

ADS-B位置検証技術の性能概算

長縄 潤一，宮崎 裕己，田嶋 裕久，
古賀 禎，北折 潤，角張 泰之
(監視通信領域)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

電子航法研究所



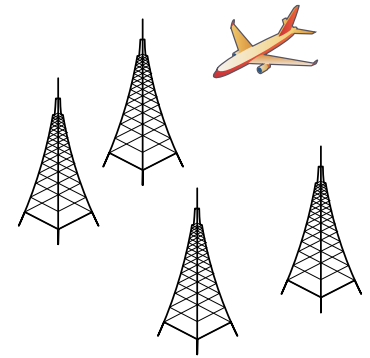


1. 背景
 - ADS-Bの脆弱性
 - 信号到達時間差による位置検証
2. システム設計法による性能概算
3. 計算例と分析結果
4. まとめ



航空路監視ではマルチセンサー型のシステムの整備が進んでいる
(異なる原理のシステムが出力する航跡を統合)

- SSR (二次監視レーダー)
 - 従来から利用
 - 更新頻度10秒, 精度 350 m 程度
- WAM (広域マルチラテレーション)
 - 4局以上の送受信局 (主に無指向性) を使った位置推定
 - 航空路WAMが運用開始
 - 更新頻度8秒, 精度 350m
- ADS-B
 - 航空機による放送
 - 令和3年度のCARATSで導入の意思決定 (ADS-B RAD, ADS-B NRA)
 - 1秒に2回位置情報を放送、精度は機上GNSS





■ 不正な位置情報

- 不正な送信源（違法電波）や機上装置不良
- ADS-Bの特徴に起因
 - 位置情報を機上からの自己申告に頼る（地上で測っていない）
 - 認証や暗号化の仕組みが無い

■ 実例等

- 海外の研究者らによる実験（例: A. Costing, et al, BlackHat USA 2012.）
- 機上装置に起因する不正情報の報告

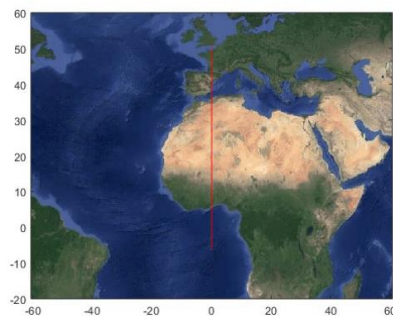
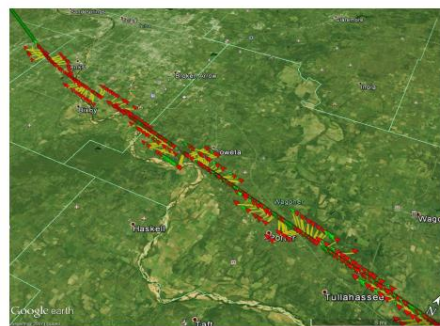


Figure 11: Aircraft Reporting an Improbable Trip Along the Prime Meridian



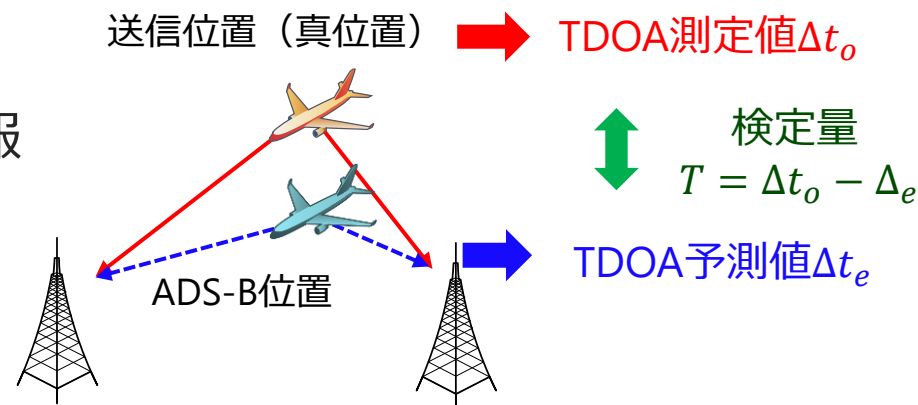
左：A. Hoag, et al, ESAVS 2018
右：FAA, SURICG/5-IP04, 2020.



