

放射方向, 到来方向, 遅延時間, ドプラ変動, 偏波情報を
同時に推定する時空間チャンネルサウンダ

東京工業大学 電気電子工学専攻

中谷 勇太 阪口 啓 高田 潤一 荒木 純道



Tokyo Institute of Technology
Mobile Communication Research Group

研究背景

現在の移動体通信において大容量かつ
高速, 高品質なマルチメディア通信の要望大



より高い周波数を使用することは必須



二つの問題

符号間干渉
時間適応信号処理

伝搬損失
空間適応信号処理



チャネル環境に依存

実空間に即したチャネルモデルの構築



到来方向, 放射方向, 遅延時間

チャネルサウンダ



研究内容

遅延時間, 到来方向, 放射方向以外の伝搬パラメータは？



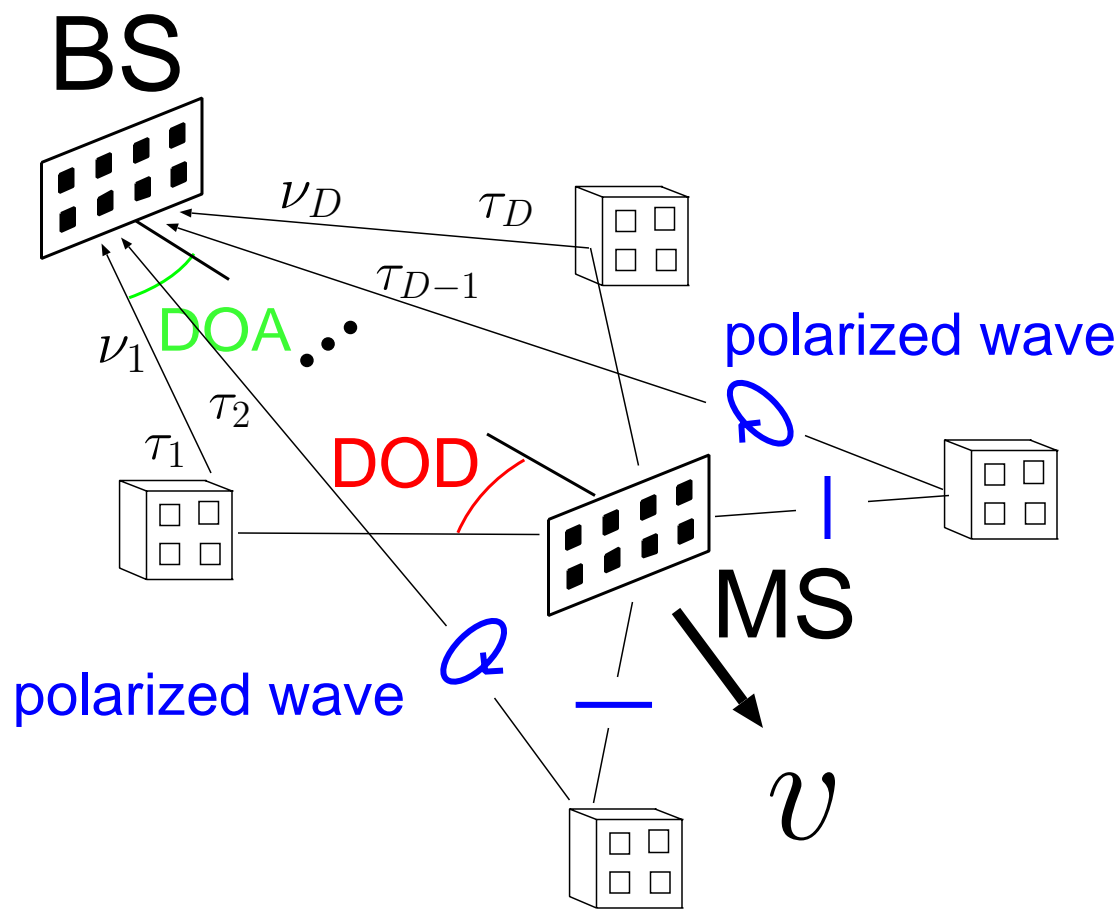
ドプラ変動, 偏波情報



放射方向, 到来方向, 遅延時間, ドプラ変動, 偏波情報を同時に推定する時空間チャネルサウンダの実装方法の提案



時空間チャネルサウンディングのイメージ図



放射方向
到来方向
偏波情報
ドプラ変動
遅延時間

マイクロセル

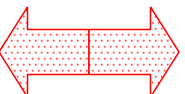


サウンドの原理 1

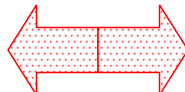
フーリエ変換対

到来方向  受信側の実空間軸

