

半導体レーザーへの戻り光を利用した合成開口顕微鏡

小野田岳志・梅田 倫弘

東京農工大学工学部機械システム工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

Synthetic Aperture Microscopy Using External Optical Feedback to a Laser Diode

Takeshi ONODA and Norihiro UMEDA

Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakacho, Koganei 184

A scanning optical microscope using synthetic aperture radar (SAR) technique is presented. A lateral resolution obtained by the microscope is superior to the diffraction limit of light in the far field region. As this microscope utilizes a self-coupling laser diode for heterodyne detection, the optical system is very simple. It is demonstrated that the resolution over the diffraction limit was achieved by observing a sample of binary grating.

1. はじめに

光波によって表面形状を観測するとき、その横分解能は光波の回折限界によって制限される。すなわち、光波は回折により横方向に広がりながら伝播するので、観測対象面でのビーム径は有限な値となり、そのビーム内に並ぶ小さな2つの物体を識別できない。従来の光学計測では、このような回折限界を超える分解能を得ることはできなかった。

この問題を、マイクロ波によるリモートセンシングの分野では合成開口レーダー (SAR: synthetic aperture radar)¹⁾によって解決している。

そこで、SARを光領域に応用した光合成開口レーダー (optical SAR) が提案されている²⁾。しかし、従来の光合成開口レーダーでは、反射光であるドップラー信号の光ヘテロダイン検出にマイケルソン干渉計を用いるため、光学系が複雑になる難点がある。これに対して、半導体レーザー (LD) の戻り光を利用する自己結合干渉計を用いれば、LD共振器内で光ヘテロダイン検出することができるため、光学系を非常に簡素化することができる³⁻⁵⁾。また、合成開口法の分解能はレーダーの開口径が小さければ小さいほど向上することから、開口径の小さなLDを用いることで高分解能のセンシングが期待できる。

そこで、本論文では、回折限界を超える方位分解能と装置の簡素化の達成を目的として、自己結合干渉計によ

る光 SAR を走査型レーザー顕微鏡に応用した合成開口顕微鏡を試み、その有効性を検討した結果について報告する。

2. 原 理

2.1 SAR原理^{1,6)}

Fig. 1 に SAR の概念図を示す。一般にレーダーの分解能は、アンテナからの放射ビームの広がり角 β に比例する。ここで二点分解できる広がり角 β をレーダーの分解能の基準にしたがってアンテナの開口径 D と送信波の波長 λ で表せば、

$$\beta \approx \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

となる。したがって、レーダーの視野距離を R とすると方位分解能 Δx は、次式のように近似できる。

$$\Delta x \approx \beta R \approx \frac{\lambda R}{D} \quad (2)$$

Δx はビームの地表面投射パターン幅であるので、この Δx がこのアンテナの回折限界となる。式(2)から、アンテナの開口を大きくするほど分解能が向上することがわかる。そこで、SAR では、比較的小さい開口のアンテナを用いて、標的がレーダーの視野内に留まっている間に得られる信号を蓄積して、実効的に大口径のアンテナとして作用させる。

Fig. 1 において、レーダーを搭載したプラットフォーム

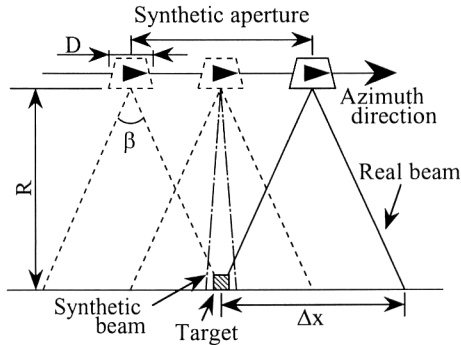


Fig. 1. Geometry of SAR measurement. D : real aperture, β : beam expanded angle, R : slant range, Δx : diffraction limit (Footprint).