電子航法研究所では信号到達時間差（TDOA: Time Difference of Arrival）を使った位置検証技術に取り組んできた※

■ 原理

- 2局以上の受信局を使用
 - 測定したTDOAとADS-B位置情報から予測したTDOAを比較
- ※ ここでは差を検定量と呼ぶ



■ 利点

- TDOA測定はWAM受信機が備える機能
- 理想的にはWAMのソフトウェアの改修で実装できる可能性

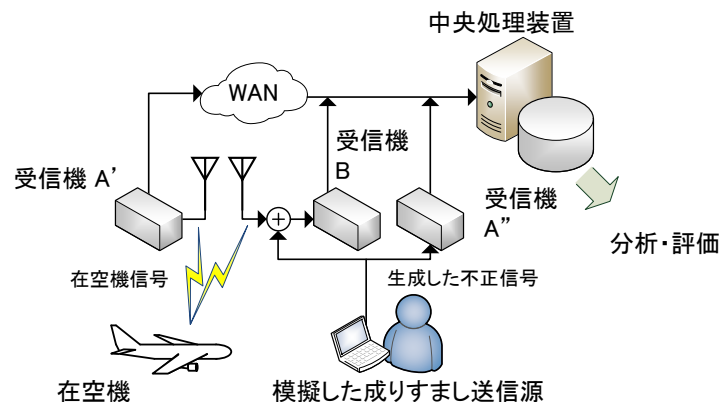
※ 到来角を使う方法は今回省略



■ 当所による研究

- 理論の定式化、原理の解明
- 実験による評価・検証
- 性能の補強方法
(到来角の併用など)
- システム設計法

これまでに実施した実験



アンテナ



受信機

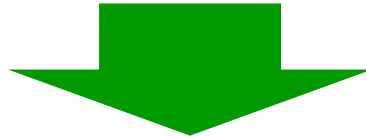


■ 海外動向

- SESAR JUではTDOA, AOAを含む様々な手法を検討 (SESAR P15.4.6)
- Thales社によるTDOAの実用化 (H. Neufeldt, ESAVS 2016)
- 米国はTDOAを利用
- Aireon社によるTDOAの検討



- これまでの研究で明らかになった性質
 - 性能指標
 - 不正の検知率 ... 不正な情報を不正と判定
 - 誤報率 ... 正しい情報（実際の航空機）を不正と誤判定
 - 判定しきい値によるトレードオフ
 - 位置関係が重要



- 設計段階で位置関係・性能を概算できないか
- 性能に影響する支配的な要因は何か？

システム設計法

システム設計法





■ 要件

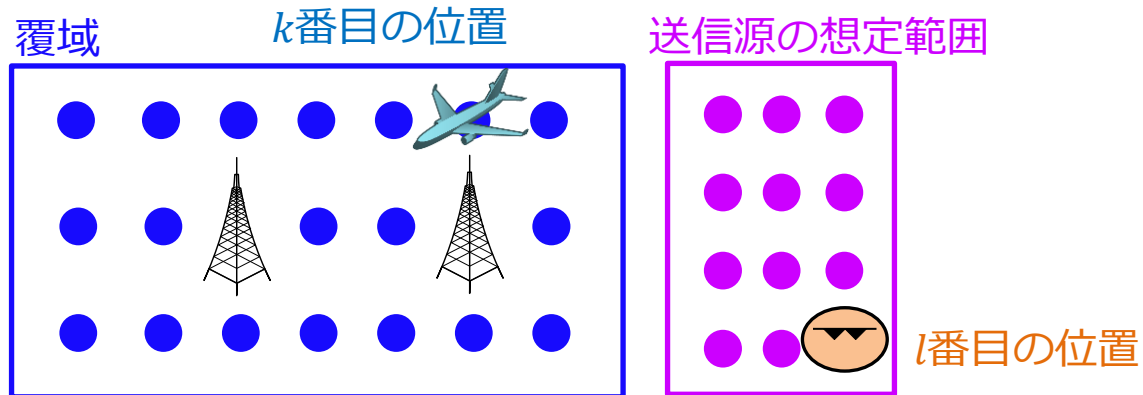
1. 検知率と誤報率
2. 不正の検知可否は位置関係で決まる
(ADS-Bの位置、不正な送信源の位置、受信局の位置)
3. 不正な送信源の位置は事前の想定が困難

