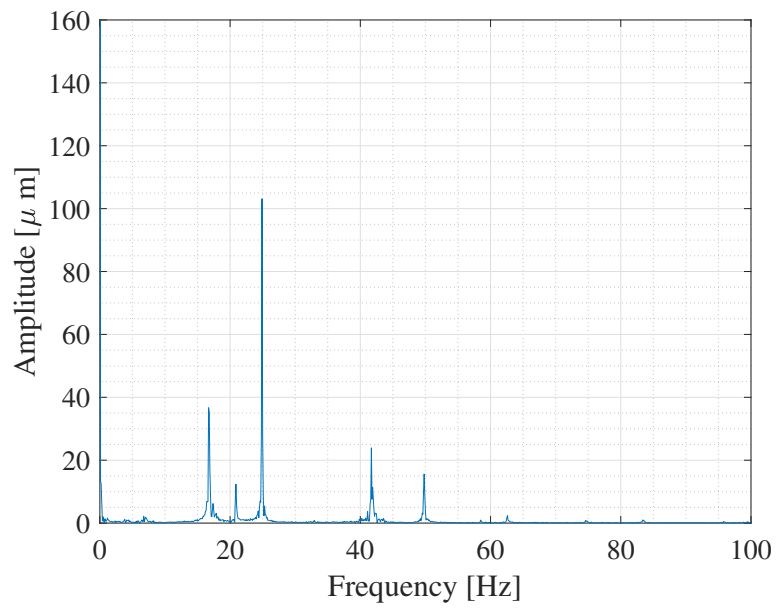


図 4.47 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 1)



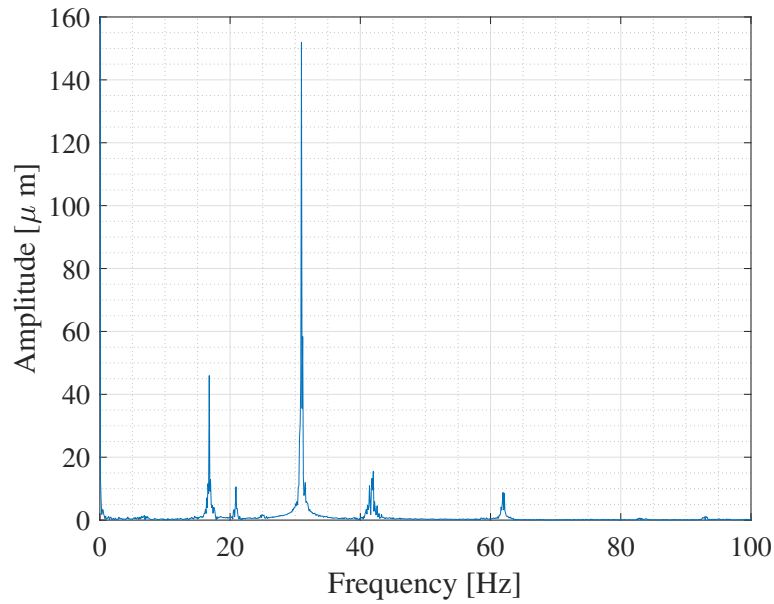


図 4.48 変位のフーリエスペクトル (プラットフォーム 2)

得られた変位のフーリエスペクトルからクロススペクトルを求めた結果を図 4.49 に示す。クロススペクトルでは、振動数 16.8 Hz, 20.9 Hz, 24.9 Hz, 30.96 Hz, 41.7 Hz に、それぞれ振幅が  $40.2 \mu\text{m}$ ,  $11.43 \mu\text{m}$ ,  $13.47 \mu\text{m}$ ,  $5.78 \mu\text{m}$ ,  $15.57 \mu\text{m}$  のピークが現れている。このうち 24.9 Hz, 30.96 Hz のピークは外乱によるものである。クロススペクトルによりプラットフォームの外乱は抑制されるものの、外乱がターゲットの振動に比べて大きく、僅かながら外乱成分が残ってしまっている。しかしながら、ターゲットのピークと同等かそれ以下には抑圧できているため、ターゲットの振動推定の目的のためには十分な性能であると考えている。

