



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	合成開口レーダーのための高画質画像再生法
Author(s)	白川, 智昭; Shirakawa, Tomoaki; 内山, 靖之 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 153, 65-70
Issue Date	1990-11-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42263">https://hdl.handle.net/2115/42263</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	153_65-70.pdf



## 合成開口レーダーのための高画質画像再生法

白川 智昭 内山 靖之  
北島 秀夫 小川 吉彦

(平成 2 年 8 月 31 日受理)

### High Quality Image Reconstruction for Synthetic-Aperture Radar

Tomoaki SHIRAKAWA, Yasuyuki UCHIYAMA

Hideo KITAJIMA and Yoshihiko OGAWA

(Received August 31, 1990)

#### Abstract

In this paper, a new image reconstructing algorithm for synthetic-aperture radar(SAR) is proposed. This method is based on filtering and yields reconstructed images of higher resolution than the conventional methods. The result of computer simulation is included to show the effectiveness of the proposed method.

#### 1. ま え が き

合成開口レーダー (SAR) は、高分解能のレーダーとして人工衛星や航空機に搭載されており、地上観測、海洋観測、資源探査等に利用されている。SAR の基本は古くから用いられているパルスレーダであるが、送受信アンテナを搭載した飛翔体の運動や、送信パルスの圧縮によって、その分解能はパルスレーダにくらべて飛躍的に向上している。

SAR によって得られる目標物からの反射波は一種の 2 次元ホログラムである。よって、初期の SAR においては、像再生は光学処理によって行われていた。ところが、光学処理特有のレンズの収差の問題や、処理の再現性、融通性などの問題から、1970年代の電子計算機の発展にともない、像再生法の主流が光学処理からデジタル処理へと移っていった。ところが、デジタル処理においては、SAR の受信データの量が膨大であることが大きな問題となった。たとえば、SEASAT-SAR において地上約 100km 四方の領域から得られる受信データのサンプル数は数千点×数千点にも達し、これらのデータに対する処理をすべて計算機の主記憶上で行うのは不可能であった。したがって、この膨大なデータを計算機上でいかに効率的に処理するかが、デジタル処理の実用化に際しての重要な鍵となった。

デジタル処理による SAR の像再生のためのアルゴリズムは、C. Wu らによって提案されたものがよく知られており、現在でもこれが基礎となっている<sup>1)</sup>。この方法は一次元の相関演算が中心となっているので、本稿ではこれを以後相関法と呼ぶ。相関法は図 1 (a) のフローチャートに示されているように、本来 2 次元の SAR 受信データに対して、飛翔体からの電波の照射方向である

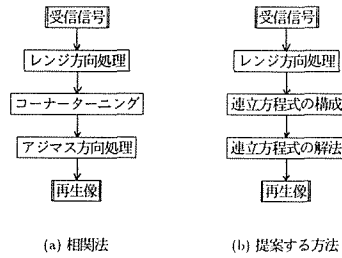


図1 SAR 画像再生法のフローチャート

レンジ方向と飛翔体の運動方向であるアジマス方向の2回の一次元処理を行うことにより像再生を行う方法で、同時に必要とされるデータ量は2次元処理を行う場合に比べて非常に少なくなる。また、各方向処理は相関演算が中心となっているため、この部分を周波数領域で行うことにより演算の高速化をはかることもできる。

本論文の目的は、相関法よりも分解能の高い再生像を得るアルゴリズムを提案することである。本手法は、図1 (b) のフローチャートに示されるように、相関法によってレンジ方向処理されたデータから求めるべき地上の電波反射率分布に関する連立方程式を導出し、それを解くことによって像再生を行うもので、この処理は、受信信号に対して SAR システムの逆フィルタを適用することに相当する。また、一般に、逆フィルタを用いる場合、信号にノイズが含まれていると像再生の精度が落ちるといった問題が発生するが、連立方程式の解法に最小自乗法を用いることによってこれを回避している。本論文で提案する方法は相関法に比べて多くの処理時間が必要なため、像再生の高速処理には適していない。しかし、地上の重要な領域の像を相関法よりも高い分解能で再生できるという利点を有している。

本論文の構成としては、2で SAR のモデルを説明した後、受信信号の定式化を行う。次に、3で再生像に関する連立方程式の導出とその解法を説明し、4で本手法を用いた SAR の像再生シミュレーションの結果を示す。最後に5でここで得られた結果をまとめ、さらに、今後の課題を考察する。

## 2. SAR のモデルと受信信号の定式化

図2 (a) に SAR のモデルを示す。飛翔体は高度  $H$  にある  $\xi$  軸上を速度  $v$  で直線運動しながら地表に向かってパルス列を発射する。発射されたパルスは地表の領域  $A$  で反射し、再び飛翔体

