第490回電波研連F分科会
開催日:2004年12月17日

4成分散乱電力分解によるPi-SAR画像の解析

石堂基　　山口芳雄　　山田寛喜
新潟大学

発表の流れ

1. 研究の背景・目的
   - ●POLSAR画像解析を行う背景・目的
   - ●解析に使用した領域
   - ●POLSAR画像について
2. 三成分散乱モデル分解について
   - ●Covariance matrix について
   - ●三成分散乱モデル分解
   - ●三成分散乱モデルとCovariance matrix の画像
   - ●三成分散乱モデルの問題点と四成分散乱モデル分解の提案
3. 四成分散乱モデル分解について
   - ●平均化Covariance matrix
   - ●基本ターゲットにおける平均化Covariance matrix
   - ●確率密度関数の変更
4. 解析結果
   - ●市街地モデルの解析(鳥屋野潟周辺画像)
   - ●植生モデルの解析(苫小牧画像)
5. まとめ

1. 研究の背景･目的

背景

地球観測 →

- 地球環境観測
- 大規模災害の迅速な把握
- 地球の資源探査

航空機に搭載された偏波合成開口レーダ(Pi-SAR)により得られたPOLSAR画像データを用いて地表面の解析を行う

偏波情報を用いることにより、地上ターゲットの識別がある程度可能

偏波を用いた振幅情報、位相情報の利用
合成開口処理による高分解能の実現

目的

市街地や植生の領域を検出するためには？

物理モデルを基本とした三成分散乱モデル分解†を用いる

定式化に問題がある

平均化Covariance matrix を用いた四成分散乱モデル分解の提案

三成分散乱モデル分解と四成分散乱モデル分解を様々な方法で比較

四成分散乱モデル分解の妥当性を評価

†: Freeman, Durdenらによる

解析領域(1)

HH　HV　VV

L-band

画像データの諸元

解析領域	新潟市鳥屋野潟周辺
観測日時	2003年8月20日
入射角	34.4～47.1(degree)
偏波	HH HV VH VV
周波数	1.27[GHz] (L-band)
波長	λ =23.6(cm)
画像サイズ	2000×2000(pixel)
ピクセルサイズ	2.5×2.5(m)
平均化サイズ	5×5 (pixel)

解析領域(2)

HH　HV　VV

L-band

画像データの諸元

解析領域	北海道苫小牧
観測日時	2002年11月8日
入射角	36.4～49.2(degree)
偏波	HH HV VH VV
周波数	1.27[GHz] (L-band)
波長	λ =23.6(cm)
画像サイズ	2000×2000(pixel)
ピクセルサイズ	2.5×2.5(m)
平均化サイズ	5×5

POLSAR画像解析について

Scattering matrix $[S]$

集合平均

Covariance matrix
$[C]$ 3×3

Coherency matrix
$[T]$ 3×3

Kennaugh matrix
$[K]$ 4×4

Physical

Mathematical

Phenomenological

三成分散乱モデル分解

Entropy, $\overline{\alpha}$

Huynenn Parameter

2. 三成分散乱モデル分解について

Covariance matrix(1)

散乱行列 [S] をCovariance matrix [C] に変換する

集合平均をとれるため、平均化処理が容易

独立要素によりベクトル化

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \longrightarrow S=\begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$\langle [C] \rangle = \frac{1}{N}\sum^{N} S \otimes S^{*T} = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{HV}S_{HH}^* \rangle & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

$\langle \cdot \rangle$: アンサンブル平均

Covariance matrix(2)

特徴

- 森林などの分布した自然ターゲットに対して、偏波チャネルの電力によりほとんどの要素が決まる
- 個々のターゲットに依存しない2次統計量として用いることができる
- 実験的にわかっているReflection symmetry なターゲット $\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\rangle \approx \langle S_{HV}S_{VV}^{*}\rangle \approx 0$ に対して三成分散乱モデル分解を使うことができる

$$\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\rangle \approx \langle S_{HV}S_{VV}^{*}\rangle \approx 0 \Rightarrow \langle C\rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2\rangle & 0 & \langle S_{HH}S_{VV}^{*}\rangle \\ 0 & 2\langle |S_{HV}|^2\rangle & 0 \\ \langle S_{VV}S_{HH}^{*}\rangle & 0 & \langle |S_{VV}|^2\rangle \end{bmatrix}$$

三成分散乱モデル分解(1)

測定散乱波を物理的な散乱過程に基づいた散乱モデルに分解

Covariance Matrix の要素を用いて分解を行う

表面散乱　海域・農地・低植生域における散乱過程

二回反射　地表面に入射して樹幹や人工建造物に反射する散乱過程

体積散乱　ランダムに傾いたWireが合成された散乱過程

三成分散乱モデル分解(2)

観測された Covariance Matrix を以下のように3つの成分に展開する

$$\langle [C] \rangle^{HV} = f_s \langle [C] \rangle^{HV}_{surface} + f_d \langle [C] \rangle^{HV}_{double} + f_v \langle [C] \rangle^{HV}_{volume}$$

$$= f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{f_v}{3} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

C_{11} $\quad \langle |S_{HH}|^2 \rangle = f_s |\beta|^2 + f_d |\alpha|^2 + \cancel{f_v}$

C_{22} $\quad \langle |S_{HV}|^2 \rangle = f_v / 3$

C_{33} $\quad \langle |S_{VV}|^2 \rangle = f_s + f_d + \cancel{f_v}$

C_{13} $\quad \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle = f_s \beta + f_d \alpha + \cancel{f_v} / 3$

C_{12}, C_{21} $\quad \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle \approx \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \approx 0$

$\mathrm{Re}(S_{HH} S_{VV}^*) < 0$
$\beta = 1$

$\mathrm{Re}(S_{HH} S_{VV}^*) > 0$
$\alpha = -1$

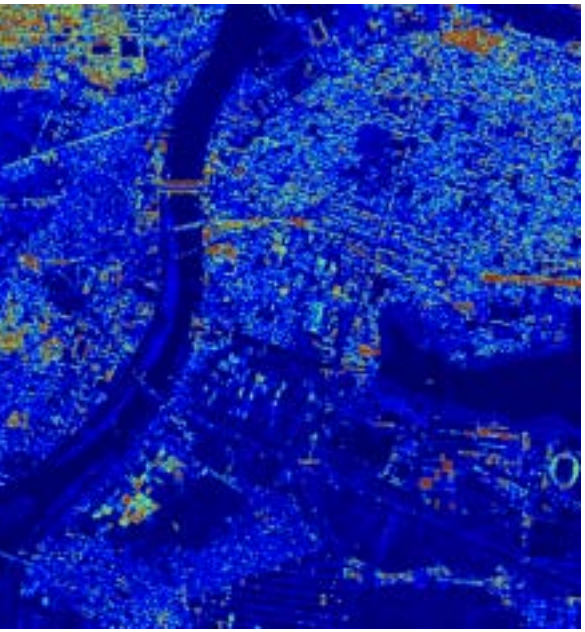
各成分による散乱電力

$$P_s = f_s \left(1 + |\beta|^2\right)$$

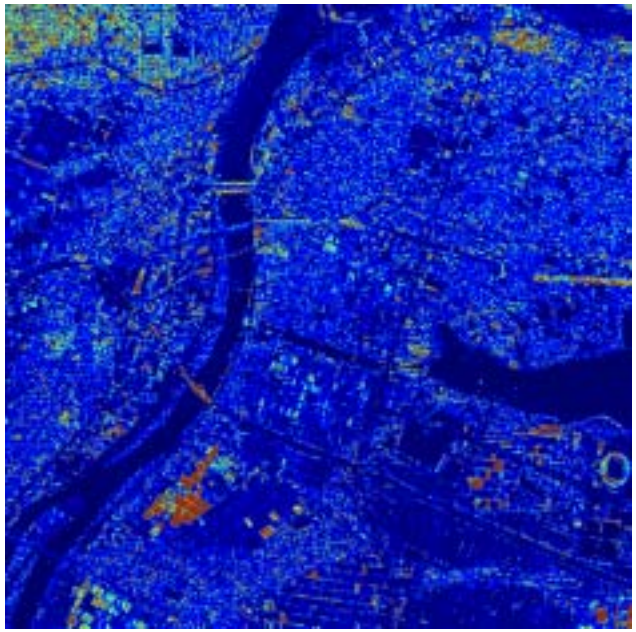
$$P_d = f_d \left(1 + |\alpha|^2\right)$$

$$P_v = \frac{8}{3} f_v = 8 \langle |S_{HV}|^2 \rangle$$

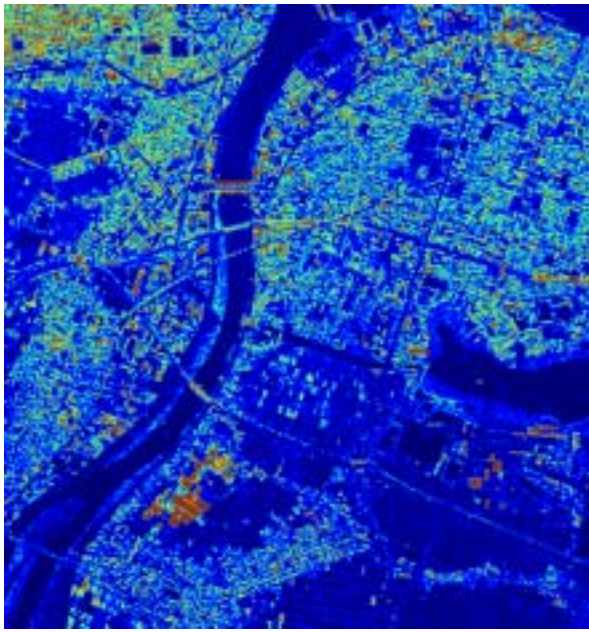
三成分散乱モデル分解(3)



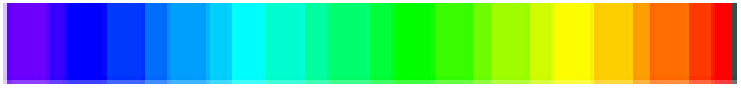
P_s



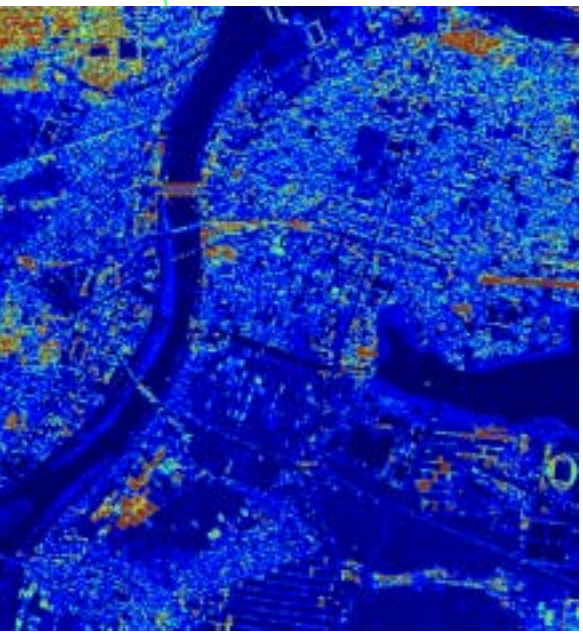
P_d



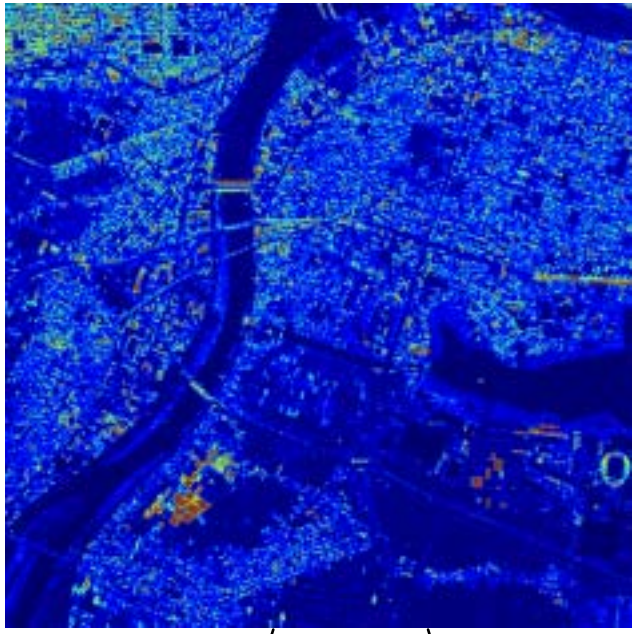
P_v

min  max

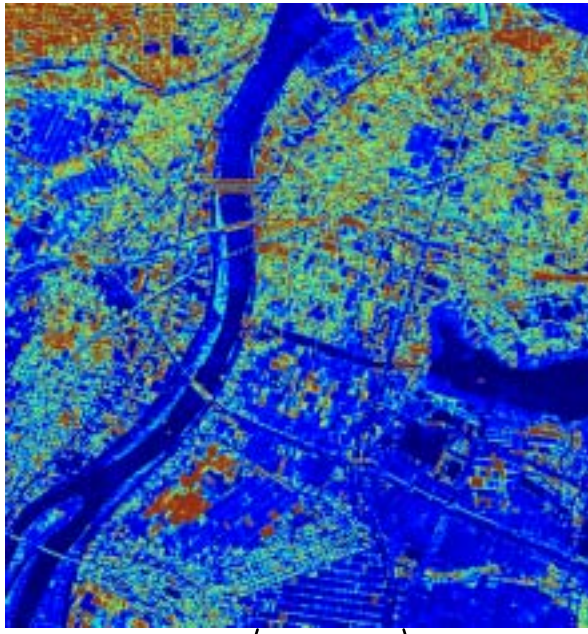
平均化Covariance Matrix の要素(1)



$\left\langle \left| S_{HH} \right|^2 \right\rangle$



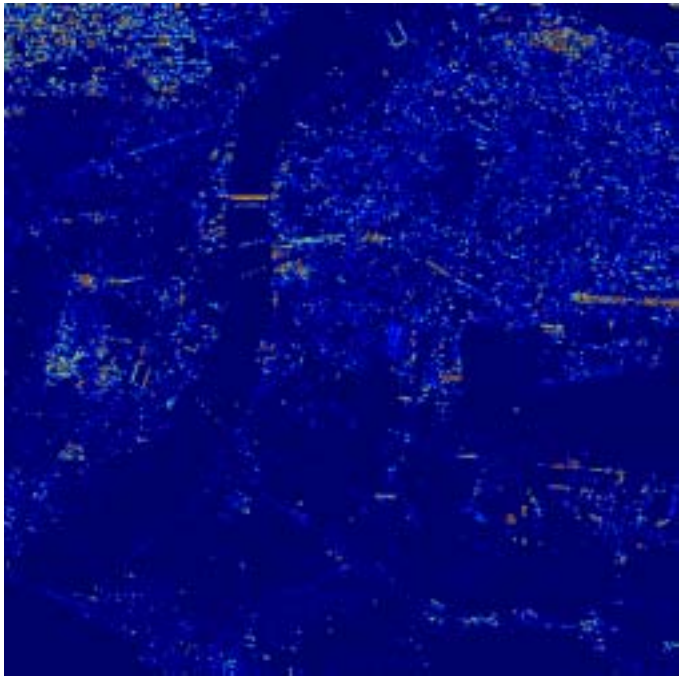
$2\left\langle \left| S_{HV} \right|^2 \right\rangle$