ターゲットの振動のピークに着目すると、図 4.41 より推定される振幅と同程度の推定値が得られている。それぞれの振動成分の振動方向は未知であるが、外乱無しで測定した場合と、プラットフォーム 1 及び 2 の視線方向の成す角がそれぞれ  $14^\circ$ ,  $12.5^\circ$  であり、これらの  $\cos$  をとった程度の振幅推定値の差に収まっていることから、妥当な結果が得られたと考えている。

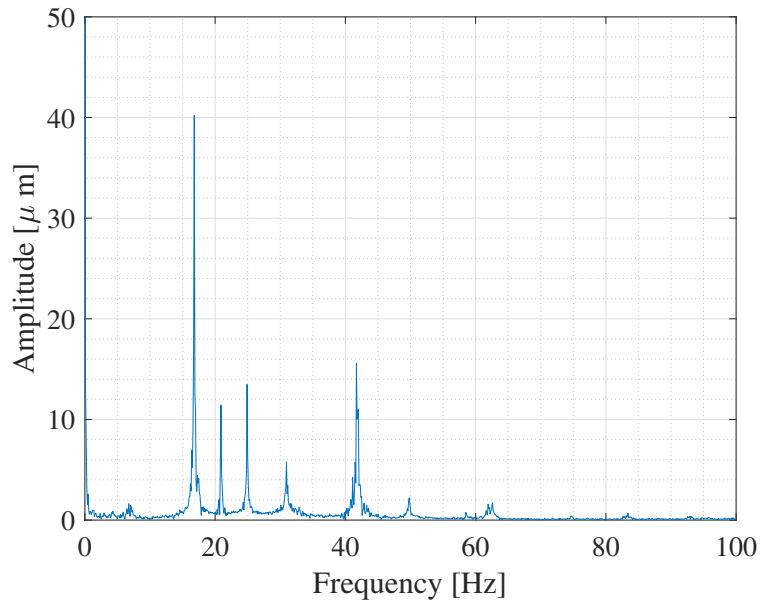


図 4.49 変位のクロススペクトル

## 4.5 まとめ

本章では、ミリ波レーダを用いて構造物の振動状態を測定するにあたり、レーダを設置しているプラットフォームそのものも振動外乱を受けている場合に、この外乱を除去した上でターゲットの振動の振幅と振動数を推定する方法を FMCW レーダに拡張した。

CW ドップラレーダの場合ターゲットの距離に関する情報は得られないため、レーダの視野内に複数の振動する物体がある場合や、マルチパスの影響を受ける場合には、本来の測定したいターゲットのみの振動状態を抽出するのが困難な場合が生じるという課題に対して、FMCW レーダを用いて距離でターゲットを分離した上で本手法を適用することを検討した。シミュレーションと実験で基礎的な原理検証を完了するとともに、CRLB を導出し、理論上の推定精度を明らかにした。

本手法を実際の構造物監視に適用し、屋外環境での有効性を確認することが、今後の課題である。

## 第5章 結論

### 5.1 本研究の成果

鉄鋼製造プロセスでは、長年、プロセスの効率化やプロセス計測技術の研究が行われてきた。一方、高温の溶融物や粉体を大量に取り扱い、生産設備が巨大であり、24時間昼夜を問わず稼働を続けるといった鉄鋼製造プロセス特有の課題により、未だ可視化の進んでいないプロセスが存在したり、屋外設備の監視手法の確立等の新たなニーズも現れてきた。本研究では、マイクロ波帯の電磁波の鉄鋼製造プロセスにおける新たな計測技術としての適用可能性を論じ、上記の課題の解決手段を提案した。本研究で得られた成果を以下に述べる。

ミリ波レーダを用いて構造物の振動状態を測定するにあたり、レーダを設置しているプラットフォームそのものも振動外乱を受けている場合に、この外乱を除去した上でターゲットの振動の振幅と振動数を推定する方法を述べた。