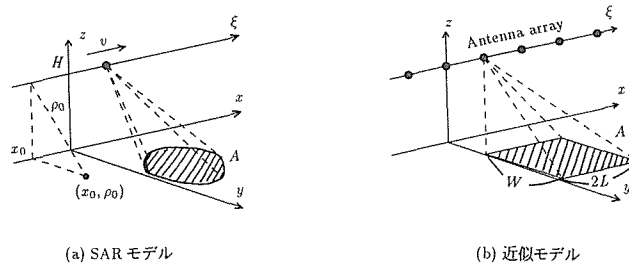


図2 SAR のモデル

に搭載されたアンテナによって受信される。以後、地表の点を表す座表系として、図に示されているように、 $\xi$  軸に平行な  $x$  軸および  $\xi$  軸とその点との距離  $\rho$  を使った  $(x, \rho)$  座標系を用いるものとする。 $\rho$  方向がレンジ方向、 $x$  方向がアジマス方向に対応している。

SAR の受信信号を求めるために、このモデルを同図 (b) のように近似する。すなわち、

- (1) 地上の照射領域  $A$  は、二辺の長さが  $2L$ ,  $W$  の矩形とする。
- (2) 飛翔体の運動を考えるかわりに、 $\xi$  軸上に並んだアンテナのアレイを考える。各アンテナは、地表に向かって単一のパルスを発射し、自分の出したパルスに対する反射波のみを受信する。

この近似モデルを用いると、送信信号としてベースバンドパルス  $S_0(t)$  で変調された角周波数  $\omega$  の正弦波を用いたときの、 $\xi$  の位置にあるアンテナによって受信される信号の同期検波後の信号  $h(\xi, r_t)$  は次のようになる<sup>2)</sup>。

$$h(\xi, r_t) = \int_{\rho_A}^{\rho_B} \int_{\xi-L}^{\xi+L} \sigma(x, \rho) S_0(r_t - r(\xi)) e^{-j2kr(\xi)} dx d\rho \quad (1)$$

ここで、 $k$  は送信信号の波数、 $\rho_A$ ,  $\rho_B$  は地上の照射領域の  $\rho$  座標の最大値および最小値、 $\sigma(x, \rho)$  は地上の電波反射率分布、 $r(\xi) = \sqrt{\rho^2 + (x - \xi)^2}$  はアンテナと地上の各点との間の距離である。また、 $r_t$  は時刻  $t$  を  $r_t = ct/2$  ( $c$  は光速) によって距離に換算した変数である。

SAR では、送信信号にチャープパルスを用いることで、レンジ方向の分解能を向上させている。チャープパルスとは、パルス幅  $t_c$  の間で線形 FM 変調されたパルスであり、周波数偏移を  $f_c$  とすると次式で表される。

$$S_0(r_t) = a_\Delta(r_t) e^{j\beta(r_t - \frac{\Delta}{2})^2} \quad (2)$$

ただし、

$$\beta = \frac{4\pi f_c}{c^2 t_c}, \quad \Delta = \frac{ct_c}{2} \quad (3)$$

$$a_\Delta(r_t) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq r_t \leq \Delta \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases}$$

であり、 $\Delta$  は距離換算したパルス幅を表している。式 (2) を式 (1) に代入すると、結局、SAR の受信信号は次のようになる。

$$h(\xi, r_t) = \int_{\rho_A}^{\rho_B} \int_{\xi-L}^{\xi+L} a_\Delta(r_t - r(\xi)) \sigma(x, \rho) e^{-j2kr(\xi)} e^{j\beta(r_t - r(\xi) - \Delta/2)^2} dx d\rho \quad (4)$$

### 3. 連立方程式の導出と SAR 像再生

図 1 (b) で示したように、ここで提案する方法は、相関法でレンジ圧縮を行った信号を用いて、地上の反射率分布  $\sigma$  に対する連立方程式を導出するものである。相関法におけるレンジ圧縮を式 (2) を用いて計算すると、レンジ圧縮後の信号  $R(\xi, r_t)$  は次のように求められる。

$$R(\xi, r_t) = \int_{\rho_A}^{\rho_B} \int_{\xi-L}^{\xi+L} \sigma(x, \rho) g(r_t - r(\xi)) e^{-j2kr(\xi)} dx d\rho \quad (5)$$

$$g(v) = \begin{cases} \frac{\sin[\beta v(\Delta - |v|)]}{\beta v} & ; -\Delta \leq v \leq \Delta \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式 (5) より  $\sigma$  に対する連立方程式を得るために、次の近似を行う。