■ 方針

1. 誤報率はしきい値設定に埋め込み、検知率のみ計算
2. 不正な送信源は想定されるエリアを指定
→ エリア内で発生確率は一様
3. 位置関係の組み合わせを総当たりで計算
→ **平均検知率**を計算



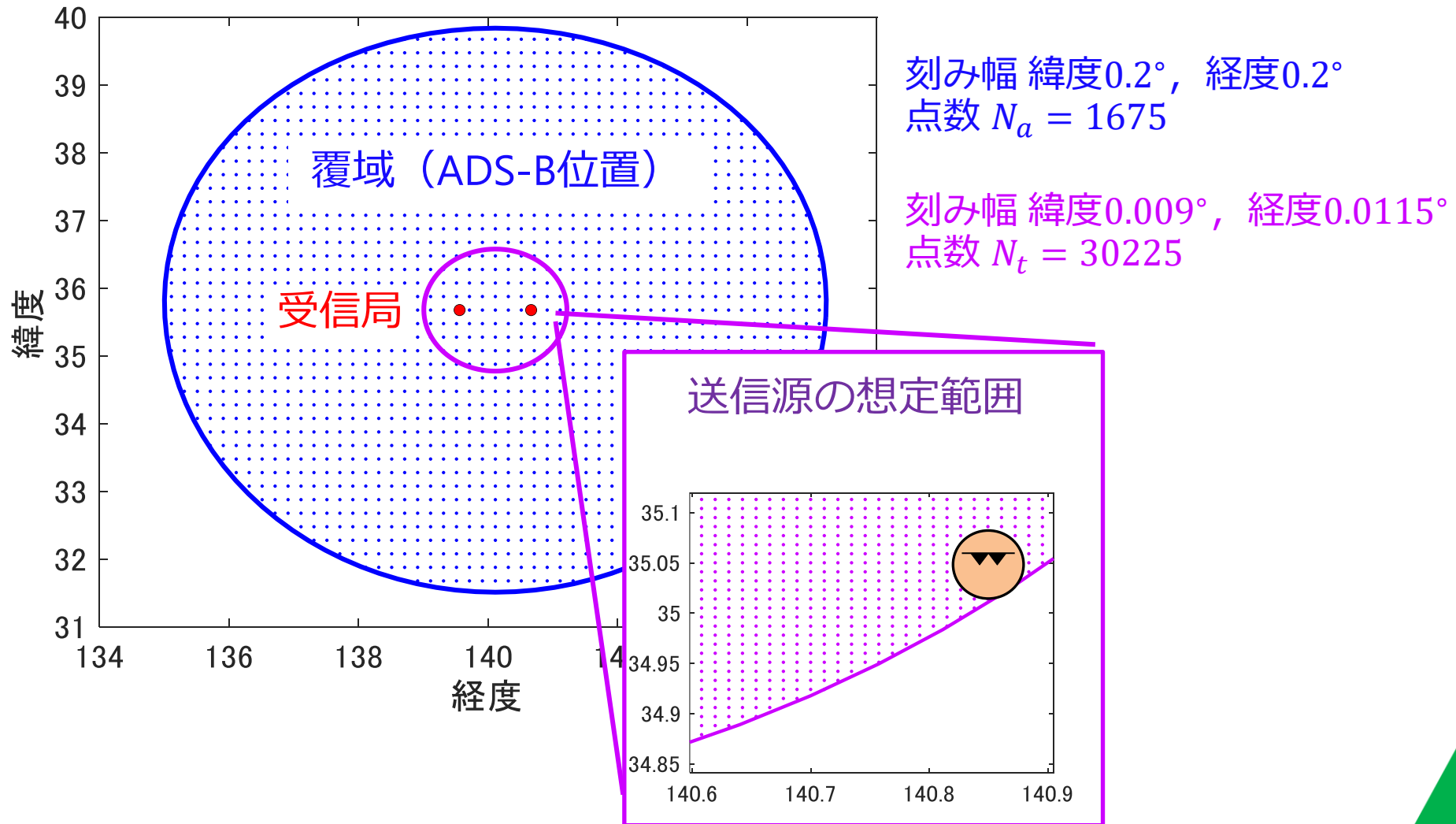
- 覆域と送信源の想定範囲を点群に分割し、総当たり計算



- k, l で総当たりして平均を取る



■ 実際の計算で使った点群





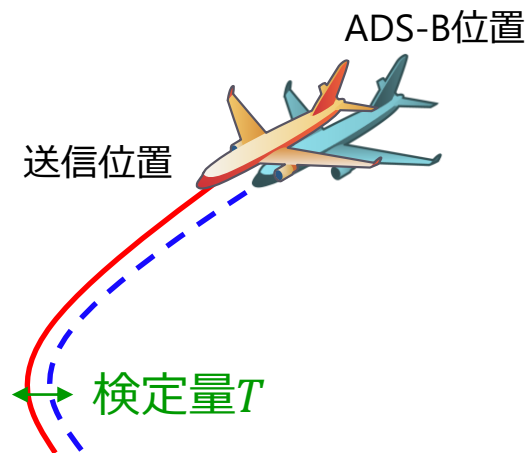
1. 計算条件の設定
2. 覆域点群・送信点群の生成
 - 覆域点 : $k = 1 \dots N_a$
 - 送信点 : $l = 1 \dots N_t$
3. 点の組合せごとに検知率計算
 - しきい値、検知率
 - (k, l) の組み合わせ総数は $N_a \times N_t$
4. 平均化
 - 全組み合わせ ($N_a \times N_t$) を平均化するのが基本
