

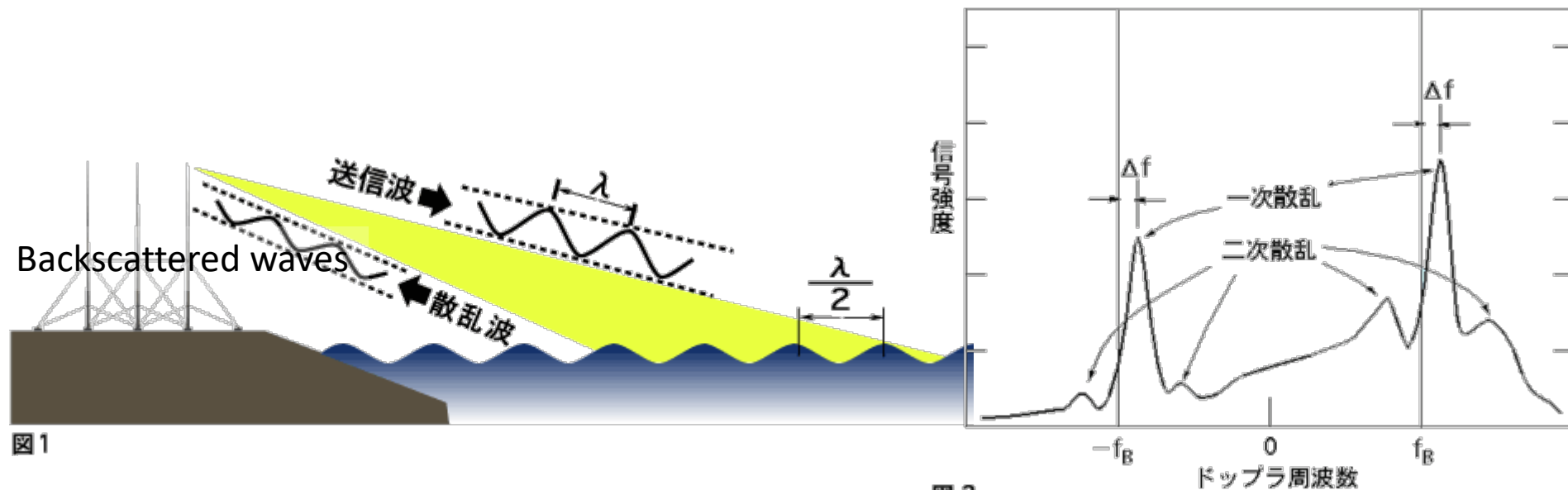
パッシブレーダ技術を用いた 海洋表層流速場計測に関する検討

灘井章嗣

(情報通信研究機構 沖縄電磁波技術センター)

海洋レーダ

- 海面に向かいレーダ波(HF or VHF)を送信
- 海面で後方散乱されたレーダ波を受信
- 海面からの後方散乱にはBragg共鳴機構が重要
Bragg共鳴条件により、散乱に寄与する海面波成分の波長、伝搬方向が決まる → 一次散乱エコー
- 視線方向流速は、一次散乱エコーが示すDoppler速度と海面波成分の波長から理論的に求められる位相速度の差



海洋レーダによる海面流速ベクトル計測

- 海洋レーダは流速ベクトルのある方向（視線方向）成分を計測する
- 独立ではない2つ（以上）の流速方向成分が得られれば、流速ベクトルを計測できる
- 2流速方向成分を用いた流速ベクトル合成の精度は使用する流速計測方向の交差角に依存する

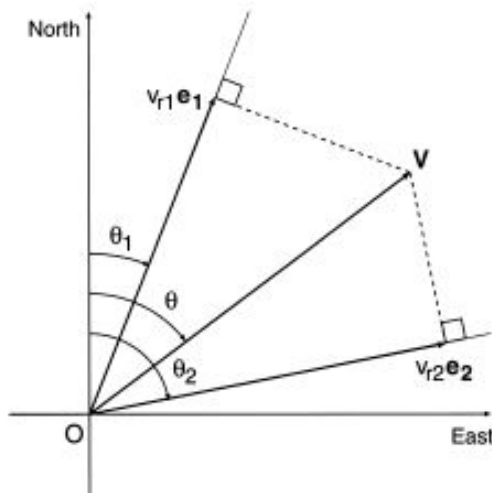


Fig. 1. Vectorization of the radial current velocities.