(1) 一般に  $\rho \gg |x - \xi|$  であるので、 $r(\xi) \sim \rho + (x - \xi)^2 / 2\rho$  とする。

(2)  $\sigma$  は  $\rho$  方向に滑らかであり、地上の電波照射領域を  $\rho$  方向に  $\rho_A = \rho_0$ ,  $\rho_1 = \rho_0 + \Delta\rho, \dots$ ,  $\rho_{N-1} + \Delta\rho = \rho_B$  と  $N$  個の小区間に分割したとき、区間内での反射率  $\sigma$  の値は一定である。

この近似を考慮して、式 (5) の両辺を 2 次元フーリエ変換すると次式となる。

$$g(v) = \begin{cases} \frac{\sin[\beta v(\Delta - |v|)]}{\beta v} & ; -\Delta \leq v \leq \Delta \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\bar{R}(f_t, f_r) = G(f_r) \sum_{i=0}^{N-1} P(f_t, f_r; \rho_i) \cdot \bar{\sigma}(f_t, \rho_i)$$

$$\bar{\sigma}(f_t, \rho) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(x, \rho) e^{-j2\pi f_t x} dx = \mathcal{F}[\sigma(x, \rho)]_x$$

$$G(f_r) = \frac{\sin(u\Delta\rho)}{u} e^{-ju\Delta\rho} \mathcal{F}[g(v)]_v$$

$$P(f_t, f_r; \rho_i) = \sqrt{\frac{\pi\rho_i}{2u}} e^{j(\frac{\rho_i}{2} f_t^2 - 2u\rho_i)} \left[ F^* \left( \sqrt{\frac{2u}{\pi\rho_i}} \left( L + \frac{\pi\rho_i f_t}{u} \right) \right) - F^* \left( \sqrt{\frac{2u}{\pi\rho_i}} \left( -L + \frac{\pi\rho_i f_t}{u} \right) \right) \right]$$

$$F^*(x) = \int_0^x e^{-j\frac{\pi}{2}\lambda^2} d\lambda \quad (\text{Fresnel 積分})$$

$$u = k + \pi f_r$$

いま、式 (7) において、ある  $f_t$  に注目するものとし、 $f_t$  に関する部分を省略すると、

$$\bar{R}(f_r) = G(f_r) \sum_{i=0}^{N-1} P(f_r; \rho_i) \cdot \bar{\sigma}(\rho_i) \quad (8)$$

また、 $f_r$  は実際には標本化されて与えられるので、その標本点を  $f_{r0}, f_{r1}, \dots, f_{r, M-1}$  の  $M$  点とすると、式 (8) はさらに簡略化されて、次のようになる。

$$\bar{R}_j = G_j \sum_{i=0}^{N-1} P_{ji} \bar{\sigma}_i \quad j = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (9)$$

ただし、

$$\bar{R}_j = \bar{R}(f_{rj}), \quad G_j = G(f_{rj}), \quad P_{ji} = P(f_{rj}; \rho_i), \quad \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}(\rho_i)$$

式 (9) は地上の反射率分布  $\sigma$  のアジマス方向のフーリエ変換  $\bar{\sigma}$  に対する連立方程式となっている。したがって、この連立方程式の解をアジマス方向に逆フーリエ変換することにより、 $\sigma$  を求めることができる。

式 (9) の連立方程式の未知数の数は  $N$ 、式の本数は  $M$  となっている。 $N$  は近似 (2) における地上の照射領域の分割法によって決定される。いま、この分割によって生じる小領域の幅を、受信データにおけるレンジ方向のサンプル幅に一致するように選ぶと、 $M \geq N$  となり、連立方程式の解法に最小自乗法を用いることができる。すなわち、残差

$$\varepsilon^2 = \sum_{j=1}^{M-1} \left| \bar{R}_j - G_j \sum_{i=0}^{N-1} \bar{R}_{ji} \bar{\sigma}_i \right|^2 \quad (10)$$

を最小にするような  $\bar{\sigma}$  を解とすることによって、本手法のような逆フィルタを用いる場合に問題となるノイズの影響を低減することができる。

#### 4. 計算機シミュレーション

3で述べた像再生法による SAR の画像再生シミュレーションを行った。用いたパラメータを表 1 に示す。シミュレーションの手順としては、まず、点目標に対する再生画像を相関法によるものとくらべることによって、本手法によって得られる再生像の分解能を評価する。次に、広がりのある目標物に対するシミュレーションを行い、再生像の画質を調べる。