受信リニアアレー上において
 r 間隔で M_r 点のデータを取得

遅延時間  周波数軸

周波数軸上において
 f 間隔で M_f 点のデータを取得

ドプラ変動  時間軸

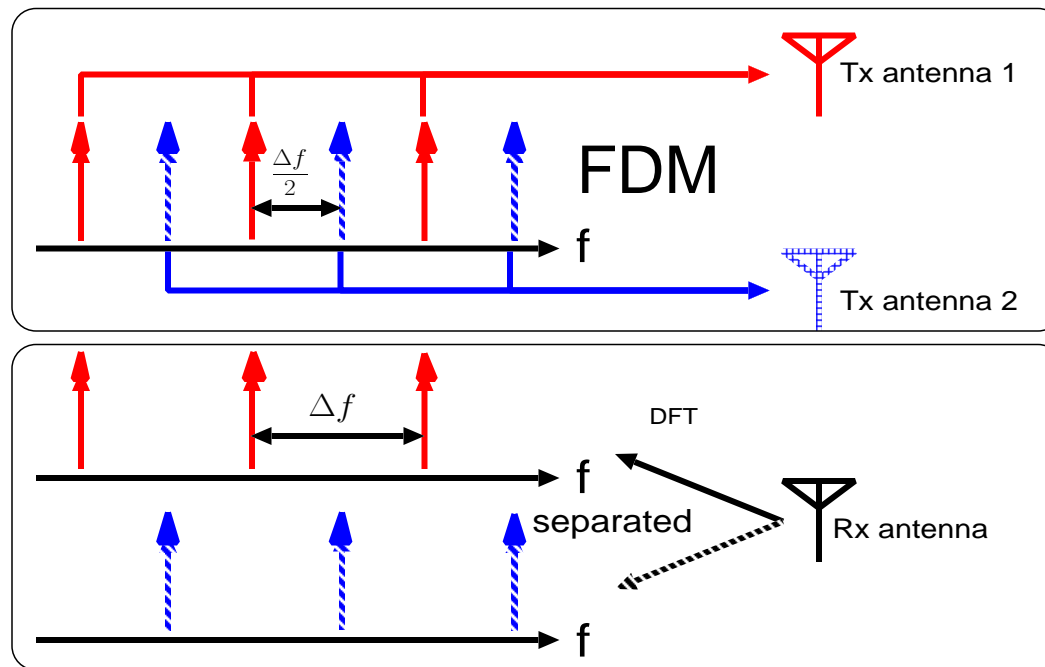
時間軸上において
 t 間隔で M_t 点のデータ取得



サウンドの原理 2

放射方向推定は送信側の実空間軸と周波数軸を用いる

マルチキャリア数 3つ
マルチキャリア間隔 f [Hz]
送信アンテナエレメント数 2つ



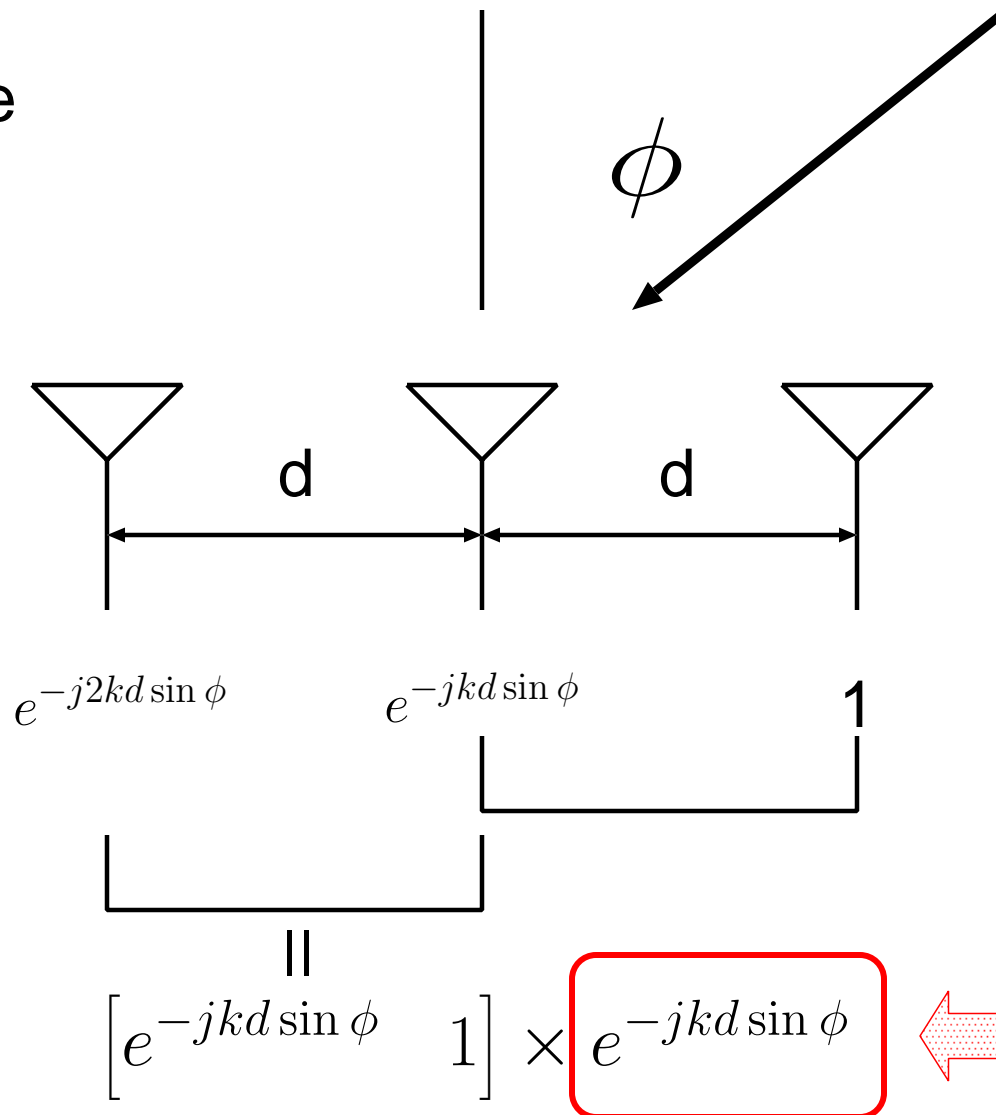
各素子間の周波数数は一般的に f / M_s
キャリア周波数に比べて f は十分小さい



ESPRIT

(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)

Azimuth Plane



推定パラメータ (第 i 素波)

$$h = \sum_{i=1}^d \gamma_i \otimes \mathbf{a}_{\Delta r}(\phi_i^r) \otimes \mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) \otimes \mathbf{a}_{\Delta f}(\tau_i) \mathbf{a}_{\Delta t}(\nu_i) \in C^{M_r M_s M_t M_f}$$