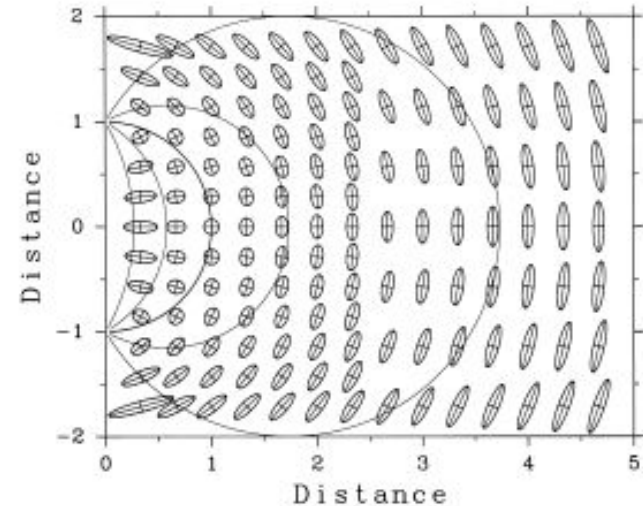
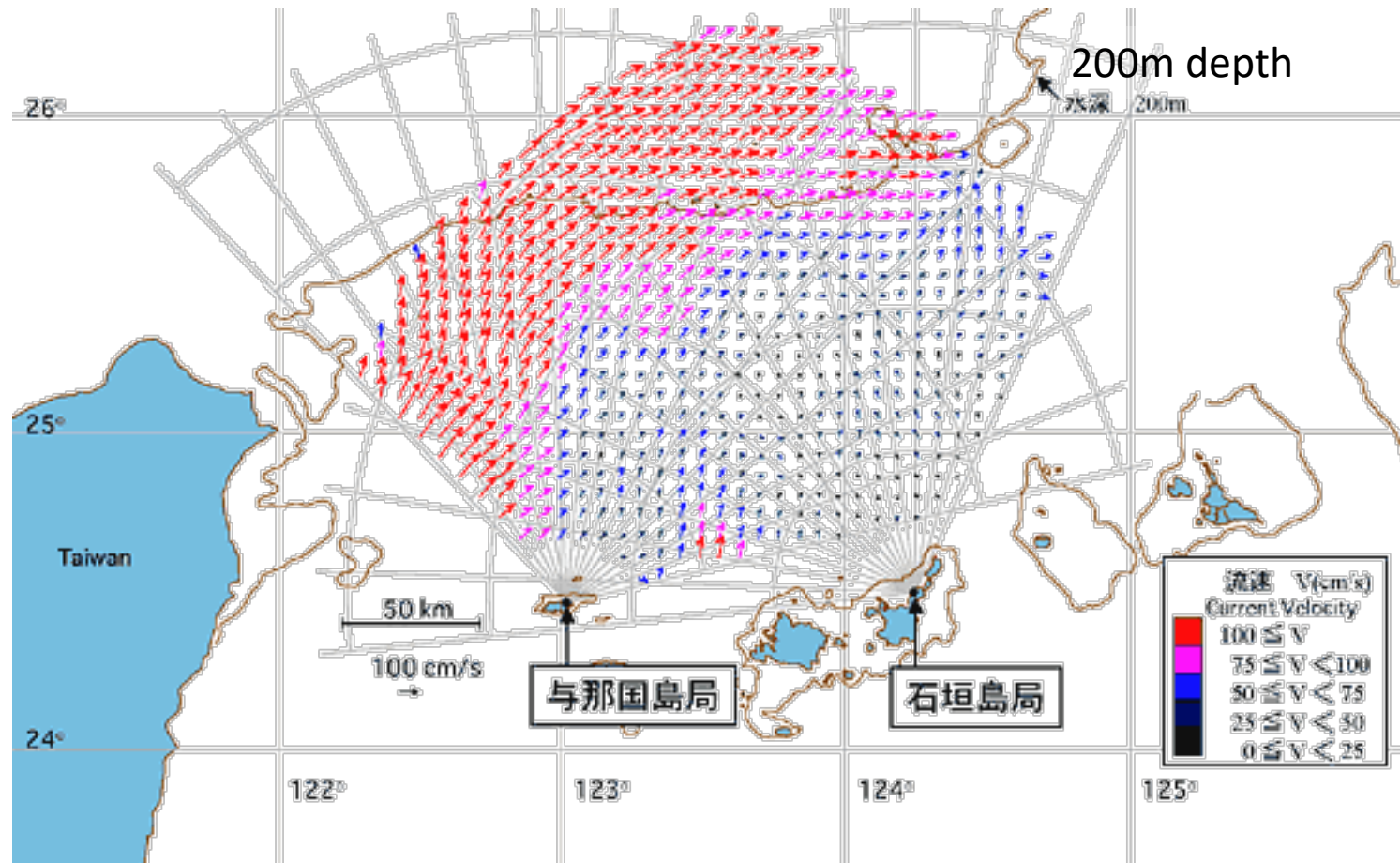


Fig. 3. Spatial change of error ellipse of current vector measurement with contour of the azimuthal difference between the radar beams. Two radars are located at $(0, \pm 1)$. Distance of 0.05 corresponds to velocity of σ_r . Contour interval is 30 deg (thick line: 90 deg).

海洋レーダを用いた流速ベクトル計測の例

- 長距離海洋レーダ(NICT)で観測した八重山諸島近くの黒潮

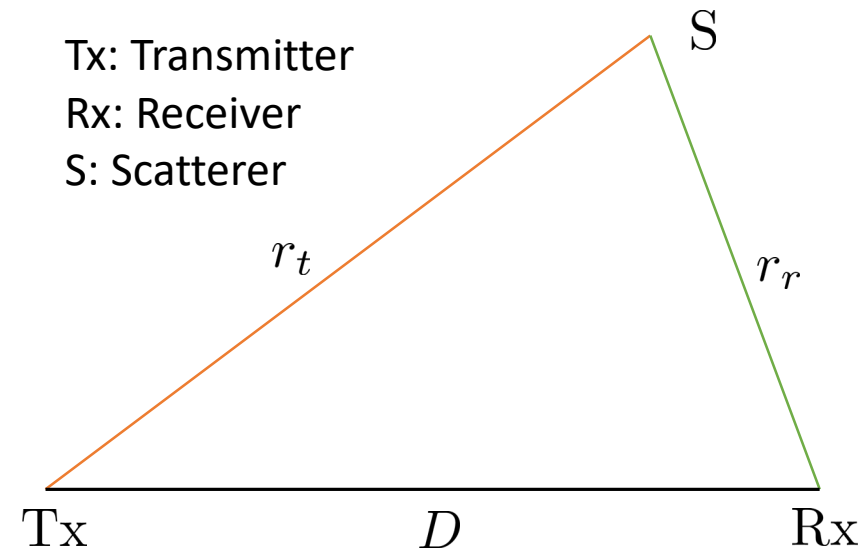
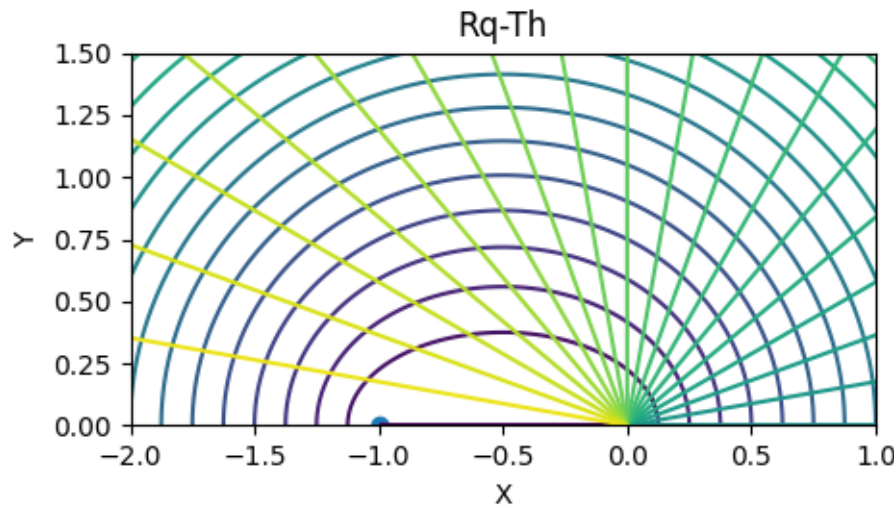