始めに、点目標に対するシミュレーション結果を示す。地上の照射領域の中心に単位反射率の点目標が存在するときの受信信号を式 (1) より求め、相関法および本手法を用いて像再生を行った。再生された像を、目標物を含む平面でレンジ方向、アジマス方向に切ったときの断面図を図 3 に示す。点線が相関法、実線が本手法を表している。いずれの方向も、本手法の方が再生された点目標の広がりが減少し、サイドローブの大きさも低減していることがわかる。再生像の分解能をメインローブの電力半値幅で計算すると、従来の方法にくらべてレンジ方向に約 2 倍、アジマス方向に約 3 倍の分解能の改善がみられる。

次に、地上の画像として広がりのあるものを用い、再生像の分解能の向上が画質にどのように反映するかを調べた。原画像としては標準画像データベース SIDBA に含まれている AERIAL を用い、これを地上の電波反射率分布と仮定した。原画像を図 4 (a) に示す。これに対する再生像

表 1 シミュレーションパラメータ

項目	値	単位
飛行体高度	95000	m
オフナディア角	20	deg
送信波長	25	cm
送信パルス幅	4	$\mu\text{sec}$
送信パルス周波数	1000	pps
チャープ圧縮率	2.475	MHz/ $\mu\text{sec}$
アンテナビーム幅	1000	m
レンジ方向サンプル間隔 (距離換算値)	5	m
アジマス方向サンプル間隔 (距離換算値)	5	m
相関法による理論的分解能		
レンジ方向	15.0	m
アジマス方向	11.9	m

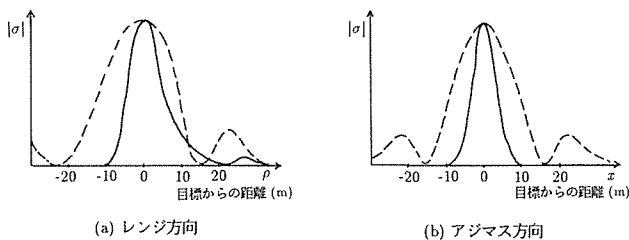


図 3 点目標に対するシミュレーション結果



図4 広がりのある画像に対するシミュレーション結果

が同図 (b) および (c) である。(b) が相関法によるもの、(c) が本論文で提案した連立方程式によるものである。図より明らかなように、従来の方法による再生像に見られる画像のぼけが、本手法では取り除かれていることがわかる。したがって、本手法を用いることにより、SAR 再生像の画質が、従来の方法にくらべて改善されることが示された。

## 5. ま と め

本論文では、SAR 画像再生アルゴリズムとして、連立方程式を用いて逆フィルタ的な考え方に基づいたものを提案し、具体的な連立方程式の導出法について述べた。また、この方法を用いて像再生の計算機シミュレーションを行い、従来の方法よりも高画質、高分解能の再生像が得られることを示した。

本手法の欠点は、相関法にくらべて演算量が増加し、多くの計算時間が必要となることである。しかし、地上の広い領域の像再生には従来の相関法を用いて高速の像再生を行い、その中で重要な領域についてのみ本手法を用いて高分解能の再生像を得るという方法を取ることで、この欠点はそれほど問題とならなくなる。また、連立方程式の係数行列は SAR のシステムパラメータのみから計算できるため、大容量の記憶装置にあらかじめ計算した係数行列の値を格納しておくことができれば、連立方程式の解法が行列一ベクトル積のみで実行できるため、高速な像再生も可能となる。

最後に、今後の課題として受信ノイズの問題について述べる。受信信号に含まれるノイズやデータの量子化によって信号の  $S/N$  比が非常に悪くなった場合、本手法のような最小自乗法のみではノイズの影響を低減できなくなる。どの程度の  $S/N$  比まで本手法をそのまま適用可能かについては現在検討中であるが、連立方程式の導出が 2 次元の周波数領域で行われているため、古くから使用されている周波数窓を用いる方法が適用できないかを現在考察している。また、飛行体の高度等のパラメータの変動も受信信号においてはノイズとして振舞うため、それらの変動の情報が得られた場合、それをどのようにして像再生アルゴリズムに反映させてゆくかも現在検討中である。

## 参考文献

- 1) C. Wu, K. Y. Liu and M. Jin: "Modeling and a Correlation Algorithms for Space-borne SAR Signals," IEEE Trans. on Aerosp. & Electron. Syst., vol. AES-18, 5, 563-575 (1982)
- 2) H. Kitajima, T. Shimono and K. Makino: "Operational Principles of Synthetic Aperture Imaging Radars," Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University, XVI, 2, 113-118 (1983)