

平成26年度(第14回)研究発表会

WAMにおける性能改善方式の評価

独立行政法人 電子航法研究所 監視通信領域

○島田 浩樹*, 宮崎 裕己, 古賀 禎, 松永 圭左, 角張 泰之,
本田 純一, 二瓶 子郎 (* 現 国土交通省 航空局)

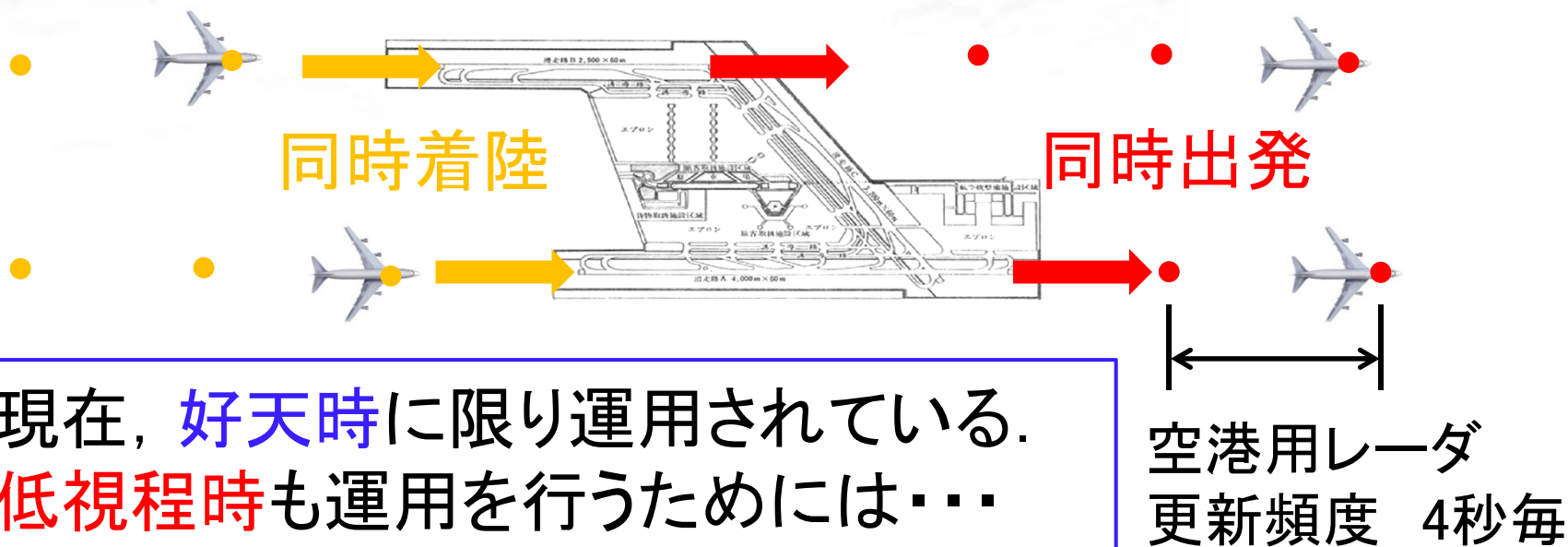
発表内容

- 研究の背景とWAMの概要
- WAMの性能改善方法
- WAM実験装置の概要
- 評価
- まとめ

研究の背景とWAMの概要

成田国際空港 同時着陸／同時出発方式

年間22万回 ⇒ 30万回 への空港容量拡大



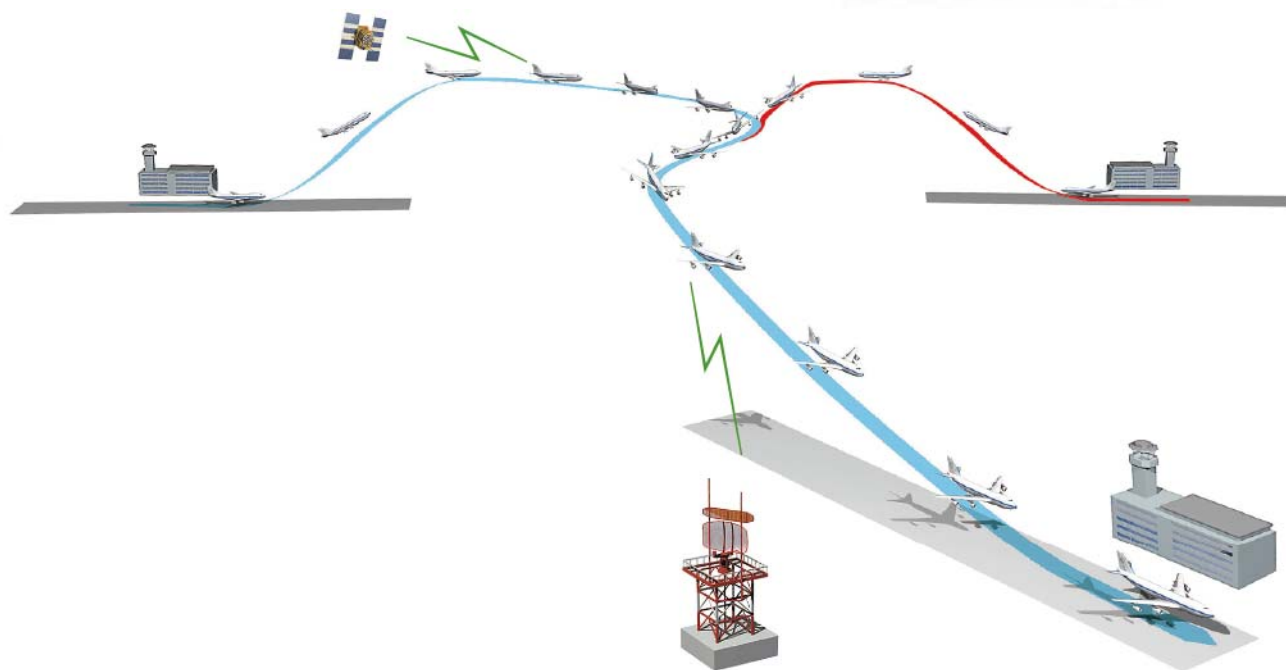
現在、**好天時**に限り運用されている。
低視程時も運用を行うためには・・・

高精度かつ高頻度な航空機監視が必要！

研究の背景とWAMの概要

軌道ベース運用 (TBO: Trajectory Based Operation)

時間管理を導入した4次元軌道の概念図



シームレスかつ高性能な航空機監視が必要！

研究の背景とWAMの概要

広域マルチラテレーション (WAM: Wide Area Multilateration)

	レーダー(SSR)	WAM
更新頻度	4秒(空港用) 10秒(航空路)	1秒平均
覆域	固定(地形に影響)	柔軟に設計可
ブラインド	近傍, 空中線直上, 山岳等の後方など	基本的になし

😊 高精度かつ高頻度, シームレスな監視が実現できる!