海洋レーダの課題

- 他の無線局（海洋レーダを含む）による干渉
 - 短波通信が長距離通信手段として長年使われているように、この周波数帯の電波は遠方まで伝搬する
 - 海洋レーダの場合でも、海面で後方散乱されるのは送信エネルギーのごく一部だけ
 - 干渉を起こす可能性が極めて広い範囲に及ぶ
- 2台のレーダを結ぶ線に近い領域（ほとんどの場合、沿岸域に対応）で流速ベクトル計測精度が悪い
 - レーダ設置間隔を短くすることで沿岸の計測領域を増大できるが、レーダ同士の相互干渉の可能性も増大する
- 他の送信源からの電波を利用するパッシブレーダを用いることで、干渉の可能性を抑えながら観測領域を拡大させることはできないか

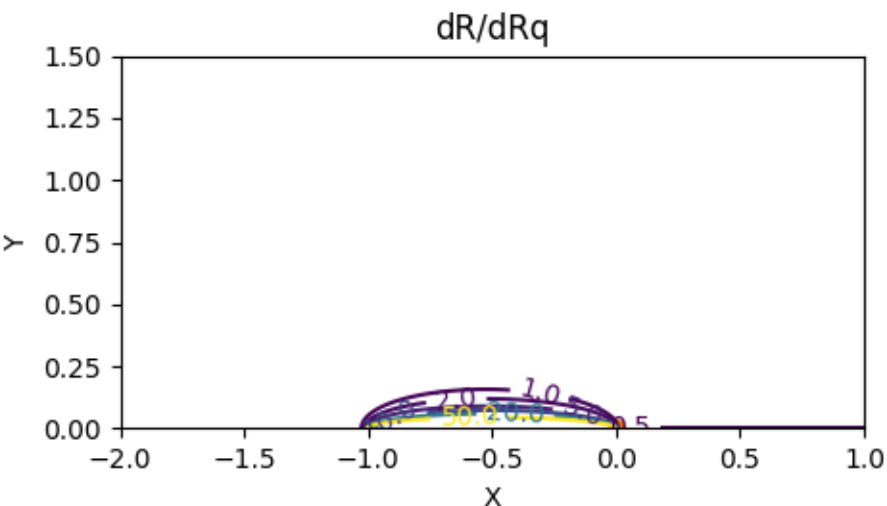
パッシブレーダ: 距離計測

- 通常のアクティブレーダは、自身が送信した電波がターゲットで後方散乱されたものを受信
- 送信から受信までの遅延時間から距離を計測
- パッシブレーダは、外部送信源からの電波がターゲットで散乱されたものを受信
- 送信源から直達する電波を基準として、ターゲットで散乱された電波の相対伝搬時間から疑似距離を計測
- 疑似距離 $R_q = r_t + r_r - D$