2つのCW ドップラレーダでターゲットの振動を測定し、2つのベースバンド信号のクロススペクトルを計算することでプラットフォームの振動を取り除き、ターゲットの振動のみを取り出す方法を提案した。シミュレーションと実験により提案手法が正しく動作することを確認した。また、本手法によって達成可能なターゲットの振動数と振幅の推定精度を定量化するためにCRLBを導出し、シミュレーションとの比較によりこれらの妥当性を確認した。

さらに、距離でターゲットを分離し、実用上のロバスト性を改善するため、本手法のFMCWレーダへの適用を検討した。シミュレーションと実験で基礎的な原理検証を完了するとともに、CRLBを導出し、理論上の推定精度を明らかにした。

### 5.2 今後の課題

#### 振動外乱除去手法の実用化

本研究では、CW ドップラレーダとFMCWレーダを用いて、ラボスケールで提案手法の基礎的な原理検証を完了した。今後は、実用化に向けスケールアップした場合の課題抽出と対策を進めていく。例えば、ターゲットが大きくなった場合に、振動を測定する位置の信号を正しく取得できるかどうかは、今後検討すべき課題である。また、設備の振動を長期に渡り監視し、振動状態の時系列データから劣化の予兆を検知する解析手法の研究も求められる。これには、近年の機械学習的な手法の適用も考えられ、研究の広がりが期待できる。

さらに，本手法は製鉄設備の監視のみならず，橋梁等の屋外のインフラ構造物の監視にも適用可能な手法だと考えられる．あるいは一般のレーダにおいても，アンテナが風により振動する等の課題がある場合に，本手法により課題解決が可能なアプリケーションがあるかもしれない．本手法の新たな適用先を探索するのも，今後の課題である．

## 謝辞

新潟大学の山田寛喜教授には、本論文を執筆するにあたり丁寧なご指導を賜りました。また、博士課程への進学を快く受け入れて下さるとともに、第3章、及び第4章の研究を遂行するにあたり数多くのご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

進学後は研究室のゼミに参加するようになり、山口芳雄フェロー、山田研の卒業生、メンバーの皆様には、研究に対する貴重なアドバイスを頂きました。深く感謝申し上げます。研究室では最先端の研究に触れることができ、大変刺激になりました。

博士課程へ進学のお機会を与えて頂いた日本製鉄(株)の当時の上司の、村上英樹様、中川繁政様、本田達朗様、杉橋敦史様に心から感謝申し上げます。仕事と学業の両立ができるか不安でしたが、励ましのお言葉を頂き心強く感じました。

最後に、博士課程進学後は家庭でも博士研究に取り組むことが多く、家事や育児に至らない点があったかと思いますが、常に応援してくれた家族に深く感謝致します。

## 参考文献

### 参考文献

- [1] 吉沢一郎, 中川繁政, “製鉄設備におけるシステム・計測制御技術の進歩と展望,” 新日鉄住金技報, vol.411, pp.2-9, 2018.
- [2] 山本豊樹, 和田和実, 鹿子慎太郎, 樋口暁, “製鉄設備における診断技術の現状と今後,” 新日鉄住金技報, vol.402, pp.2-9, 2015.
- [3] 有山達郎, “鉄鋼における二酸化炭素削減長期目標達成に向けた技術展望,” 鉄と鋼, vol.105, no.6, pp.567-586, 2019.
- [4] 野村誠治, “2000年代の日本国内における製鉄技術動向,” 日本製鉄技報, vol.413, pp.2-14, 2019.
- [5] 原恭輔, “マイクロ波集中照射加熱による連続製鉄法の研究,” 東京工業大学 博士論文 甲第8649号, 2012.
- [6] T. Kinoshita and A. Sugihashi, “Design and optimization of a slot antenna for microwave heating of agglomerates,” COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol.37, no.6, pp.1886-1892, 2018.
- [7] 木下貴博, 杉橋敦史, 塚口友一, “マイクロ波によるモールドパウダー加熱技術の開発,” CAMP-ISIJ, vol.30, pp.597, September 2017.
- [8] G. Hakobyan and B. Yang, “High-Performance automotive radar: A review of signal processing algorithms and modulation schemes,” IEEE Signal Processing Magazine, vol.36, no.5, pp.32-44, 2019.
- [9] 小林純夫, “鉄鋼業におけるマイクロ波応用計測法の研究開発,” 東京大学 博士論文 207497, 1985.
- [10] D. Malberg, P. Hahlin, and E. Nilsson, “Microwave technology in steel and metal industry, an Overview,” ISIJ International, vol.47, no.4, pp.533-538, 2007.
- [11] 日本製鉄(株), 日本製鉄ファクトブック, 2019.