が一定の高度を地表面と平行に速度 v で進行するとき、視野距離 R にある点標的がレーダーの視野内に留まっている時間 T は、

$$T = \frac{\Delta x}{v} \quad (3)$$

となる。レーダーと標的との相対運動によりドップラーシフトが生じ、標的からの反射波は線形周波数変調されてチャープ信号となる。したがって、標的の方位方向の座標 X_0 はチャープ信号から知ることができる。レーダーが標的の真上に来たときを時間 t の原点とするとチャープ信号のドップラー周波数の時間変化 ν_d は、

$$\nu_d(t, x) = \frac{2v}{\lambda R}(vt - X_0) \quad (4)$$

と表せる。ここで t は、 $-T/2 \leq t \leq T/2$ である。チャープ率 $\dot{\nu}_d$ は、

$$\dot{\nu}_d = -\frac{2v^2}{\lambda R} \quad (5)$$

となり、標的がレーダーの視野内に留まっている間のドップラー信号の周波数変化幅すなわちドップラー帯域幅 B は、

$$B = |\dot{\nu}_d| T \quad (6)$$

となる。このドップラー帯域幅の時間分解能 Δt は、

$$\Delta t = \frac{1}{B} \quad (7)$$

なので、方位分解能 Δx_{SAR} は、

$$\Delta x_{\text{SAR}} \approx v \Delta t \approx \frac{D}{2} \quad (8)$$

となる。つまり、ドップラー信号を測定することにより、レーラーの近似式が成立するファーフールド ($R \geq D^2/4\lambda$) で、回折限界を超える方位分解能を得ることができる。SAR の特徴は、分解能が視野距離や波長によらず実開口径のみに依存することである。マイクロ波

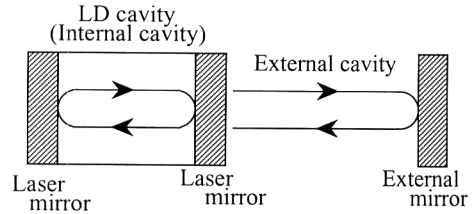


Fig. 2. Schematic diagram of a laser diode feedback self-coupling interferometer.

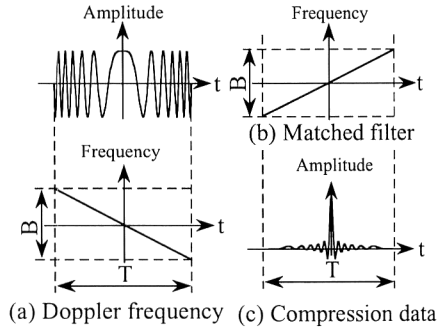


Fig. 3. Principle of azimuth compression. T : dwell time, B : Doppler bandwidth.

による SAR では、送信波パルスを線形周波数変調することによってレンジ方向の分解能も同様の手法で向上させているが、本研究で行う光 SAR では、方位方向の分解能の向上についてのみ検討する。ドップラー信号の検出には、自己結合干渉計による光ヘテロダイン法を用いる。

2.2 自己結合干渉計³⁻⁵⁾

自己結合干渉計は、LD 共振器内の光と外部反射体からの戻り光との自己結合効果を利用した干渉計である。Fig. 2 に自己結合干渉計の光学系を示す。自己結合干渉計は、測定対象（外部反射体）を外部ミラーとする二重共振器として作用する。この二重共振器は、LD 共振器内の光を参照光、外部ミラーからの戻り光を信号光とする二光束干渉計と等価的に扱うことができる⁴⁾。LD パッケージ内に内蔵されているパワーモニター用フォトダイオード (PD) を用いて、LD 共振器後端面からの漏れ光を、参照光と信号光の干渉信号として検出する。

2.3 画像再生⁶⁻⁹⁾

受信信号から直流成分を遮断して得られるドップラー信号を方位圧縮する。点標的からの受信信号は、ドップラーシフトによって Fig. 3(a) に示すように、線形周波数変調を受ける。これを (b) のような受信信号と逆の周波数対時間遅延特性をもつマッチトフィルターを通すこ