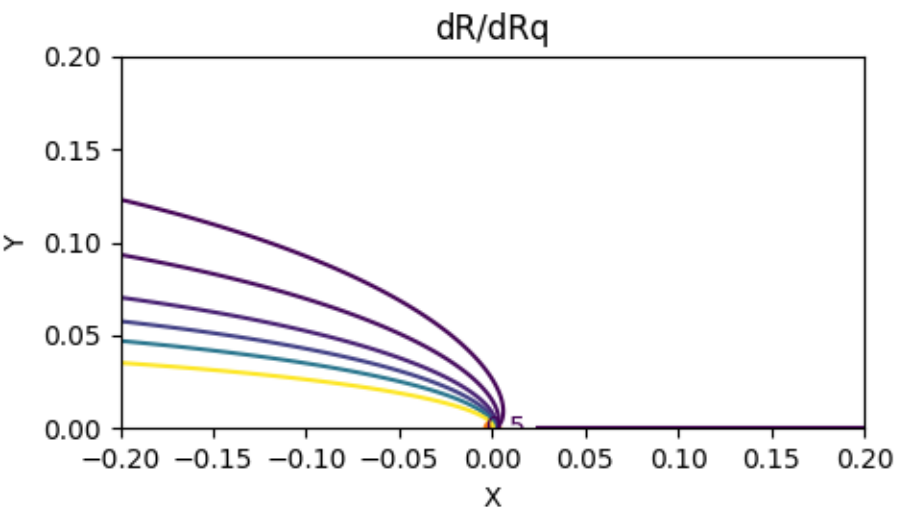


パッシブレーダ: 距離分解能

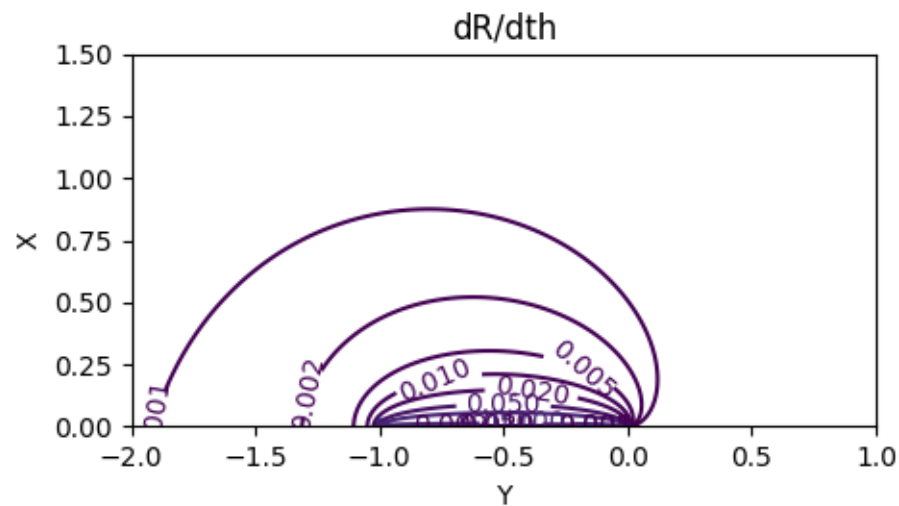
疑似距離変化に対する距離変化



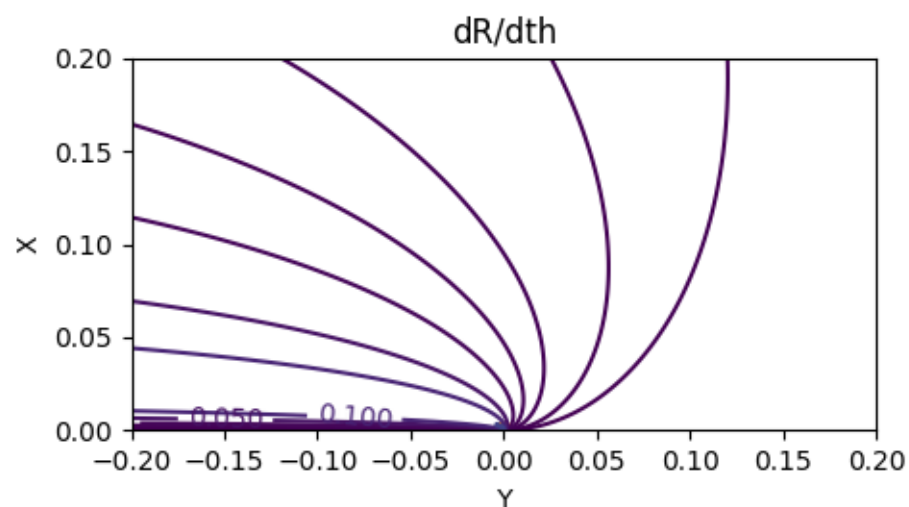
受信局周辺



方位変化に対する距離変化



受信局周辺



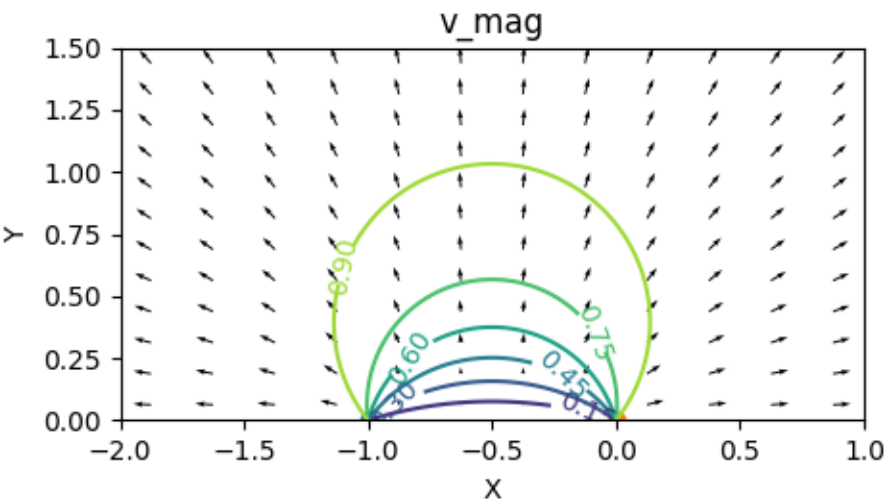
- パッシブレーダで計測されるDoppler速度は、経路長の時間変化に対応

T_x : Transmitter
 R_x : Receiver
 S : Scatterer

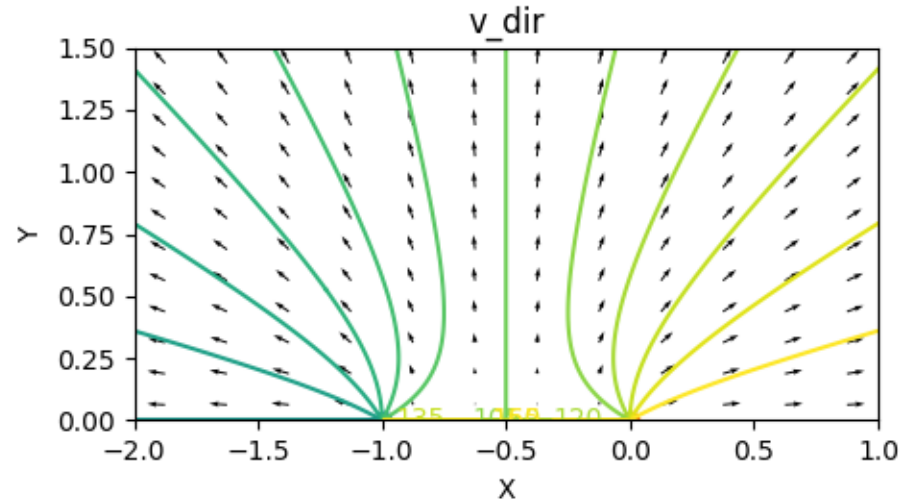


パッシブレーダ: Doppler速度計測 (Cont.)