- [12] 今野雄介, 伊勢居良仁, 杉浦雅人, “高温対象物の画像計測,” 新日鉄住金技報, vol.411, pp.64-71, 2018.
- [13] A.C. Metaxas and R.J. Meredith, “Industrial microwave heating,” The Institution of Engineering and Technology, 1988.
- [14] M. Hotta, M. Hayashi, and K. Nagata, “Complex permittivity and permeability of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>1-x</sub>O powders in the microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz,” ISIJ International, vol.50, no.10, pp.1514-1516, 2010.
- [15] R. Roy, D.K. Agrawal, J. Cheng, and S. Gedeveanlshvili, “Full sintering of powdered-metal bodies in a microwave field,” Nature, vol.399, no.6737, pp.668-670, 1999.
- [16] 森本雅之, 大沼均, 新屋謙治, “産業用マイクロ波加熱装置,” 三菱重工技報, vol.31, no.6, pp.396-399, 1994.
- [17] 吉川昇 他, “マイクロ波加熱の基礎と産業応用,” S&T 出版, 2017.
- [18] 平初雄, 中村壽志, “不定形耐火物のマイクロ波乾燥技術,” 新日鉄技報, vol.388, pp.69-75, 2008.
- [19] 後藤潔, 花桐誠司, 河野幸次, 筒井康志, 新田法生, “炉材技術開発の歩みと今後の展望,” 新日鉄技報, vol.391, pp.109-112, 2011.
- [20] 織田博史, 茨城哲治, 安部洋一, “回転炉床法によるダストリサイクルシステム,” 新日鉄技報, vol.384, pp.134-139, 2006.
- [21] M. Hotta, M. Hayashi, and K. Nagata, “Complex permittivity and permeability of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>1-x</sub>O powders in the microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz,” ISIJ International, vol.50, no.10, pp.1514-1516, 2010.
- [22] E. Jerby, O. Aktushev, and V. Dikhtyar, “Theoretical analysis of the microwave-drill near-field localized heating effect,” Journal of Applied Physics, vol.97, no.3, pp.034909, 2005.
- [23] 塚口友一, 村方勇次, 吉廣望, “高纯净発熱モールドパウダー,” CAMP-ISIJ, vol.25, pp.1002, September 2012.
- [24] W.D. Kingery, H.K. Bowen, and D.R. Uhlmann, “Introduction to Ceramics,” Wiley-Interscience, 1976.
- [25] D. Regonini, V. Adamaki, C.R. Bowen, S.R. Pennock, J. Taylor, and A.C.E. Dent, “AC electrical properties of TiO<sub>2</sub> and Magneli phases, Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub>,” Solid State Ionics, vol.229, pp.38-44, 2012.