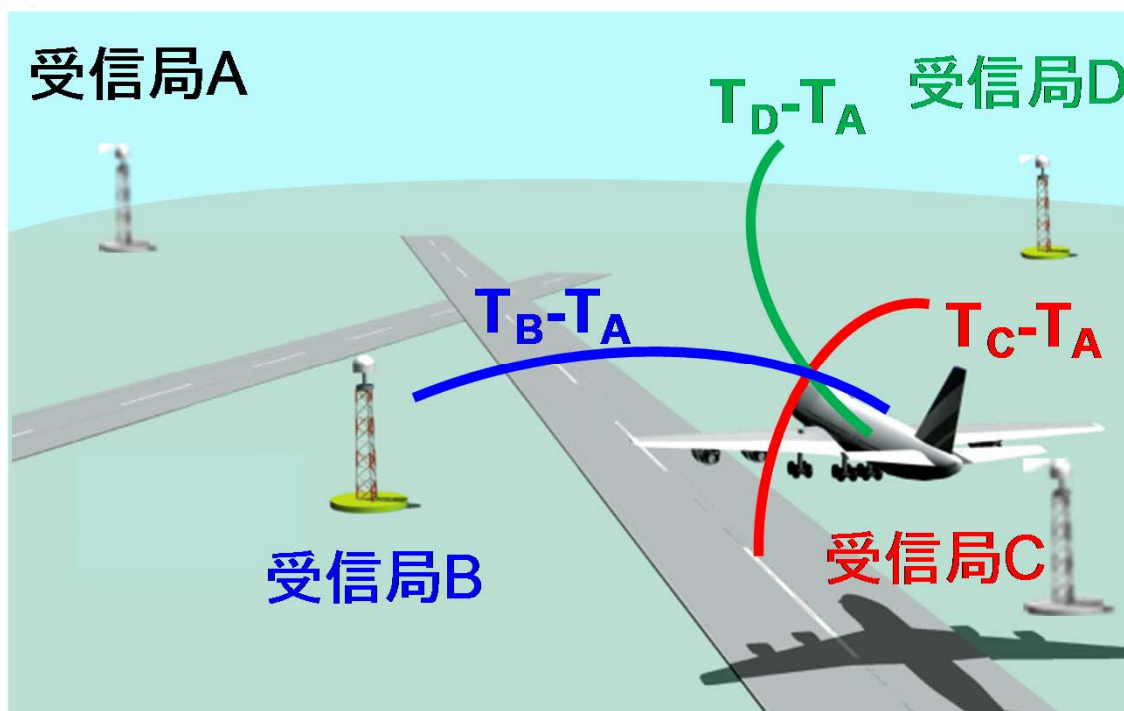
😊 将来の軌道ベース運用(TBO)への活用が期待できる!

WAMによる航空機監視が要望されている!

研究の背景とWAMの概要

測位原理 – TDOA測位 (**TDOA**: Time Difference Of Arrival)

- 受信局は航空機(トランスポンダ)が送信する信号を検出.
- 各受信局の到達時間差で求まる双曲面同士との交点を算出.



4局以上の受信局で信号検出することが必要!

研究の背景とWAMの概要

航空機(トランスポンダ)が送信する信号形式

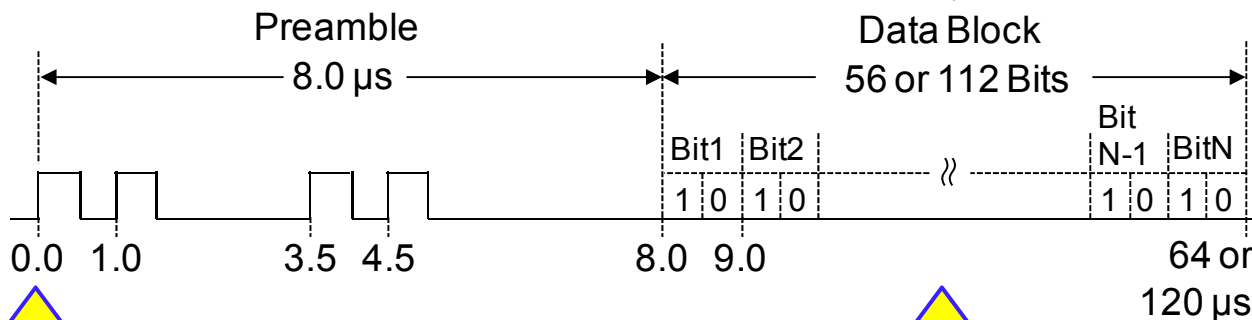
SSRモードS応答・モードSスキッタ信号(SSRモードS信号形式)

SSRモードS応答, 航空機衝突防止装置(ACAS) 56bit

フォーマット 番号	各種メッセージ (高度情報等)	航空機 アドレス
--------------	--------------------	-------------

SSRモードS応答, 拡張スキッタ(ADS-B) 112bit

フォーマット 番号	各種メッセージ (位置情報, 高度情報, 動態情報等)	航空機 アドレス
--------------	--------------------------------	-------------



到達時刻
を測定

データブロックを解読

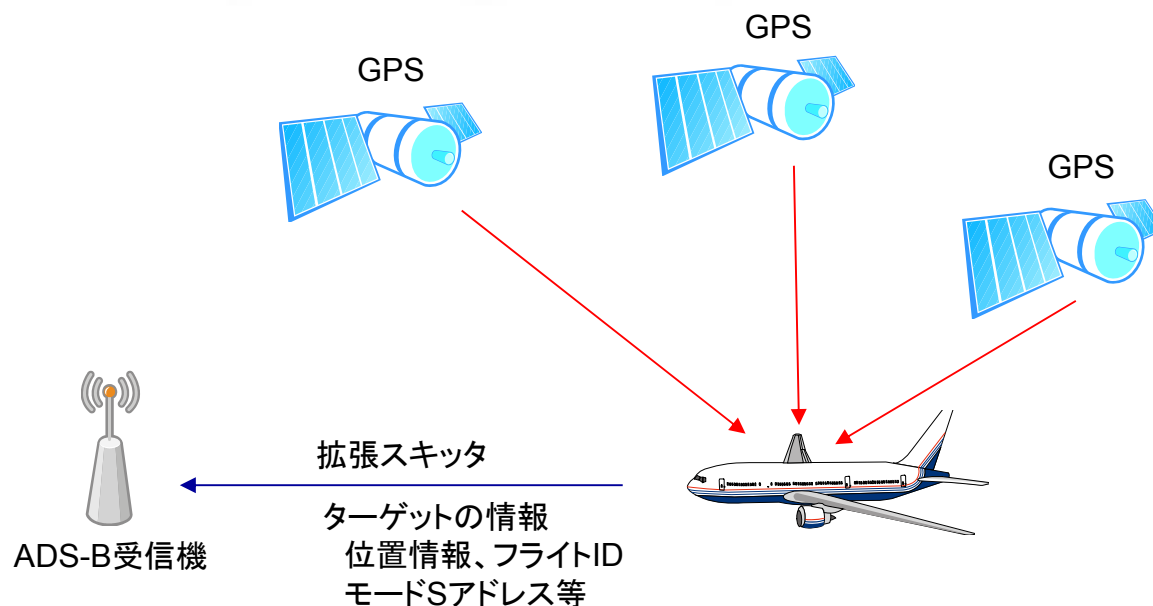
研究の背景とWAMの概要

放送型自動位置情報伝送・監視機能

(ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)

SSRモードSと同一の信号形式・拡張スキッタ信号を使用.

ADS-Bにおいては, トランスポンダに追加装備を必要とする.



WAMは、**ADS-B受信機**として利用できる！

研究の背景とWAMの概要

WAM監視技術の確立を目的として、試作・評価を行う。

これまでの実施内容

- ✓ WAM実験装置を試作
- ✓ 羽田空港周辺に受信局を設置。
- ✓ 基本(4局), 拡張(8局)の性能評価を実施。
評価の結果, 遠方での性能低下が確認された。

▶ 送受信局を構成に追加

積極的に質問を行い, 測位や高度情報を取得する。

質問機能を活用した測位方式で,
遠方における性能改善を図る。

本発表で報告

発表内容

- 研究の背景とWAMの概要
- WAMの性能改善方法
- WAM実験装置の概要
- 評価
- まとめ

WAMの性能改善方法

WAM測位誤差 (TDOA測位)

$$\sigma_P = \sigma_d \times DOP$$

σ_P : WAM測位誤差

σ_d : 距離差 (TDOA) の測定誤差

- ・時刻検出のサンプリング周波数 (分解能) を上げる.
- ・受信局同士の時刻を正確に同期させる.