 - 以下を除外しても良い
 - 見通し外
 - ADS-B位置と送信源位置が近すぎる場合
(原理的な問題、不正の定義)

主な計算条件

- 受信局位置
- 覆域範囲
- 不正な送信源の想定範囲
- 点群生成ための刻み幅
- 受信局性能
(精度と時刻同期性能)
- しきい値計算のパラメータ
(誤報率等)



- 仮説検定を使った理論式を利用（実験で検証済み）
- 正常な航空機の持つ検定量分布から所望の誤報率を満たすよう計算



$$T \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$$

$\mu_0 \leftarrow$ 遅延（バイアス） $\times$ 飛行速度

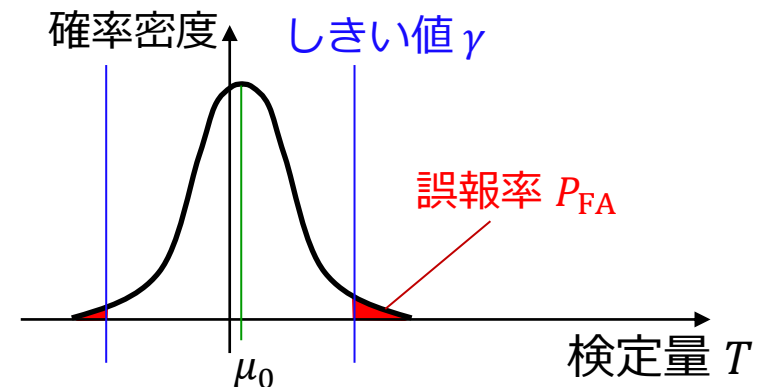
$\sigma_0 \leftarrow$ TDOA精度 $(\sqrt{2} \times \sigma_t)$