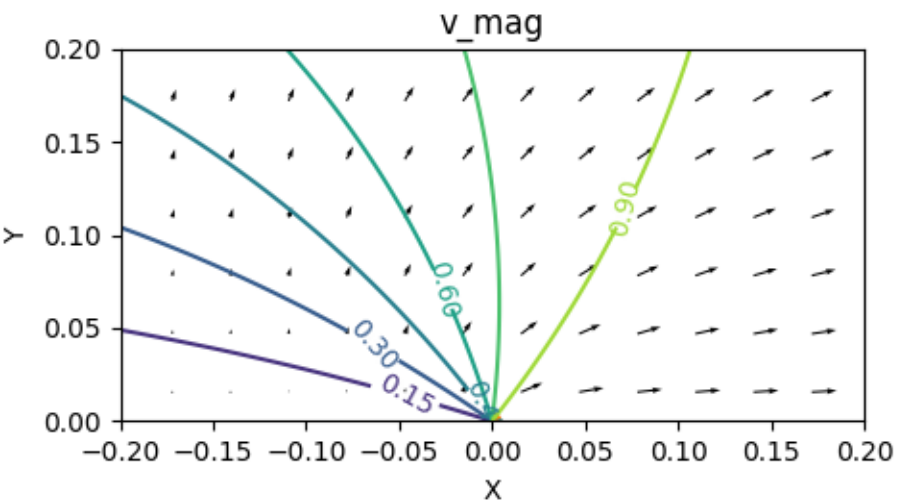
速度倍率



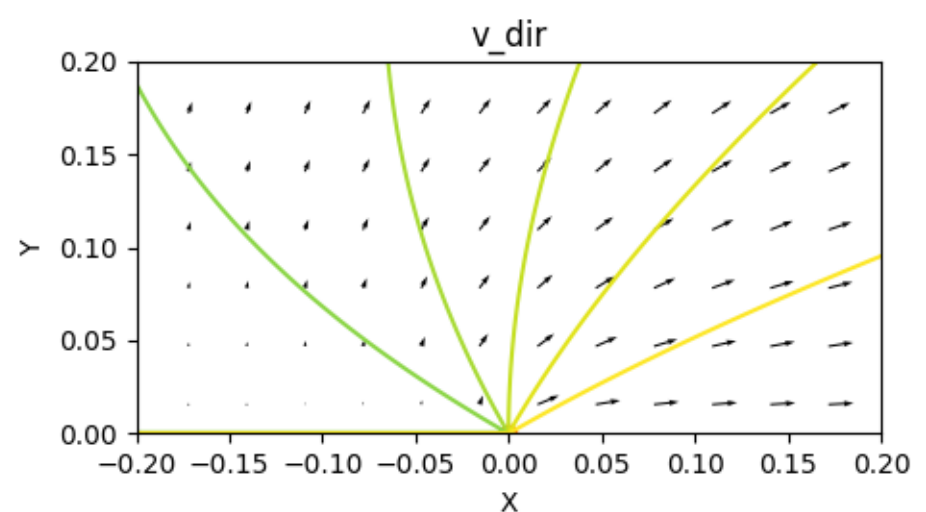
速度計測方向



受信局周辺

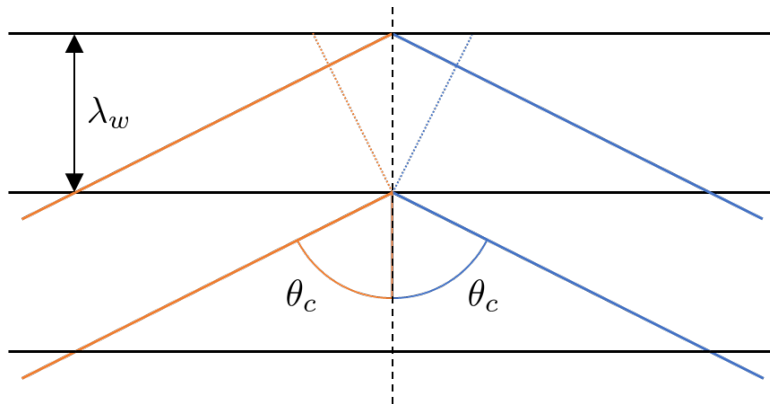


受信局周辺



海面における電波の斜め散乱

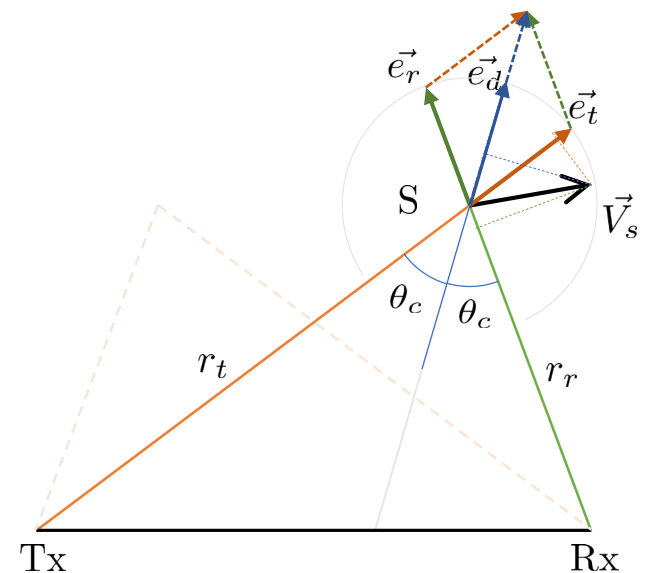
- ここでは入射角が90度に近い場合を考える
- 海洋波浪を様々な海洋波成分の重ね合わせと考える
 - ある海洋波成分について考えると、ほかの海洋波成分の影響により規則的な構造をもちえない
- 入射角と反射角が同じ散乱
- 海洋波成分の伝搬方向と速度計測方向が一致



- Bragg共鳴条件

$$2\lambda_w \cos \theta_c = n\lambda_r$$

$$\theta_{v_w} = \theta_d$$



海洋表面から計測されるDoppler速度

- 二次元Bragg共鳴条件を満たす海洋波成分の位相速度と流速ベクトルの速度計測方向成分の和
- 一次Bragg共鳴条件を満たす海洋波成分だけを考える

海洋波成分の波長、位相速度

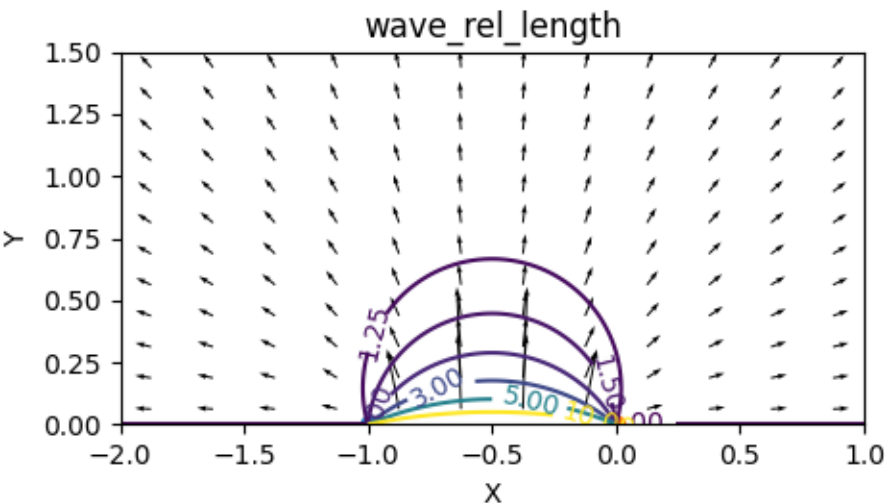
$$\begin{aligned}\lambda_w^{(1)} &= \frac{\lambda_r}{2} \frac{1}{\cos \theta_c} \\ C_p^{(1)} &= \sqrt{\frac{g}{2\pi} \lambda_w^{(1)}} \\ &= \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \sqrt{\frac{\lambda_r}{2 \cos \theta_c}} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g \lambda_r}{\pi}} \sqrt{\frac{1}{\cos \theta_c}} \\ &= C_p \sqrt{\frac{1}{\cos \theta_c}}\end{aligned}$$

