

合成開口レーダの原理と再生処理に関連した教育用コンテンツの開発

伊藤 陽介*, 森 和加奈**

(キーワード: リモートセンシング, 映像レーダ, 合成開口, SAR 画像, パルス圧縮, レンジドップラー法)

1. はじめに

リモートセンシングとは、地球表面や大気で放射、散乱、反射した種々の電磁波を航空機や人工衛星から計測し、それを地球資源や地球環境の観測、評価、管理などに役立てる技術の総称である。とくに、センサのプラットフォームとして人工衛星を用いた場合、時々刻々と変化する地球的な規模で発生する現象の把握を可能とし、その観測データの利用は地球温暖化や砂漠化など環境問題の発見に役立っている。

近年、センサの空間解像度、観測波長域、観測波長分解能、解析方法などは、益々高度化かつ多様化しつつある。その中でも、気象条件に影響されにくく高分解能な観測を可能にする合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) の利用が1990年代から本格化している¹⁾。しかし、SAR の原理を理解し、SAR 画像を生成する過程を理解することは一般に困難といわれ、通常、SAR 画像のデータ処理は、専門家によって行われていることが多い。他方、SAR の原理とデータ処理について理解した上で、SAR 画像を各種応用した方がより深い考察を可能とすることは明らかである。

本研究では、高等学校までに修得した学習内容に基づいて SAR の原理と SAR 画像が得られるまでの処理方法に関連した教育用コンテンツを開発することを目的とする。本稿では、教育用コンテンツの全体構成と特徴、開発環境を述べ、本コンテンツの一部を解説する。さらに、開発したアニメーションを紹介するとともに、本コンテンツの効果と改善点について考察する^{2),3)}。

2. 合成開口レーダの教育用コンテンツ

2.1 全体構成

図 2.1 は、レンジドップラー法による SAR 画像の再生処理を示す^{4),5)}。本研究では、ここに示されたすべての処理を解説するのではなく、SAR 画像の再生処理を理解す

るために必要最小限な概念と処理方法に関する教育用コンテンツを開発する。通常、パルス圧縮処理では、受信信号と参照関数の相関処理を高速化するために高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) と逆 FFT を用いる。ここでは、相関処理を時間軸で解説した方が容易にパルス圧縮処理を理解できると考え、コンテンツを構成している。さらに、解説を簡潔にするため、レンジ方向はアジマス方向に対して直交し、地表面は静止している場合のみを想定し、ドップラー中心周波数は0[Hz]とする。

SAR の原理と再生処理に関連した教育用コンテンツは、図 2.2 に示すように1から6までの項目から構成される Web ページとなっている。目次から任意の項目を閲覧可能であり、前後の項目および目次に進むこともできる。

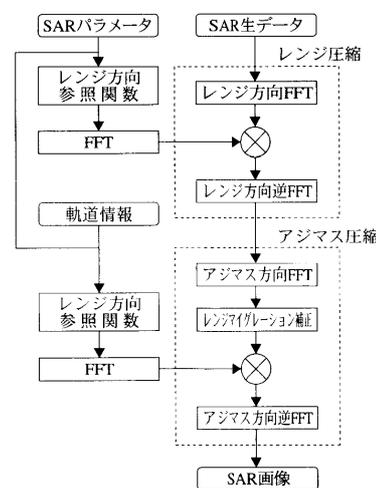


図 2.1 レンジドップラー法

2.2 特徴と開発環境

本研究の教育用コンテンツは、高等学校科目「数学 I, II, III」および「物理 I, II」の学習内容を修得している場合を想定して開発している。また、映像レーダや SAR に関する予備知識がなくても理解しやすいものであることを目指した。

* 鳴門教育大学生活・健康系(技術)教育講座
** 日本郵政公社近畿支社 (平成15年3月鳴門教育大学学校教育学部卒業)

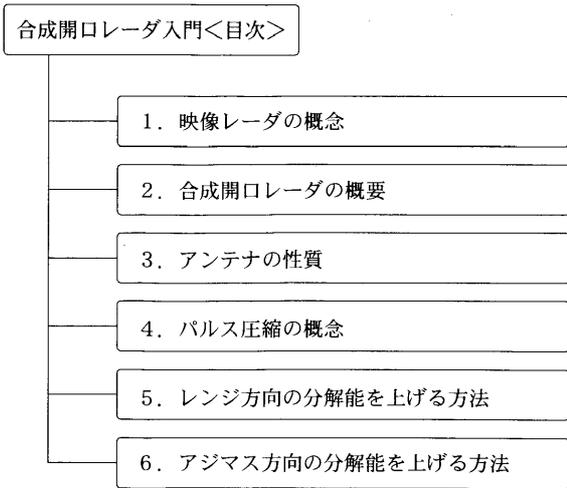


図 2. 2 教育用コンテンツの全体構成

映像レーダや SAR の概念を理解する場合、時間の経過と受信信号の関係を視覚的にとらえることは不可欠と考え、Web ページ内に静止画とアニメーションを多数導入している。アニメーションは、一般的に用いられている Web ブラウザのプラグインとして普及している FLASH プレーヤを利用する。そのため、FLASH 形式のモーショングラフィックス・データを作成する開発環境を用いた^{6),7)}。