- [26] 中野武人, 藤雅雄, 永野恭一, 溝口庄三, 山本利樹, 浅野敬輔, “連鑄鑄片の縦割れの発生におよぼす鑄型内溶融パウダープールの影響,” 鉄と鋼, vol.67, no.8, pp.1210-1219, 1981.
- [27] J. Sheen, “Comparisons of microwave dielectric property measurements by transmission/reflection techniques and resonance techniques,” Measurement Science and Technology, vol.20, no.4, pp.042001, 2009.
- [28] 柴田長吉郎, 堀江涼, “マイクロ波を用いた計測技術,” 鉄と鋼, vol.73, no.9, pp.1096-1102, 1987.
- [29] S.M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, “Automotive radars: A review of signal processing techniques,” IEEE Signal Processing Magazine, vol.34, no.2, pp.22-35, 2017.
- [30] 長棟章生, 四辻淳一, “擬似ランダム信号変調ドップラーレーダ方式ガス流速計,” 計測自動制御学会論文集, vol.50, no.9, pp.626-632, 2014.
- [31] M. Kronauge and H. Rohling, “New chirp sequence radar waveform,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.50, no.4, pp.2870-2877, 2014.
- [32] A. Bourdoux, U. Ahmad, D. Guermandi, S. Brebels, A. Dewilde, and W.V. Thillo, “PMCW waveform and MIMO technique for a 79 GHz CMOS automotive radar,” 2016 IEEE Radar Conference, pp.1-5, 2016.
- [33] C. Sturm and W. Wiesbeck, “Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing,” Proceedings of the IEEE, vol.99, no.7, pp.1236-1259, 2011.
- [34] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.34, no.3, pp.276-280, 1986.
- [35] H. Abeida, Q. Zhang, J. Li, and N. Merabtine, “Iterative Sparse Asymptotic Minimum Variance Based Approaches for Array Processing,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.61, no.4, pp.933-944, 2013.
- [36] J. Li and P. Stoica, “MIMO radar with colocated antennas,” IEEE Signal Processing Magazine, vol.24, no.5, pp.106-114, 2007.
- [37] 若松洋介, 山田寛喜, 山口芳雄, “Khatri-Rao 積仮想アレーを用いた MIMO ドップラーレーダによる屋内人物位置推定に関する検討,” 信学技報, vol.114, no.193, AP2014-79, pp.39-44, August 2014.
- [38] 小西順平, 大橋卓, 山田寛喜, 丸山貴司, 平本美智代, 山口芳雄, “Khatri-Rao 積仮想アレー処理を用いた MIMO レーダによる距離および角度分解能向上に関する検討,” 信学技報, vol.117, no.31, AP2017-29, pp.37-42, May 2017.



- [39] 川田豊, 日下卓也, 井上憲一, 今田紘, 宮川裕, “位相変調法による高炉装入物レベル測定用 FM レーダ,” 計測自動制御学会論文集, vol.22, no.11, pp.61-67, 1986.
- [40] J. Wei, X. Chen, Z. Wang, J. Kelly, and P. Zhou, “3-Dimension burden surface imaging system with T-shaped MIMO radar in the blast furnace,” *ISIJ International*, vol.55, no.3, pp.592-599, 2015.
- [41] D. Zankl, S. Schuster, R. Feger, and A. Stelzer, “What a Blast!: A massive MIMO radar system for monitoring the surface in steel industry blast furnaces,” *IEEE Microwave Magazine*, vol.18, no.6, pp.52-69, 2017.
- [42] Y. Matsui, Y. Yamaguchi, M. Sawayama, S. Kitano, N. Nagai, and T. Imai, “Analyses on blast furnace raceway formation by micro wave reflection gunned through tuyere,” *ISIJ International*, vol.45, no.10, pp.1432-1438, 2005.
- [43] J. Wei and X. Chen, “Blowpipe antenna in blast furnace raceway depth measurement,” *ISIJ International*, vol.55, no.3, pp.586-591, 2015.
- [44] 川田豊, 真鍋知多佳, 小林明, 坪根巖, 山名寿, “マイクロ波方式による転炉内溶鉄レベル計の開発,” *鉄と鋼*, vol.76, no.11, pp.2041-2048, 1990.
- [45] 山下信也, “高精度電磁波式距離計の鉄鋼プロセスへの提案,” *日本鉄鋼協会 第 227・228 回西山記念技術講座*, pp.83-102, November 2016.
- [46] 佐藤源之, 鄒立龍, ジョバンニニコ, “地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) によるインフラモニタリングに関する基礎実験,” *信学技報*, vol.116, no.526, AP2016-179, pp.11-16, March 2017.
- [47] 藤垣元治, 中嶋友朗, “サンプリングモアレカメラによる構造物の微小振動計測,” *CAMP-ISIJ*, vol.31, pp.422-423, November 2018.
- [48] 石井抱, 唐正密, 島崎航平, 姜明俊, 高木健, “高フレームレートパノラマ画像を用いた広域小振動計測,” *CAMP-ISIJ*, vol.31, pp.426-427, November 2018.
- [49] I. Mostafanezhad, B.K. Park, O.B. Lubecke, V. Lubecke, and A.H. Madsen, “Sensor nodes for Doppler radar measurements of life signs,” *2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp.1241-1244, June 2007.
- [50] C. Li and J. Lin, “Random body movement cancellation in Doppler radar vital sign detection,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.56, no.12, pp.3143-3151, 2008.