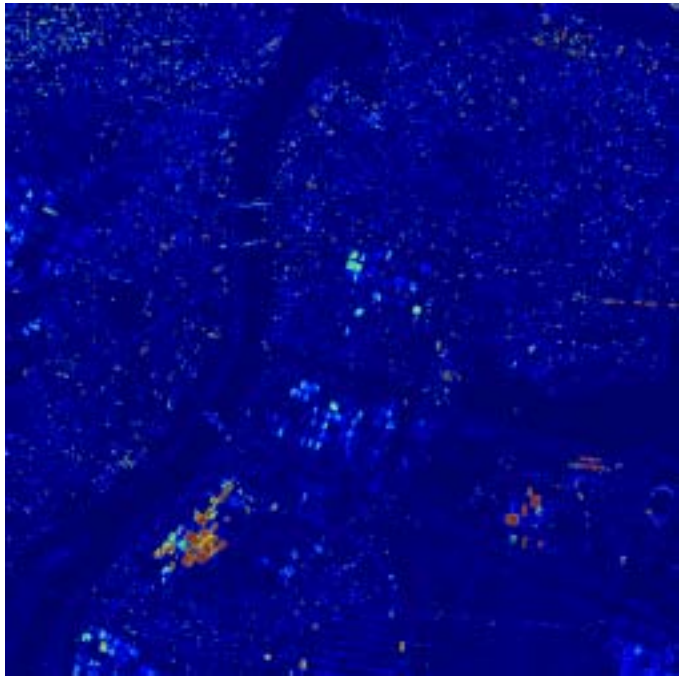
$\left\langle \left| S_{VV} \right|^2 \right\rangle$

$$\langle [C] \rangle = \begin{bmatrix} \langle | S_{HH} |^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & 2\langle | S_{HV} |^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle | S_{VV} |^2 \rangle \end{bmatrix}$$

平均化Covariance Matrix の要素(2)



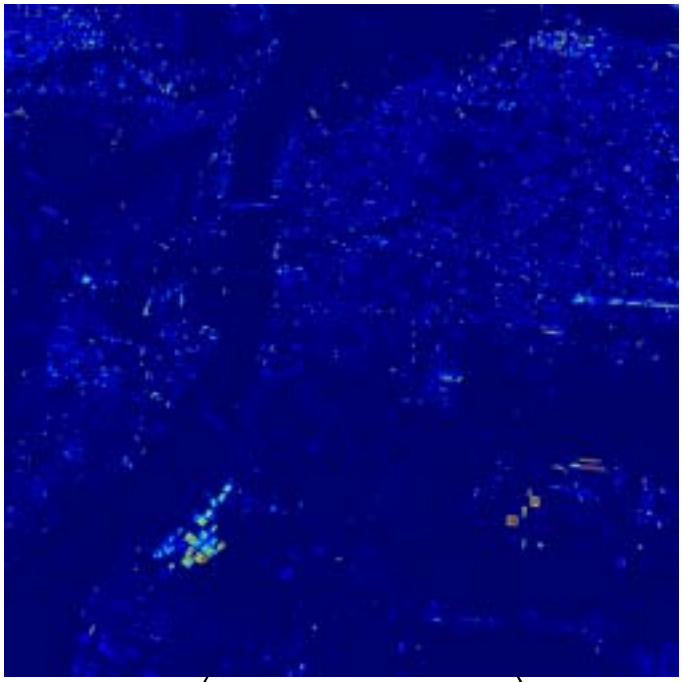
$\mathrm{Re}\langle S_{HH} S_{VV}^{*} \rangle$



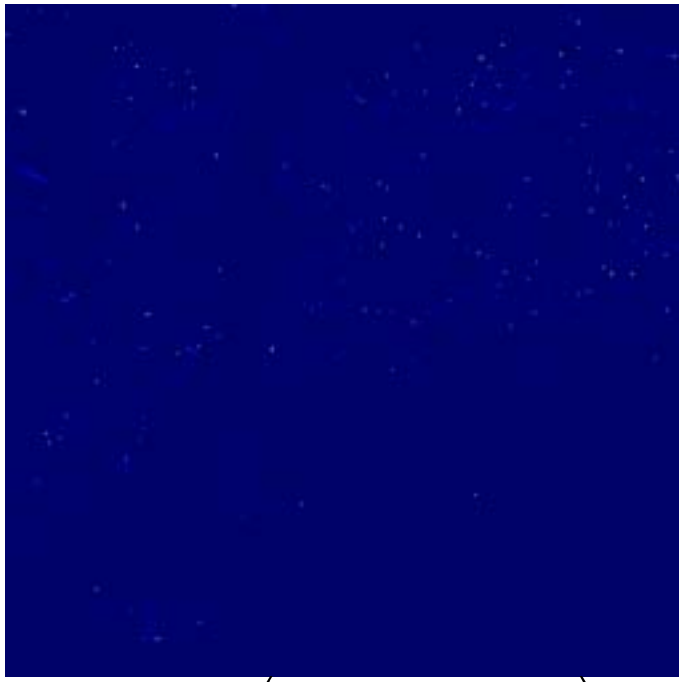
$\mathrm{Im}\langle S_{HH} S_{VV}^{*} \rangle$

$$\langle [C] \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HH} S_{HV}^{*} \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^{*} \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{HH}^{*} \rangle & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{VV}^{*} \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^{*} \rangle & \sqrt{2}\langle S_{VV} S_{HV}^{*} \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

平均化Covariance Matrix の要素(3)



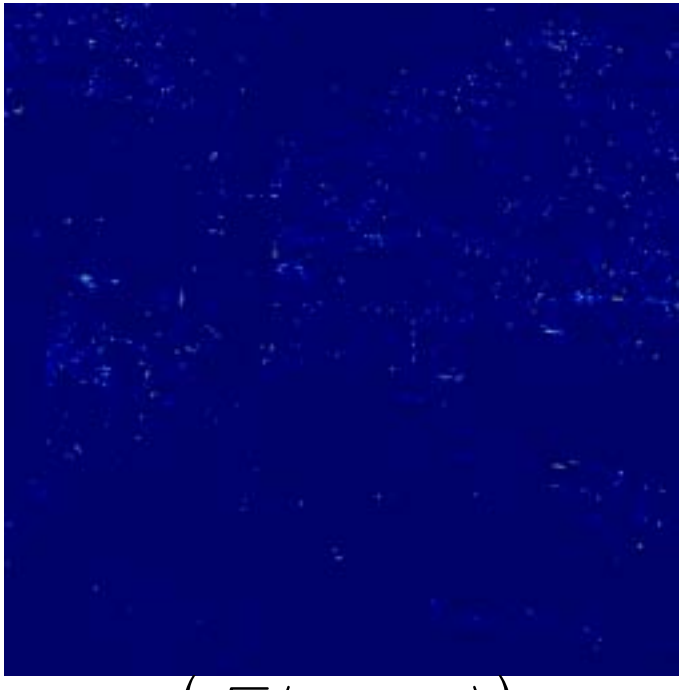
$\mathrm{Re}\left(\sqrt{2}\left\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\right\rangle\right)$



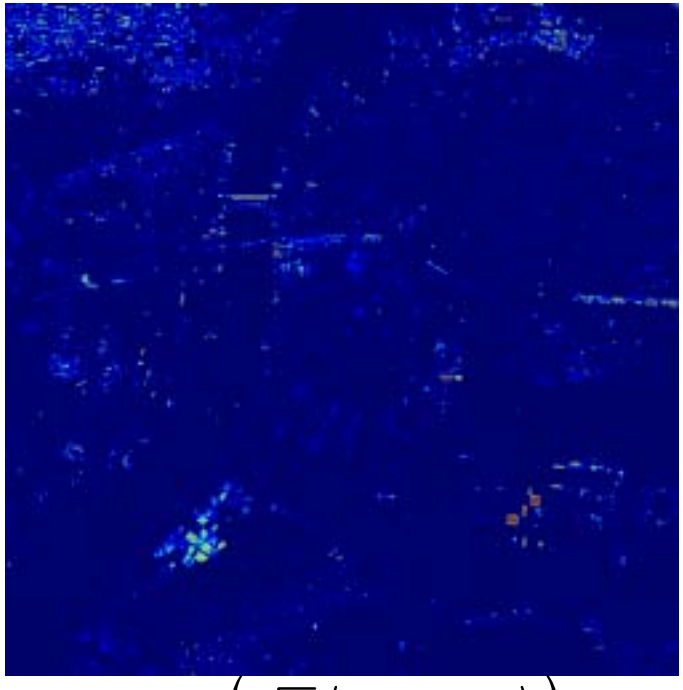
$\mathrm{Im}\left(\sqrt{2}\left\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\right\rangle\right)$

$$\langle[C]\rangle=\begin{bmatrix}\left\langle|S_{HH}|^{2}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\right\rangle & \left\langle S_{HH}S_{VV}^{*}\right\rangle\\ \sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{HH}^{*}\right\rangle & 2\left\langle|S_{HV}|^{2}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\right\rangle\\ \left\langle S_{VV}S_{HH}^{*}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{VV}S_{HV}^{*}\right\rangle & \left\langle|S_{VV}|^{2}\right\rangle\end{bmatrix}$$

平均化Covariance Matrix の要素(4)



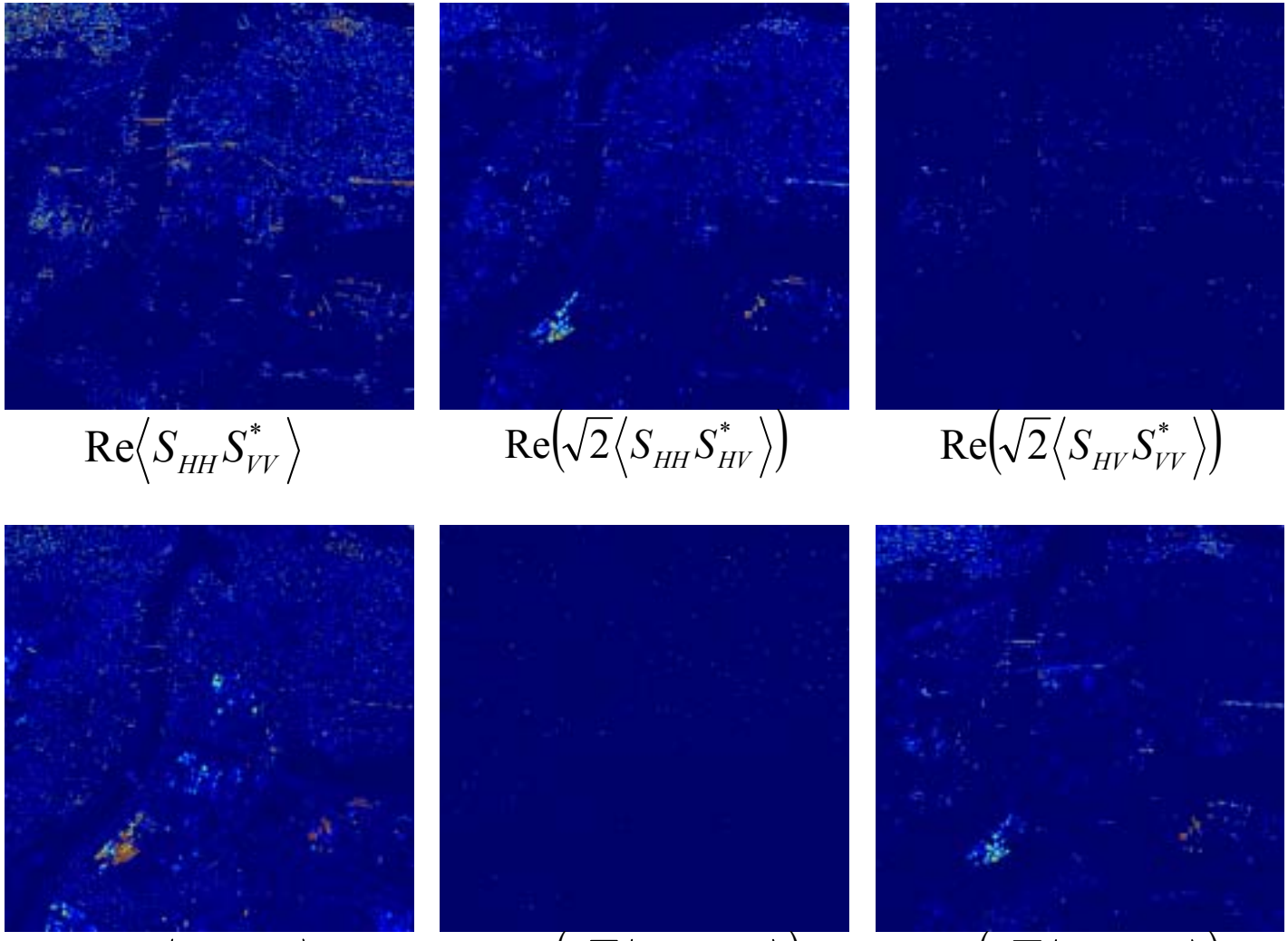
$\mathrm{Re}\left(\sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\right\rangle\right)$



$\mathrm{Im}\left(\sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\right\rangle\right)$

$$\langle[C]\rangle=\begin{bmatrix}\left\langle|S_{HH}|^{2}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\right\rangle & \left\langle S_{HH}S_{VV}^{*}\right\rangle\\ \sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{HH}^{*}\right\rangle & 2\left\langle|S_{HV}|^{2}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\right\rangle\\ \left\langle S_{VV}S_{HH}^{*}\right\rangle & \sqrt{2}\left\langle S_{VV}S_{HV}^{*}\right\rangle & \left\langle|S_{VV}|^{2}\right\rangle\end{bmatrix}$$

平均化Covariance Matrix の要素



$\mathrm{Re}\langle S_{HH}S_{VV}^{*}\rangle$ $\mathrm{Re}\left(\sqrt{2}\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\rangle\right)$ $\mathrm{Re}\left(\sqrt{2}\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\rangle\right)$

$\mathrm{Im}\langle S_{HH}S_{VV}^{*}\rangle$ $\mathrm{Im}\left(\sqrt{2}\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\rangle\right)$ $\mathrm{Im}\left(\sqrt{2}\langle S_{HV}S_{VV}^{*}\rangle\right)$