DOP : 精度劣化指数 (Dilution Of Precision)

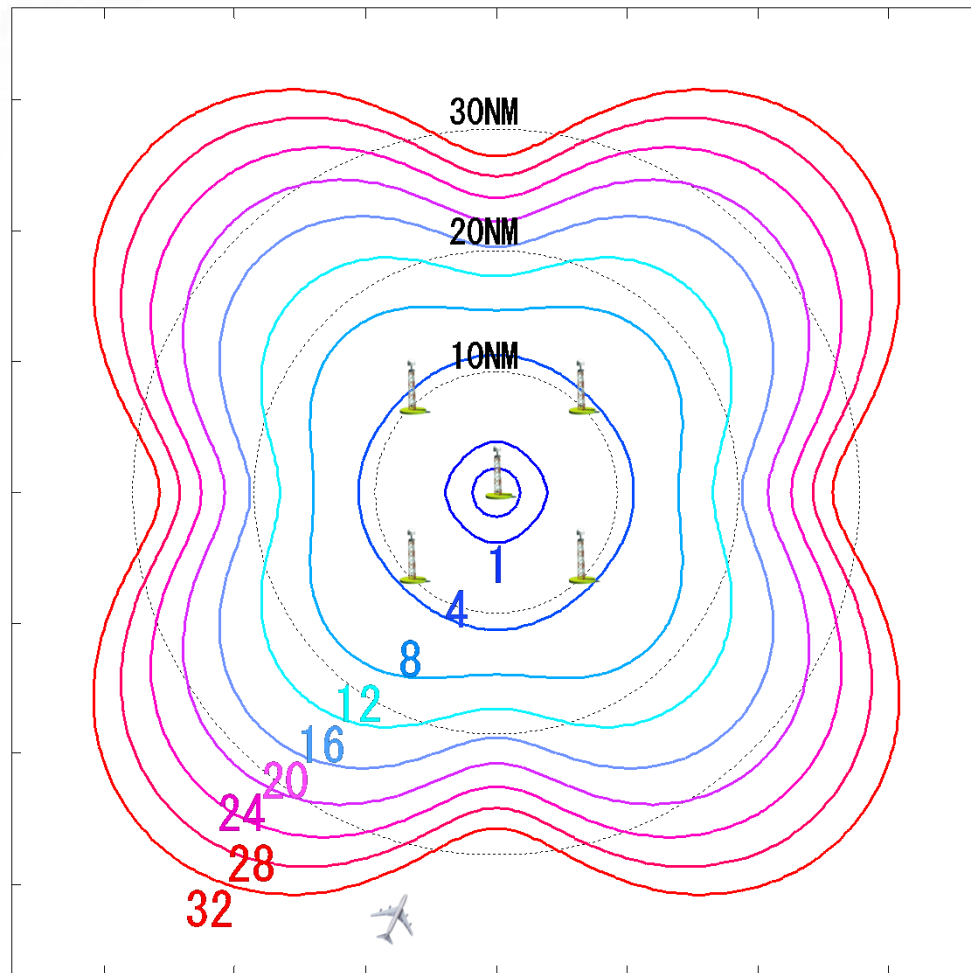
航空機と受信局の幾何学的位置関係の指標値

水平方向の監視 ⇒ **HDOP** (水平方向のDOP)

WAMの性能改善方法

航空機を広く囲むように受信局を**広範囲**に設置する。

⇒海上には、受信局は設置することは困難である。



受信局



HDOP分布

(高度10,000feet)

※数値:HDOP値



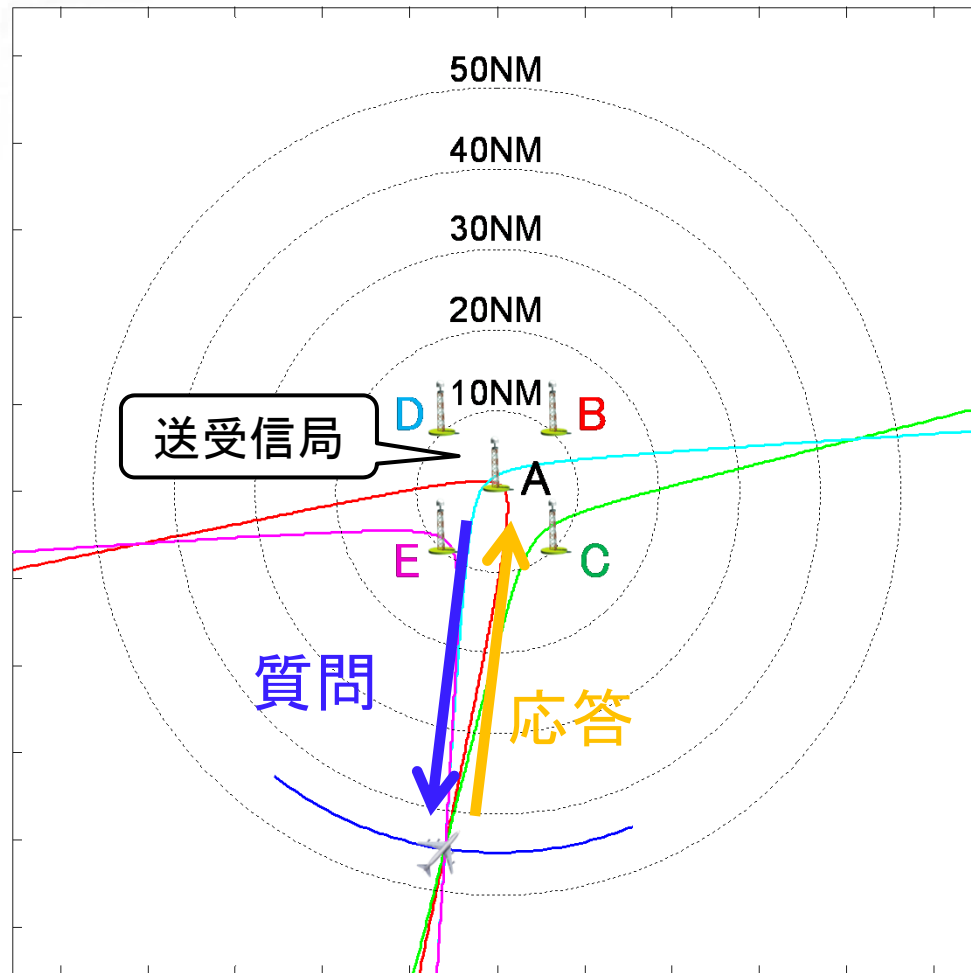
Range Mark

(10NM毎)

WAMの性能改善方法

Ranging測位のイメージ図

(TDOAによる双曲線+送受信局による測定距離の真円)



-  送受信局 A
受信局 B~E
-  TDOA B-A 双曲線
-  TDOA C-A 双曲線
-  TDOA D-A 双曲線
-  TDOA E-A 双曲線
-  測定距離による真円
-  目標の測位位置
-  Range Mark
(10NM毎)