- [51] Y. Wang, Z. Wang, B. Zhao, and L. Xu, "Enhancement of azimuth focus performance in high-resolution SAR imaging based on the compensation for sensors platform vibration," *IEEE Sensors Journal*, vol.16, no.16, pp.6333-6345, August 2016.
- [52] 木下貴博, 山田寛喜, "レーダによるターゲット変位推定における振動外乱除去方法の検討," *信学技報*, vol.119, no.316, SANE2019-80, pp.55-60, November 2019.
- [53] T. Kinoshita and H. Yamada, "Vibration disturbance cancellation method for estimation of target displacement by CW Doppler radar," 2020 IEEE Radar Conference, pp.498-502, September 2020.
- [54] C. Li and J. Lin, "Non-contact measurement of periodic movements by a 22-40 GHz radar sensor using nonlinear phase modulation," 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.579-582, June 2007.
- [55] Y. Yan, C. Li, J.A. Rice, and J. Lin, "Wavelength division sensing RF vibrometer," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.1-4, 2011.
- [56] Y. Yan, L. Cattafesta, C. Li, and J. Lin, "Analysis of detection methods of RF vibrometer for complex motion measurement," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.59, no.12, pp.3556-3566, December 2011.
- [57] C. Li, J. Ling, J. Li, and J. Lin, "Accurate Doppler radar noncontact vital sign detection using the RELAX algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.59, no.3, pp.687-695, March 2010.
- [58] T. Kinoshita and H. Yamada, "Effect of antenna pattern of radar on vibration estimation for infrastructure monitoring," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.741-742, January 2021.
- [59] S.M. Kay, "Fundamentals of statistical signal processing, Volume I: Estimation theory," Prentice Hall, 1993.
- [60] 木下貴博, 山田寛喜, "FMCW レーダによるターゲット変位推定における振動外乱除去方法の検討," *電子情報通信学会和文論文誌 B*, vol.J103-B, no.11, pp.616-625, 2020.
- [61] L. Ding, M. Ali, S. Patole, and A. Dabak, "Vibration parameter estimation using FMCW radar," 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai, pp.2224-2228, 2016.
- [62] Y. Xiong, Z. Peng, G. Xing, W. Zhang, and G. Meng, "Accurate and robust displacement measurement for FMCW radar vibration monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol.18, no.3, pp.1131-1139, 2018.

- [63] 岡本英二, “フーリエ級数・変換とその通信への応用,” 電子情報通信学会 通信ソサイエティ  
マガジン, vol.12, no.4, pp.279-283, 2018.

# 付録

## 付録1：フィッシャー情報行列要素の計算

CW ドップラレーダを用いてターゲットの振動数と振幅を推定する際のクラメール・ラオの下  
限を導出するため、式 (3.26) に基づいて、フィッシャー情報行列の上三角成分を求める。

$$I_{1,1} = \frac{1}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \quad (\text{A.1})$$

$$I_{1,2} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} \right. \\ \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} \right] \quad (\text{A.2})$$

$$I_{1,3} = -\frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{ \omega_t n + \phi_t \} \right. \\ \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{ \omega_t n + \phi_t \} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$I_{1,4} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \right. \\ \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \right] \quad (\text{A.4})$$