また、SAR 関係の専門書では、パルス圧縮処理と合成開口処理に使われる相関処理などの数式展開において結果のみを表記し、過程が省略されている場合が多い。本教育用コンテンツでは、紙面の制約がないため、できるだけ段階を追って数式変形が理解できるように配慮し、学習者が自ら数式を展開できるようにしている。また、冒頭に述べた高等学校の学習内容を超えるオイラーの公式などについては、付随する解説ページを追加し、基礎的な内容から学べるように工夫している。

3. 教育用コンテンツ

本節では、図 2.2 の項目 1, 2, および、5 の解説内容と、アニメーション化した部分について述べる。

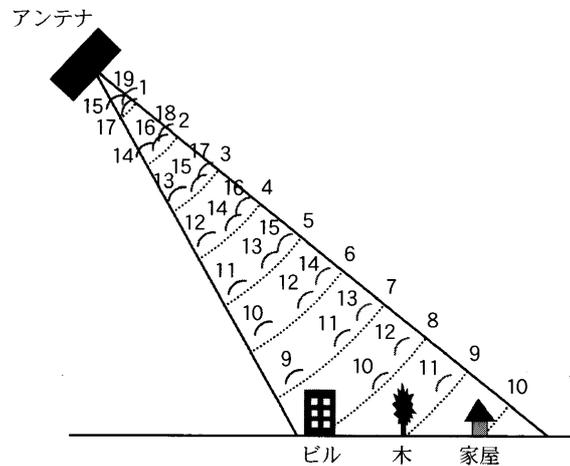
3.1 映像レーダシステム の概念

(1) 解説内容

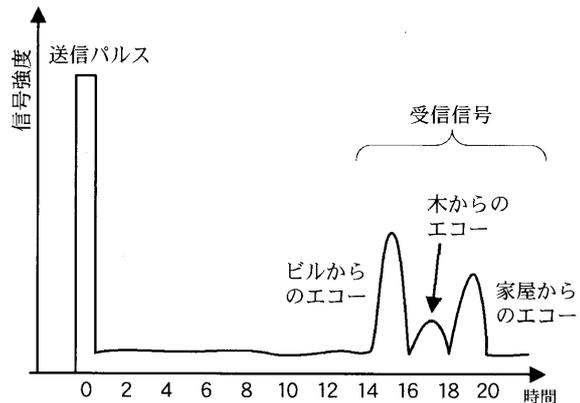
映像レーダシステムは、地表面に向けてアンテナから位相の揃ったパルス状の電磁波を送信し、地表面から散乱した電磁波を同じアンテナで時系列的に受信し、映像化する。ここで、電磁波は、波長が数 cm のマイクロ波帯を利用する。通常、マイクロ波は地表面において四方八方に散乱するが、とくに、送信アンテナと同じ方向に散乱する場合を後方散乱という。レーダシステムでは、後方散乱したマイクロ波のみを観測する。

図 3.1 (a) は、マイクロ波パルスが発射されてから地上の物体で散乱して戻ってくるまでのパルス位置を模式的に表したものである。破線はアンテナから地表に向かって送信されたマイクロ波パルスの波面を、実線は地表物体で散乱された散乱パルスの波面を示している。数字は発射されてからの時間を表す。この図では、ビルおよび木からの後方散乱はそれぞれ 15 単位時間後および 17 単位時間後に、家からの後方散乱は 19 単位時間後にアンテナに戻ってくる。

図 3.1 (b) は、前述した受信信号強度の時間変化を示し、レーダ画像 1 ライン分の観測データを表す。すなわち、受信信号強度の時間記録がそのまま地表を走査することになる。プラットフォームの移動に合わせて、パルスの送信と受信信号の記録を順次繰り返すことにより、地表面の 2 次元画像が得られる。



(a) マイクロ波パルスの波面



(b) 送信パルスと受信信号

図 3.1 映像レーダシステムの模式図

図 3.2 に映像レーダシステムの幾何学的配置と名称を示す。アンテナからマイクロ波の照射方向（レーダビーム）をレンジ方向と呼び、プラットフォームが進行する方向をアジマス方向と呼ぶ。レンジ方向は、受信したパルスの左右の曖昧さを避けるため、アジマス方向に対して横向きでかつ斜め下方とする。

プラットフォームから見たレーダビームの方向を規定するふ角 (θ_a) とオフナディア角 ($90^\circ - \theta_a$) は、それぞれ、水平方向とレーダビームの間の角度と、直下方向とレーダビームの間の角度を指す。地表面から見たレーダビームの方向を規定する入射角 (θ) は、入射面からの垂線とレーダビームがなす角度である。また、アンテナと地表面との距離をスラントレンジとし、それに対応する地表面への投影距離をグラントレンジと定義する。

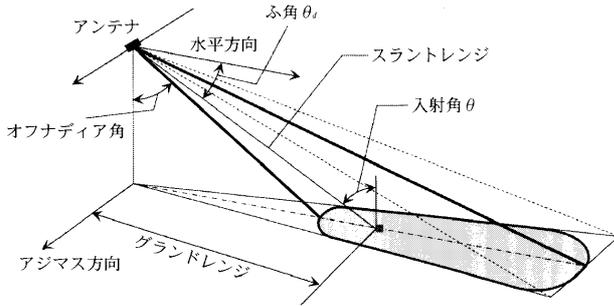


図 3.2 映像レーダシステムの幾何学的配置

地表面の照射には持続時間が数十 μsec 程度の短いマイクロ波パルスが用いられる。送信されたパルスは光速 c [m/sec] で伝播し地表面に入射し、入射エネルギーの一部が散乱される。送信パルスがアンテナと対象物間を t [sec] で往復する場合、対象物までのスラントレンジ距離は $ct/2$ [m] である。