WAMの性能改善方法

送受信局を中心とした測定距離

質問信号の送信時刻: t_{int}

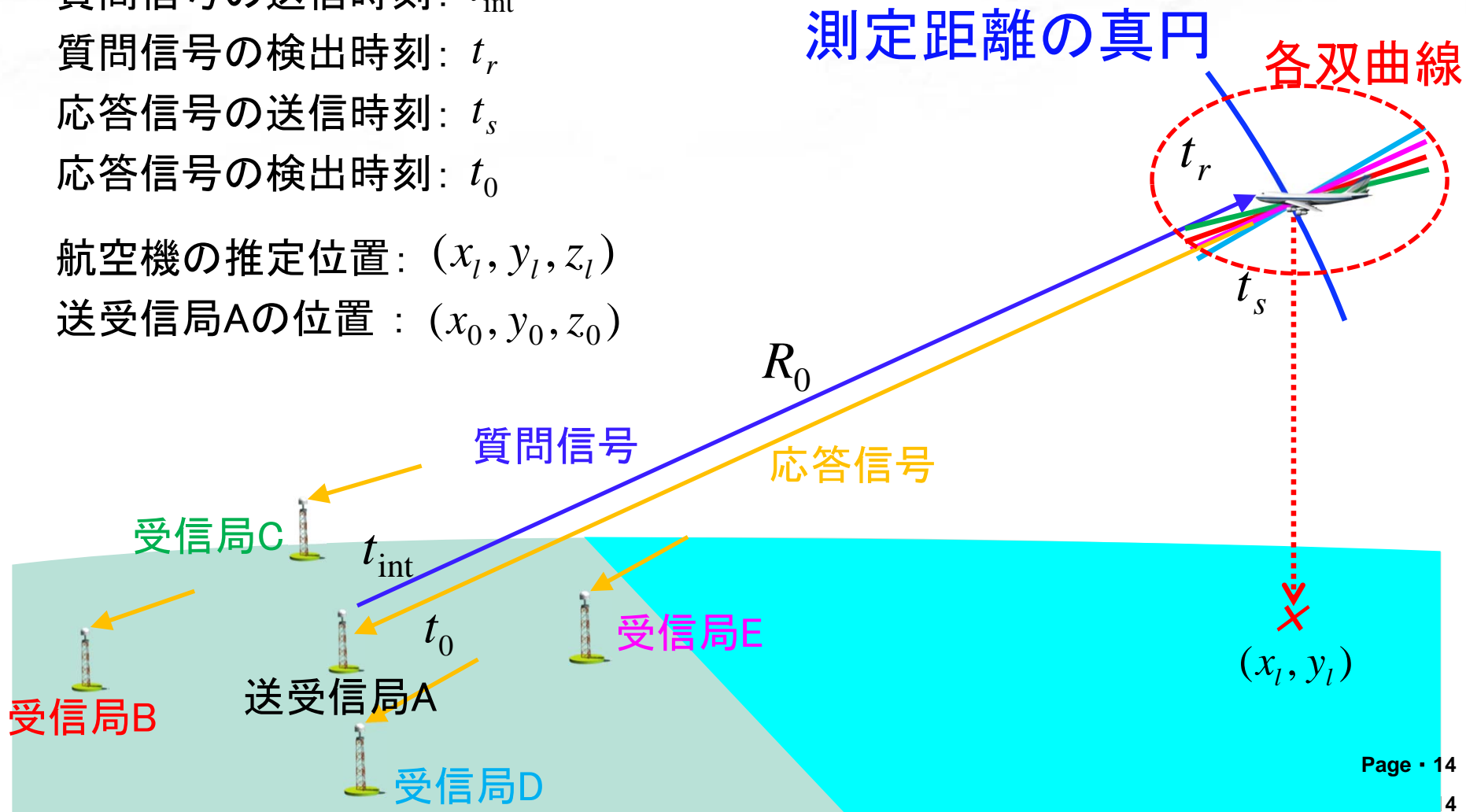
質問信号の検出時刻: t_r

応答信号の送信時刻: t_s

応答信号の検出時刻: t_0

航空機の推定位置: (x_l, y_l, z_l)

送受信局Aの位置: $(x_0, y__0, z_0)$



WAMの性能改善方法

測定距離の計算式

$$R_0 + \underline{v_{\text{int}}} = f_0(x_l, y_l, z_l) + \underline{v_{\text{int}}} = \frac{c\{t_0 - t_{\text{int}} - \underline{(t_s - t_r)}\}}{2}$$

ここで, $f_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$

送受信局の距離の測定誤差 : v_{int}

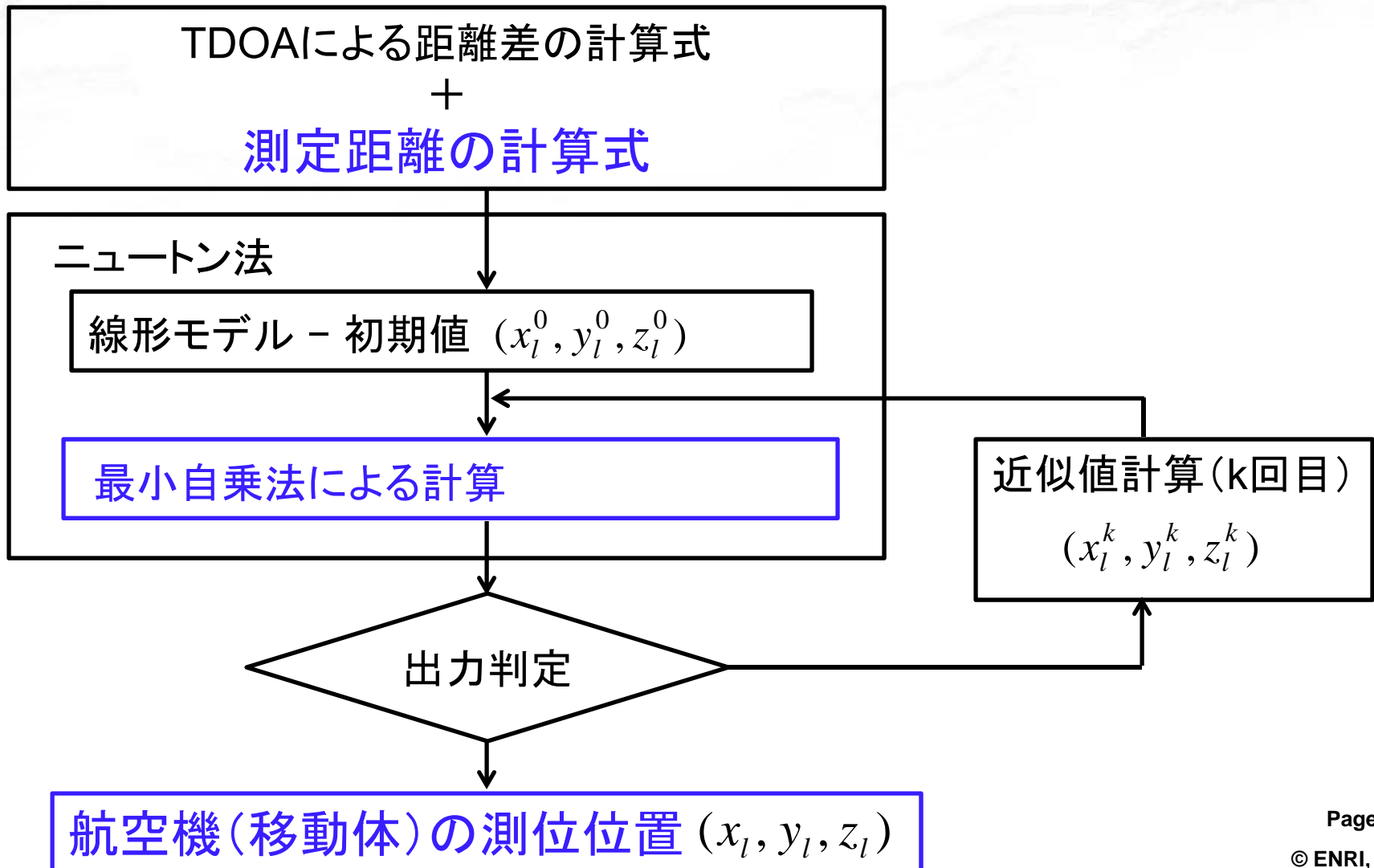
トランスポンダ内の処理遅延時間: $t_s - t_r = 132.75 \times 10^{-6}$

※ ICAO規定で132.75(許容値: ±0.25) μ秒と定義.