四成分散乱モデル分解の提案

三成分散乱モデル分解の欠点

- 必ずしも $\langle S_{HH}S_{HV}^{*}\rangle \approx \langle S_{HV}S_{VV}^{*}\rangle \approx 0$ が成立しない
- $\langle |S_{HV}|^{2}\rangle$ が必ず体積散乱成分にならない
- 定式化において強制的に0にして計算している部分がある

これらの問題を解決する分解法を提案すれば、
より詳細に地表面を解析することが可能

四成分散乱モデルを提案

3. 四成分散乱モデル分解について

平均化Covariance matrix (1)

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} a & c \\ c & b \end{bmatrix}$$

$$[S(\theta)]^{HV}=\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a & c \\ c & b \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\langle [C(\theta)] \rangle = \int_0^{2\pi} [C(\theta)] p(\theta) d\theta$$

数式的な平均Covariance matrix

$$\langle [C(\theta)] \rangle^{HV} = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{hv}S_{hh}^* \rangle & 2\langle |S_{hv}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv}S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

$p(\theta)$は確率密度関数

$$\langle |S_{hh}|^2 \rangle = |a|^2 I_1 + |b|^2 I_2 + |c|^2 I_3 + 2\mathrm{Re}(ab^*) I_4 + 2\mathrm{Re}(ac^*) I_4 + 2\mathrm{Re}(bc^*) I_4$$

$$\langle |S_{vv}|^2 \rangle = |a|^2 I_2 + |b|^2 I_1 + |c|^2 I_3 + 2\mathrm{Re}(ab^*) I_4 - 2\mathrm{Re}(ac^*) I_6 - 2\mathrm{Re}(bc^*) I_5$$

$$\langle |S_{hv}|^2 \rangle = \frac{1}{4}|b-a|^2 I_3 + |c|^2 I_7 + \mathrm{Re}\{c^*(b-a)\} I_8$$

$$\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle = (|a|^2 + |b|^2) I_4 - |c|^2 I_3 + ab^* I_1 + a^* b I_2 + (b^* c - ac^*) I_5 + (a^* c - bc^*) I_6$$

$$\langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle = a\frac{b^*-a^*}{2} I_5 + b\frac{b^*-a^*}{2} I_6 + c\frac{b^*-a^*}{2} I_3 + ac^* I_{10} + bc^* I_9 + |c|^2 I_8$$

$$\langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle = a^*\frac{b-a}{2} I_6 + b^*\frac{b-a}{2} I_5 + c^*\frac{b-a}{2} I_3 + ca^* I_9 + b^* c I_{10} - |c|^2 I_8$$

$$I_1 = \int_0^{2\pi} \cos^4\theta p(\theta) d\theta \qquad I_6 = \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \sin 2\theta p(\theta) d\theta$$

$$I_2 = \int_0^{2\pi} \sin^4\theta p(\theta) d\theta \qquad I_7 = \int_0^{2\pi} \cos^2 2\theta p(\theta) d\theta$$

$$I_3 = \int_0^{2\pi} \sin^2 2\theta p(\theta) d\theta \qquad I_8 = \int_0^{2\pi} \sin 2\theta \cos 2\theta p(\theta) d$$

$$I_4 = \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \cos^2\theta p(\theta) d\theta \qquad I_9 = \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \cos 2\theta p(\theta) d\theta$$

$$I_5 = \int_0^{2\pi} \cos^2\theta \sin 2\theta p(\theta) d\theta \qquad I_{10} = \int_0^{2\pi} \cos^2\theta \cos 2\theta p(\theta) d$$

平均化Covariance matrix (2)

確率密度関数を一様であると仮定し $p(\theta) = p = \dfrac{1}{2\pi}$ のように選べば

$\left\langle \left\| S_{hh} \right\|^2 \right\rangle = \left\langle \left\| S_{vv} \right\|^2 \right\rangle = \frac{1}{8}\left\| a + b \right\|^2 + \frac{1}{4}\left(\left\| a \right\|^2 + \left\| b \right\|^2 \right) + \frac{1}{2}\left\| c \right\|^2$	実数
$\left\langle S_{hh} S_{vv}^* \right\rangle = \left\langle S_{vv} S_{hh}^* \right\rangle = \frac{1}{8}\left\| a + b \right\|^2 + \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(a^* b \right) - \frac{1}{2}\left\| c \right\|^2$	実数
$\left\langle \left\| S_{hv} \right\|^2 \right\rangle = \frac{1}{8}\left\| a - b \right\|^2 + \frac{1}{2}\left\| c \right\|^2$	実数
$\left\langle S_{hh} S_{hv}^* \right\rangle = \left\langle S_{hv} S_{vv}^* \right\rangle = + \frac{j}{2}\mathrm{Im}\{ c^* (a - b) \}$	虚数
$\left\langle S_{hh}^* S_{hv} \right\rangle = \left\langle S_{hv}^* S_{vv} \right\rangle = - \frac{j}{2}\mathrm{Im}\{ c^* (a - b) \}$	虚数

散乱行列[S]を用いて基本ターゲットの平均化Covariance matrixを求める

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \Rightarrow \langle [C] \rangle = \begin{bmatrix} ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \end{bmatrix}$$

基本ターゲットによる平均化Covariance matrix(1)

ワイヤターゲット

垂直ワイヤ $[S]^{HV}_{v-wire} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

水平ワイヤ $[S]^{HV}_{h-wire} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$\langle [C] \rangle^{HV}_{wire} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

二回反射ターゲット(金属の2面リフレクタ)

垂直diplane $[S]^{HV}_{v-diplane} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

水平diplane $[S]^{HV}_{h-diplane} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

$$\langle [C] \rangle^{HV}_{diplane} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

二次統計量の利点

基本ターゲットによる平均化Covariance matrix(2)

奇数回反射ターゲット(Plate,Sphere,3面リフレクタ)

プレート $[S]_{plate}^{HV} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ⇒ $\langle [C] \rangle_{plate}^{HV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

円偏波発生ターゲット(Helix)

R-Helix $[S]_{r-helix}^{HV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$ ⇒ $\langle [C] \rangle_{r-helix}^{HV} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} & -1 \\ -j\sqrt{2} & 2 & j\sqrt{2} \\ -1 & -j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$

L-Helix $[S]_{l-helix}^{HV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$ ⇒ $\langle [C] \rangle_{l-helix}^{HV} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -j\sqrt{2} & -1 \\ j\sqrt{2} & 2 & -j\sqrt{2} \\ -1 & j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$

基本ターゲットによる平均化Covariance matrix(3)

$\langle S_{hh}S_{hv}^*\rangle = \langle S_{hv}S_{vv}^*\rangle = \frac{j}{2}\mathrm{Im}\{c^*(a-b)\}$ の関係より

$$\frac{1}{2}\mathrm{Im}\{c^*(a-b)\} = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\left(\langle S_{HH}S_{HV}^*\rangle + \langle S_{HV}S_{VV}^*\rangle\right)$$

Helixのみ存在

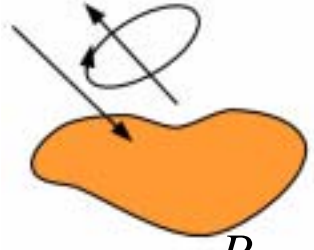
R-Helix $[S]_{r-helix}^{HV} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$ $\Rightarrow$ $\frac{1}{2}\mathrm{Im}\left\{\frac{j}{2}\left(\frac{1+1}{2}\right)\right\} = \frac{1}{4}$

L-Helix $[S]_{l-helix}^{HV} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$ $\Rightarrow$ $\frac{1}{2}\mathrm{Im}\left\{\frac{-j}{2}\left(\frac{1+1}{2}\right)\right\} = -\frac{1}{4}$

<u>円偏波発生成分</u>

$$\frac{f_c}{4} = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\left(\langle S_{HH}S_{HV}^*\rangle + \langle S_{HV}S_{VV}^*\rangle\right) = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\{S_{HV}^*(S_{HH}-S_{VV})\}$$

$$P_c = f_c$$

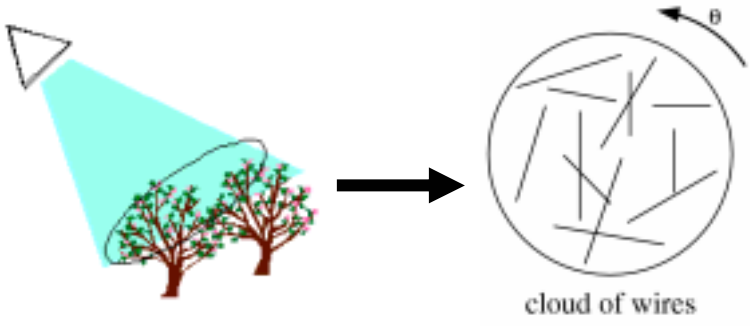


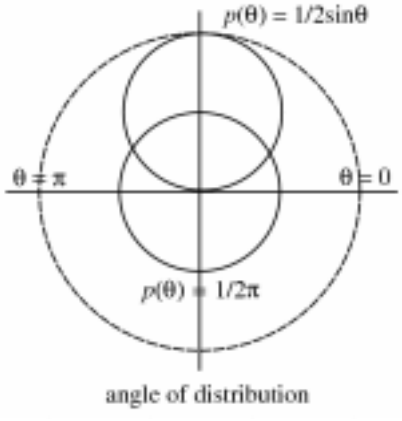
P_c

確率密度関数の変更(1)

垂直に立っている幹・枝が多い植生を想定して確率密度関数を変更する

$$p(\theta)=\begin{cases}\frac{1}{2}\sin\theta & (0<\theta<\pi)\\ 0 & (\pi<\theta<2\pi)\end{cases} \qquad \int_0^{2\pi} p(\theta)d\theta=1$$





確率密度関数の変更(2)

$p(\theta)=\frac{1}{2}\sin\theta$ のとき

$$\left\langle \left|S_{hh}\right|^2\right\rangle = |a|^2 I_1 + |b|^2 I_2 + |c|^2 I_3 + 2\mathrm{Re}(ab^*) I_4$$

$$\left\langle \left|S_{vv}\right|^2\right\rangle = |a|^2 I_2 + |b|^2 I_1 + |c|^2 I_3 + 2\mathrm{Re}(ab^*) I_4$$

$$\left\langle \left|S_{hv}\right|^2\right\rangle = \frac{1}{4}|b-a|^2 I_3 + |c|^2 I_7$$

$$\left\langle S_{hh}S_{vv}^*\right\rangle = \left(|a|^2+|b|^2\right) I_4 - |c|^2 I_3 + ab^* I_1 + a^* b I_2$$

$$\left\langle S_{hh}S_{hv}^*\right\rangle = c\frac{b^*-a^*}{2} I_3 + ac^* I_{10} + bc^* I_9$$

$$\left\langle S_{hv}S_{vv}^*\right\rangle = -c^*\frac{b-a}{2} I_3 + ca^* I_9 + b^* c I_{10}$$

$$I_1=\frac{3}{15} \qquad I_6=0$$

$$I_2=\frac{8}{15} \qquad I_7=\frac{7}{15}$$

$$I_3=\frac{8}{15} \qquad I_8=0$$

$$I_4=\frac{2}{15} \qquad I_9=-\frac{6}{15}$$

$$I_5=0 \qquad I_{10}=\frac{1}{15}$$

$$\left\langle \left|S_{hh}\right|^2\right\rangle = \frac{3}{15}|a|^2 + \frac{8}{15}|b|^2 + \frac{8}{15}|c|^2 + \frac{4}{15}\mathrm{Re}(ab^*)$$

$$\left\langle \left|S_{vv}\right|^2\right\rangle = \frac{8}{15}|a|^2 + \frac{3}{15}|b|^2 + \frac{8}{15}|c|^2 + \frac{4}{15}\mathrm{Re}(ab^*)$$

$$\left\langle \left|S_{hv}\right|^2\right\rangle = \frac{2}{15}|a-b|^2 I_3 + \frac{7}{15}|c|^2$$

$$\left\langle S_{hh}S_{vv}^*\right\rangle = \frac{2}{15}\left(|a|^2+|b|^2-4|c|^2\right) + \frac{8}{15}ab^* + \frac{3}{15}a^* b$$

$$\left\langle S_{hh}S_{hv}^*\right\rangle = \frac{4}{15}c\left(b^*-a^*\right) + \frac{8}{15}ac^* - \frac{6}{15}bc^*$$

$$\left\langle S_{hv}S_{vv}^*\right\rangle = \frac{4}{15}c^*(b-a) + \frac{8}{15}b^* c - \frac{6}{15}a^* c$$

水平ワイヤ $[S]_{h-wire}^{HV} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ → $\langle [C] \rangle_{h-wire}^{HV} = \frac{1}{15}\begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 8 \end{bmatrix}$

垂直ワイヤ $[S]_{v-wire}^{HV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ → $\langle [C] \rangle_{v-wire}^{HV} = \frac{1}{15}\begin{bmatrix} 8 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$

平均化Covariance matrixの展開(1)

地面と木の幹により構成される2回反射構造を想定 → 誘電体

hh成分とvv成分の位相差を考慮した複素数 α を導入

$$[S]_{tree} \Rightarrow \begin{bmatrix} e^{j2\gamma_h} R_{gh} R_{th} & 0 \\ 0 & e^{j2\gamma_v} R_{gv} R_{tv} \end{bmatrix} = e^{j2\gamma_v} R_{gh} R_{th} \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \alpha = e^{j(\gamma_h - \gamma_v)} \frac{R_{gh} R_{th}}{R_{gv} R_{tv}} \propto \frac{S_{hh}}{S_{vv}}$$

$R_{t\_}$: 樹幹による反射係数　$R_{g\_}$: 地面による反射係数　$\gamma_{\_}$: 伝播定数　(_はそれぞれ,水平のhか垂直のv)

この2回反射構造は角度 θ に対して植生のようにランダムとはならないので、角度に対する積分は行わない

$$\langle [C] \rangle_{double}^{HV} = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

平均化Covariance matrixの展開(2)

表面散乱モデルの基本Covariance matrix

1次Bragg反射モデルを用いて

$$[S]_{surface} = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \langle C \rangle_{surface}^{HV} = \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