レーダ画像のレンジ方向の分解能は、パルスの大きさ (時間 τ [sec], 長さ $c\tau$ [m]) で決まる。地表面の2つの物体を区別するためには、各物体からのパルスが、少なくともパルス長の半分以上異なる時間に戻って受信されなければならない。そのためにはアンテナからの往復の距離の差が $c\tau/2$ 以上離れている必要がある。これをスラントレンジ分解能と呼ぶ。

光速 c は定数であるため、レンジ分解能を高めるためにはパルス幅を小さくする必要がある。しかし、パルス幅を小さくしすぎると、マイクロ波のエネルギーが少なくなり伝播及び散乱時に減衰し、ノイズと識別できなくなってしまう。そこで、パルスに含まれる情報量を増加させるためにパルスを構成するマイクロ波周波数を線形的に変化させ帯域幅 B [Hz] を増加させるチャープ変調されたパルスを送信する。受信したパルスをレンジ方向参照関数と相関処理を行うパルス圧縮によりレンジ分解能を B 倍に高めることができる。

一方、マイクロ波の波長を λ [m], アジマス方向のアンテナ長を d [m] とするとき、そのビーム幅 β_a はアンテナの性質より λ/d と近似できる。図 3.3 に示すようにプラットフォームからのスラントレンジ r が増すとともにビームは扇状に広がり、アジマス方向に照射する地表面上の幅 $r\beta_a = r\lambda/d$ が、アジマス分解能 (ρ_a [m]) となる。

アジマス分解能を高めるために、アジマス方向に幅の

広いアンテナを搭載することが考えられるが、一般にアンテナの大きさには制限があり実現は難しい。そのため、アジマス方向に運動しているプラットフォームと地表面の物体間の相対距離の変化に起因するドップラー効果を利用する。このドップラー効果によりアジマス方向に並べた受信信号にチャープ変調と同様な周波数変化が現れ、アジマス方向参照関数と相関処理を行うパルス圧縮によって、アジマス分解能を向上させることができる。この処理のことを合成開口処理という。

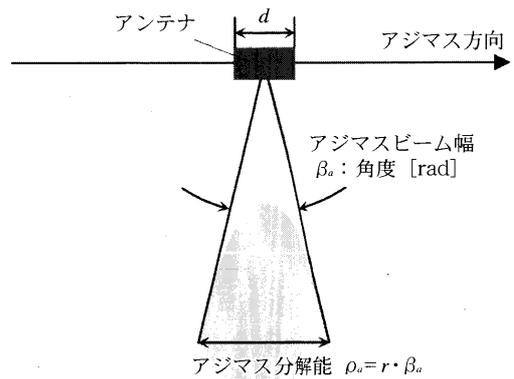


図 3.3 アジマス方向のマイクロ波照射領域

(2) アニメーション化した部分

図 3.1 では、番号付けされたパルスを順に追うことによって、映像レーダシステムの概念を模式的に示している。アンテナで受信される信号は、地表面で散乱したマイクロ波のうち、アンテナ方向に後方散乱するが、図 3.1 のみでは解説できない。そのため、図 3.4 と図 3.5 に示すアニメーションを追加した。

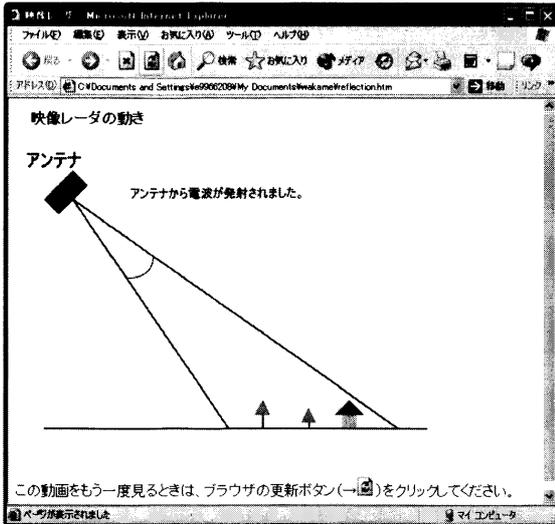
図 3.4 (a)~(c)では、パルスが伝播していく様子をアニメーション化するとともに、アンテナの右下に現在の状態を解説する文を表示し、時間的に変化するマイクロ波パルスの状態を把握しやすいように配慮した。

図 3.5 (a)~(c)は、後方散乱の意味を解説するアニメーションである。アンテナから送信されたマイクロ波の状態から、対象物体で散乱したマイクロ波がアンテナで受信された状態をアニメーション化し、最後に後方散乱の解説文を表示することで、その意味を明確化している。