とによってパルス圧縮が行われる。その結果、(c)に示すように、時間 T に広がっていた点標的からの信号は一点に圧縮される。信号処理で方位圧縮を行う場合は、ドップラー信号とマッチトフィルターのインパルス応答とをたたみこみ演算をすることで同じ効果を得ることができる。実際の処理はFFT (fast Fourier transform) を利用して周波数領域で行う。

3. 装置

Fig. 4 に自己結合干渉計による合成開口顕微鏡の実験装置図を示す。標的を3軸ステージに固定して、方位方向を X 軸方向、光軸方向を Z 軸方向と定める。標的の平面を観測対象面とする。本実験の光 SAR では、レーザーを搭載したプラットフォームの移動によって走査を行うのではなく、Fig. 4 に示すように、レーザーを固定して外部ミラーとなる標的(試料)を動かして走査を行う。信号光(戻り光)は、プラットフォームと標的との相対運動によってドップラーシフトする。このドップラーシフトした信号光をLD共振器内の参照光と干渉させることによって、ドップラー信号成分がヘテロダイン検出される。

光源には、PD内蔵の波長830 nmのLDを用いた。このPDでLDの自己結合効果により生じた干渉信号を

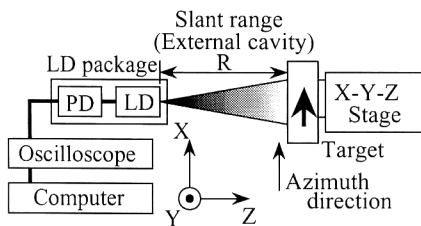


Fig. 4. Experimental setup of the synthetic aperture microscopy using self-coupling interferometer.

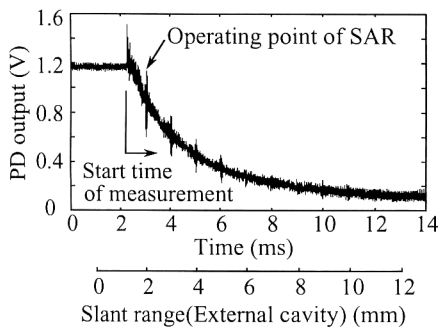


Fig. 5. Interferogram measured by the self-coupling interferometer as function of slant range.

検出する。PDで検出された信号をストレージオシロスコープに記録してコンピューターに取り込み信号処理をした。

3.1 コヒーレンス特性

装置の視野距離(外部共振器長)の変化に対する干渉信号の変動を測定した。標的には反射鏡を用いた。この標的を Z 軸方向に速度 1 mm/s でLD前端面から遠ざけて視野距離(外部共振器長)を変化させた。このとき得られた干渉信号を Fig. 5 に示す。測定開始の位置ではLDパッケージと標的は接しているが、LDチップはLD前端部の保護カバーガラス表面より 1.2 mm 奥にあるので、視野距離は時間軸の下に示した視野距離軸のようになる。

Fig. 5 より約 1 mm 間隔ごとに干渉のピークがみられた。この干渉信号のピーク間隔は、外部共振器長がほぼLD実効共振器長(= 1.02 mm : 共振器長 $300 \mu\text{m}$, 実効屈折率 3.4)の整数倍と等しいことから、モードの競合によって生じたと考えられる³⁾。以後実験では視野距離を 2.0 mm として2つ目の干渉のピークで行った。

3.2 回折限界の測定

次に視野距離 2.0 mm での装置の回折限界を測定した。Fig. 4 の実験装置ではレンズを用いていないので、反射光の一部しかLD共振器内に戻らない。したがって実効的な回折限界は、標的上でのビームのスポット径よりかなり小さくなる。そこで正確なマッチトフィルタを推定するために、Fig. 6 に示す装置で、回折限界をナイフエッジ法と類似の方法で測定した。