 4D Unitary ESPRIT

$$\mathbf{a}_{\Delta r}(\phi_i^r) = \left[\mathbf{1} \ e^{-j2\pi \frac{\Delta r}{\lambda} \sin(\phi_i^r)} \ \dots \ e^{-j2\pi (M_r - 1) \frac{\Delta r}{\lambda} \sin(\phi_i^r)} \right]$$



到来方向

$$\mathbf{a}_{\Delta f}(\tau_i) = \left[\mathbf{1} \ e^{-j2\pi \Delta f \tau_i} \ \dots \ e^{-j2\pi (M_f - 1) \Delta f \tau_i} \right]$$



遅延時間

$$\mathbf{a}_{\Delta t}(\nu_i) = \left[\mathbf{1} \ e^{-j2\pi \nu_i \Delta t} \ \dots \ e^{-j2\pi (M_t - 1) \nu_i \Delta t} \right]$$



ドプラ変動

$$\mathbf{a}'_{\Delta s}(\phi_i^s) = \mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) \odot \mathbf{a}_{\Delta f/M_s}(\tau_i)$$

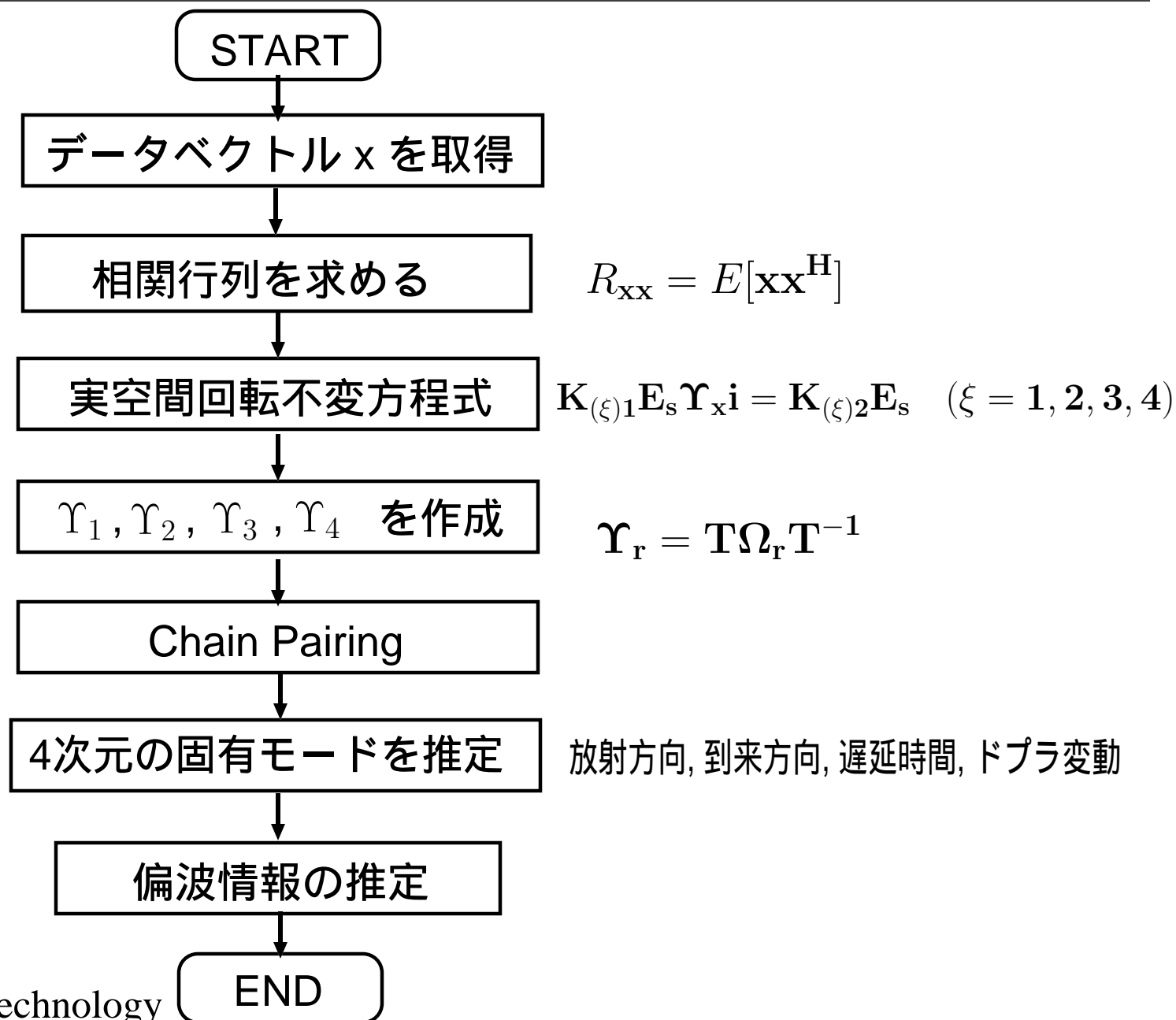


放射方向

$$\mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) = \left[\mathbf{1} \ e^{-j2\pi \frac{\Delta s}{\lambda} \sin(\phi_i^s)} \ \dots \ e^{-j2\pi (M_s - 1) \frac{\Delta s}{\lambda} \sin(\phi_i^s)} \right]$$