※ ICAO規定: ICAO Annex10 VolumeIV

WAMの性能改善方法

Ranging測位計算方法

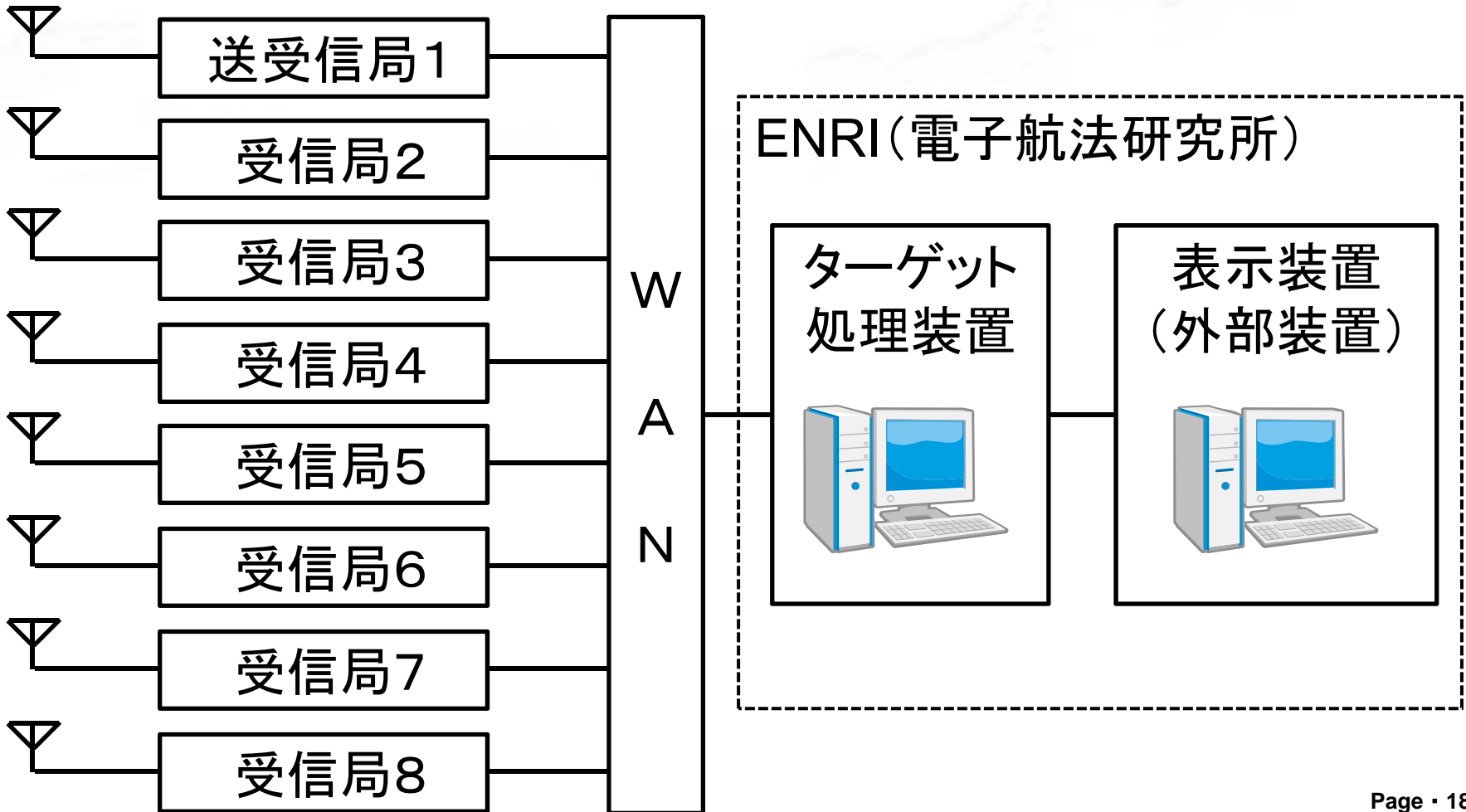


発表内容

- 研究の背景とWAMの概要
- WAMの性能改善方法
- WAM実験装置の概要
- 評価
- まとめ

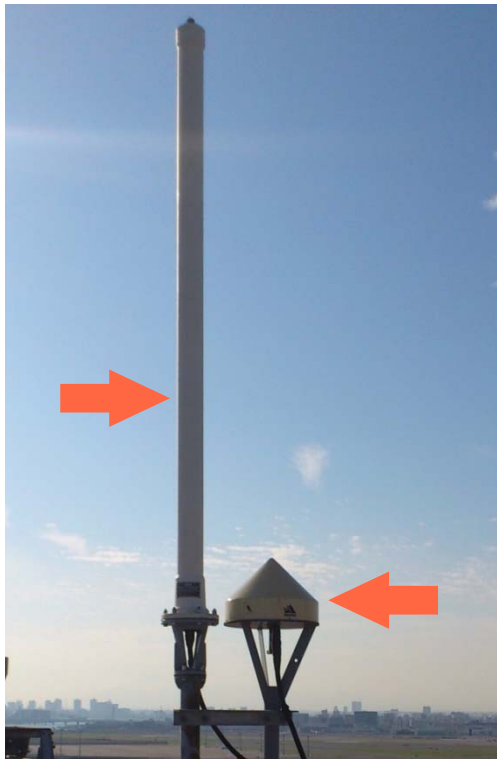
WAM実験装置の概要

装置の構成



WAM実験装置の概要

各装置の外観



(左)送・受信アンテナ
(右)GPSアンテナ



送受信局1



受信局 2~8



ターゲット処理装置

WAM実験装置の概要

各装置の機能概要

□ 受信局

信号検出時刻を測定 ⇒ 2ナノ秒サンプリング分解能
データブロック部の解読

□ 送受信局

SSR質問信号を送信

質問信号と応答信号の関連付け

□ ターゲット処理装置

TDOA測位・Ranging測位

送受信局への質問制御

追尾処理

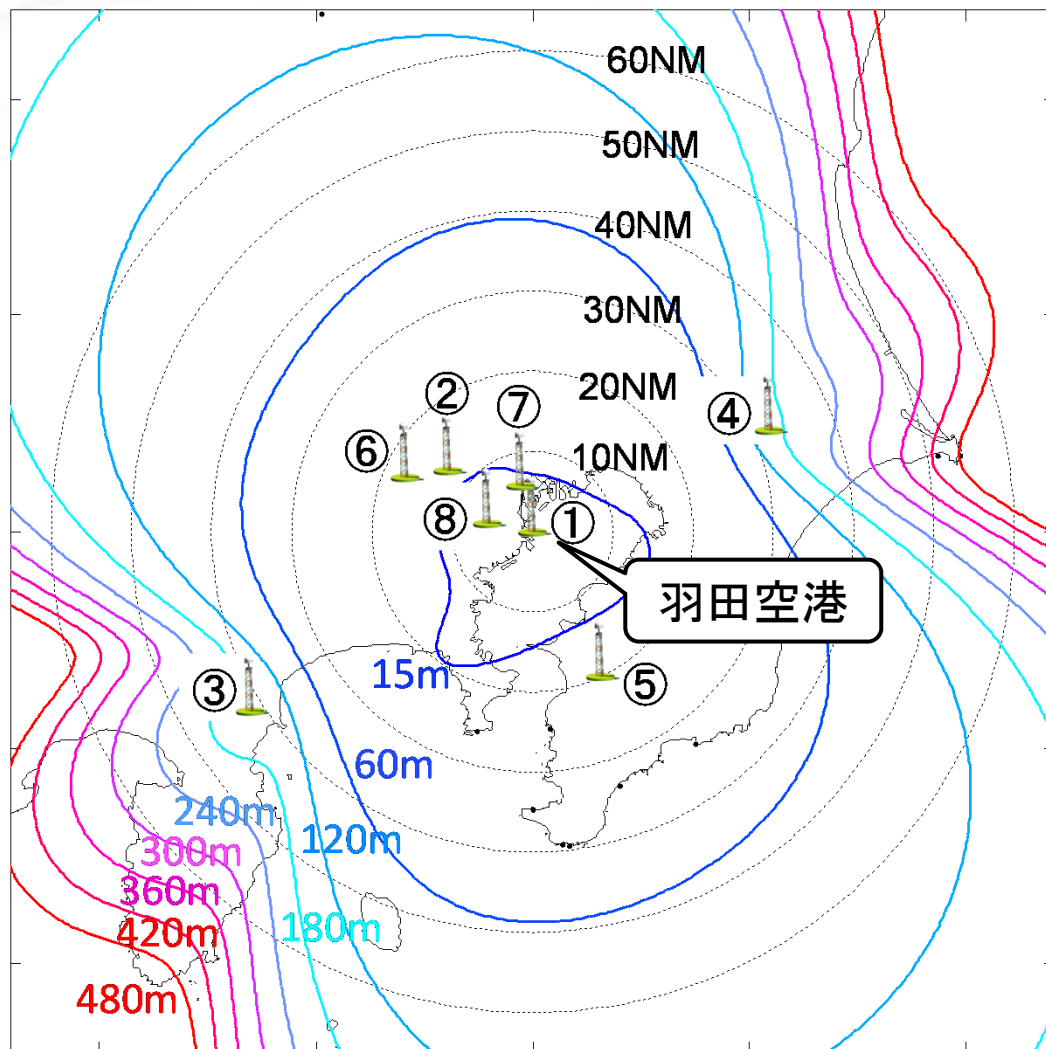
GPSコモンビュー時刻同期制御

一般的には
10ナノ秒サンプリング