固定した反射鏡にレーザーを入射させる。SARを行う視野距離 2.0 mm の位置でナイフエッジを用いてビームを切りながら、パワーモニター用PDの出力をオシロスコープに記録した。Fig. 7 に出力結果を示す。ビーム形状をガウス分布と仮定して、ナイフエッジの移動量が

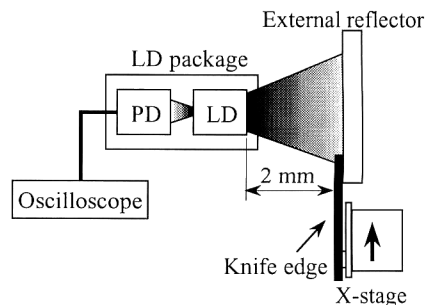


Fig. 6. Experiment setup for measuring the effective diffraction limit of the synthetic aperture microscopy using the self-coupling interferometer.

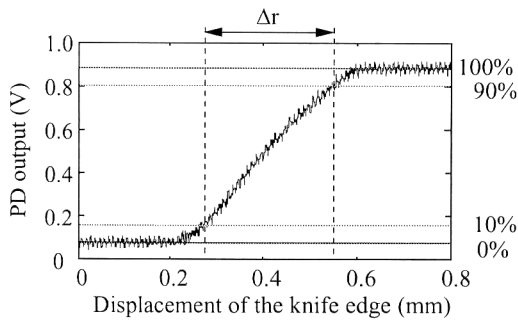


Fig. 7. Experimental result for Fig. 6.

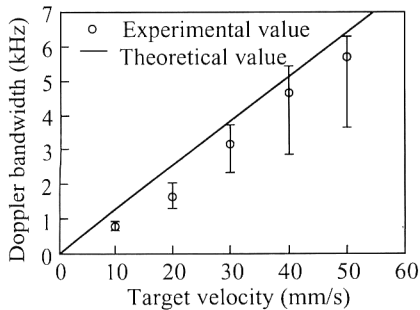


Fig. 8. Measurement of Doppler frequency bandwidth by the self-coupling interferometer.

ら装置の実効的な回折限界 Δx_e は次式のように計算される。

$$\Delta x_e = 0.390 \Delta r \quad (9)$$

ここで、 Δr は全出力の 90% から 10% のナイフエッジの移動量である。Fig. 7 より Δr は $271 \mu\text{m}$ と求められたので、視野距離 2.0 mm での装置の実効的な回折限界は、

$$\Delta x_{e2.0} = 106 \mu\text{m} \quad (10)$$

となった。

3.3 ドップラー信号の検出

自己結合干渉計でのドップラー信号周波数と速度の関係を Fig. 4 の実験装置で調べた。標的に反射鏡を用いて、視野距離を 2.0 mm として方位方向に 1 ライン走査させた。走査速度を 10 mm/s , 20 mm/s , 30 mm/s , 40 mm/s , 50 mm/s として、それぞれの場合で得られた受信信号のドップラー帯域幅を測定した。この結果を Fig. 8 に示す。理論値は次式より求めた。

$$B = |\dot{\nu}_d| T = \frac{2\Delta x_e}{\lambda R} \quad (11)$$

この Δx_e は視野距離が 2.0 mm における装置の実効的な回折限界なので、式 (10) の値を代入した。測定値が

SAR の理論値と同じ傾向がみられたことから、自己結合干渉計によってドップラー信号をヘテロダイン検出することが可能であることを確認できた。ばらつきが大きい原因は、次の 2 つが考えられる。すなわち、1) レーダーの視野に限界がありドップラー信号が完全に得られなかったこと、2) 標的が光軸に対して完全に直角でないため走査中に視野距離が 2.0 mm に保たれず干渉のピーク (Fig. 5) からずれたためドップラー信号が完全に得られなかったことである。