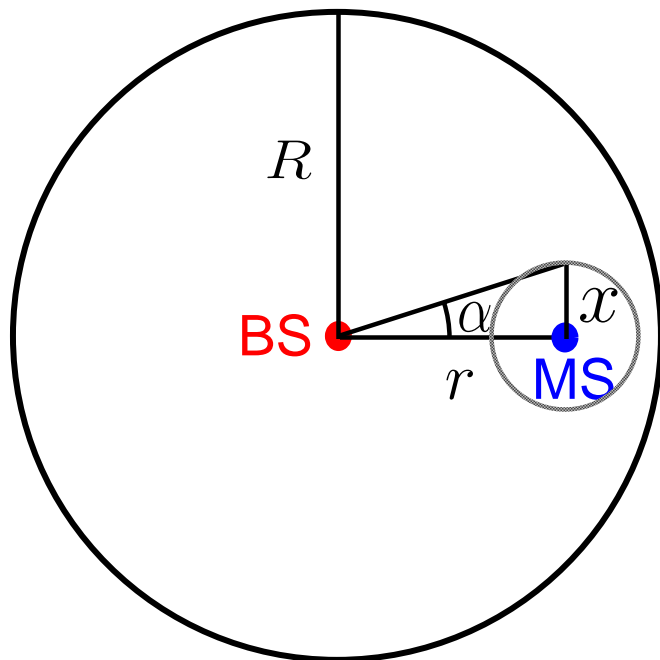


推定アルゴリズムのフローチャート



パラメータ設定 1

マイクロセル



$$R = 500[m]$$

$$\frac{\pi R^2}{2} = \int_0^r 2\pi r dr$$

$$r = \frac{R}{\sqrt{2}} = 350[m]$$

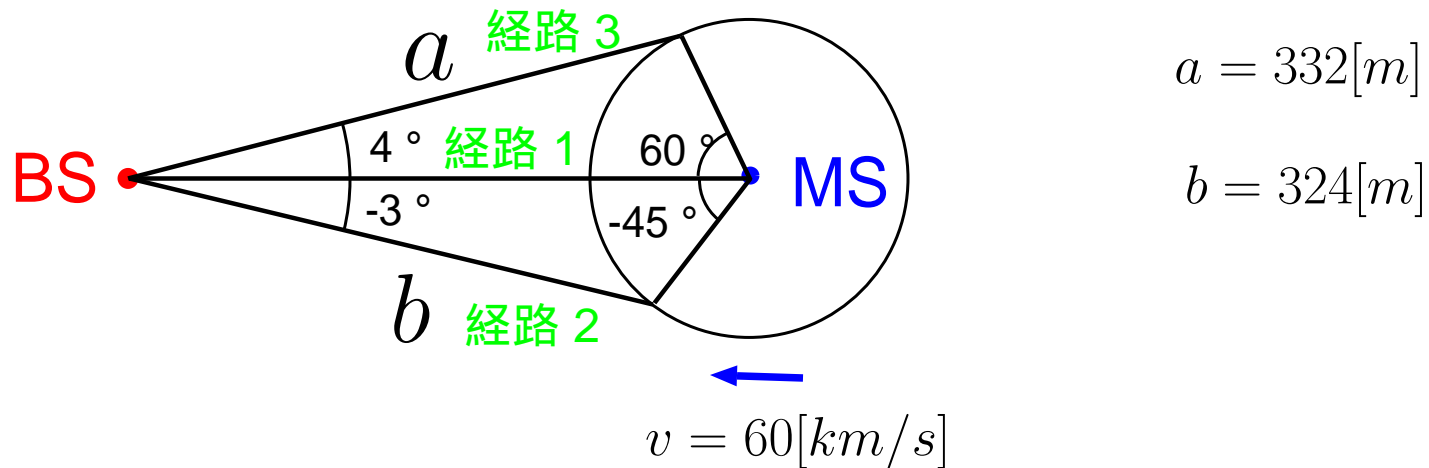
角度拡がりが 10° ($=5^\circ$) とすると

$$\tan \alpha = \frac{x}{r}$$

$$x = 30[m]$$



パラメータ設定 2



	経路 1	経路 2	経路 3
伝搬距離 [m]	350	354	362
遅延時間 [ns]	1167	1180	1207
ドプラ周波数 [Hz]	325	230	162



入力データ

入力データ 3波到来時

	1波目	2波目	3波目
放射方向 [deg]	0	-45	60
到来方向 [deg]	0	-3	4
遅延時間 [ns]	1167	1180	1207
ドプラ周波数 [Hz]	325	230	162



シミュレーションの環境

中心周波数は 5.85 [GHz]

送受のアンテナ素子は半波長間隔に 5 本ずつ

マルチキャリア間隔は 50 [kHz] 間隔に 5 本

間欠受信間隔は 1 [ms] で 5 ポイント

コヒーレントな波を想定

(3 × 3) 次元の部分行列空間で重み付けが
一様なスムージングを実行



シミュレーション結果 1

試行回数 100 回

100 スナップショット

SNR = 20 [dB]

	1波目	2波目	3波目	分散 [%]
放射方向 [deg]	0.001	-45.002	59.998	0.01
到来方向 [deg]	0.0019	-2.9935	4.0045	0.01
遅延時間 [ns]	1166.8	1179.8	1206.9	0.02
ドプラ周波数 [Hz]	324.996	229.994	162.001	0.002



シミュレーション結果 2

試行回数 100 回

100 スナップショット

SNR = 15 [dB]

	1波目	2波目	3波目	分散 [%]
放射方向 [deg]	0.00	-45.00	59.99	0.5
到来方向 [deg]	0.0027	-2.9955	4.0013	0.06
遅延時間 [ns]	1166	1181	1207	0.3
ドプラ周波数 [Hz]	324.99	230.01	162.02	0.09



シミュレーション結果 3

試行回数 100 回

100 スナップショット

SNR = 10 [dB]