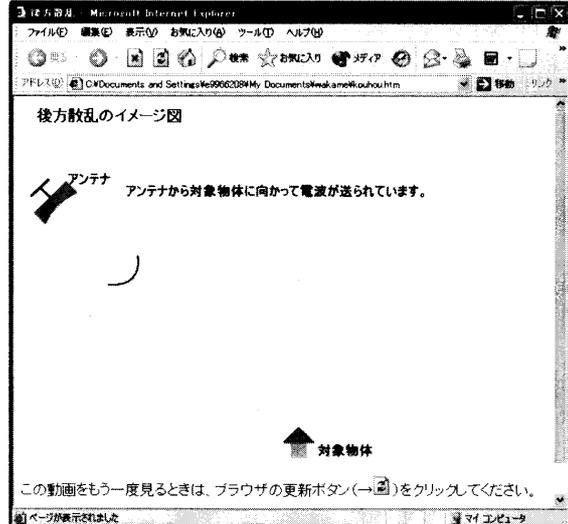
3.2 合成開口レーダの概要

(1) 解説内容

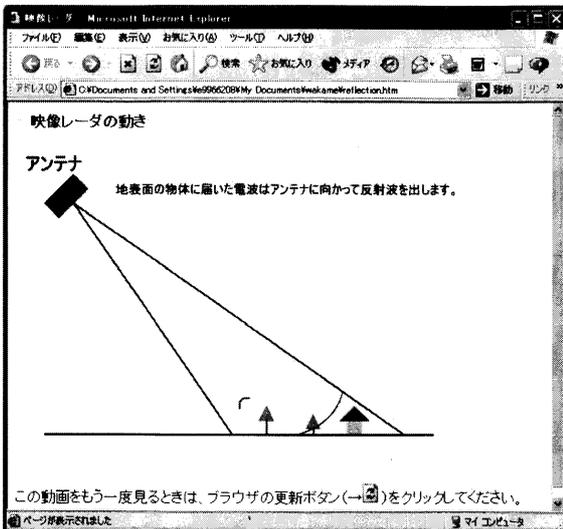
映像レーダにおけるアジマス方向の分解能が低いことを逆に利用して、合成開口レーダ (SAR) では、地表面の対象物体から後方散乱したパルスを、アジマス方向において複数回受信し、それらのパルスを合成して高解像度化を図る。この処理は、アジマス方向に長い仮想的なアンテナがあると考えられるため、合成開口処理と呼ばれる。



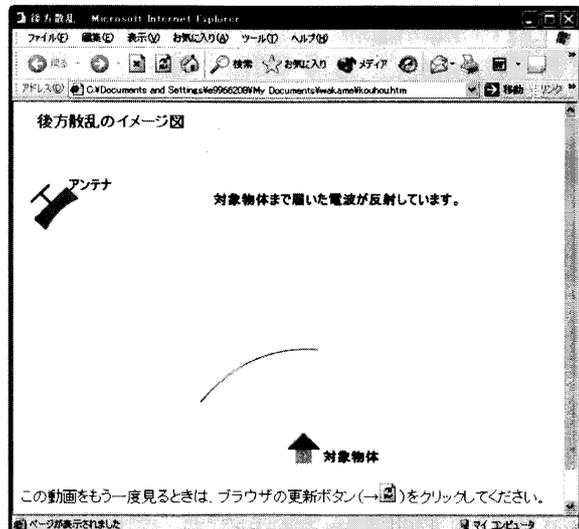
(a) アンテナからマイクロ波パルスが発射された状態



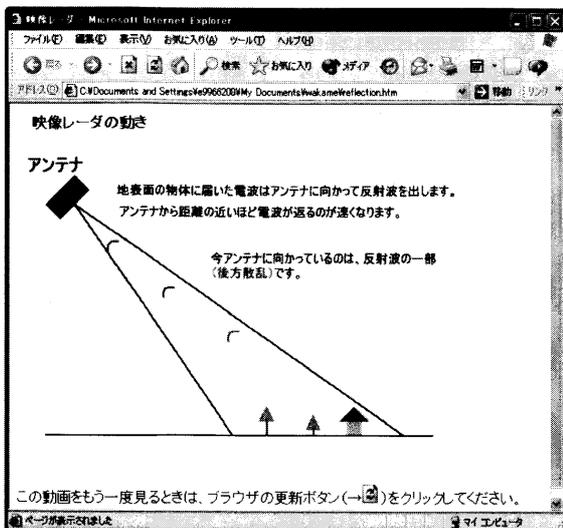
(a) マイクロ波を送信した状態



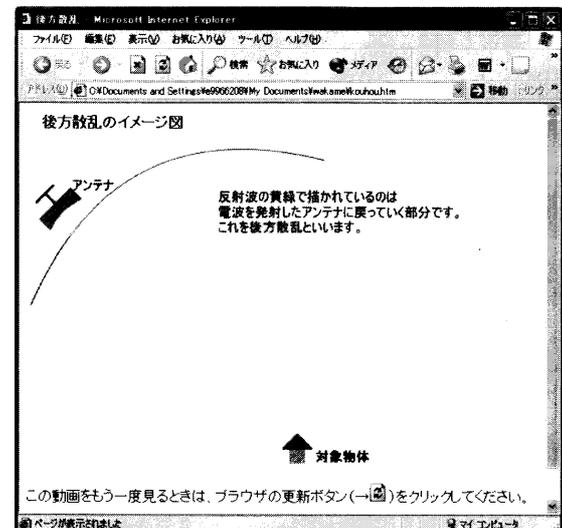
(b) 地表面に到達したマイクロ波パルスが散乱している状態



(b) 対象物体においてマイクロ波が散乱した状態



(c) 後方散乱したマイクロ波パルスがアンテナに戻っている状態



(c) 散乱したマイクロ波がアンテナで受信された状態と後方散乱の解説文の表示

図 3.5 後方散乱したマイクロ波を解説するアニメーション

図 3.6 に示すように、地表面にある点 P はプラットフォームが軌道上を距離 ρ_0 だけ運動する間、マイクロ波を照射され続けている。例えば、 $a_1 \sim a_5$ においてパルスが送信されたとすると、合成開口処理後は、 $a_1 \sim a_5$ を一つの大きなアンテナに合成されたと見なすことができる。