$$I_{1,5} = -\frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right. \\ \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right] \quad (\text{A.5})$$

$$I_{1,6} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (\text{A.6})$$

$$I_{1,7} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} \} - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} \} \right] \quad (\text{A.7})$$

$$I_{1,8} = \frac{jA\beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1} \} - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1} \} \right] \quad (\text{A.8})$$

$$I_{1,9} = -\frac{jA\beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2}n + \phi_{p2} \} - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2}n + \phi_{p2} \} \right] \quad (\text{A.9})$$

$$I_{1,10} = \frac{jA}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \right] \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned}
I_{1,11} = & \frac{jA\beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.11})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{1,12} = & -\frac{jA\beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.12})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,2} = & \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right] \quad (\text{A.13})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,3} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right] \quad (\text{A.14})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,4} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.15})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,5} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.16})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,6} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (\text{A.17})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,7} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{\alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{\alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}\} \right] \quad (\text{A.18})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,8} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.19})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,9} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.20})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,10} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \quad (\text{A.21})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,11} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.22})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{2,12} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.23})
\end{aligned}$$

$$I_{3,3} = \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right] \quad (\text{A.24})$$

$$\begin{aligned}
I_{3,4} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.25})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,5} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.26})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,6} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (\text{A.27})
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
I_{3,7} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\} \} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\} \} \right] \quad (\text{A.28})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,8} = & -\frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.29})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,9} = & \frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.30})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,10} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\} ] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\} ] \right] \quad (\text{A.31})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,11} = & -\frac{A^2\beta_1}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.32})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{3,12} = & \frac{A^2\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. - \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.33})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,4} = & \frac{A^2}{\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.34})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,5} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.35})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,6} = & \frac{A^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (\text{A.36})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,7} = & \frac{A^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2n \cos\{\omega_t n + \phi_t\} \} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2n \cos\{\omega_t n + \phi_t\} \} \right] \quad (\text{A.37})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,8} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.38})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,9} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.39})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,10} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \quad (\text{A.40})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,11} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (A.41)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{4,12} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (A.42)
\end{aligned}$$

$$I_{5,5} = \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (A.43)$$

$$\begin{aligned}
I_{5,6} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_t n + \phi_t\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right] \quad (A.44)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,7} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\} \} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\} \} \right] \quad (A.45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,8} = & -\frac{A^2\beta_1}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (A.46)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,9} = & \frac{A^2\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (A.47)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,10} = & -\frac{A^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \quad (A.48)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,11} = & -\frac{A^2\beta_1}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (A.49)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{5,12} = & \frac{A^2\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sin \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (A.50)
\end{aligned}$$

$$I_{6,6} = \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \right] \quad (\text{A.51})$$