	1波目	2波目	3波目	分散 [%]
放射方向 [deg]	0.01	-44.9	60.0	1.0
到来方向 [deg]	0.002	-3.016	3.995	0.1
遅延時間 [ns]	1159	1180	1213	0.9
ドプラ周波数 [Hz]	324.9	229.8	161.8	0.5



シミュレーション結果 4

試行回数 100 回

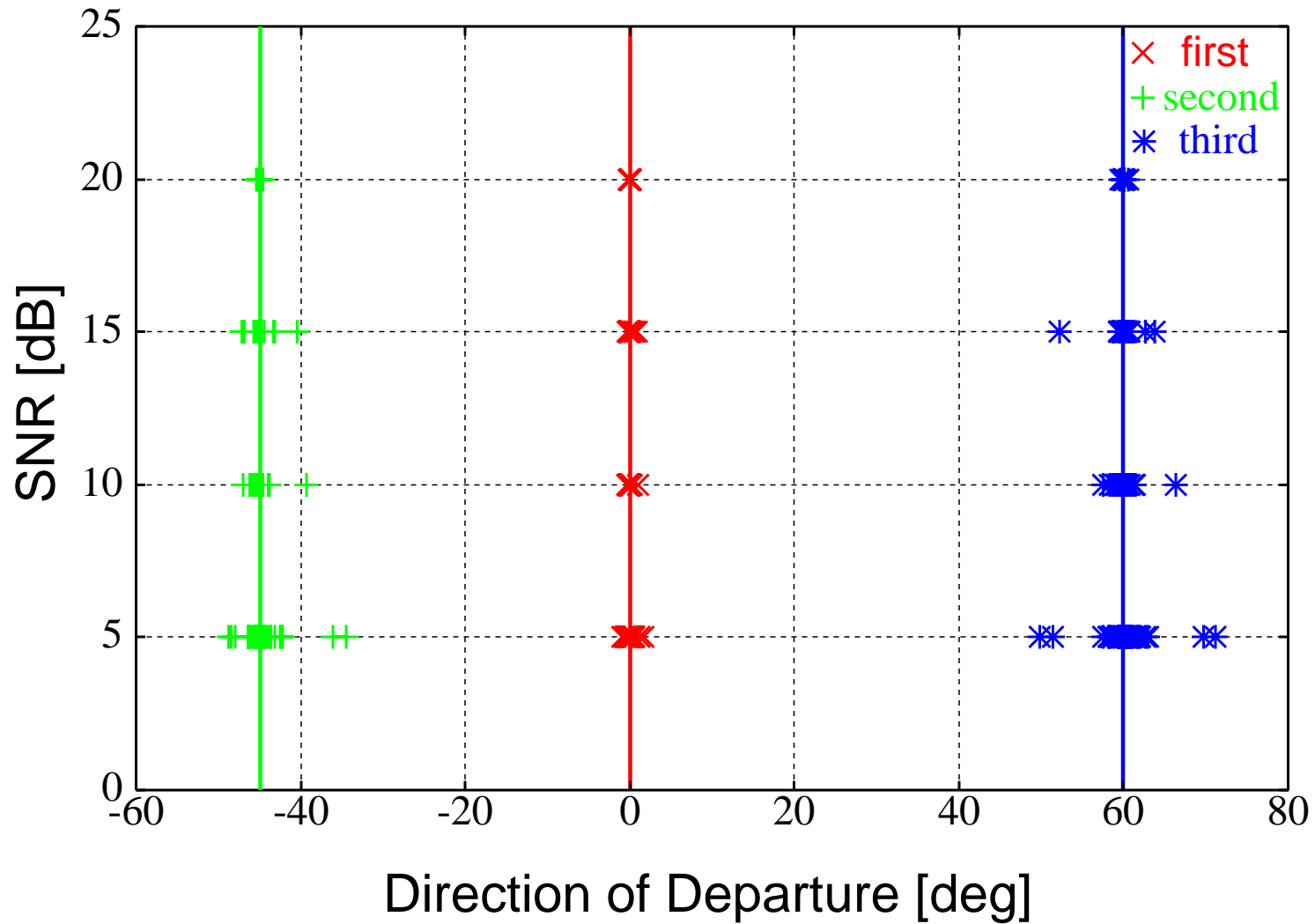
100 スナップショット

SNR = 5 [dB]