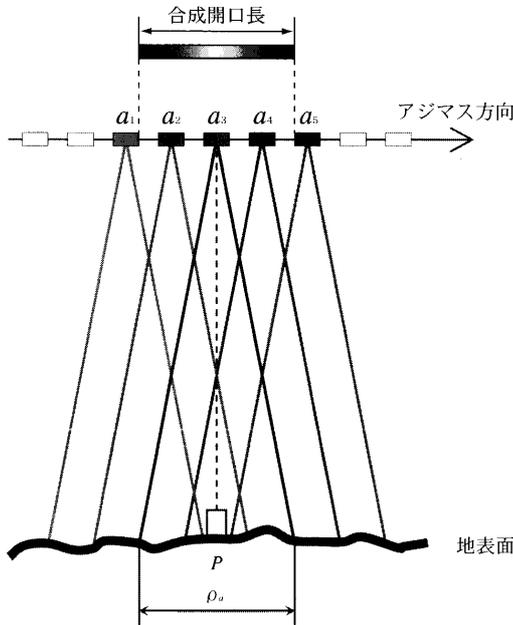
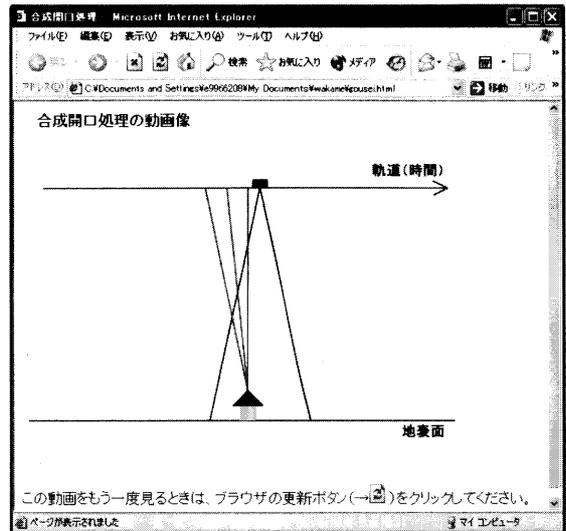


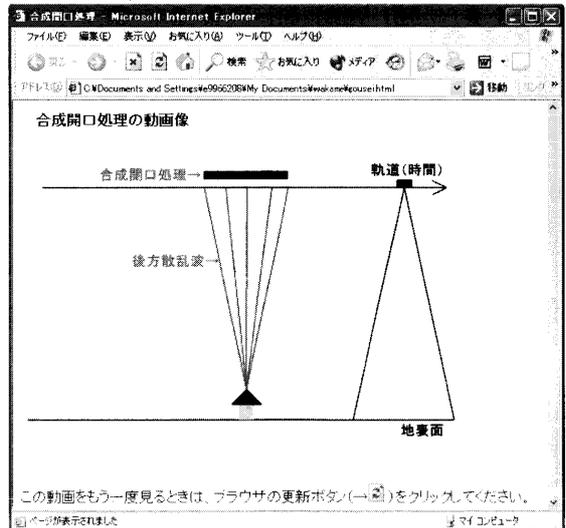
図 3.6 合成開口処理

(2) アニメーション化した部分

図 3.6 に対応する Web ページでは、各パルスの状態をそれぞれ表示しているが、時間的な動きを明確にするため、図 3.7 (a)~(c) に示す合成開口処理を解説するアニメーションを追加した。このアニメーションでは、軌道を左から右に向けてプラットフォームが移動しながら、パルス波を放射状に地表面に照射する。対象物体から後方散乱信号を受信した場合、それらを蓄積した位置の総距離が合成開口長となることを表現している。

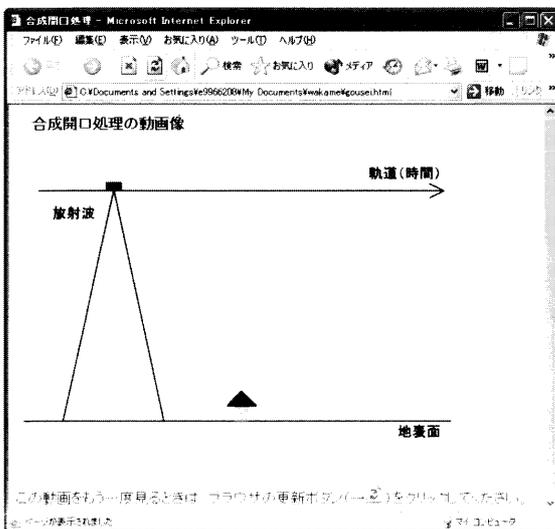


(b) 対象物体からの後方散乱を受信しながら移動している状態



(c) 対象物体を通過した後、合成開口処理位置を表示

図 3.7 合成開口処理を解説するアニメーション



(a) 対象物体からの後方散乱を受信する前

3.3 レンジ方向の解像度を上げる方法

(1) 解説内容

3.1 節で解説したように、レンジ方向の解像度を上げるためにパルス圧縮処理が行われる。この処理では、周波数帯域幅 B の広いパルス信号を送信し、観測後に参照信号との相関処理によりパルス幅を狭める。そのため、時間とともに一次関数的に周波数を増加または減少させるチャープ変調を施す。 $\omega(t)$ 、 ω_0 、 B をそれぞれ、送信信号の角周波数、搬送波角周波数、チャープ率 [Hz/sec] とすると、