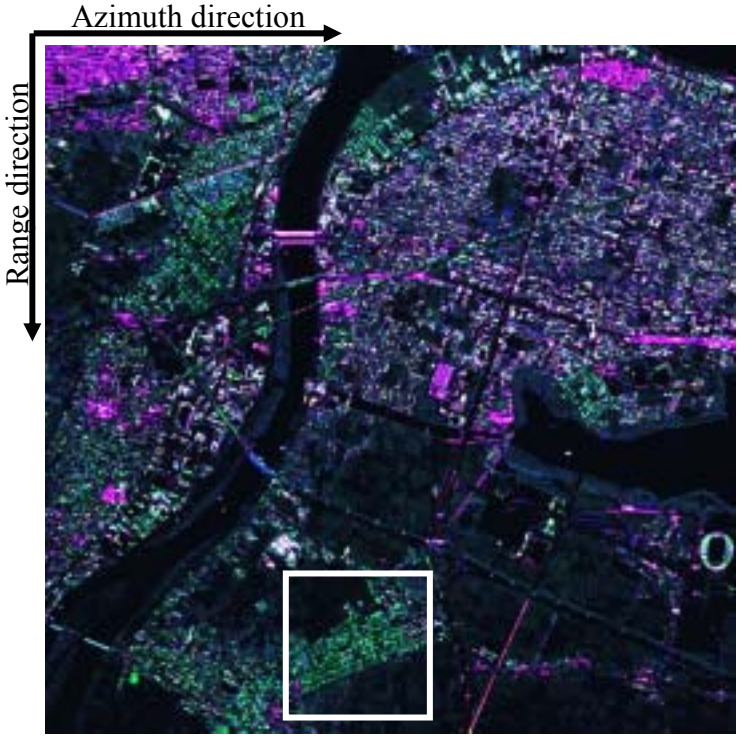
円偏波発生電力

Covariance matrixにおけるc_{12}, c_{23}の値を用いるとf_cは

$$\frac{f_c}{4} = \frac{1}{2}\left|\mathrm{Im}\left\langle S_{HV}^*\left(S_{HH} - S_{VV}\right)\right\rangle\right| = \frac{1}{2}\left|\mathrm{Im}\left\{\left\langle S_{HH}S_{HV}^*\right\rangle + \left\langle S_{HV}S_{VV}^*\right\rangle\right\}\right|$$

$$= \frac{1}{2}\left|\mathrm{Im}\left\{\left\langle c_{12}\right\rangle + \left\langle c_{23}\right\rangle\right\}\right|$$

四成分散乱モデル分解(1)



HH　HV　VV

azimuth方向に対して傾いた市街地

→ HV偏波が多く発生

↓

~~全てが体積散乱成分の寄与となり得る~~

P_s　P_d　P_v　P_cの四成分を用いた四成分散乱モデル分解を行う

四成分散乱モデル分解(2)

観測された Covariance Matrix を以下のように4つの成分に展開する

$$\langle[C]\rangle^{HV} = f_s\langle[C]\rangle^{HV}_{surface} + f_d\langle[C]\rangle^{HV}_{double} + f_v\langle[C]\rangle^{HV}_{volume} + f_c\langle[C]\rangle^{HV}_{circular}$$

$$p(\theta) = \frac{1}{2}\sin\theta$$

$$= f_s\begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_d\begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{f_v}{15}\begin{bmatrix} 8 & 0 & 2 \\ 0 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix} + \frac{f_c}{4}\begin{bmatrix} 1 & \pm j\sqrt{2} & -1 \\ \mp j\sqrt{2} & 2 & \pm j\sqrt{2} \\ -1 & \mp j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$$

f_s, f_d, f_v, f_c :表面散乱，二回反射，体積散乱の円偏波発生成分の寄与

α, β :相対要素(未定係数)

$$C_{11} \quad \langle|S_{HH}|^2\rangle = f_s|\beta|^2 + f_d|\alpha|^2 + \frac{8}{15}f_v + \frac{f_c}{4}$$

$$C_{22} \quad \langle|S_{HV}|^2\rangle = \frac{2}{15}f_v + \frac{f_c}{4}$$

$$C_{33} \quad \langle|S_{VV}|^2\rangle = f_s + f_d + \frac{3}{15}f_v + \frac{f_c}{4}$$

$$C_{13} \quad \langle S_{HH}S_{VV}^*\rangle = f_s\beta + f_d\alpha + \frac{2}{15}f_v - \frac{f_c}{4}$$

$$C_{12}, C_{21} \quad \frac{f_c}{4} = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\{\langle S_{HH}S_{HV}^*\rangle + \langle S_{HV}S_{VV}^*\rangle\}$$

$\mathrm{Re}(S_{HH}S_{VV}^*) < 0$
$\beta = 1$

$\mathrm{Re}(S_{HH}S_{VV}^*) > 0$
$\alpha = -1$

各成分による散乱電力

$$P_s = f_s(1+|\beta|^2)$$

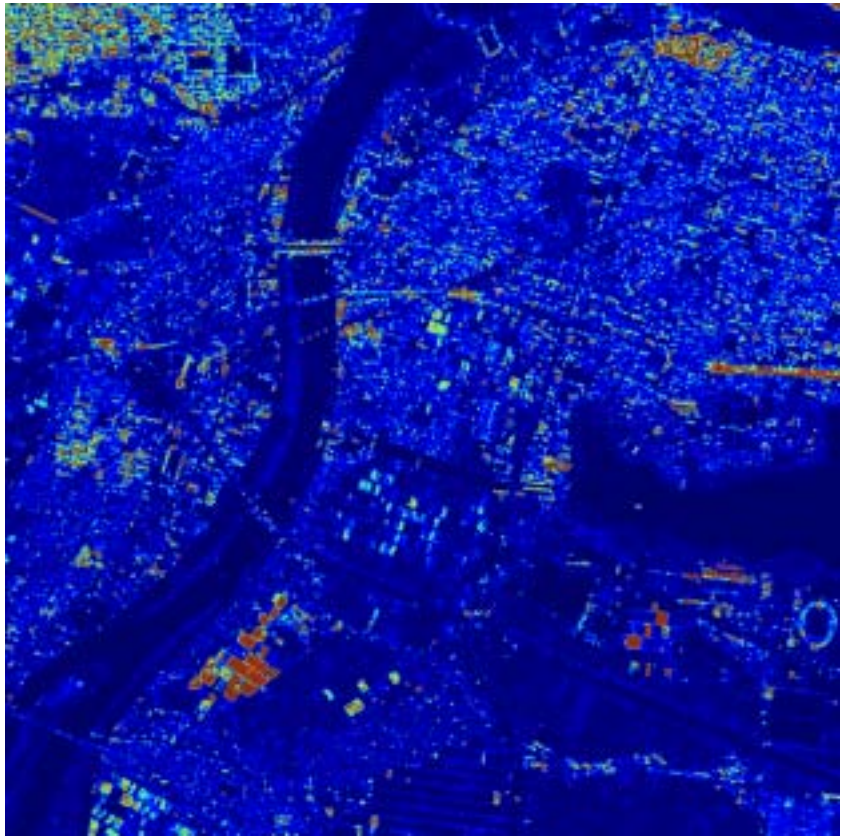
$$P_d = f_d(1+|\alpha|^2)$$

$$P_v = f_v$$

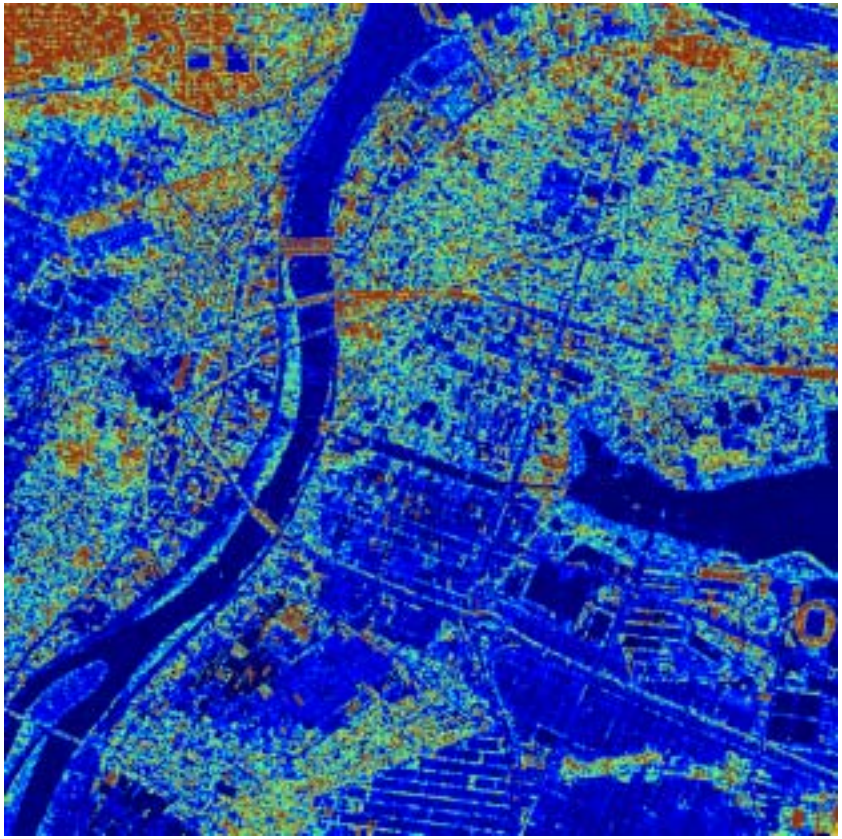
$$P_c = f_c$$

4. 解析結果

解析結果(鳥屋野潟周辺)



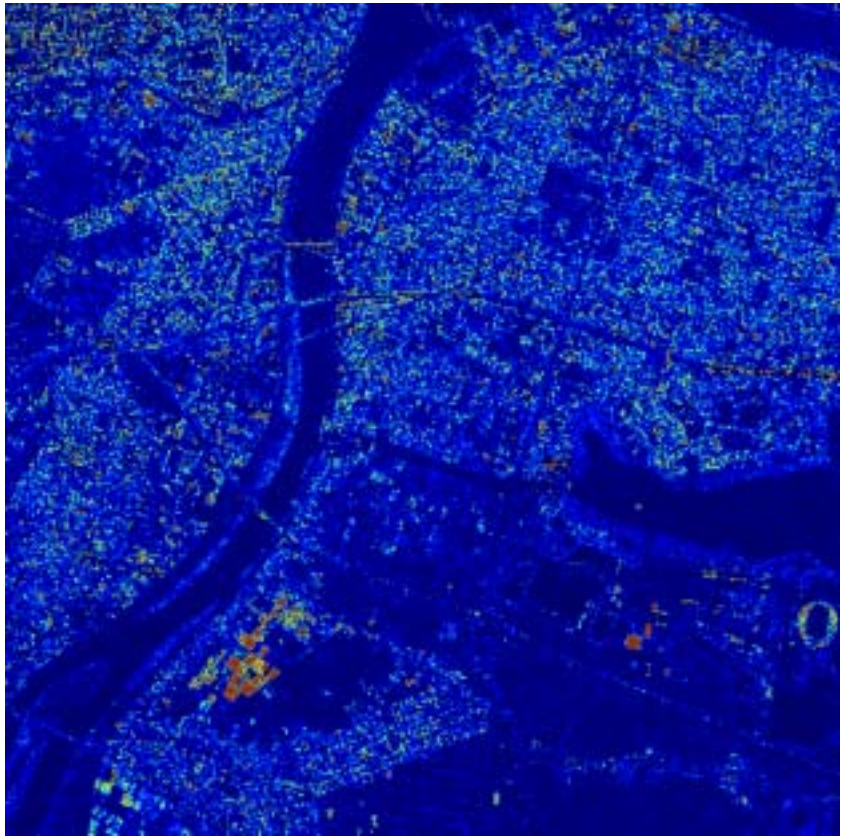
P_s



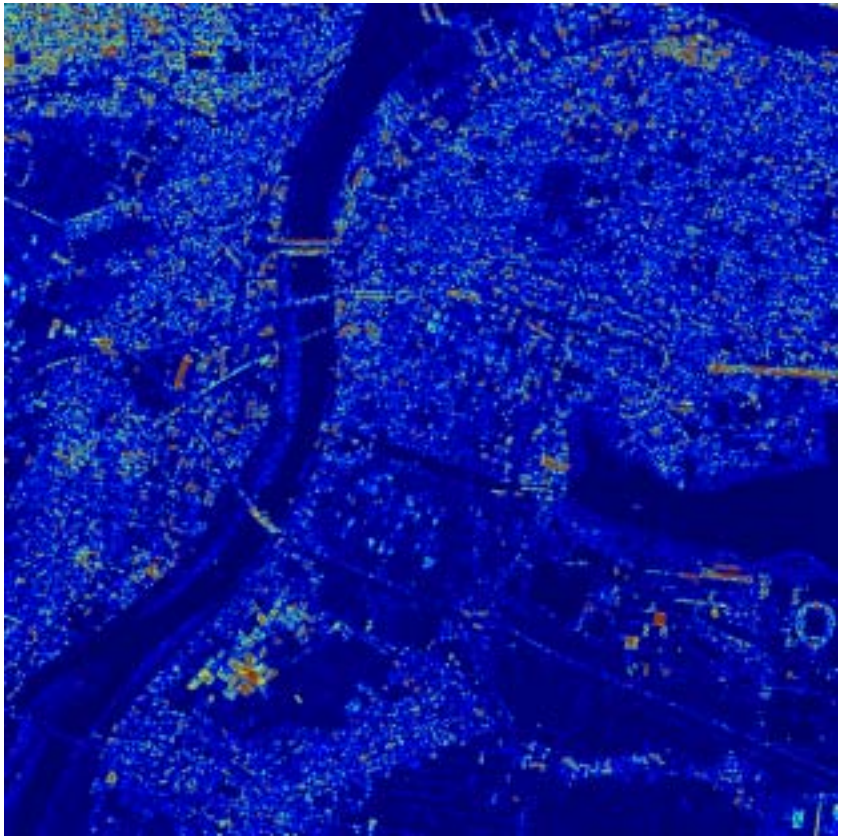
P_d

四成分散乱モデル分解

解析結果(鳥屋野潟周辺)