GPS同期方式と比べて、
2~4倍の同期精度

WAM実験装置の概要

送受信局・受信局の配置



① 羽田 (送受信局)

② 調布

③ 箱根

④ 成田

⑤ 鹿野山

⑥ 府中 (NEC)

⑦ 田町 (NEC)

⑧ 玉川 (NEC)

— HDOP分布
(高度10,000feet)

※想定される測位誤差値

..... Range Mark
(10NM毎)

発表内容

- 研究の背景とWAMの概要
- WAMの性能改善方法
- WAM実験装置の概要
- 評価
- まとめ

評価

→ 評価項目

- (1) 水平方向の測位誤差(真位置にADS-B位置を利用)
- (2) 検出率

→ 評価方法

- ・質問信号の送信周期を1秒に設定.
- ・羽田空港からの距離区分毎に, TDOA測位および Ranging測位の比較を実施.

→ 性能要件

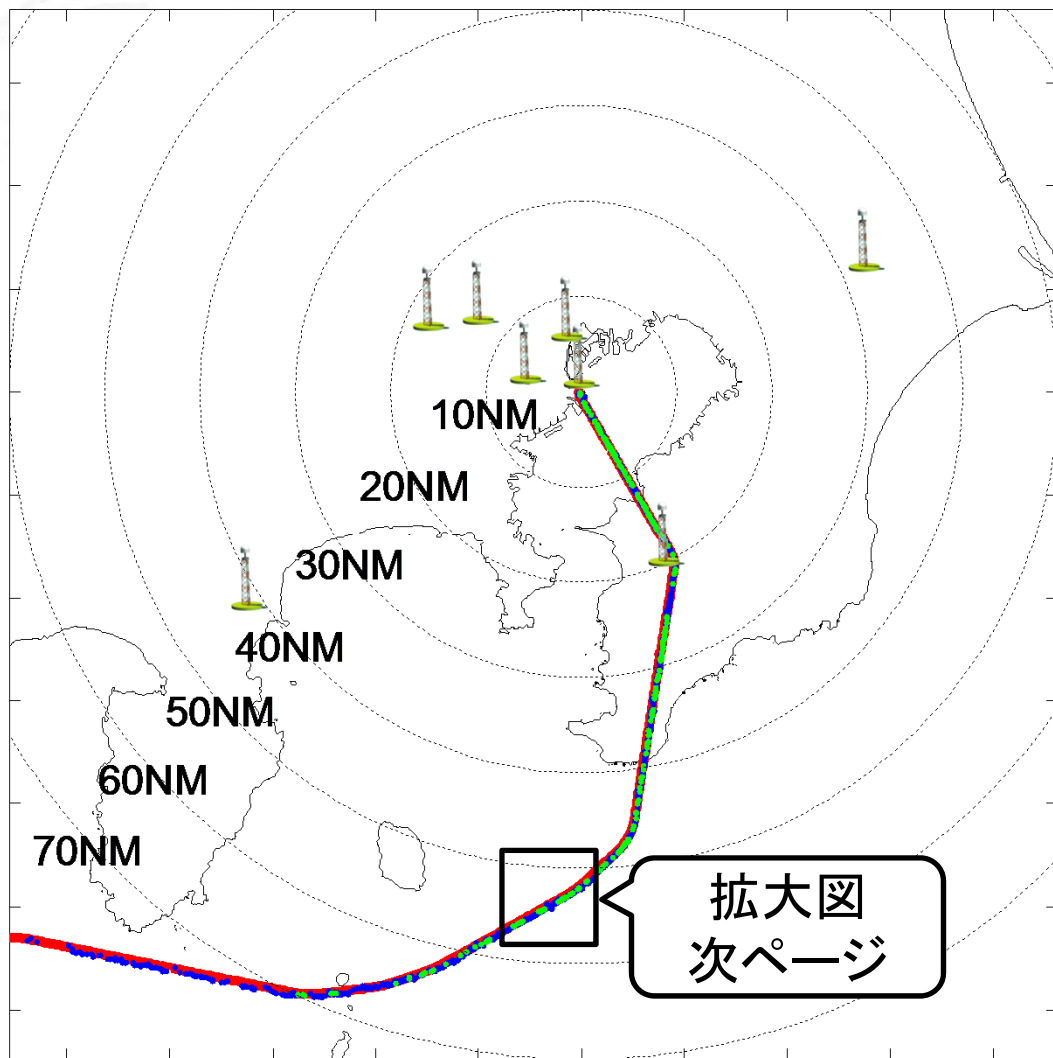
欧州が策定したWAM性能要件を基準

→ 評価対象航空機

エアライン機(ADS-B搭載機)

評価

羽田空港への到着機の航跡



— ADS-B航跡

● WAM航跡
(TDOA測位)