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t \quad \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \right) \quad (3.1)$$

である。位相は、角周波数の時間積分となるため $\int \omega(t) dt = \omega_0 t + \alpha t^2$ となる。ここで、 $\alpha = \beta/2$ である。送信信号 $S_s(t)$ は振幅と位相からなるため、複素数を用い

て表現すると、

$$S_r(t) = \exp\{j(\omega_0 t + \alpha t^2)\} \quad \left(-\frac{\tau}{2} \leq t \leq +\frac{\tau}{2}\right) \quad (3.2)$$

である。なお、単純化のため振幅は、1としている。

アンテナから送信されたパルスが地表面に到達し、後方散乱してアンテナまで戻ってくる時間を T_D とすると、受信信号 $S_r(t)$ は、送信信号が T_D だけ遅れたことによるため、

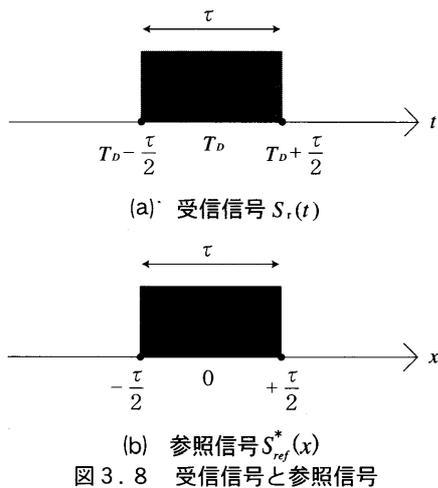
$$\begin{aligned} S_r(t) &= \exp\{j[\omega_0(t-T_D) + \alpha(t-T_D)^2]\} \\ &= \exp\{j\omega_0(t-T_D)\} \cdot \exp\{j\alpha(t-T_D)^2\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

である。搬送波周波数帯域は高域フィルタにより除去され、実際に記録される受信信号 $S_r(t)$ は、

$$S_r(t) = \exp\{j\alpha(t-T_D)^2\} \quad \left(T_D - \frac{\tau}{2} \leq t \leq T_D + \frac{\tau}{2}\right) \quad (3.4)$$

となる。

パルス圧縮では、図 3.8 に示すように受信信号とそれと同じ形状で複素共役をとった参照信号 $S_{ref}^*(x) = \exp(-j\alpha x^2)$ を用いて、複素数の相関処理を行う。



パルス圧縮された信号を $g(t)$ とするとき、図 3.9 に示すように、受信信号と参照信号を相関処理する範囲に基づいて、4 通りに場合分けを行い、 $g(t)$ を求める⁸⁾。

(a) $t \leq T_D - \tau$, および、(d) $T_D + \tau < t$ のとき

互いに関数値が重なる部分がないため、 $g(t) = 0$ となる。

(b) $T_D - \tau < t \leq T_D$ のとき

相関処理は、 $g(t) = \int_{T_D - \frac{\tau}{2} - t}^{+\frac{\tau}{2}} S_r(t+x) S_{ref}^*(x) dx$ となる。積分した結果、

$$g(t) = (\tau - T_D + t) \text{sinc}\{\alpha(t - T_D)(\tau - T_D + t)\} \quad (3.5)$$

が得られ、圧縮後の信号では、位相項が消滅し実数値となる。ここで、 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ である。

(c) $T_D < t \leq T_D + \tau$ のとき

相関処理は、 $g(t) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{T_D + \frac{\tau}{2} - t} S_r(t+x) S_{ref}^*(x) dx$ となる。積分した結果、

$$g(t) = (T_D - t + \tau) \text{sinc}\{\alpha(t - T_D)(T_D - t + \tau)\} \quad (3.6)$$

が得られ、(b)と同様に圧縮後の信号では、位相項が消滅し実数値となる。

図 3.10 にパルス圧縮前と後の信号を示す。圧縮後のパルス幅の定義を、最大値を有するピーク幅の半分とすると、式 (3.5) より t_0 を求めた結果から、パルスの周波数帯域幅 B の逆数となる。

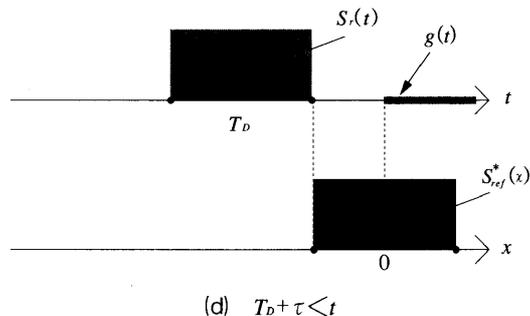
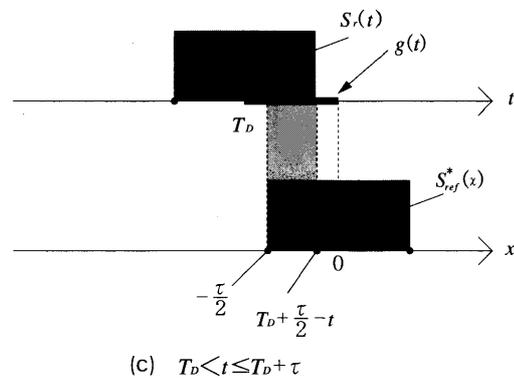
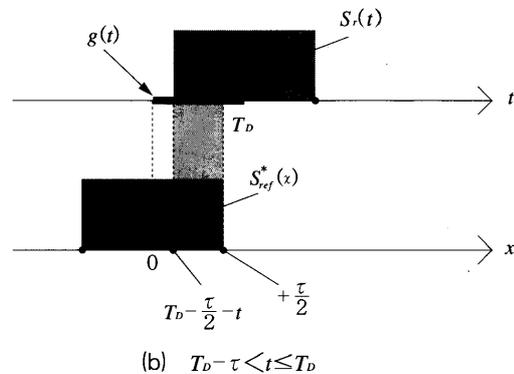
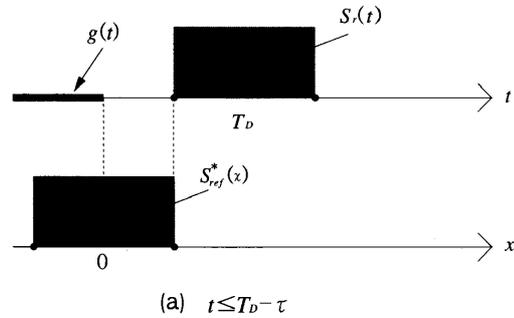