$$\begin{aligned} I_{6,7} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right. \\ & \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} \} \\ & + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \\ & \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \{ \alpha_1(k+n) \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} \} \right] \quad (\text{A.52}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{6,8} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1} \} \right. \\ & \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1} \} \right] \quad (\text{A.53}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{6,9} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right. \\ & \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right] \quad (\text{A.54}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{6,10} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right. \\ & \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \\ & + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \\ & \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [ \alpha_1 \cos \{ \omega_t(k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \right] \quad (\text{A.55}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{6,11} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \right] \quad (A.56)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{6,12} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right] \quad (A.57)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,7} = & \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \{ \alpha_1 (k+n) \cos \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} \} \right] \quad (A.58)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,8} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [ \alpha_1 (k+n) \cos \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [ \alpha_1 (k+n) \cos \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{ \omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1} \} \right] \quad (A.59)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,9} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [ \alpha_1 (k+n) \cos \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [ \alpha_1 (k+n) \cos \{ \omega_t (k+n) + \phi_t \} - \alpha_2 n \cos \{ \omega_t n + \phi_t \} ] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) n \cos \{ \omega_{p2} n + \phi_{p2} \} \right] \quad (A.60)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,10} = & \frac{A^2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \quad (\text{A.61})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,11} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.62})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{7,12} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 (k+n) \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 n \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.63})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{8,8} = & \frac{A^2 \beta_1^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) (k+n) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.64})
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
I_{8,9} = & -\frac{A^2\beta_1\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \tag{A.65}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{8,10} = & \frac{A^2\beta_1}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos\{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \tag{A.66}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{8,11} = & \frac{A^2\beta_1^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \tag{A.67}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{8,12} = & -\frac{A^2\beta_1\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)(k+n) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.68})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{9,9} = & \frac{A^2\beta_2^2}{\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.69})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{9,10} = & -\frac{A^2\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos\{\omega_tn + \phi_t\}] \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos\{\omega_t(k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos\{\omega_tn + \phi_t\}] \right] \quad (\text{A.70})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{9,11} = & -\frac{A^2\beta_1\beta_2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p1}(k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.71})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{9,12} = & \frac{A^2\beta_2^2}{2\sigma^2N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma)n \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos\{\omega_{p2}n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.72})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{10,10} = & \frac{A^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right] \quad (\text{A.73})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{10,11} = & \frac{A^2 \beta_1}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.74})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{10,12} = & -\frac{A^2 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \right. \\
& \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \\
& + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) [\alpha_1 \cos \{\omega_t (k+n) + \phi_t\} - \alpha_2 \cos \{\omega_t n + \phi_t\}] \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.75})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{11,11} = & \frac{A^2 \beta_1^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right. \\
& \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \right] \quad (\text{A.76})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{11,12} = & -\frac{A^2 \beta_1 \beta_2}{2\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right. \\
& \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p1} (k+n) + \phi_{p1}\} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.77})
\end{aligned}$$

$$I_{12,12} = \frac{A^2 \beta_2^2}{\sigma^2 N^2} \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right. \\ \left. \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\gamma) \cos \{\omega_{p2} n + \phi_{p2}\} \right] \quad (\text{A.78})$$

フィッシャー情報行列の要素を表すこれらの式は、一部を除き簡約化するのは困難だが、パラメータを与えて数値的にフィッシャー情報行列を求めることは可能である。

# 研究業績

## 参考論文

- 木下貴博, 山田寛喜, “FMCW レーダによるターゲット変位推定における振動外乱除去方法の検討,” 電子情報通信学会和文論文誌 B, vol.J103-B, no.11, pp.616-625, 2020.

## 関連論文

### 国際会議

- T. Kinoshita and H. Yamada, “Vibration disturbance cancellation method for estimation of target displacement by CW Doppler radar,” 2020 IEEE Radar Conference, pp.498-502, September 2020.
- T. Kinoshita and H. Yamada, “Effect of antenna pattern of radar on vibration estimation for infrastructure monitoring,” 2020 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.741-742, January 2021.

### 国内学会・研究会

- 木下貴博, 山田寛喜, “レーダによるターゲット変位推定における振動外乱除去方法の検討,” 信学技報, vol.119, no.316, SANE2019-80, pp.55-60, November 2019.

### その他関連論文

- 木下貴博, “マイクロ波を用いた塊成化物加熱のためのアンテナ設計と最適化,” 日本鉄鋼協会 第155回制御技術部会大会, June 2016.
- T. Kinoshita and A. Sugihashi, “Design and optimization of an antenna for microwave heating of agglomerates,” 3rd GCMEA, July 2016.
- 木下貴博, 杉橋敦史, 塚口友一, “マイクロ波によるモールドパウダー加熱技術の開発,” 日本鉄鋼協会講演大会論文集, vol.30, pp.597, September 2017.
- 木下貴博, 杉橋敦史, 塚口友一, “連続鑄造用モールドパウダーのマイクロ波加熱特性,” 第11回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム, November 2017.

- T. Kinoshita and A. Sugihashi, “Design and optimization of a slot antenna for microwave heating of agglomerates,” COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol.37, no.6, pp.1886-1892, 2018.
- 木下貴博, 杉橋敦史, “酸化鉄塊のマイクロ波加熱挙動,” 第12回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム, November 2018.