機上のGPS精度

遅延（ばらつき） $\times$ 飛行速度

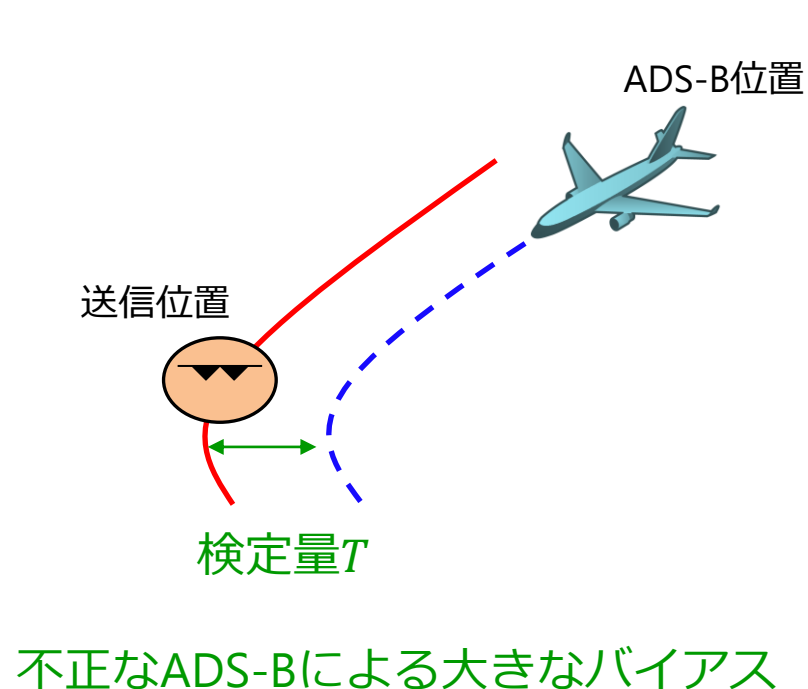
正常なADS-B位置の持つ小さな誤差

- より簡便には ...
 - TDOA精度だけ考慮
 - 測定値





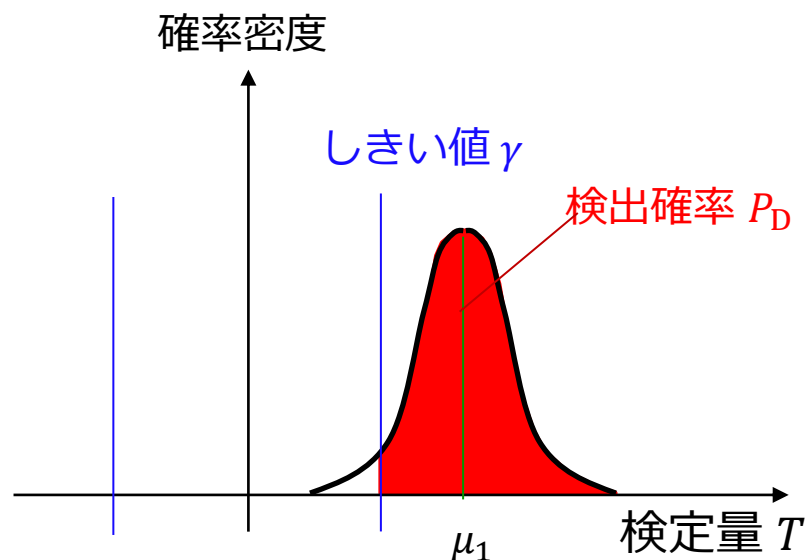
- 仮説検定を使った理論式を利用（実験で検証済み）
- 不正な位置情報が持つ検定量の分布から計算



$$T \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

$\mu_1 \leftarrow$ 不正位置と送信源位置の差で決まる

$\sigma_1 \leftarrow$ TDOA精度 ($\sqrt{2} \times \sigma_t$)