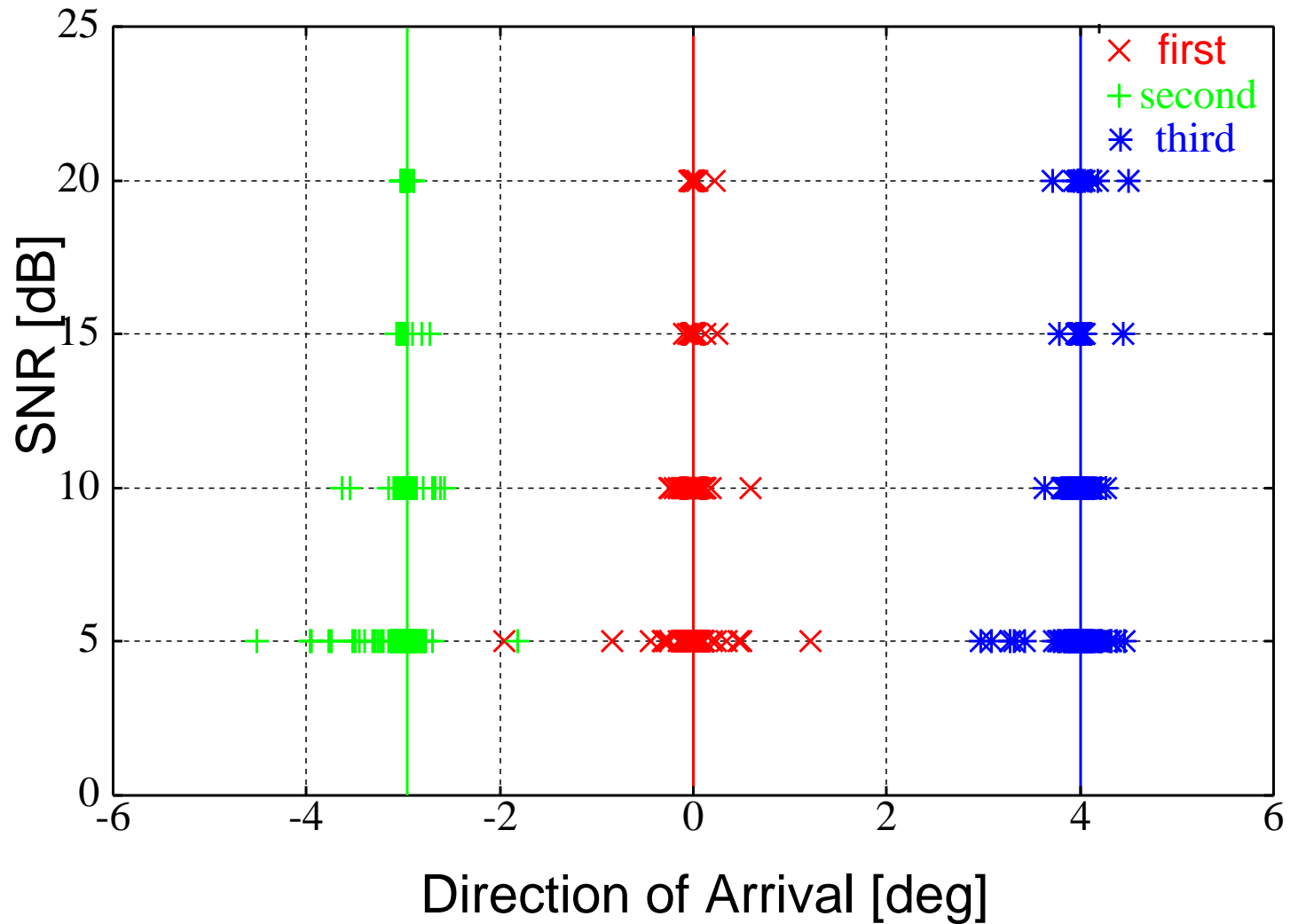
	1波目	2波目	3波目	分散 [%]
放射方向 [deg]	0.02	-44.8	60.1	5.9
到来方向 [deg]	0.03	-3.04	3.97	1.1
遅延時間 [ns]	1153	1182	1215	1.9
ドプラ周波数 [Hz]	325	230	162	4.8