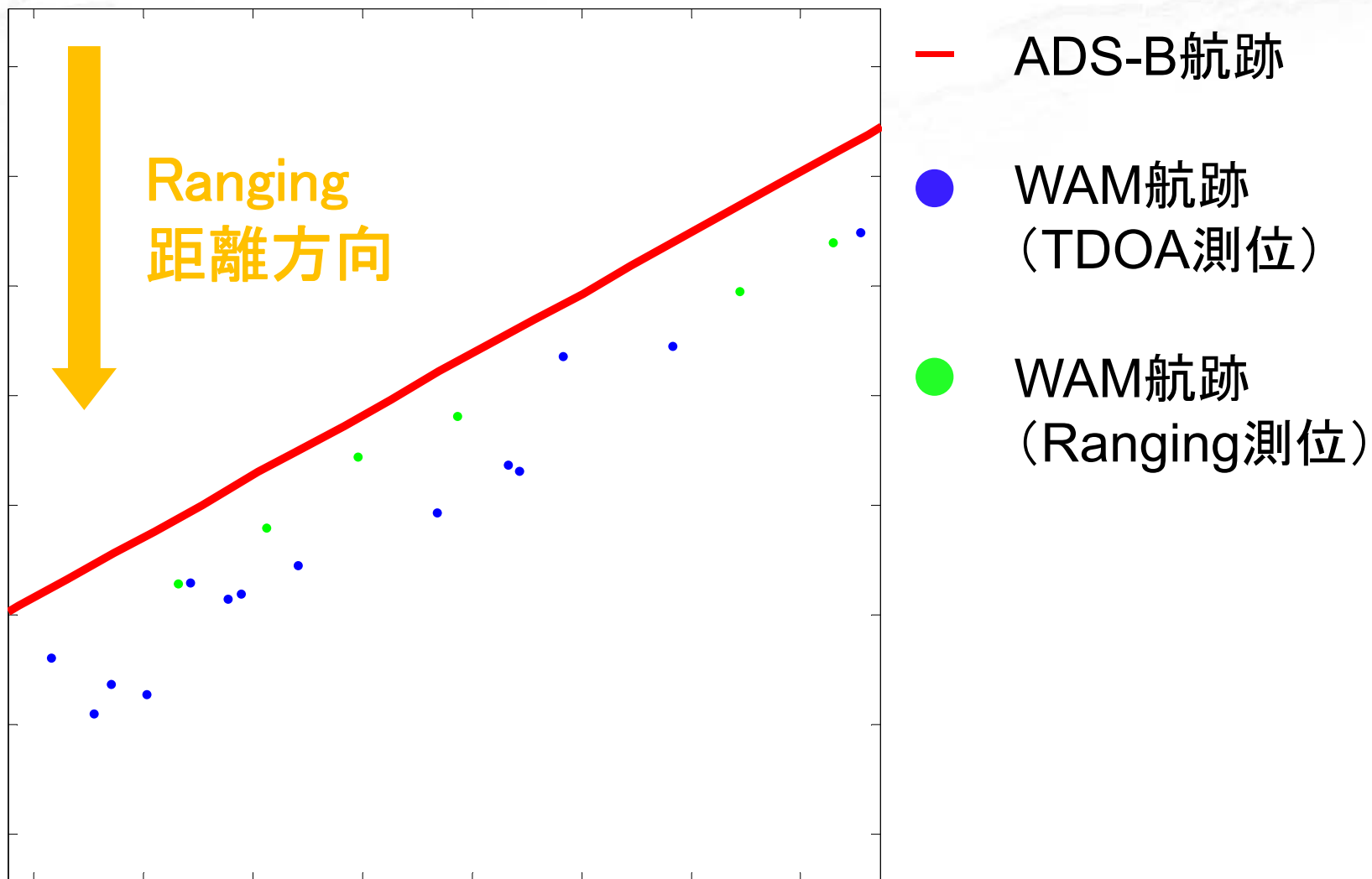
● WAM航跡
(Ranging測位)

..... Range Mark
(10NM毎)

🗼 送受信局・受信局

評価

羽田空港への到着機の航跡－55NM付近拡大図



評価

各測位方式における測位誤差(RMS)

距離	TDOA測位	Ranging測位	性能要件
2~10NM	36.6 m	28.7 m	空港用 (2~60NM) 150m(RMS)以下
10~20NM	58.1 m	58.8 m	
20~30NM	127.7 m	112.7 m	
30~40NM	183.1 m	113.8 m	航空路用 (60~70NM) 350m(RMS)以下
40~50NM	152.6 m	119.8 m	
50~60NM	248.6 m	109.8 m	
60~70NM	366.2 m	135.0 m	

Ranging測位は、遠方30~70NMの誤差は大きく減少
全ての距離区分において性能要件を満足した。

評価

各測位方式における検出率(5秒間隔)

距離	TDOA測位	Ranging測位	性能要件
2~10NM	100 %	75.0 %	97%以上
10~20NM	100 %	73.5 %	
20~30NM	100 %	61.5 %	
30~40NM	100 %	65.3 %	
40~50NM	100 %	83.3 %	
50~60NM	100 %	58.6 %	
60~70NM	100 %	42.4 %	

Ranging測位単体は、全ての距離区分において性能要件を満足しなかった。

評価

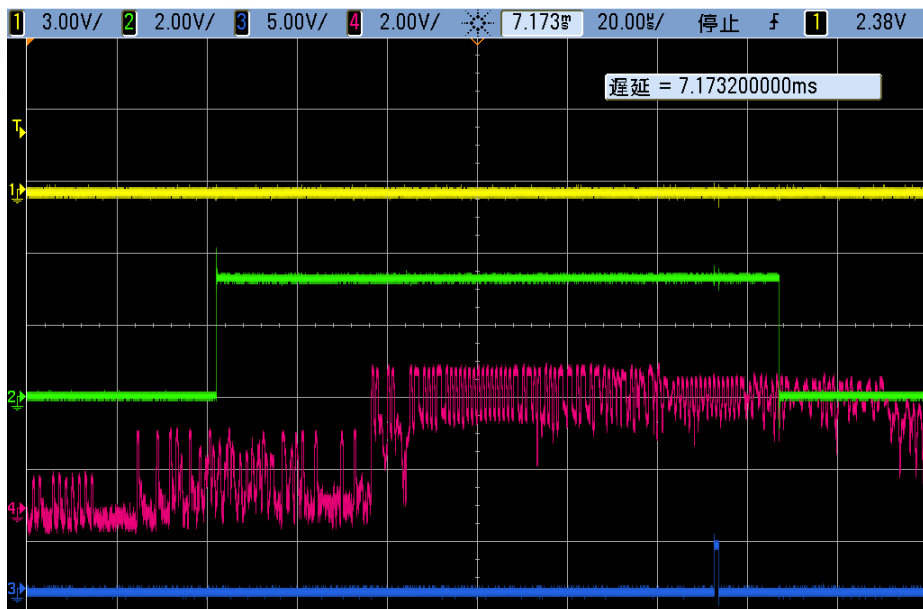
質問成功率（＝質問信号に対する応答信号の取得率）

距離	質問成功率
2～10NM	63.2 %
10～20NM	59.1 %
20～30NM	44.8 %
30～40NM	45.8 %
40～50NM	38.8 %
50～60NM	36.8 %
60～70NM	23.7 %