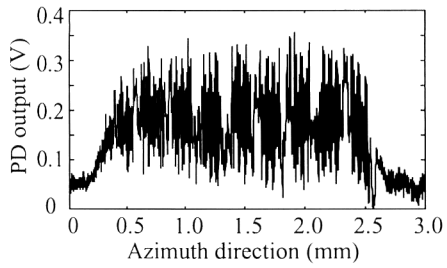
4. 実 験

自己結合干渉計によってドップラー信号の検出が確認できたので、実際に Fig. 4 の光学配置を用いて合成開口顕微法を試みた。標的にはガラス板にピッチ $50 \mu\text{m}$ の Cr メッキを施したバイナリー格子を用いた。Cr メッキ部が外部反射体となり反射強度分布が光 SAR により可視化される。視野距離 2.0 mm 、方位方向 (X 方向) 走査速度 30 mm/s とした。装置の回折限界は前述のように $106 \mu\text{m}$ なので、従来の方法では格子構造を分解できないはずである。

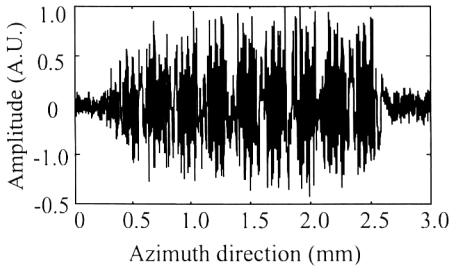
4.1 1 ライン走査における SAR

まず X 方向 (方位方向) に 1 ライン走査したときの LD 内蔵の PD によって検出された受信信号を Fig. 9(a) に示す。回折現象のために、格子を分解できていないことがわかる。

Fig. 9(a) の受信信号を SAR 再生するために、方位圧縮を行った。まず方位圧縮の前段階として、受信信号からドップラー信号成分のみ取り出すために直流成分を遮断した。この信号を Fig. 9(b) に示す。次に本実験に用いたマッチトフィルターのインパルス応答を Fig. 10 に示す。この応答には FFT を行う際の誤差を少なくするためにハミング窓を掛けた。また、Fig. 8 からわかるように、Fig. 4 に示した本実験装置で得られるドップラー信号のドップラー帯域幅は、理論値と完全には一致しない。そこで、本実験ではマッチトフィルターを最適にするために、帯域幅を理論値の $1/2$ とした。Fig. 10 を参照関数として、たたみこみ演算をして SAR 信号を得た。この SAR 信号と標的からの反射強度分布を Fig. 11 に示す。反射強度では格子を分解できていないのに対して、SAR 信号では格子に相当するピッチ $50 \mu\text{m}$ のピークが観測された。格子構造が検出できたことから、合成開口法によって回折限界を超える方位分解能が得られることが確認できた。しかし、各ピークの強度にばらつきがみられた。この原因は、3.3 項で述べたように、ドッ



(a)



(b)

Fig. 9. Received signal output of photodiode when the target of binary grating with $50\ \mu\text{m}$ pitch moves at velocity $\nu=30\ \text{mm/s}$. Unprocessed signal (a) and DC cut off signal (b).

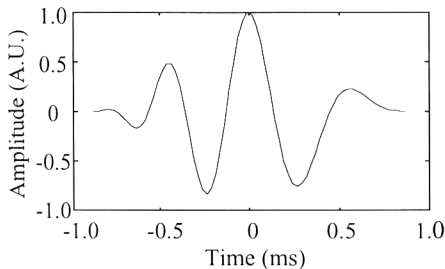


Fig. 10. Real part of complex impulse response of the SAR matched-filter synthesized by using chirp rate $\dot{\nu}=1.08\ \text{MHz/s}$, IF frequency $\nu_{\text{IF}}=1.92\ \text{kHz}$ and dwell time $T=1.75\ \text{ms}$.