計算例と分析結果





■ 受信局（2局）

- 電子航法研究所（調布）
- 東に 50 km

■ 監視覆域

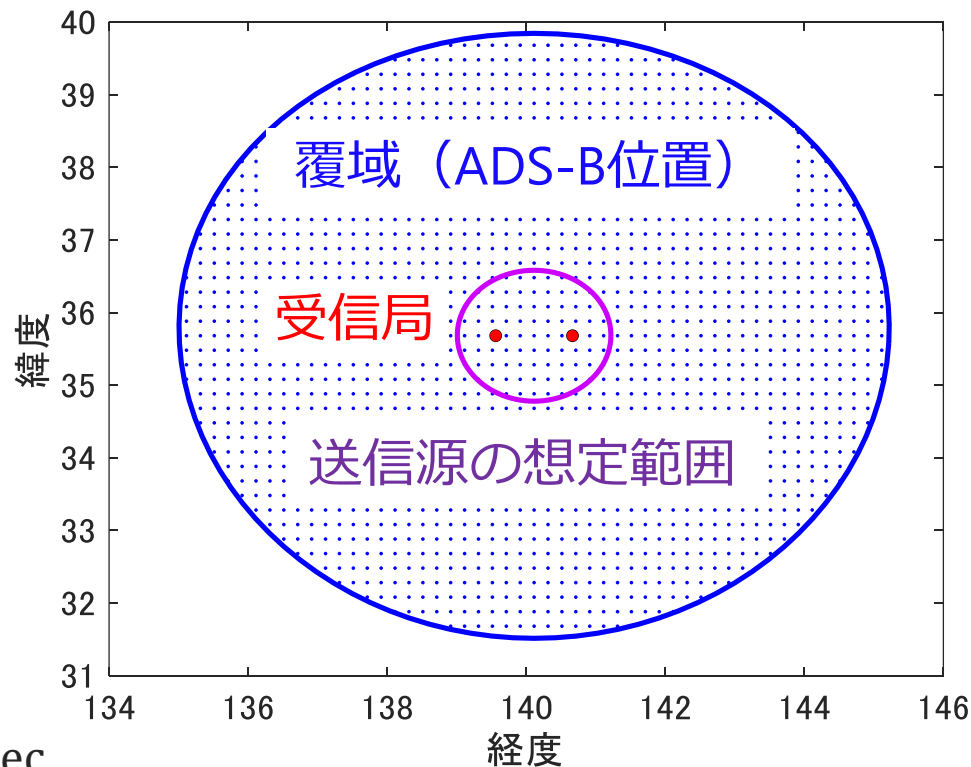
- 40,000 ft 半径 250 NM
- 点数 $N_a = 1675$

■ 不正な送信源

- 地上 半径 100 km
- 点数 $N_t = 30225$

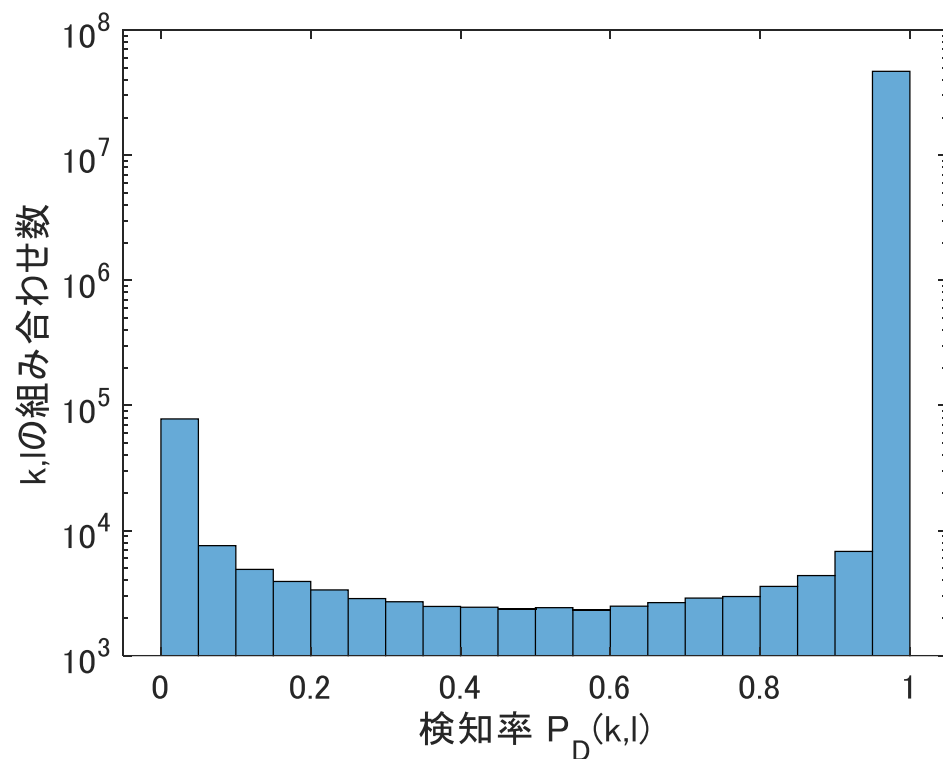
■ その他

- 測定精度 $\sqrt{2}\sigma_t = \sqrt{2} \times 30 \text{ nsec}$
- 所望の誤報率 0.05 → しきい値を設定