図 3.9 パルス圧縮処理の場合分け

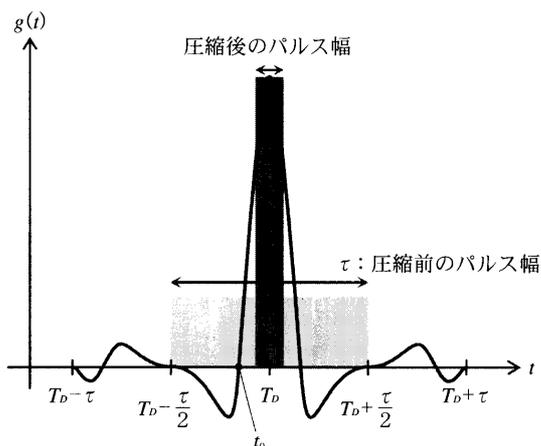
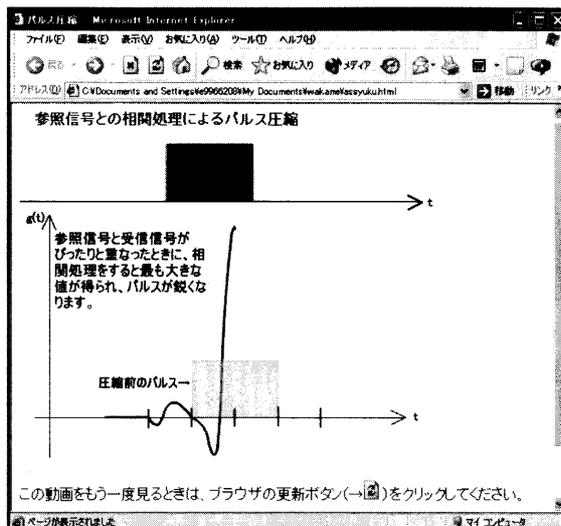


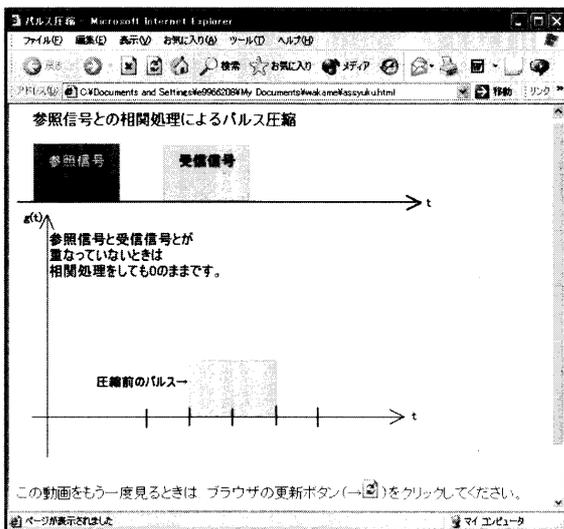
図 3.10 相関処理によるパルスの圧縮

(2) アニメーション化した部分

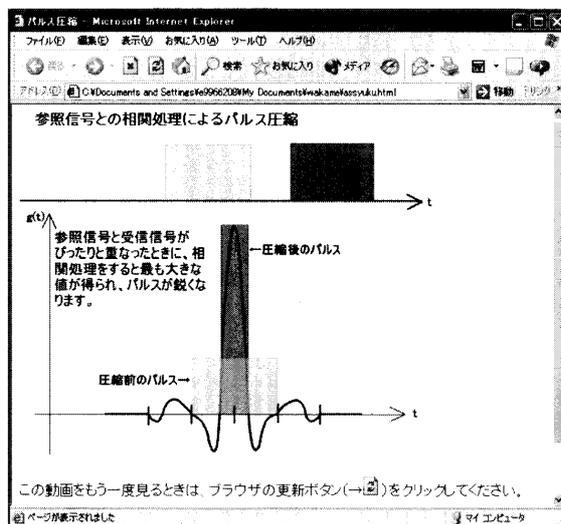
図 3.9 は、パルス圧縮処理を場合分けして解説し、図 3.10 にパルス圧縮された信号を示しているが、両者の関