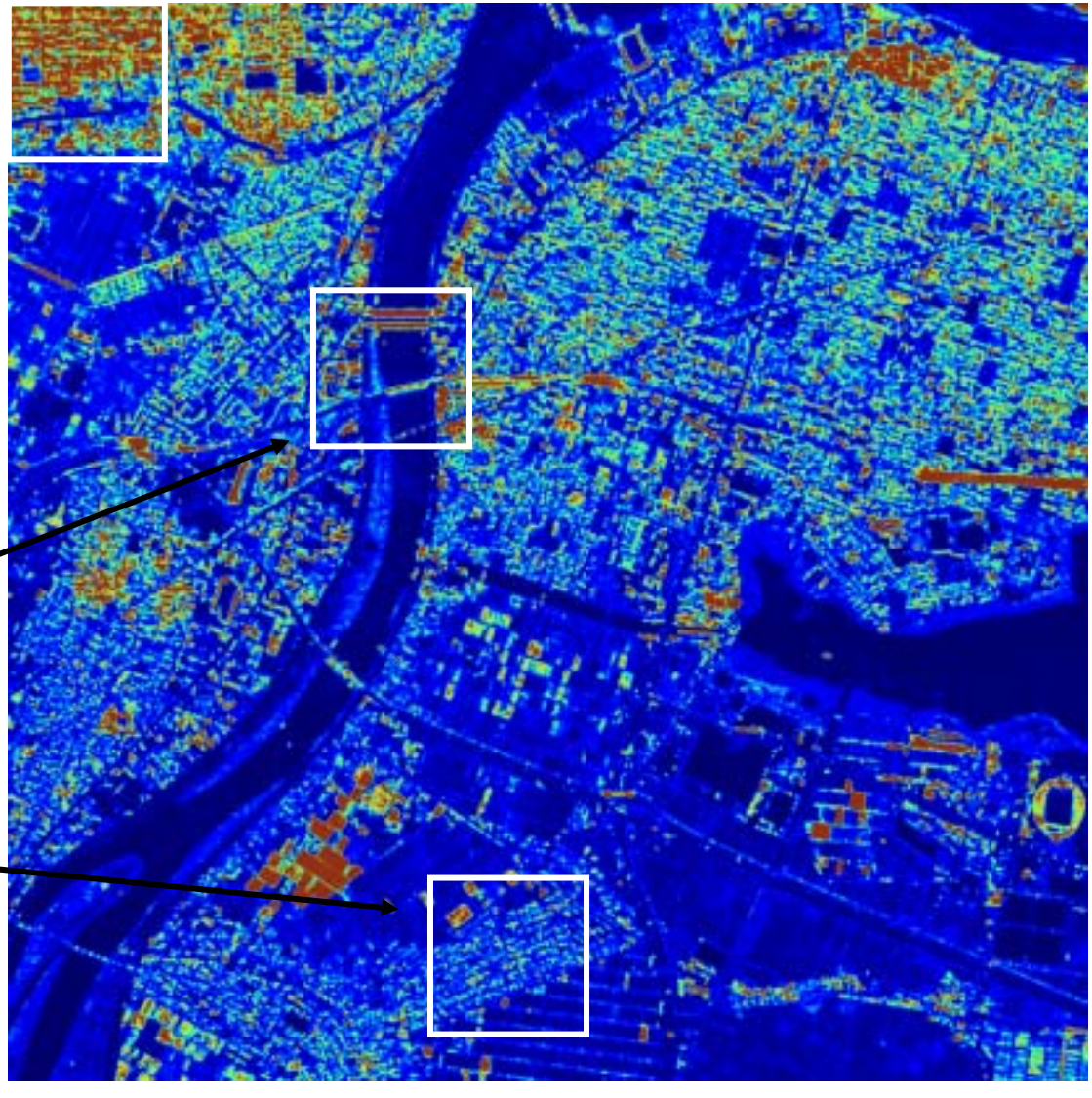
P_v



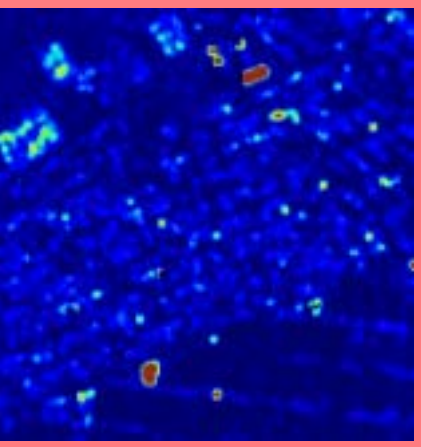
P_c

四成分散乱モデル分解

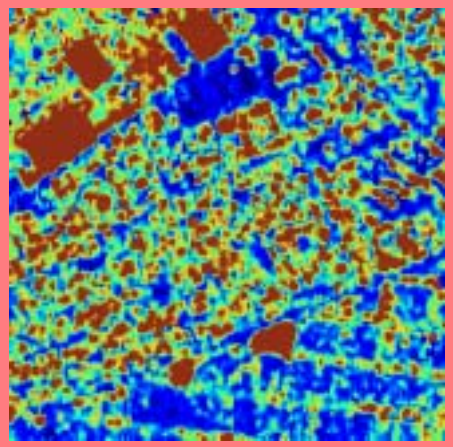
解析領域の説明



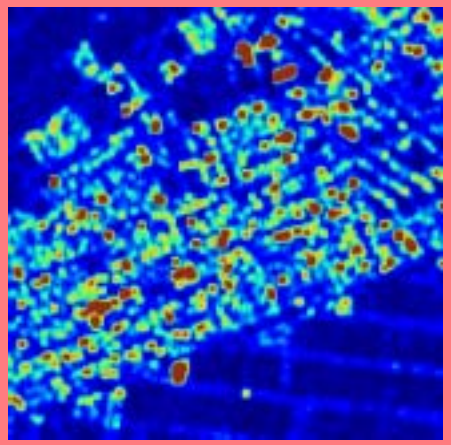
解析結果 (patch 1)



P_s



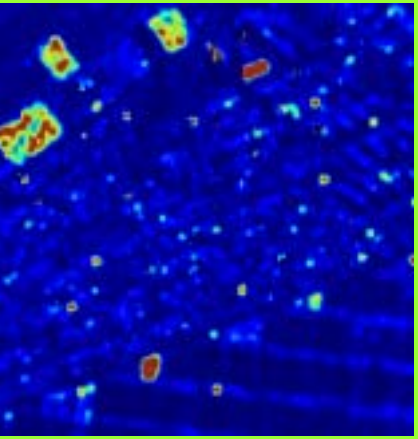
P_d



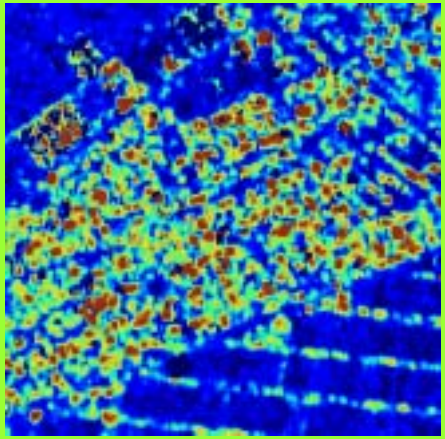
P_v

三成分散乱モデル分解

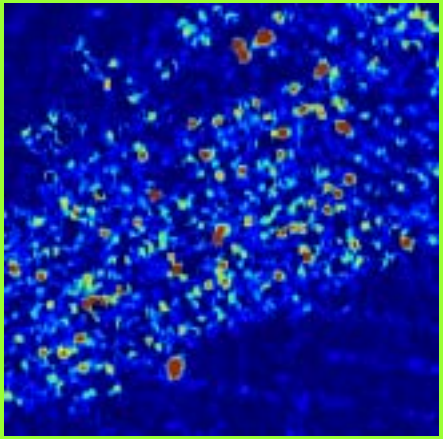
Ground truth



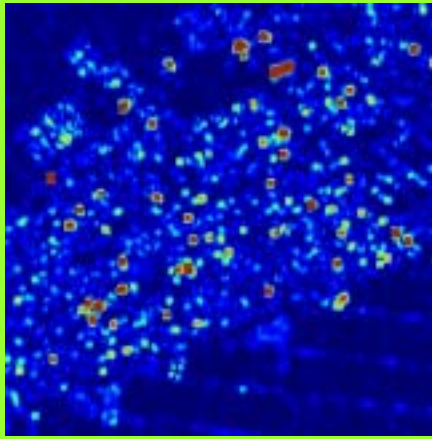
P_s



P_d



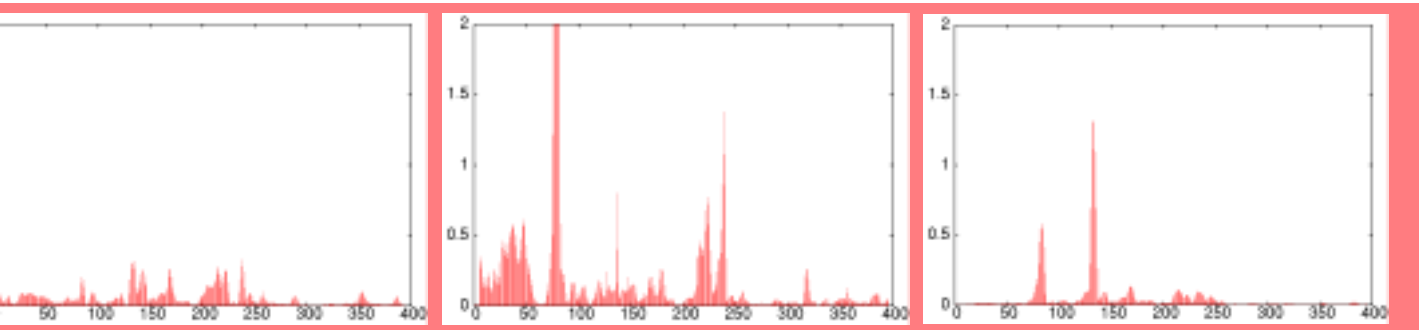
P_v



P_c

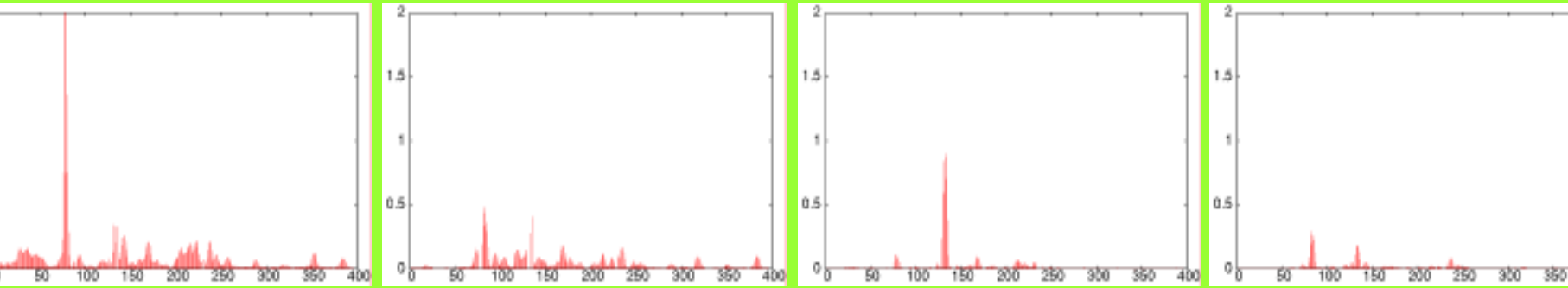
四成分散乱モデル分解

patch 1



P_s P_d P_v

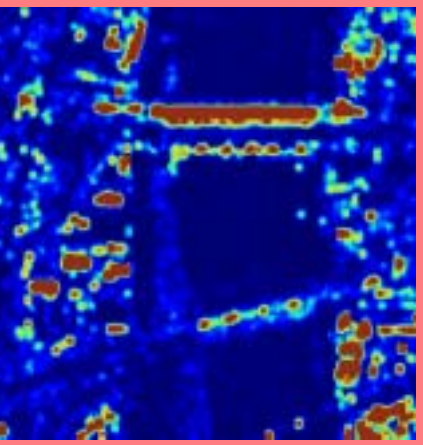
三成分散乱モデル分解



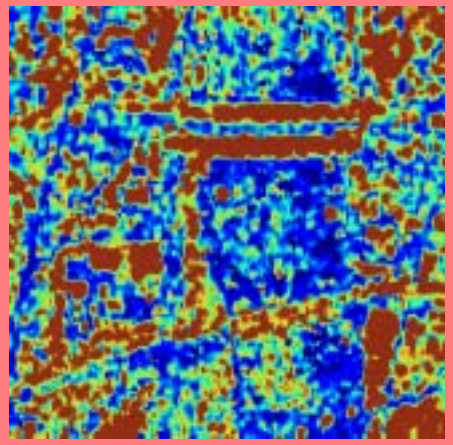
P_s P_d P_v P_c

四成分散乱モデル分解

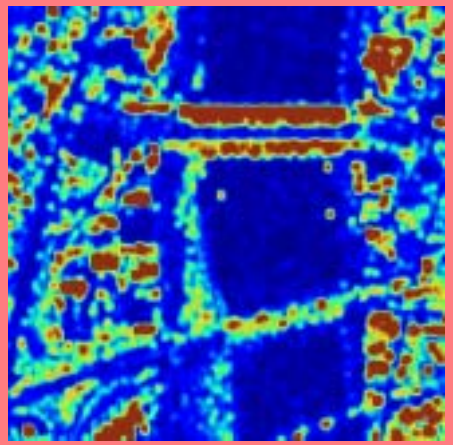
解析結果 (patch 2)