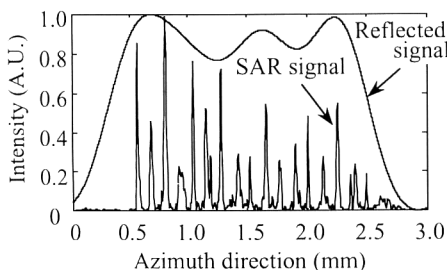
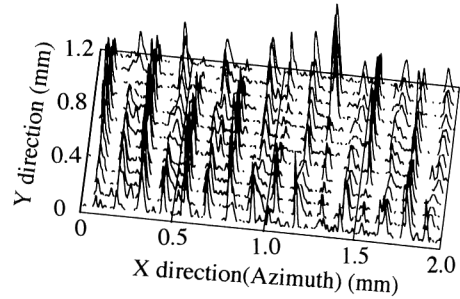
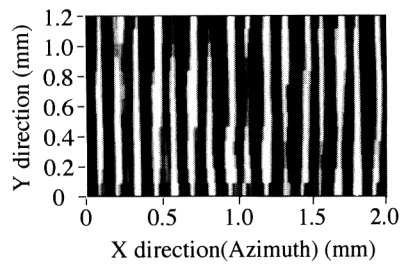


Fig. 11. Reflected signal without processing and highly resolved signal achieved by the SAR processing.



(a)



(b)

Fig. 12. (a) SAR signal detected by the binary grating of $50\ \mu\text{m}$ pitch. (b) SAR image constructed by the binary grating of $50\ \mu\text{m}$ pitch.

プラー信号が完全に得られなかったためと考えられる。

4.2 X-Y 走査

4.1 項と同様の手順を繰り返して、X-Y 走査を行い、標的の表面反射強度分布を観測した。Fig. 12(a)に得られた SAR 信号を、Fig. 12(b)に SAR 信号から得られた像を示す。ピッチ $50\ \mu\text{m}$ のバイナリー格子に相当する反射強度分布が確認できた。ここで各ピーク強度のばらつきの原因も、3.3 項で述べたように、ドップラー信号が完全に得られなかったためと考えられる。

5. ま と め

自己結合干渉計による合成開口顕微法によって、回折限界 $106\ \mu\text{m}$ に対してピッチ $50\ \mu\text{m}$ のバイナリー格子の表面反射強度分布の観測に成功した。以上の実験結果から、1) SAR の手法が光領域において有効であり、また、2) 自己結合干渉計によって光 SAR の検出が可能であることが確認できた。

1), 2) によって、回折限界を超える分解能がきわめて簡素な光学系で得られた。しかしドップラー信号が完全に得られなかったために、像が不鮮明になった。鮮明な像を得るためには、光学系の見直しと、視野距離の補正を含めたマッチトフィルターの最適化が必要である。

文 献

- 1) J. P. Fitch: *Synthetic Aperture Radar* (Springer-Verlag, New York, 1988) pp. 1-82.
- 2) S. Marcus, B. D. Colella and T. J. Green, Jr.: "Solid-state laser synthetic aperture radar," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 960-964.
- 3) Y. Katagiri and S. Hara: "Increased spatial frequency in interferential undulations of coupled cavity lasers," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5564-5570.
- 4) W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan and A. W. Palmer: "Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 1551-1558.
- 5) Y. Mitsuhashi, T. Morikawa, K. Sakurai, A. Seko and J. Shimada: "Self-coupled optical pickup," *Opt. Commun.*, **17** (1976) 95-97.
- 6) 松尾 優, 山根国義: "レーダホログラフィ", 電子通信学会 (1980) pp. 35-60.
- 7) 青木由直: 波動信号処理 (森北出版, 1986) pp. 196-229.
- 8) 内藤憲二, 能美 仁, 花木真一, 加藤史朗, 伊藤暢康, 久田安正, 伊東康之: "衛星搭載用合成開口レーダのデジタル画像処理シミュレーション", 電子通信学会論文誌 D, **J65-D** (1982) 750-757.
- 9) 武石伊嗣, 平尾耕三, 國安省史, 堀井茂勝: "合成開口レーダの画像処理", 東芝レビュー, **38** (1983) 504-507.