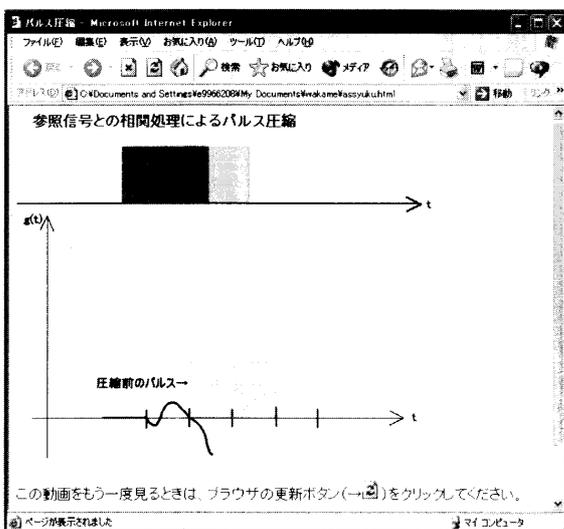
(c) 受信信号と参照信号のすべてが重なり、圧縮信号が最大となった状態



(a) 受信信号と参照信号が重なっていない状態



(d) 相関処理後、圧縮信号を表示している状態と解説文の表示
図 3.11 パルス圧縮のアニメーション



(b) 受信信号と参照信号が一部重なり、相関処理を行い圧縮信号が表示されている状態

係が把握しにくいという問題があった。そのため、図 3.11 (a)~(d)に示すように、受信信号、参照信号、パルス圧縮された信号の三者を同時に時間軸とともにアニメーション化し、パルス圧縮処理をビジュアルに理解できるように配慮している。

(3) 数式展開

本項目では、式 (3.3), (3.4) の相関処理に関連する積分計算などの解説を必要としている。ここでは、数式展開の過程を省略したが、Web ページに含まれる教育用コンテンツでは、数式変形を省略せず置換積分による積分範囲を表にまとめ、詳細を確認できるようにしている。

4. まとめ

本研究で開発した Web ページは教育用コンテンツということを念頭に置き、SAR に関する特別な専門知識がなくても理解できるように配慮した。そのため、図を多く取り入れ、さらにアニメーションの導入を行った。これにより、文字と数式を中心とする解説を避けることができ、表示された動きと解説文を読むことでビジュアルに SAR の概念と再生処理を理解できる教育用コンテンツを開発できた。

とくに、SAR 画像の再生処理において中心的な処理となるパルス圧縮処理については、理解することが難しいといわれている。本 Web ページに導入した受信信号、参照関数、パルス圧縮信号の三者を同時にアニメーション化するという試みは他に類を見ないものであり、パルス圧縮の概念を理解する場合に広く利用されると期待できる。

今後、本教育用コンテンツを利用して SAR について学習している状態において、各項目の理解度を調査するシステムを開発し、その結果に基づいて解説がわかりにくい部分や飛躍した解説や図面、アニメーションに改良を加え、より理解しやすいものに発展させる予定である。

参考文献

- 1) 飯坂譲二監修, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998 年.
- 2) 森和加奈, 合成開口レーダの原理と再生処理に関連した教育用コンテンツ, 鳴門教育大学学校教育学部中学校教員養成課程, 生活・健康系 II (技術科) 教育専攻, 平成 14 年度卒業論文, 2003 年.
- 3) 森和加奈, 伊藤陽介, 合成開口レーダの原理と再生処理に関連した教育用コンテンツ, 日本産業技術教育学会第 18 回四国支部大会講演要旨集, 2002 年, p.13.
- 4) J. C. Curlander and R. N. McDonough, SYNTHETIC APERTURE RADAR Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, 1991, pp.126-209.
- 5) 高木幹雄, 下田陽久監修, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991 年, pp.151-170.
- 6) 境 裕司, 速習 Web デザイン FLASH5, 技術評論社, 2001 年.
- 7) 青空研究会ホームページ制作部, Dreamweaver 4 & Fireworks 4 パーフェクトマスター, 秀和システム, 2001 年.
- 8) G. Franceschetti and R. Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, CRC Press, 1999, pp.15-31.

(受理日 2003 年 9 月 30 日)

Development of educational contents for synthetic aperture radar and its signal processing

Yosuke ITO* and Wakana MORI**

Remote sensing is useful to discover global issues such as warming and desertification. Synthetic Aperture Radar (SAR) which is a kind of an active sensor can observe earth surface independent of weather conditions. The SAR has been employed for various purposes since the 1990s. However, understanding the SAR is particularly difficult for students who learned natural science in the high school. There are few opportunities to know how to produce SAR images since the SAR data are generally processed by specialists. It is obviously possible to study observation results thoroughly in the case of understanding the SAR data processing in advance.

This paper presents educational contents for the purpose of understanding a principle of the SAR and its signal processing technique. These contents consist of Web pages including numerous pictures and animations to clarify sophisticated processing technique. The numerical expressions are also described without skipping the transformation process as much as possible in order to be easy to understand. At first, the block diagram and characteristics of the educational contents are shown and the software environment creating and browsing the animations are introduced. In order to show advantages of the developed contents, the three items, 1. Concept of imaging radar, 2. Introduction of SAR, and 5. Resolution enhancement method in range direction, are picked up. The detailed contents in each item are explained and the role of each animation is also described with screen copies.

The animation which displays the three shapes of received, reference, and compressed signals simultaneously is especially effective to explain the complex convolution processing in the pulse compression. The educational contents will be improved based on results of the system which investigates the degree of comprehension of each item.

* Faculty of Health and Living Sciences Education, Naruto University of Education

** Kinki branch, Nippon Yusei Kosha (Japan Post) (Graduate of Naruto University of Education in 2003)