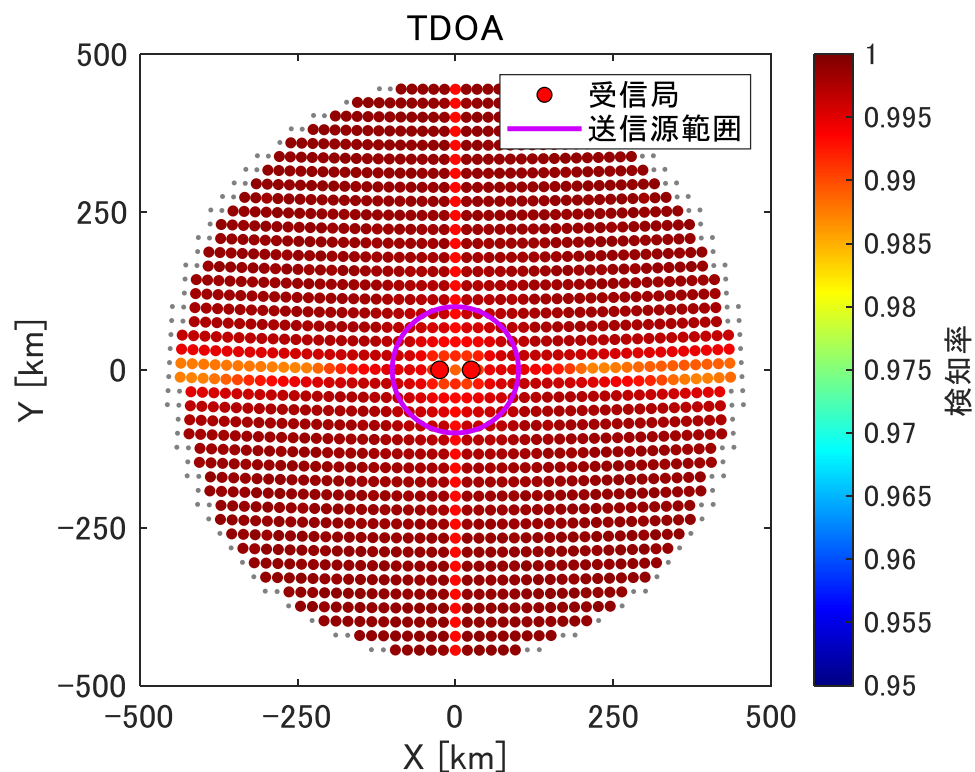


- 大部分の組み合わせで高い検知率 (0.95以上)