P_s



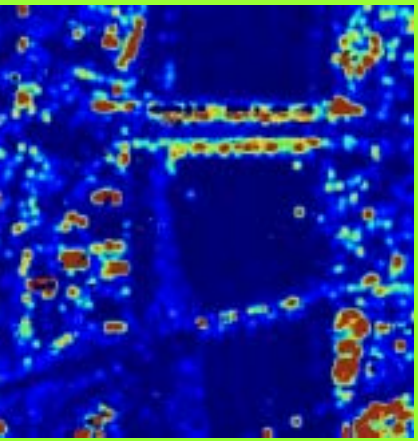
P_d



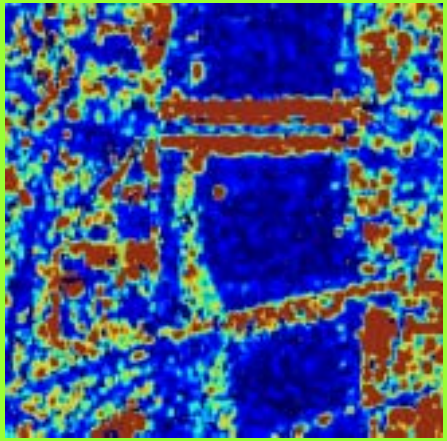
P_v

三成分散乱モデル分解

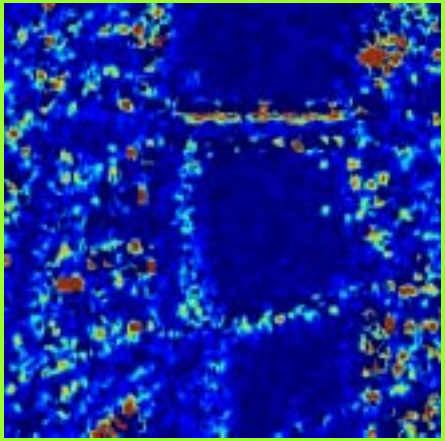
Ground truth



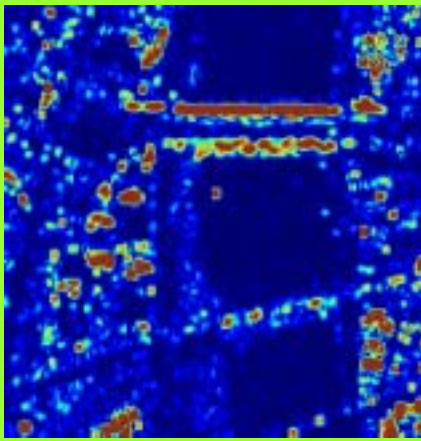
P_s



P_d



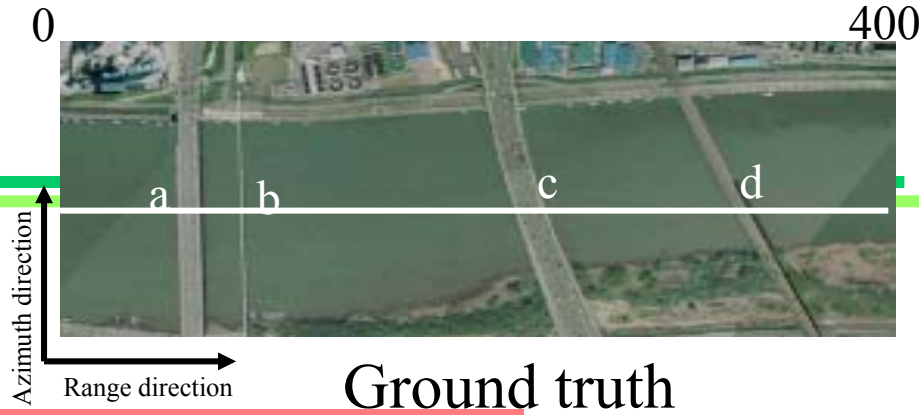
P_v



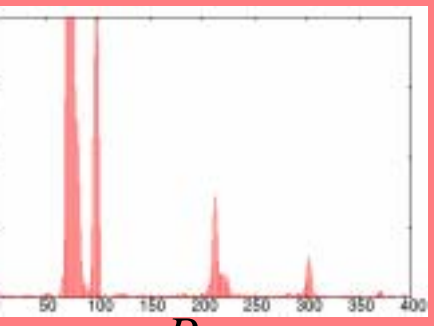
P_c

四成分散乱モデル分解

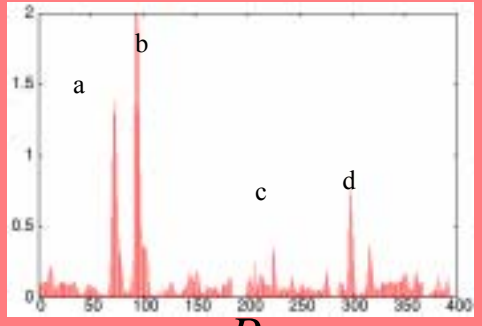
patch 2



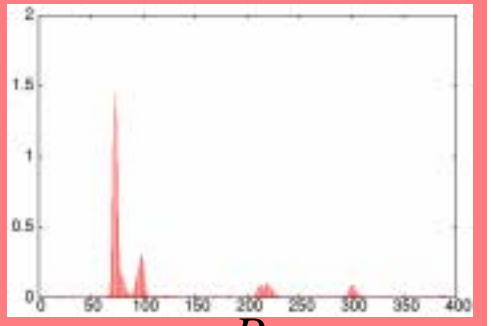
Ground truth



P_s



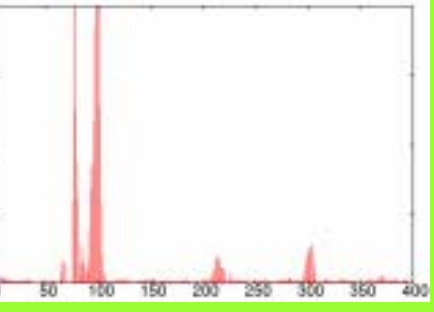
P_d



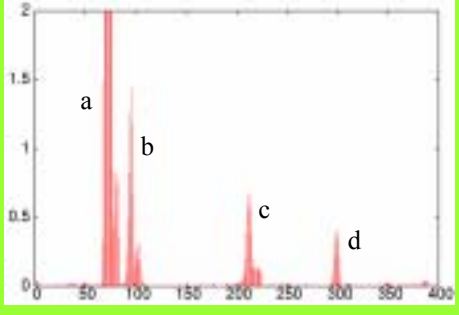
P_v

三成分散乱モデル分解

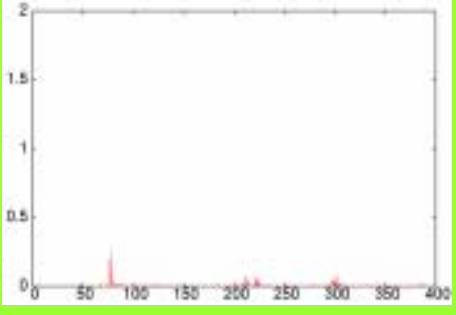
a：平成大橋
b：水道橋
c：新潟バイパス
d：新幹線高架橋



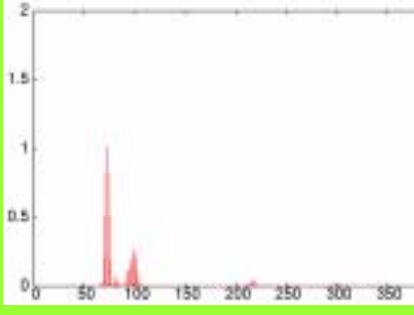
P_s



P_d



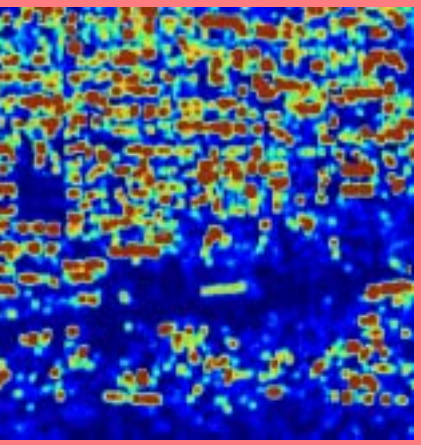
P_v



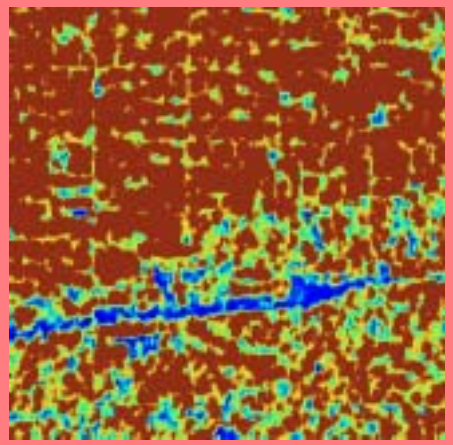
P_c

四成分散乱モデル分解

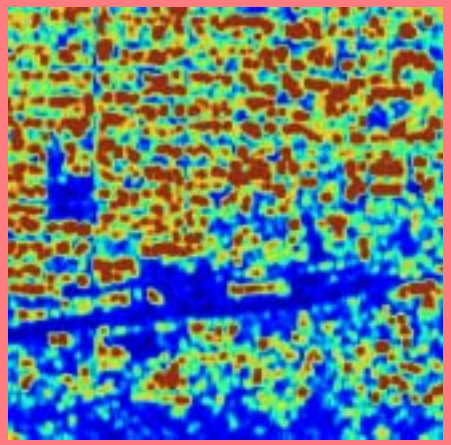
解析結果 (patch 3)



P_s



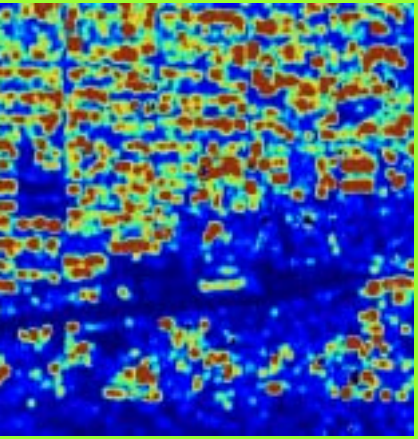
P_d



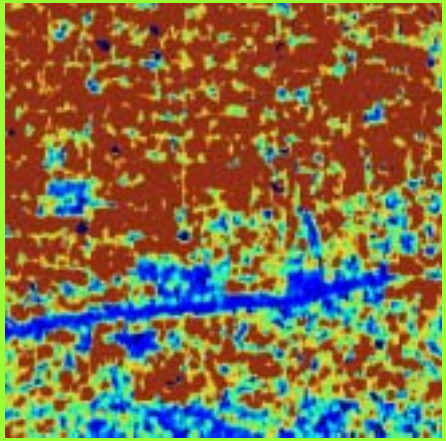
P_v

三成分散乱モデル分解

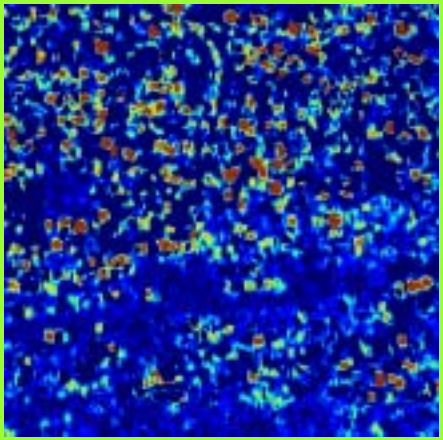
Ground truth



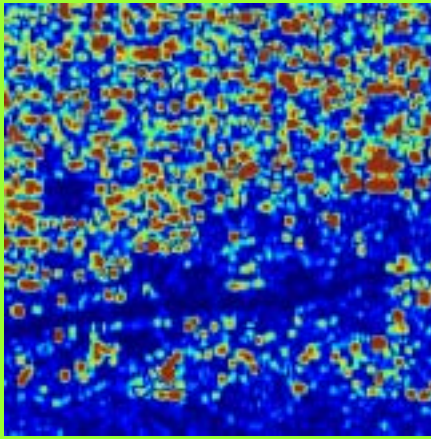
P_s



P_d



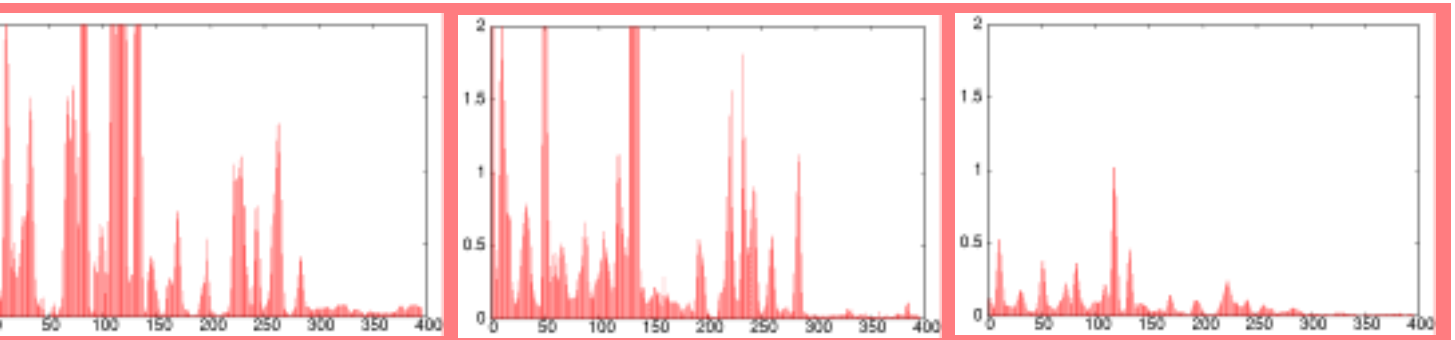
P_v



P_c

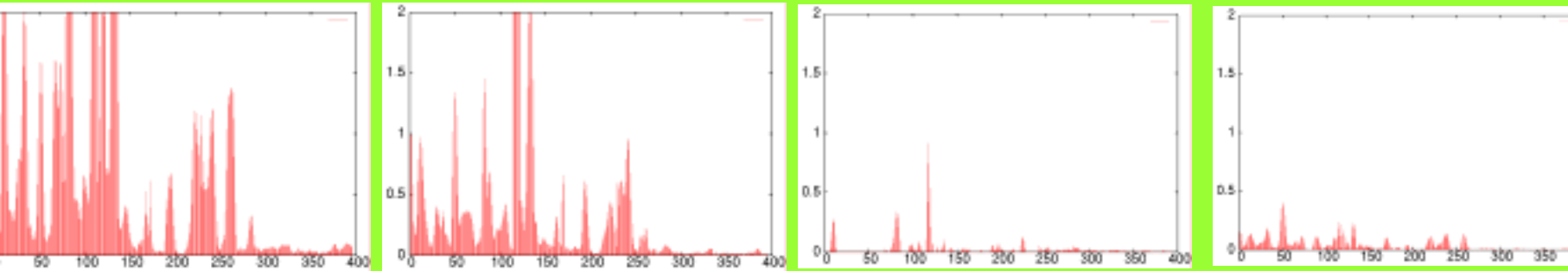
四成分散乱モデル分解

patch 3



P_s P_d P_v

三成分散乱モデル分解



P_s P_d P_v P_c

四成分散乱モデル分解

市街地モデルのまとめ

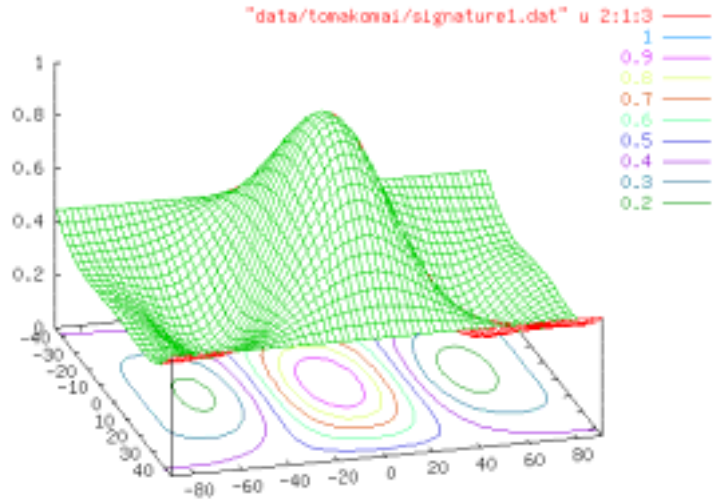
- 四成分散乱モデル分解ではアジマス方向に平行な市街地であるほど、二回反射成分が強くなる
- アジマス方向に対して平行な市街地で発生していた体積散乱成分を軽減し、円偏波発生成分への寄与に分散