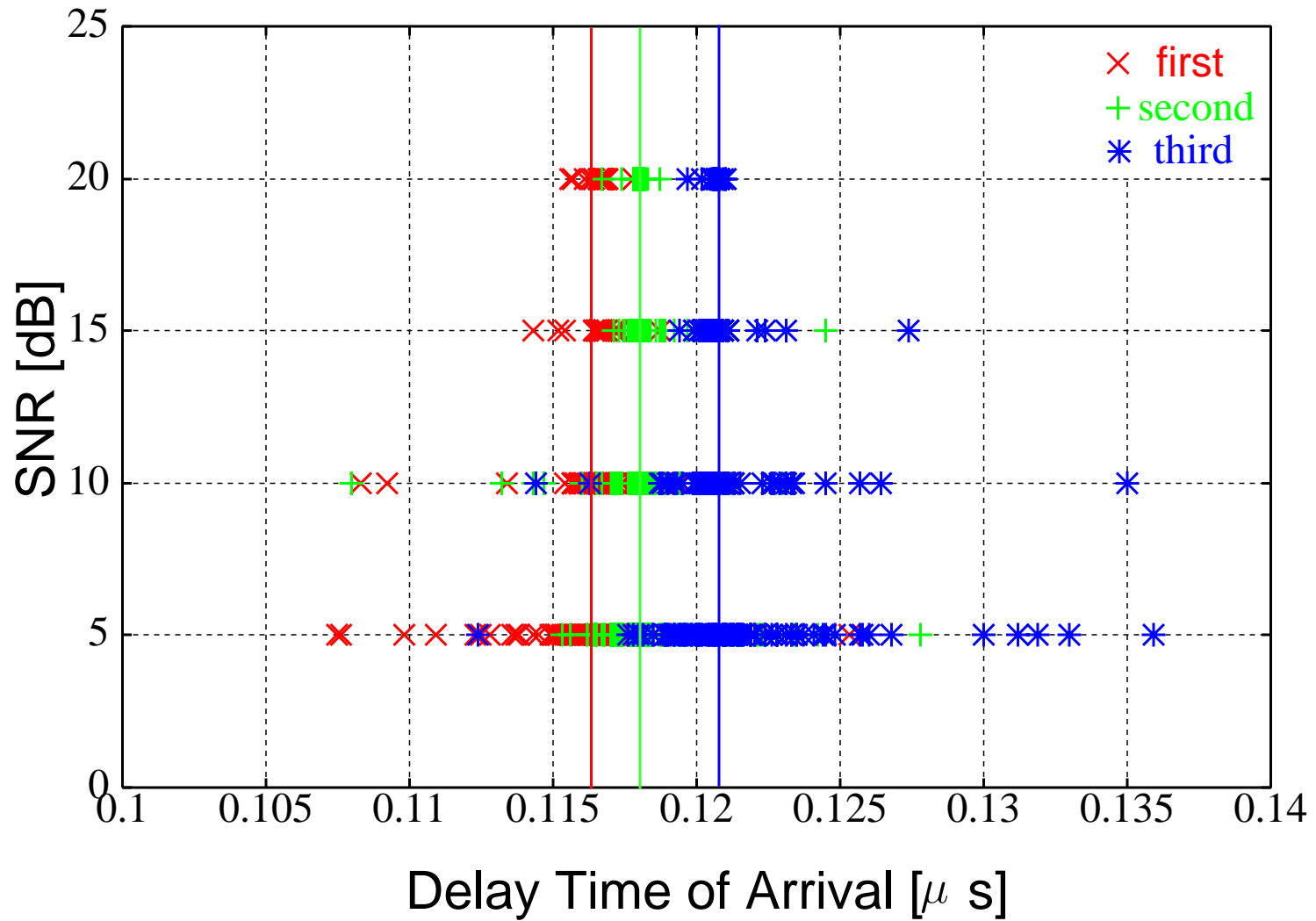
放射方向推定結果



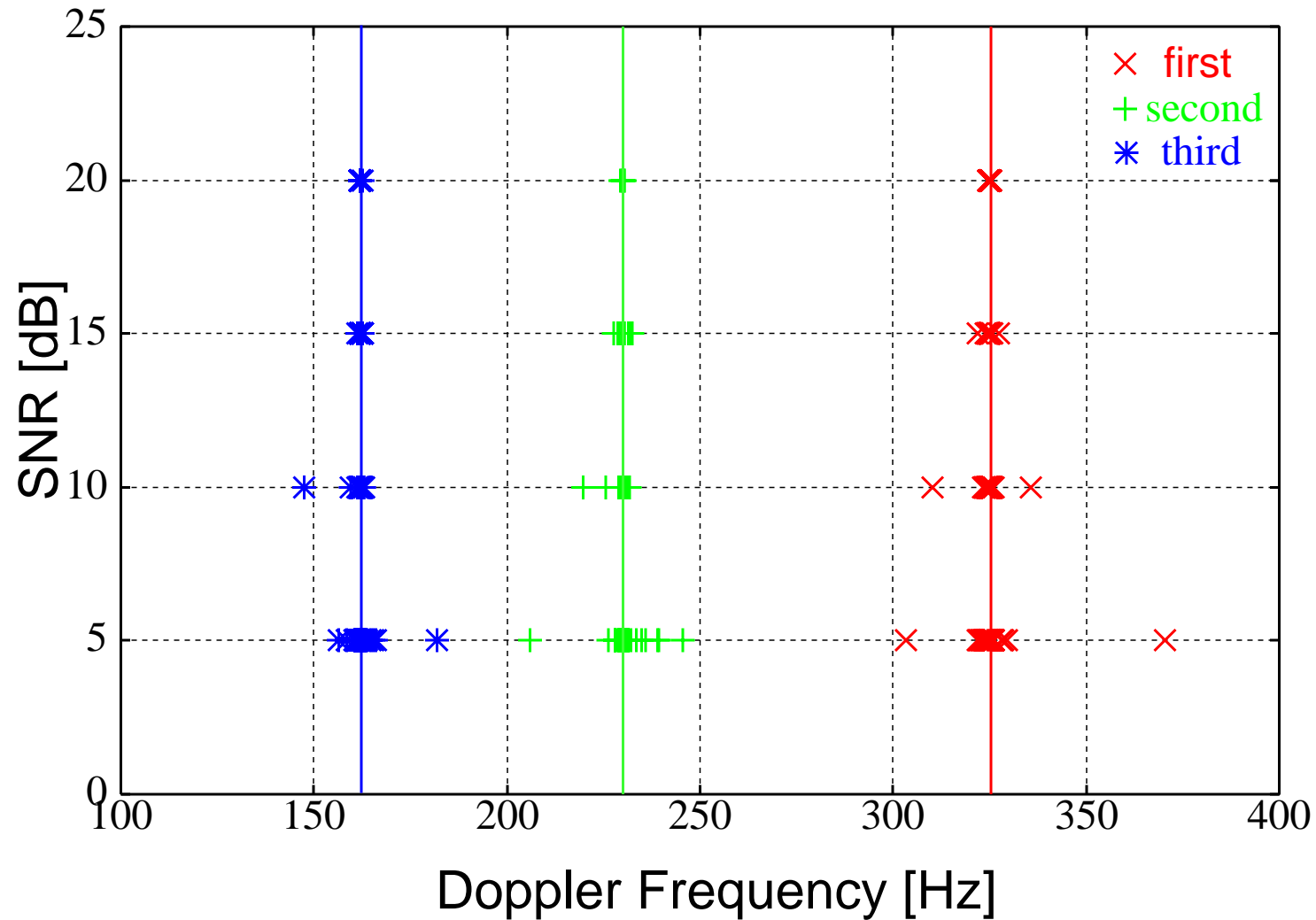
到来方向推定結果



遅延時間推定結果



ドプラ周波数推定結果



偏波情報 (第 i 素波)

4D Unitary ESPRIT で 4 つのパラメタを推定した後



送信側の垂直、水平偏波アンテナの利得 G_{θ}^s, G_{ϕ}^s

受信側の垂直、水平偏波アンテナの利得 G_{θ}^r, G_{ϕ}^r が既知

垂直、水平偏波の送信信号 $\gamma_{\theta}, \gamma_{\phi}$ は周波数が異なる



偏波情報 (第 i 素波)

送受信側で垂直、水平偏波アンテナを用いる



受信信号

$$\begin{bmatrix} x_i^\theta \\ x_i^\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_\theta^r(\phi_i^r) & 0 \\ 0 & G_\phi^r(\phi_i^r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^{\theta\theta} & A_i^{\theta\phi} \\ A_i^{\phi\theta} & A_i^{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta & 0 \\ 0 & G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} G_\theta^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\theta} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta + G_\theta^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\phi} G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \\ G_\phi^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\theta} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta + G_\phi^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\phi} G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \end{bmatrix}$$