- $N_t \times N_a$ の組み合わせの分布
- 見通し内の平均で
平均検知率 = 0.998
- 提案法は高い検知率

■ 同じ結果を別の形で可視化（検知率の空間分布）



■ 各覆域点に対して
送信点にわたる平均

■ 全体的に0.98以上



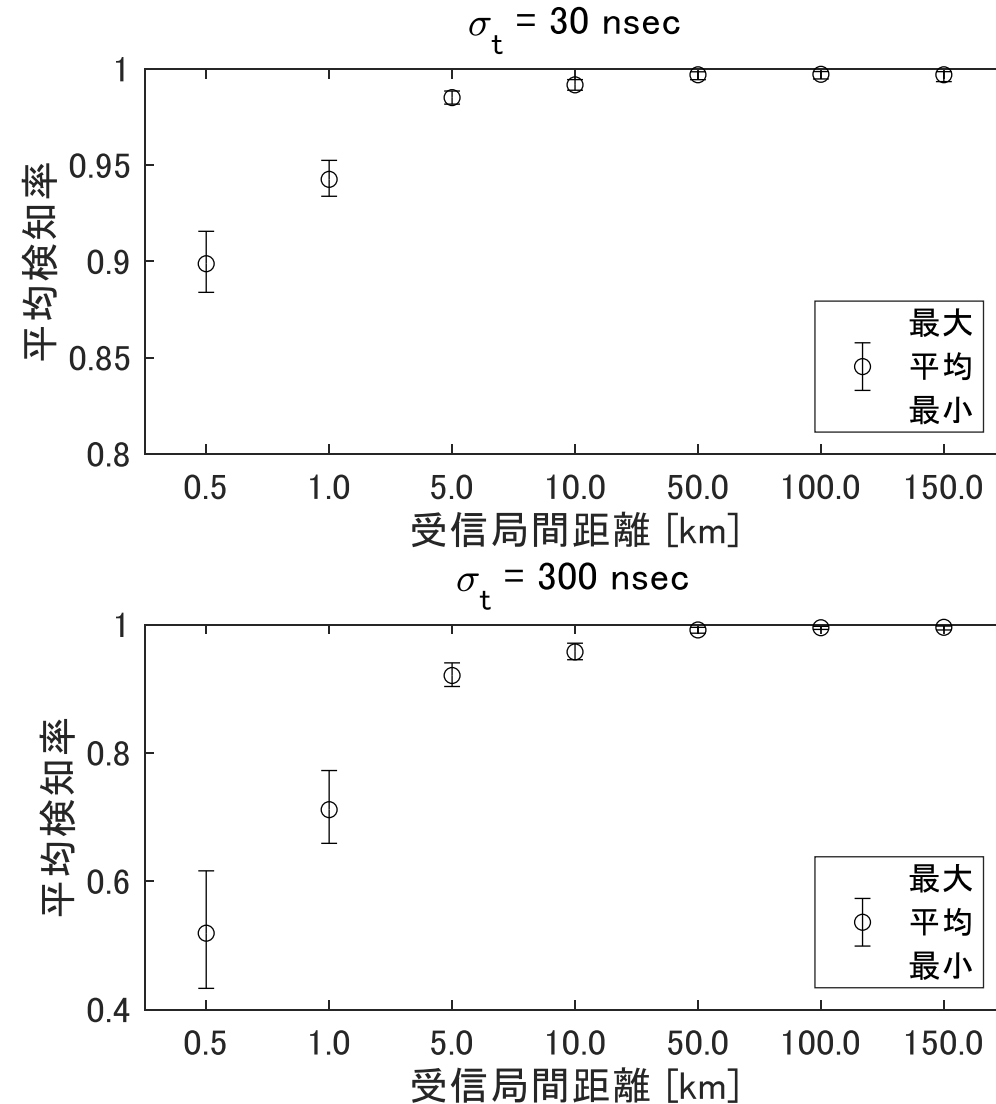
- パラメータを変化させて平均検知率の傾向を分析

項目	値
測定精度	30 nsec, 300 nsec
受信局間の距離	0.5 km, 1.0 km, 5.0 km 10.0 km, 50.0 km, 100.0 km, 150.0 km
所望の誤報率	0.05, 0.01, 0.005, 0.001
高度	5,000 ft, 10,000 ft, 20,000 ft, 30,000 ft, 40,000 ft
送信源の範囲	10 km, 30 km, 100 km

- 総計 $2 \times 7 \times 4 \times 5 \times 3 = 840$ パターン



■ 受信局間距離と測定精度が性能に強く影響する結果となった



- 全840パターンを距離と精度でグループ化
→ 各グループの統計値を図示
- 距離と精度で変化
→ 特に両方悪いと性能が低下
- バーの幅はその他要因の振れ幅
(誤報率・高度・送信源範囲)
→ 相対的には小さい



- ADS-Bの脆弱性対策としてTDOAを用いた位置検証がある
- 平均検知率を概算するシステム設計法を提案した
- 受信局間距離と測定精度が重要だと明らかにした

- 謝辞
 - 実験機材設置・利用等、研究に協力を頂いている関係各位に感謝申し上げます