↓

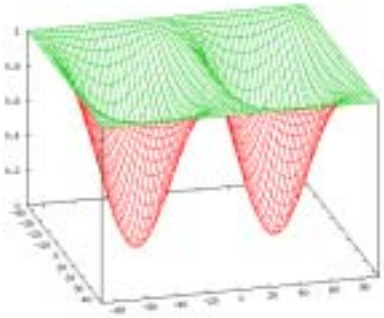
三成分散乱モデル分解よりも物理現象に近いことを確認

解析領域の説明

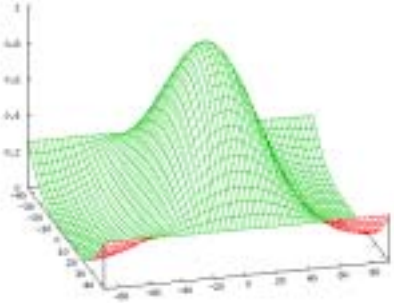
解析領域



偏波シグネチャの変化の様子



Diplane

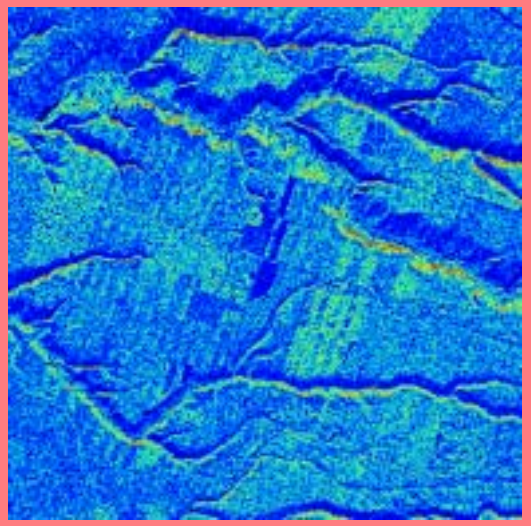


Horizontal wire

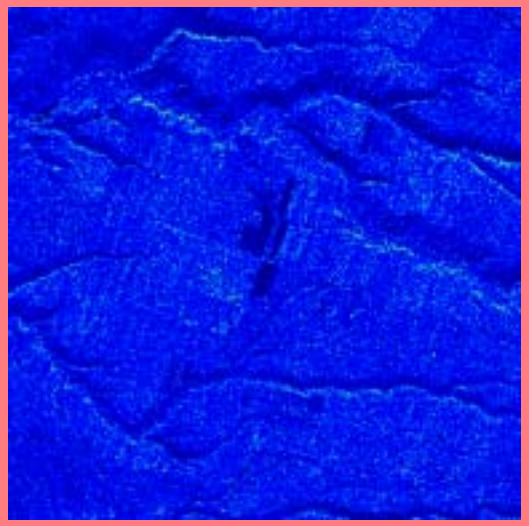
7.5mおきに偏波シグネチャを作成

解析結果(苫小牧)

三成分散乱
モデル分解

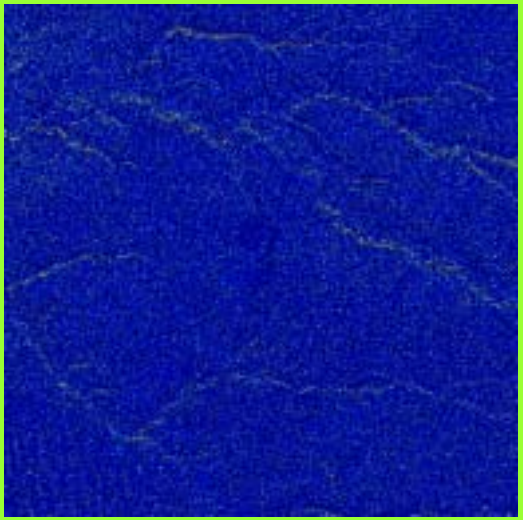


P_s

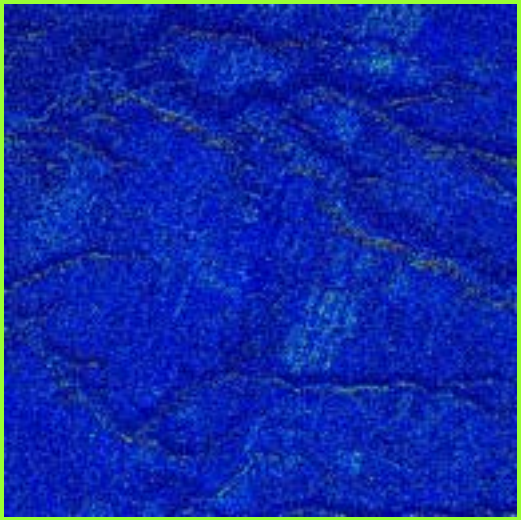


P_d

四成分散乱
モデル分解



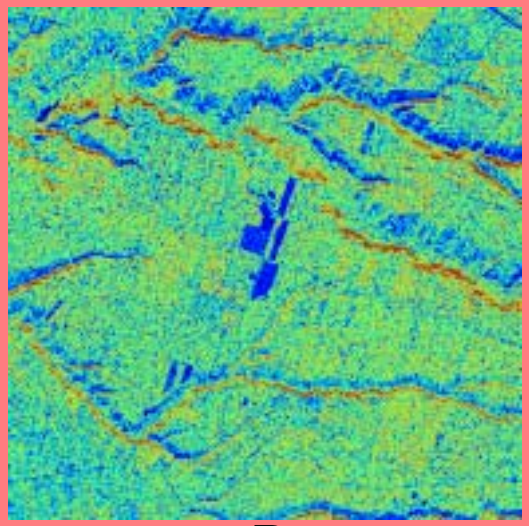
P



P_c

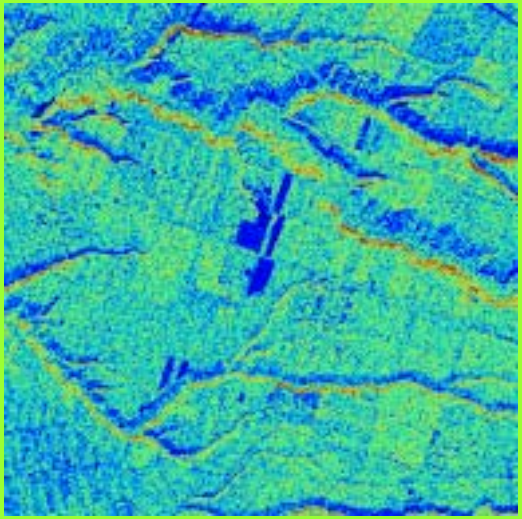
解析結果(苫小牧)

三成分散乱
モデル分解

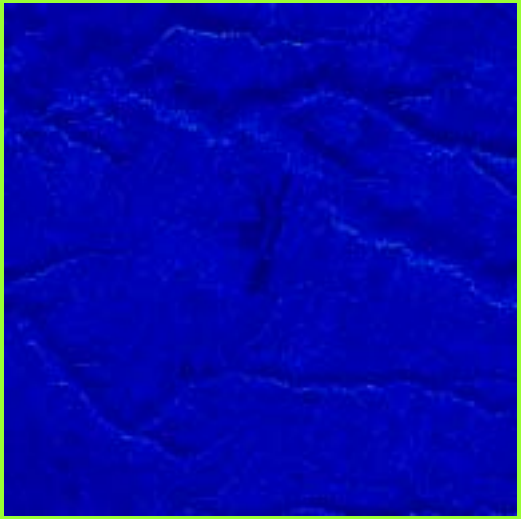


P_v

四成分散乱
モデル分解

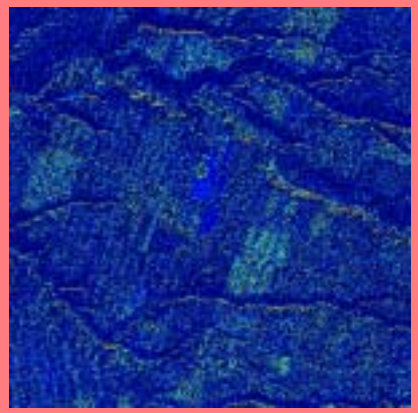


P



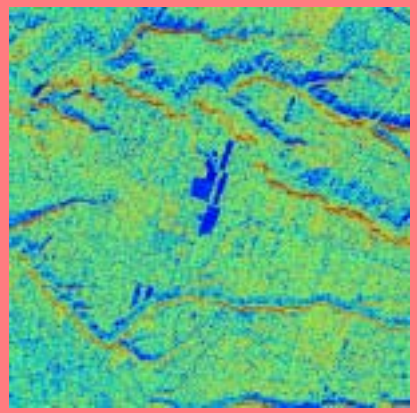
P

解析結果(苫小牧)



P_s

P_d



P_v

$$\left\langle |S_{HH}|^2 \right\rangle = f_s|\beta|^2 + f_d|\alpha|^2 + f_v$$

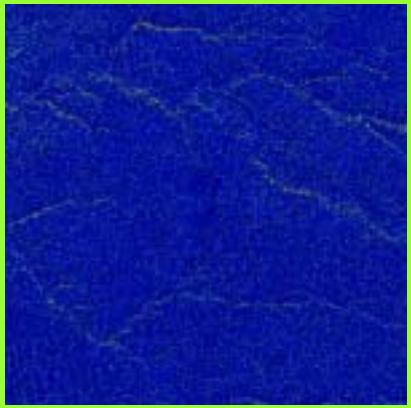
$$\left\langle |S_{HV}|^2 \right\rangle = f_v/3$$

$$\left\langle |S_{VV}|^2 \right\rangle = f_s + f_d + f_v$$

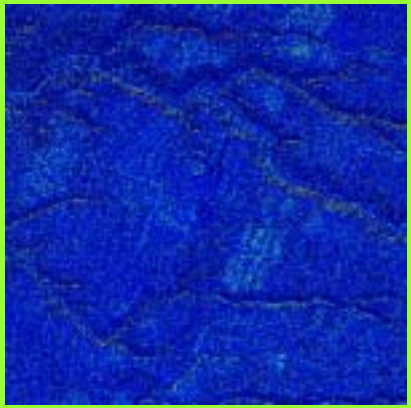
$$\left\langle S_{HH}S_{VV}^* \right\rangle = f_s\beta + f_d\alpha + f_v/3$$

$$\left\langle S_{HH}S_{HV}^* \right\rangle \approx \left\langle S_{HV}S_{VV}^* \right\rangle \approx 0$$

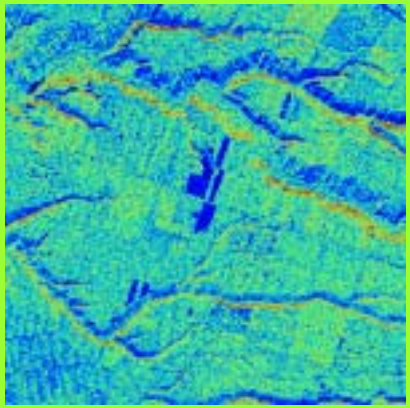
三成分散乱モデル分解(fvを除去しないもの)



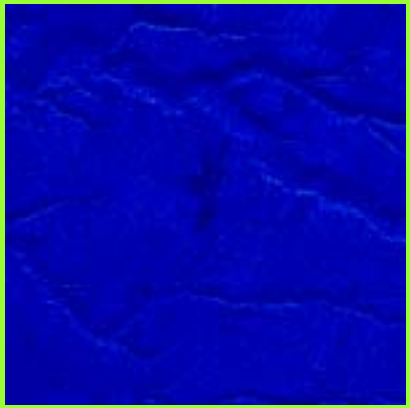
P_s



P_d



P_v



P_c

四成分散乱モデル分解

5. まとめ

まとめ

三成分散乱モデル分解の物理的な矛盾点を解消した四成分散乱モデル分解を提案

矛盾点 自然ターゲットで必ずしも $\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle = 0$ が成立しない

三成分散乱モデル分解と四成分散乱モデル分解を単純な領域で比較

市街地領域と植生領域を選択

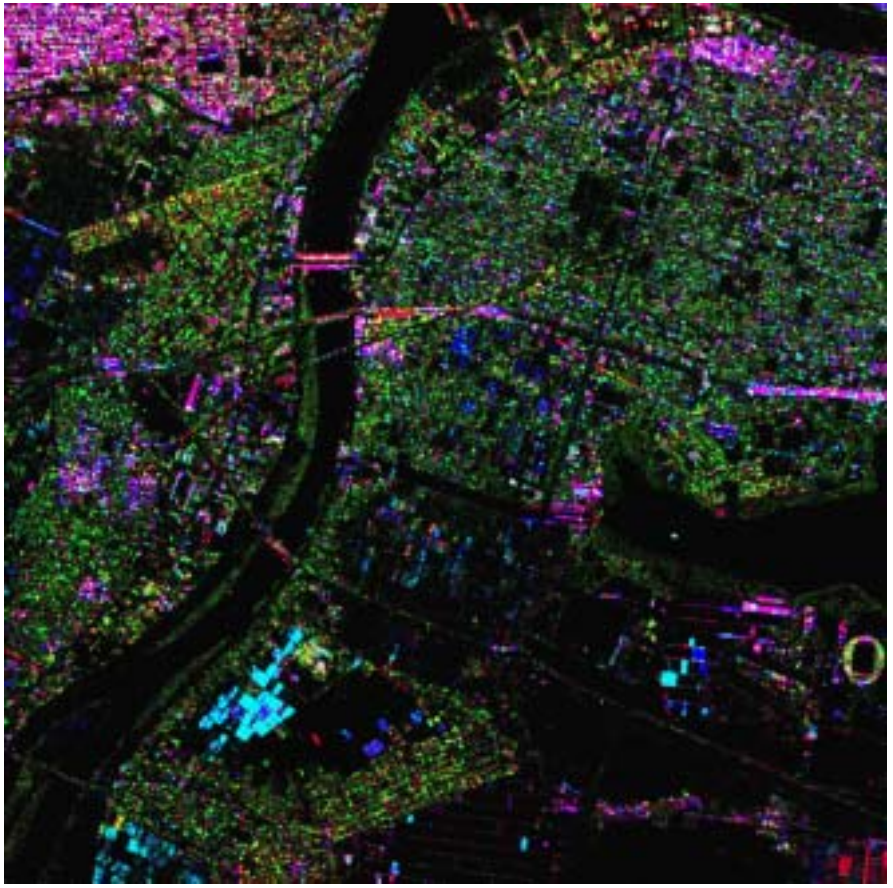
→ 三成分散乱モデル分解の時に生じた、二回反射成分における水域の不要な電力が除去された

→ 人工ターゲットではアジマスに対するターゲットの傾きによって二回反射受信電力が変化する

→ 樹幹や沢の部分において二回反射成分と想定できる箇所が微量ではあるが検出された

補足資料(コンポジット画像)