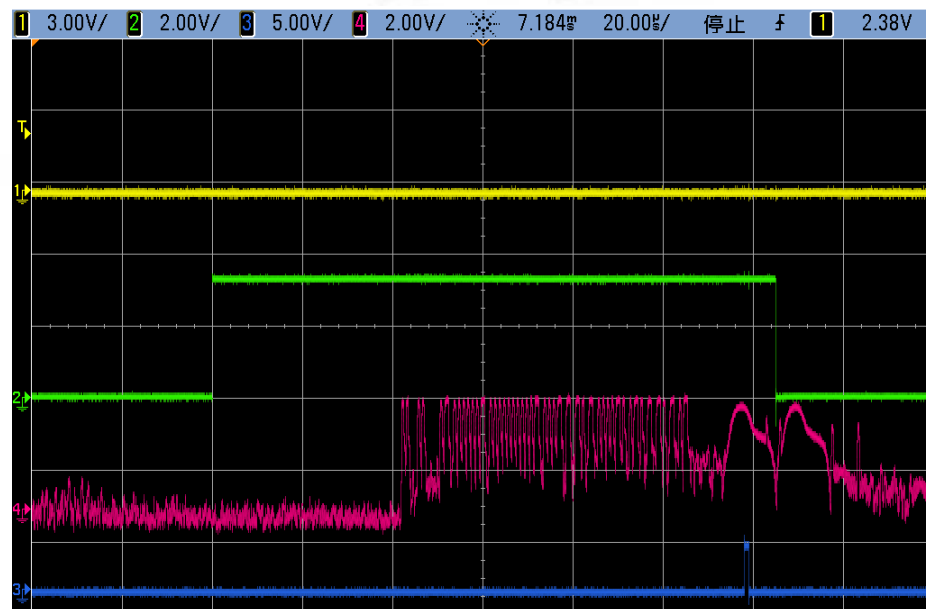
送受信局から遠方になるほど、質問成功率は減少。

評価

SSR応答信号同士の重畳



DME信号とSSR応答信号の重畳



全方向から信号が受信されるため、**信号重畳が発生**。

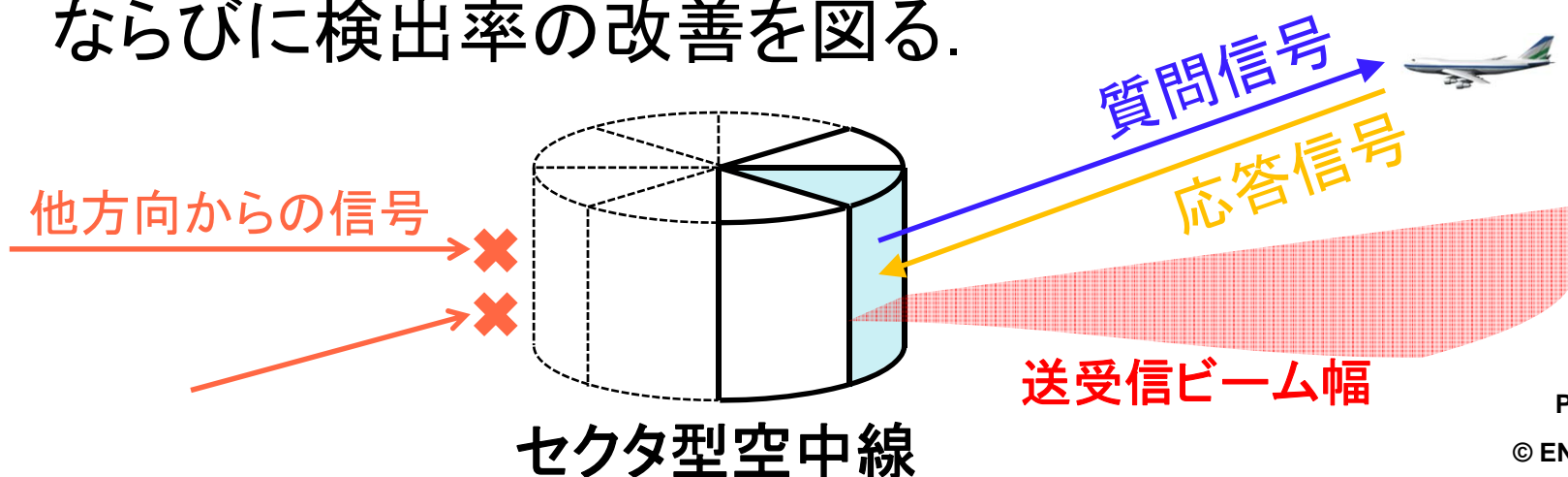
まとめ

✎ 本評価の結果

- Ranging測位は，遠方において測位誤差が減少し，**性能改善できることを確認した。**
- Ranging測位では，検出率が十分ではなかった。

➤ 今後の計画

送受信局に**セクタ型空中線**を使用し，質問成功率
ならびに検出率の改善を図る。



実験装置の設置・調整ならびに評価試験を実施するにあたり、多大なご協力いただきました関係各位に深く感謝の意を表します。

ご清聴ありがとうございました



評価(補足資料)

トランスポンダ内の処理遅延時間 ($t_s - t_r$) について

ICAO Annex10 Volume IV Fourth Edition July 2007
Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems

3.1.2.10.3.8 Reply delay and jitter

3.1.2.10.3.8.2 Reply delay and jitter for Mode S. For all input signal levels between MTL and -21 dBm, the leading edge of the first preamble pulse of the reply (3.1.2.2.5.1.1) shall occur **128 plus or minus 0.25 microsecond** after the **sync phase reversal** (3.1.2.1.5.2.2) of the received **P6**. The jitter of the reply delay shall not exceed 0.08 microsecond, peak (99.9 percentile).

$$t_s - t_r = 128 + 2.75 + 2.0 \\ = 132.75 \mu\text{秒}$$

※処理遅延の許容値
 $\pm 0.25 \mu\text{秒}$ は含まず。

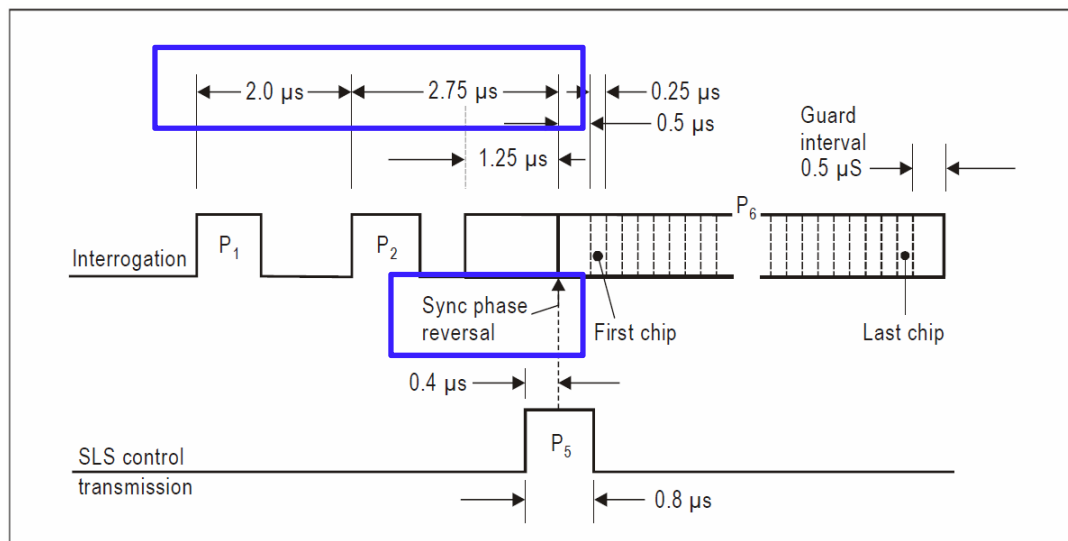


Figure 3-4. Mode S interrogation pulse sequence

評価(補足資料)

トランスポンダ内の処理遅延時間に移動する距離 R_v について

$\text{mach} = U(\text{流体の相対速度}) / a(\text{音速})$

気温15°C、1気圧(1,013hPa)の音速約340m/s

巡航速度が速い機体

- ・B777 0.84mach = 285.6m/s
- ・MD90 0.75mach = 255m/s
- ・B787 0.85mach = 289m/s
- ・A330-300 0.86mach = 292.4m/s

巡航速度を300m/sと仮定し、移動距離を計算すると、

$$R_v = 300 \times 132.75 \times 10^{-6} = 0.039825(m)$$

トランスポンダの処理遅延時間内に移動する距離は、微小であり Ranging測位計算では無視できる値とする。