計測されるDoppler速度

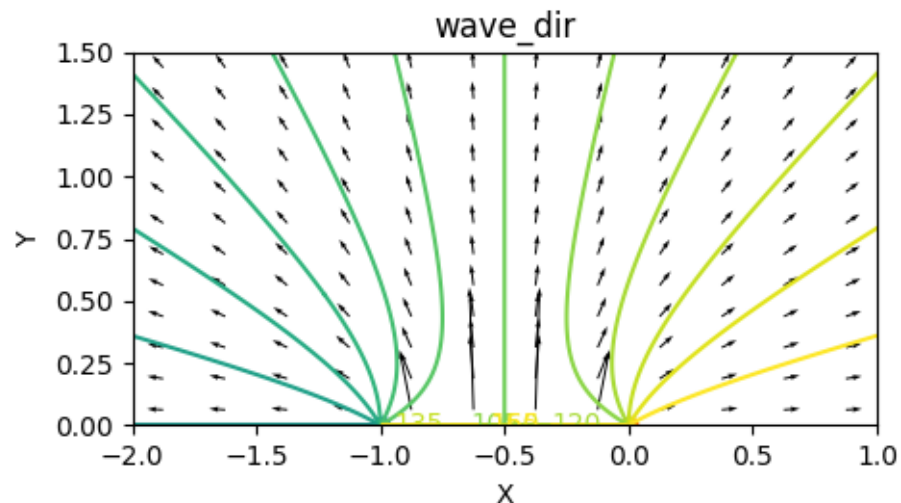
$$\begin{aligned}v_D^\pm &= (\vec{V}_s \cdot \vec{e}_d) \cos \theta_c \\ &= ((\pm C_p^{(1)} \vec{e}_d + \vec{V}_w) \cdot \vec{e}_d) \cos \theta_c \\ &= (\pm C_p^{(1)} + \vec{V}_w \cdot \vec{e}_d) \cos \theta_c \\ &= \pm C_p \sqrt{\cos \theta_c} + (\vec{V}_w \cdot \vec{e}_d) \cos \theta_c \\ &= C_p [\pm \sqrt{\cos \theta_c} + (\frac{\vec{V}_w}{C_p} \cdot \vec{e}_d) \cos \theta_c]\end{aligned}$$