三成分散乱モデル分解



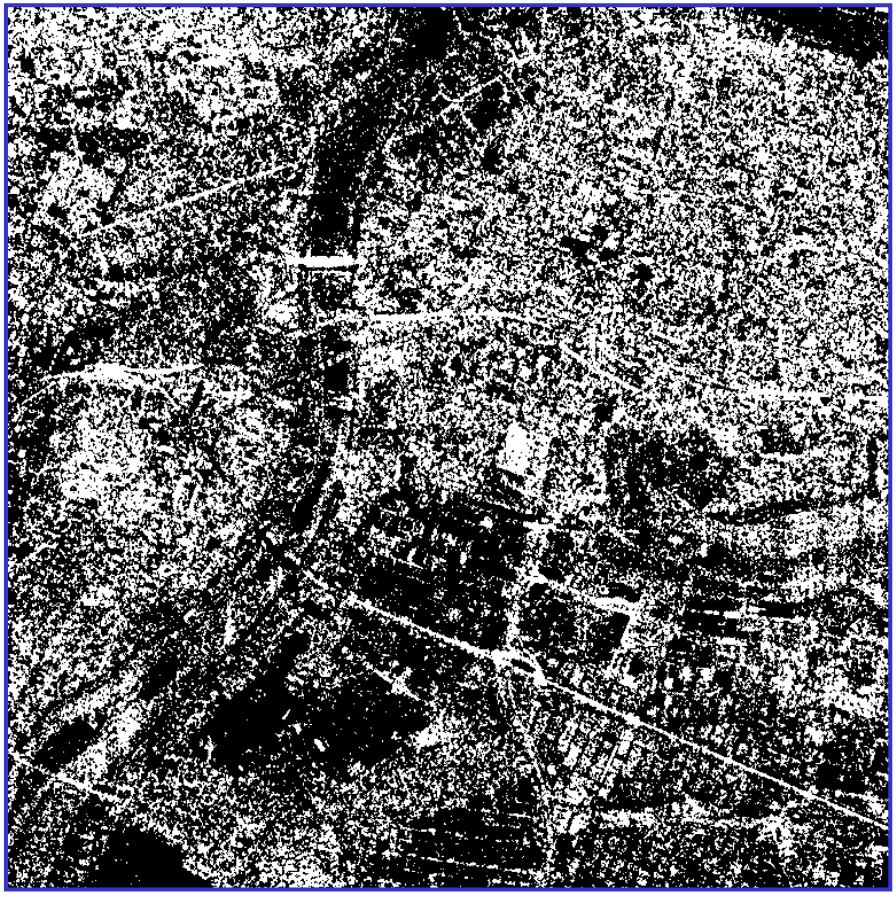
四成分散乱モデル分解

Pd Pv Ps

補足資料(α, βの分布 1)

α

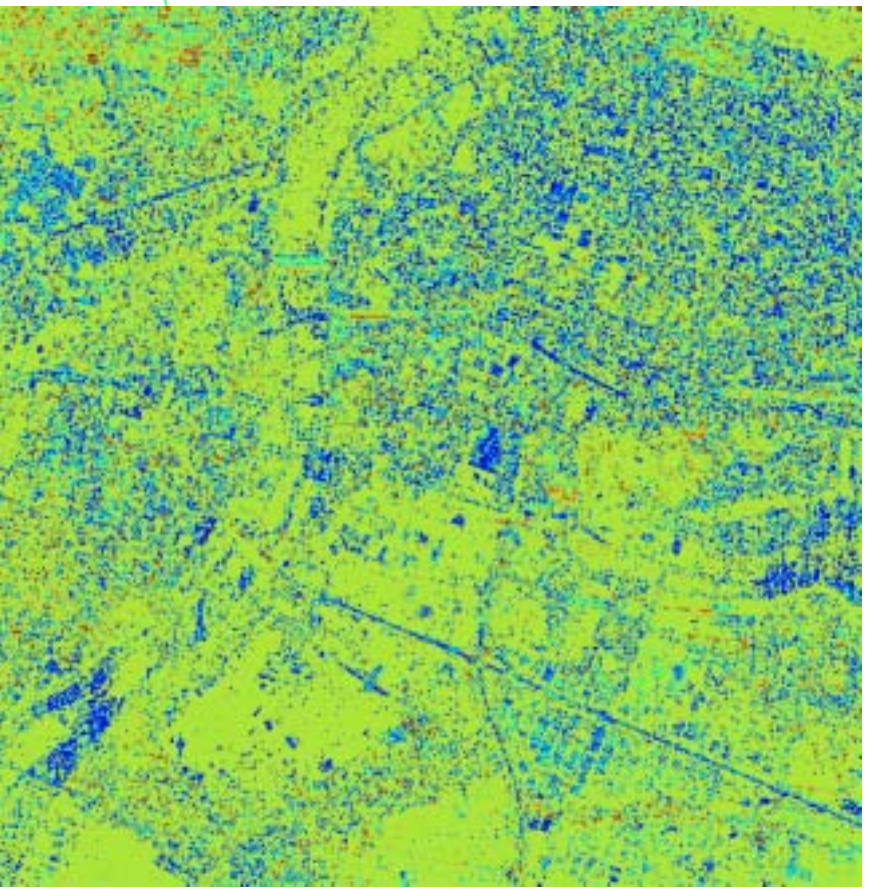
(白がα=-1の部分)



β

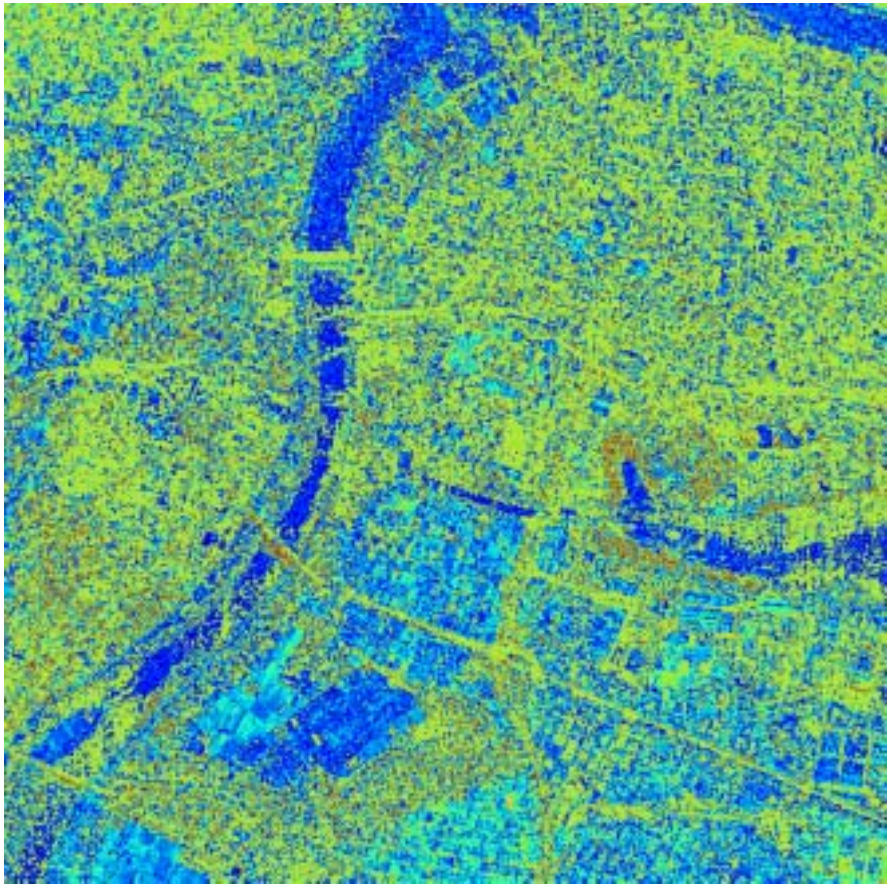
(白がβ=1の部分)

補足資料(α, βの分布 2)



α

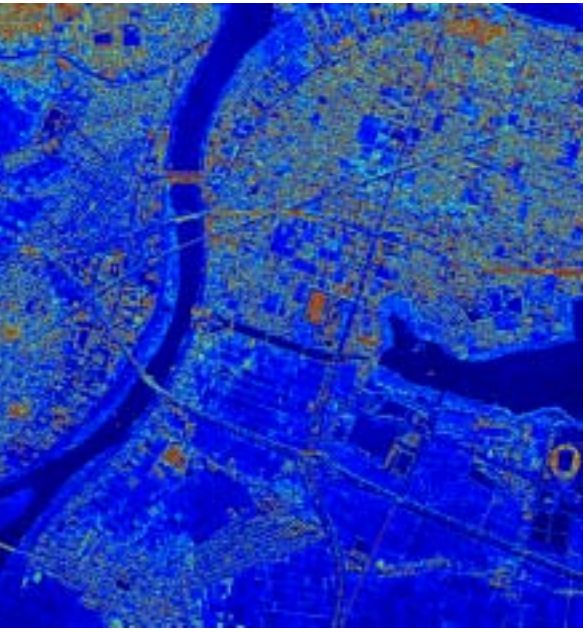
(緑がα=-1の部分)



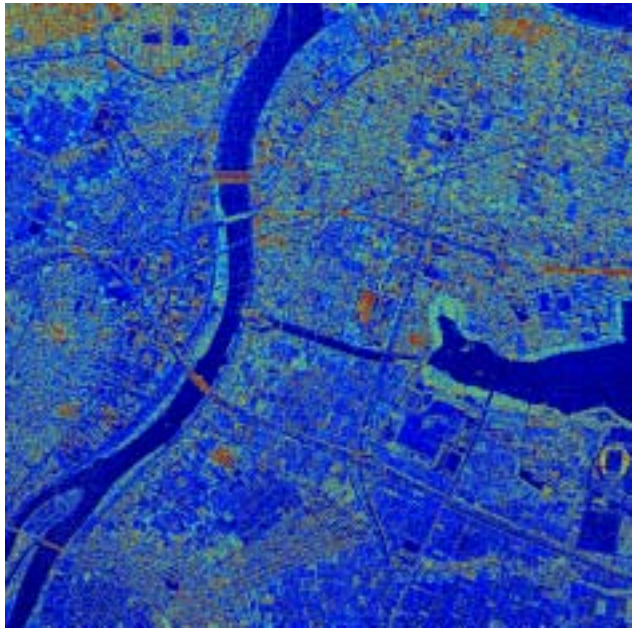
β

(緑がβ=1の部分)

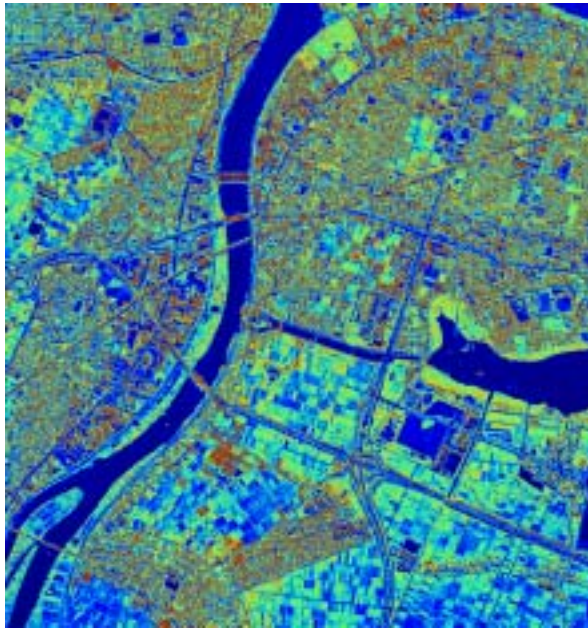
補足資料(X-band,三成分)



P_s

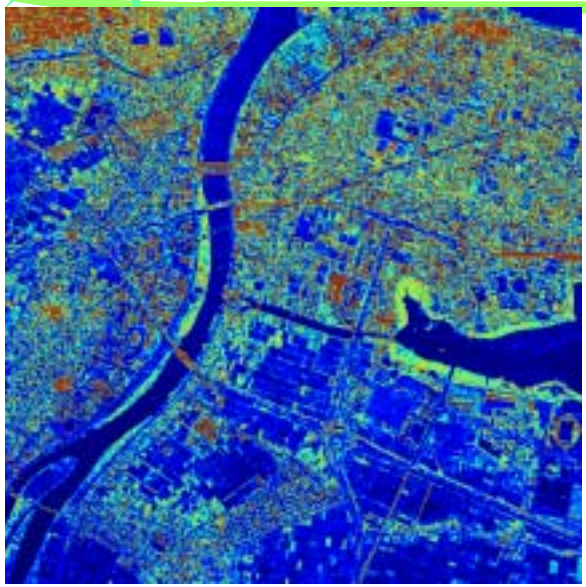


P_d

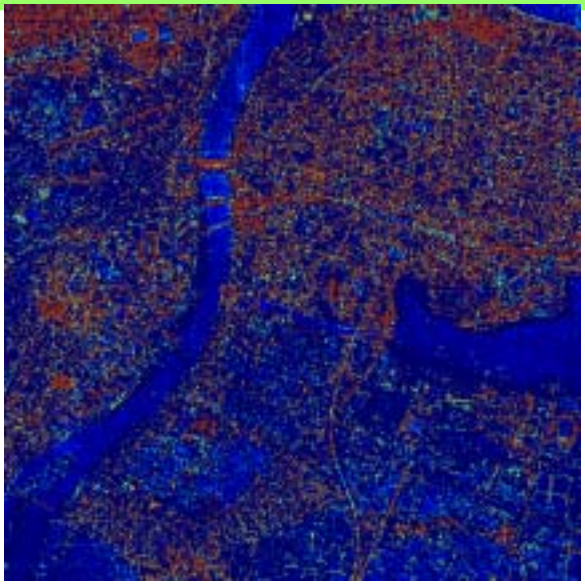


P_v

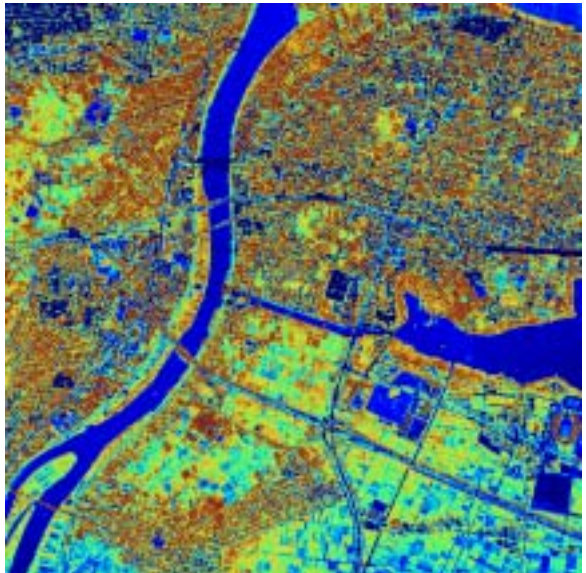
補足資料(X-band, 四成分)



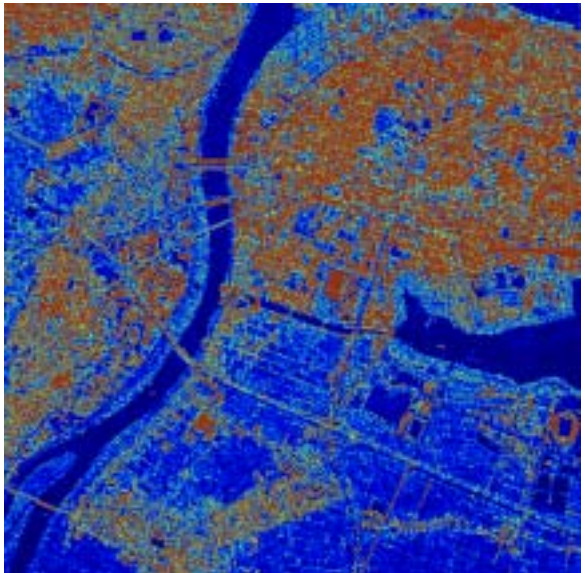
P_s



P_d



P_v



P_c