周波数の違いにより区別する



偏波情報 (第 i 素波)

$$\begin{bmatrix} G_{\theta}^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\theta} G_{\theta}^s(\phi_i^s) \gamma_{\theta} + G_{\theta}^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\phi} G_{\phi}^s(\phi_i^s) \gamma_{\phi} \\ G_{\phi}^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\theta} G_{\theta}^s(\phi_i^s) \gamma_{\theta} + G_{\phi}^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\phi} G_{\phi}^s(\phi_i^s) \gamma_{\phi} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} x_i^{\theta\theta} + x_i^{\theta\phi} \\ x_i^{\phi\theta} + x_i^{\phi\phi} \end{bmatrix}$$



$$A_i^{\theta\theta} = \frac{x_i^{\theta\theta}}{G_{\theta}^r(\phi_i^r) G_{\theta}^s(\phi_i^s) \gamma_{\theta}}$$

$$A_i^{\theta\phi} = \frac{x_i^{\theta\phi}}{G_{\theta}^r(\phi_i^r) G_{\phi}^s(\phi_i^s) \gamma_{\phi}}$$

$$A_i^{\phi\theta} = \frac{x_i^{\phi\theta}}{G_{\phi}^r(\phi_i^r) G_{\theta}^s(\phi_i^s) \gamma_{\theta}}$$

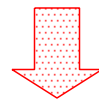
$$A_i^{\phi\phi} = \frac{x_i^{\phi\phi}}{G_{\phi}^r(\phi_i^r) G_{\phi}^s(\phi_i^s) \gamma_{\phi}}$$



まとめ

4D Unitary ESPRIT を用いたパラメタ推定の
実装方法を提案した

シミュレーションにより動作確認



今後の予定

電波暗室での動作実験



$$e^{-j2\pi(M_r-1)\frac{\Delta r}{\lambda}\sin(\phi_i^r)} \dots e^{-j2\pi(M_r-1)\frac{\Delta r}{\lambda}\sin(\phi_i^r)}$$

$$\mathbf{a}_{\Delta r}(\phi_i^r) = \left[\mathbf{1} e^{-j2\pi\frac{\Delta r}{\lambda}\sin(\phi_i^r)} \dots e^{-j2\pi(M_r-1)\frac{\Delta r}{\lambda}\sin(\phi_i^r)} \right] h = \sum_{i=1}^d \gamma_i \otimes \mathbf{a}_{\Delta r}(\phi_i^r) \otimes \mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s)$$

$$\mathbf{a}_{\Delta f}(\tau_i) = \left[\mathbf{1} e^{-j2\pi\Delta f\tau_i} \dots e^{-j2\pi(M_f-1)\Delta f\tau_i} \right]$$

$$\mathbf{a}_{\Delta t}(\nu_i) = \left[\mathbf{1} e^{-j2\pi\nu_i\Delta t} \dots e^{-j2\pi(M_t-1)\nu_i\Delta t} \right]$$

$$\mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) = \mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) \odot \mathbf{a}_{\Delta f/M_s}(\tau_i)$$

$$\mathbf{a}_{\Delta s}(\phi_i^s) = \left[\mathbf{1} e^{-j2\pi\frac{\Delta s}{\lambda}\sin(\phi_i^s)} \dots e^{-j2\pi(M_s-1)\frac{\Delta s}{\lambda}\sin(\phi_i^s)} \right]$$

$$\begin{bmatrix} x_i^{\theta\phi} \\ x_i^{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_\theta^r(\phi_i^r) & 0 \\ 0 & G_\phi^r(\phi_i^r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i^{\theta\theta} & A_i^{\theta\phi} \\ A_i^{\phi\theta} & A_i^{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta & 0 \\ 0 & G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} G_\theta^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\theta} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta + G_\phi^r(\phi_i^r) A_i^{\theta\phi} G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \\ G_\theta^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\theta} G_\theta^s(\phi_i^s)\gamma_\theta + G_\phi^r(\phi_i^r) A_i^{\phi\phi} G_\phi^s(\phi_i^s)\gamma_\phi \end{bmatrix} \int_0^R 2\pi r dr$$

$$\mathbf{K}(\xi) \mathbf{E}_s \boldsymbol{\gamma}_x \mathbf{i} = \mathbf{K}(\xi) \mathbf{E}_s \quad (\xi = 1, 2, 3, 4)$$

$$\mathbf{Y}_r = \mathbf{T} \boldsymbol{\Omega}_r \mathbf{T}^{-1}$$

$$r = \frac{R}{\sqrt{2}} = 350[m]$$

$$\tan \alpha = \frac{x}{r}$$

$$A_i^{\theta\theta} = \frac{x_i^{\theta\theta}}{G_\theta^r(\phi_i^r) G_\theta^s(\phi_i^s) \gamma_\theta}$$

$$A_i^{\theta\phi} = \frac{x_i^{\theta\phi}}{G_\theta^r(\phi_i^r) G_\phi^s(\phi_i^s) \gamma_\phi}$$

$$A_i^{\phi\theta} = \frac{x_i^{\phi\theta}}{G_\phi^r(\phi_i^r) G_\theta^s(\phi_i^s) \gamma_\theta}$$

$$A_i^{\phi\phi} = \frac{x_i^{\phi\phi}}{G_\phi^r(\phi_i^r) G_\phi^s(\phi_i^s) \gamma_\phi}$$

$$\begin{bmatrix} e^{-jkd \sin \phi} & 1 \end{bmatrix} \times e^{-jkd \sin \phi}$$

$$\in C^{M_r M_s M_t M_f}$$

$$E = M$$