一次Bragg共鳴条件を満たす海洋波成分

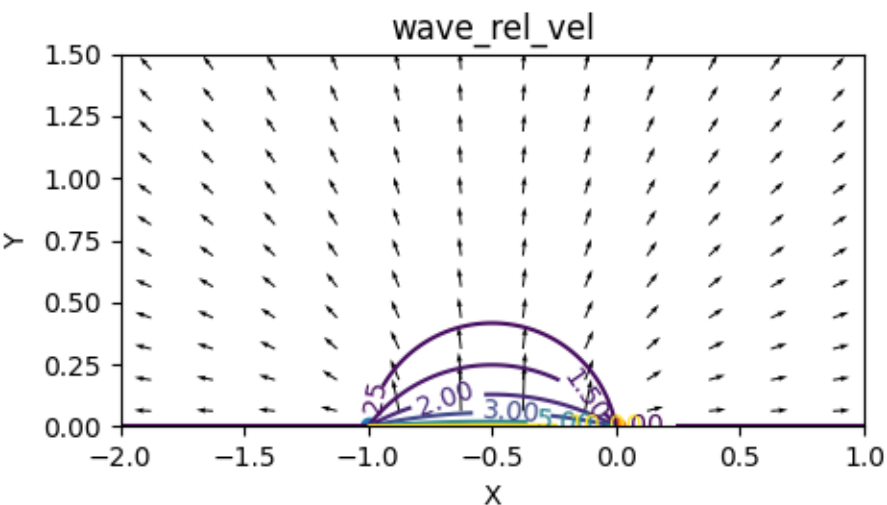
正規化波長



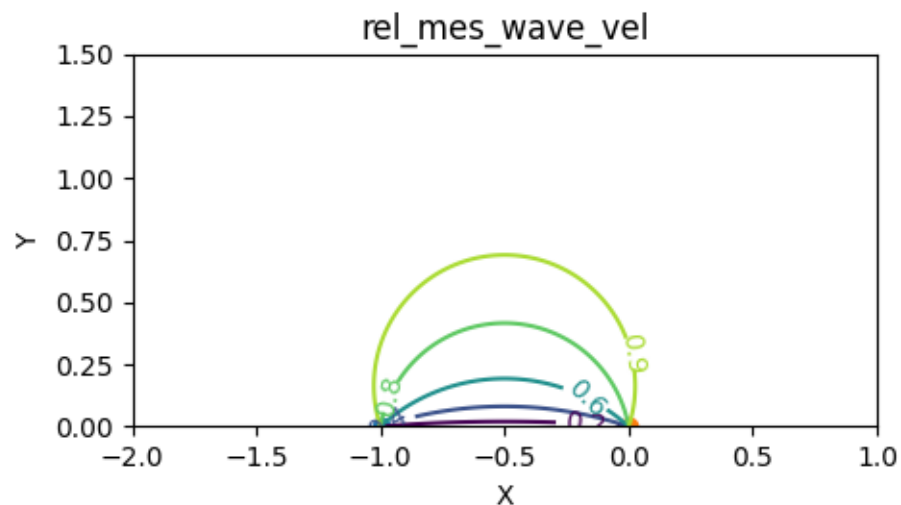
伝搬方向



正規化伝搬速度

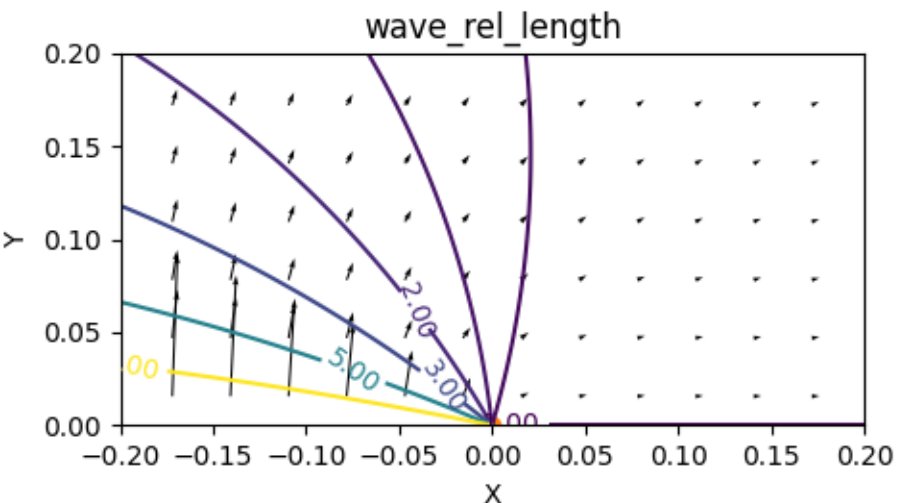


正規化Doppler速度

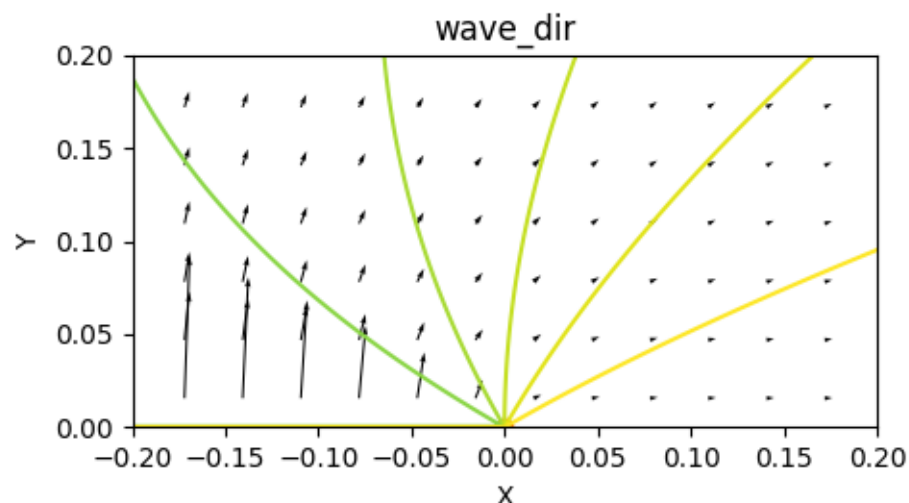


一次Bragg共鳴条件を満たす海洋波成分（受信局周辺）

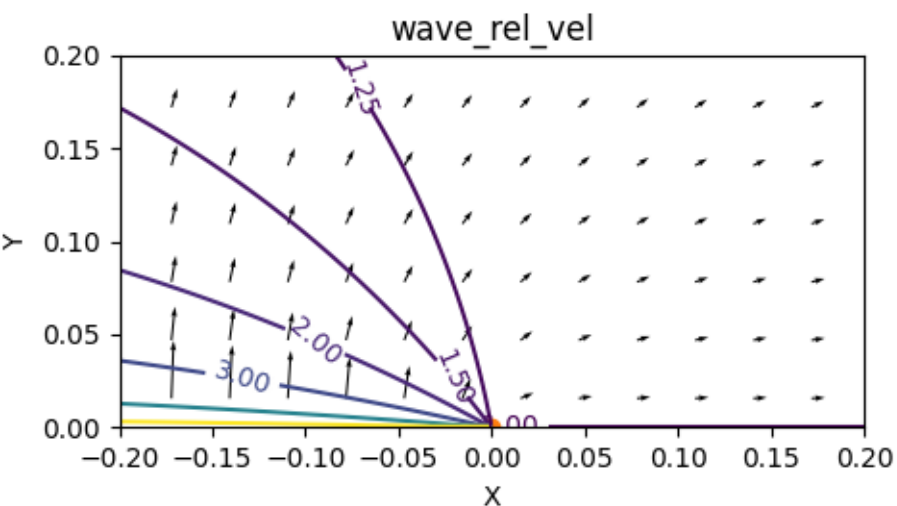
正規化波長



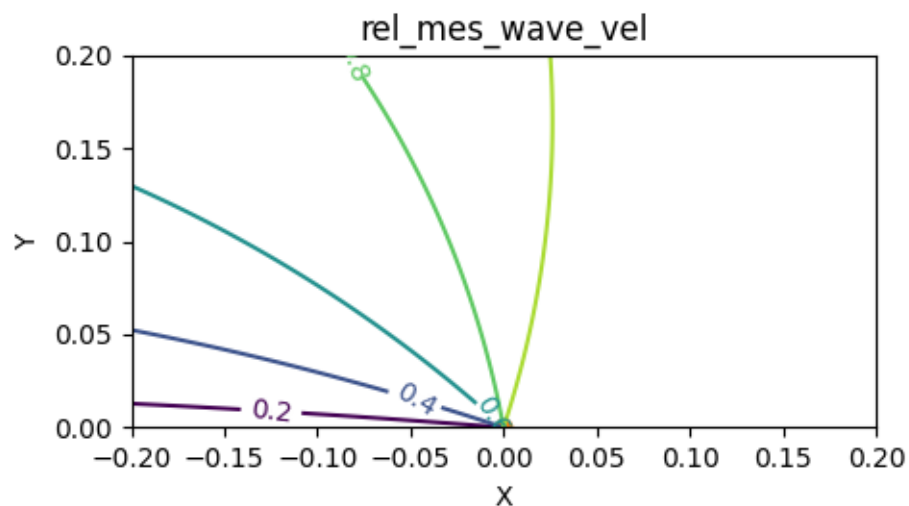
伝搬方向



正規化伝搬速度



正規化Doppler速度



流速ベクトル計測精度

- 流速ベクトル合成精度は、流速計測方向の交差角に依存
- パッシブレーダの流速計測方向 θ_d 、送信方向 θ_t 、受信方向 θ_r

$$\theta_d = \frac{\theta_t + \theta_r}{2}$$

- 交差角 $\Delta\theta$
 - パッシブレーダ2基

$$\Delta\theta = \theta_{d1} - \theta_{d2} = \frac{\theta_t + \theta_{r1}}{2} - \frac{\theta_t + \theta_{r2}}{2} = \frac{\theta_{r1} - \theta_{r2}}{2}$$

- 送信源の位置に依存しない
 - アクティブレーダとパッシブレーダ ($\theta_{t1} = \theta_{r1}$)

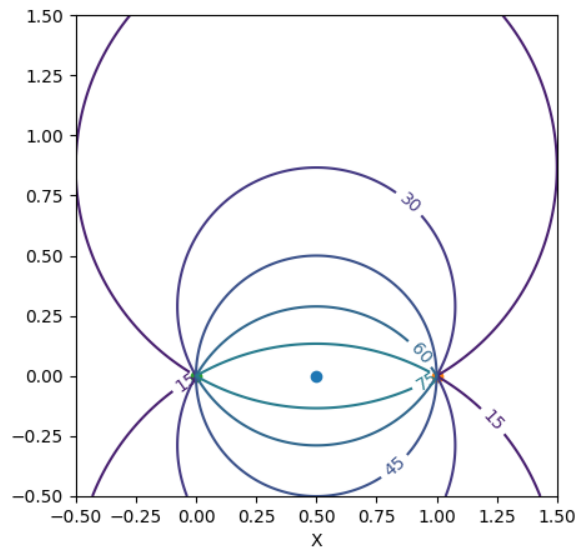
$$\Delta\theta = \theta_t - \theta_{d2} = \theta_{r1} - \frac{\theta_{r1} + \theta_{r2}}{2} = \frac{\theta_{r1} - \theta_{r2}}{2}$$

- アクティブレーダ2基 ($\theta_{t1} = \theta_{r1}$, $\theta_{t2} = \theta_{r2}$)

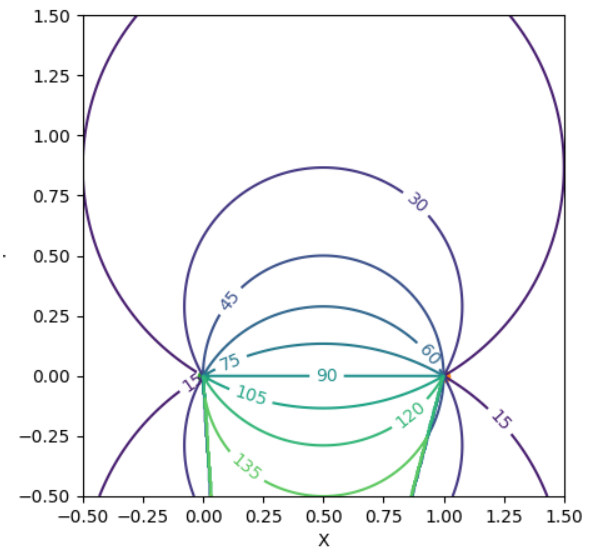
$$\Delta\theta = \theta_{t1} - \theta_{t2} = \theta_{r1} - \theta_{r2}$$

流速ベクトル計測精度: 交差角

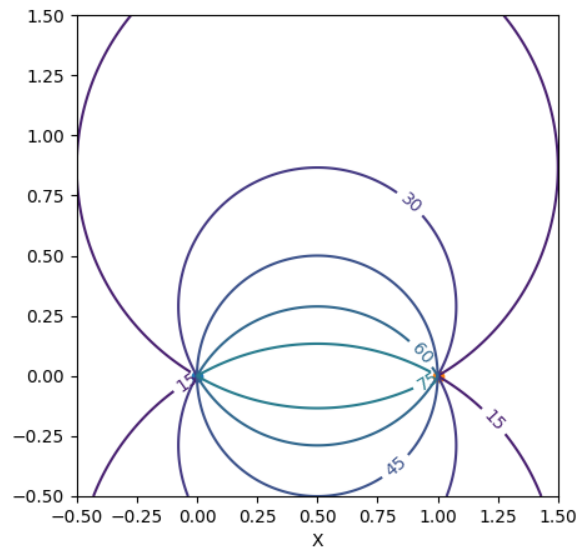
2パッシブ



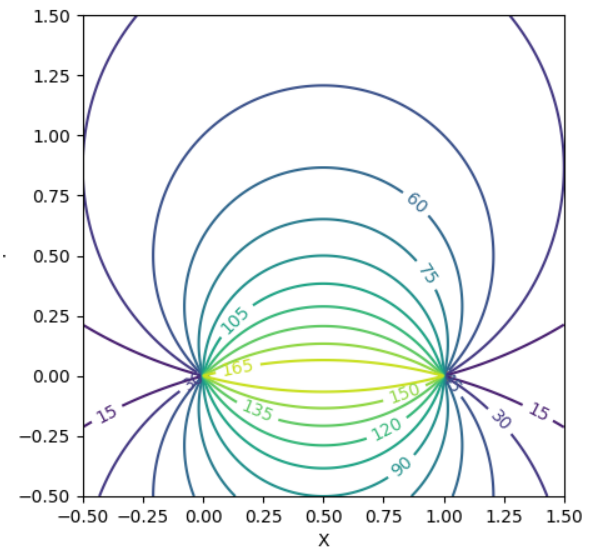
2パッシブ



パッシブ+アクティブ



2アクティブ



まとめ

- パッシブレーダ技術を用いた海面流速計測について検討
- パッシブレーダでは、送信源と受信局を結ぶ線に近い領域で、距離分解能・速度分解能ともに著しく劣化
- 送信源と受信局を結ぶ線に近い領域では、2次元Bragg共鳴条件を満たす海洋波成分は大きな位相速度を持つが、計測されるDoppler速度は極めて小さくなる
- 流速ベクトル合成精度は合成に用いる速度計測方向の交差角に依存するが、パッシブレーダ2基の組み合わせでは、送信源の位置に関係なく、送信源と受信局を結ぶ線に近い領域で良好な精度が得られる
 - アクティブレーダとパッシブレーダの組み合わせでも交差角はパッシブレーダ2基と同じだが、上記のようにパッシブレーダでの計測自体が困難
- パッシブレーダから離れた位置にある送信源を用いるパッシブレーダ2基の組み合わせにより、沿岸域の海洋表面流速を計測できる可能性が示された。