



航空航法における衛星航法の利用と 電離圏の影響

斎藤 享、坂井 丈泰、松永 圭左、吉原 貴之

独立行政法人電子航法研究所

衛星航法

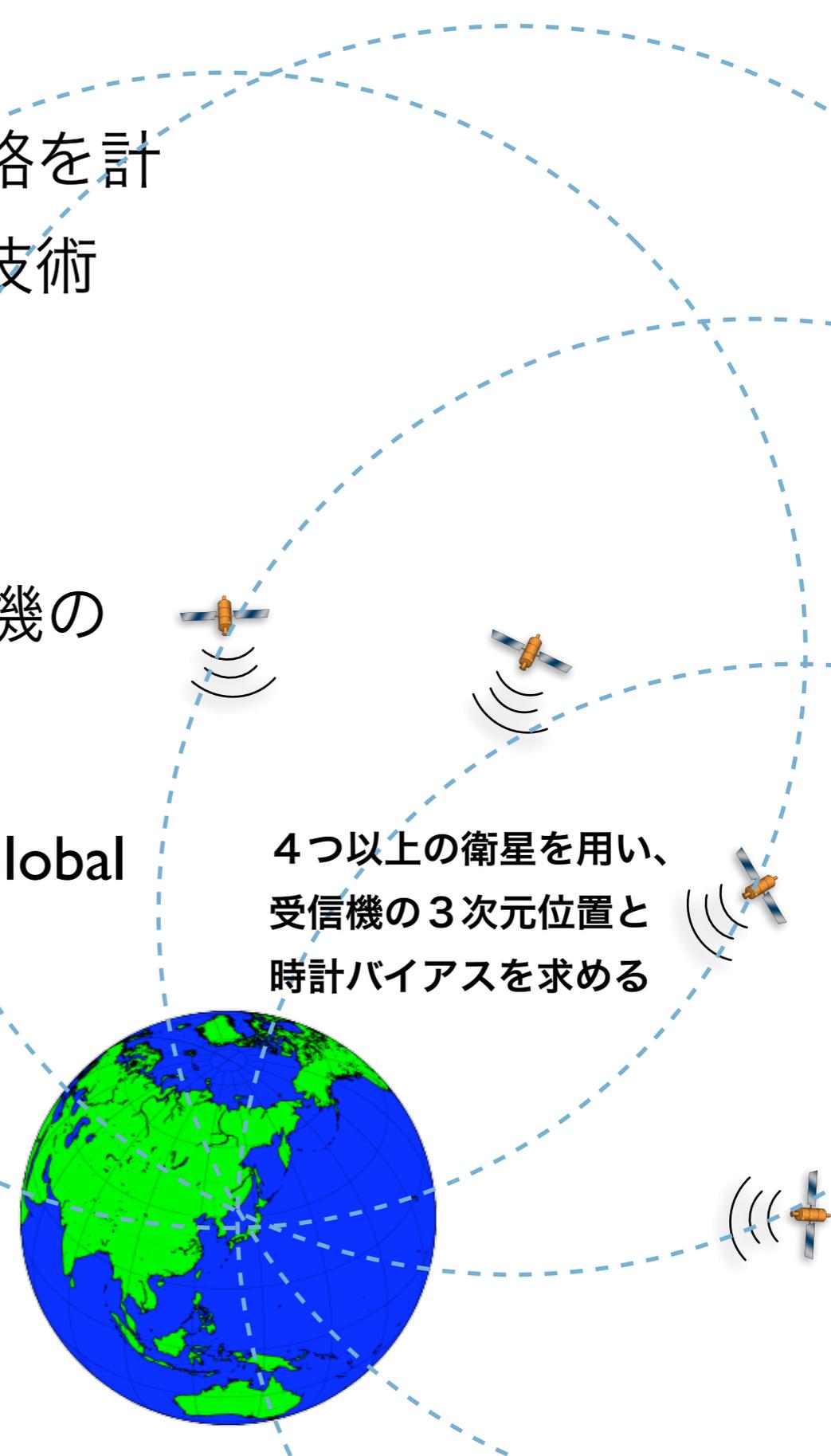
* 航法：ある地点からある地点までの航路を計画し、その航路を維持するための科学技術

* 衛星航法

- 無線航法の一つ
- 衛星と受信機の距離を測定し、受信機の正確な位置を求める

* 全世界的衛星航法システムシステム (Global Navigation Satellite System; GNSS)

- GPS (アメリカ)
- GLONASS (ロシア)
- GALILEO (欧州)
- COMPASS/BEIDOU (中国)





衛星航法と電離圏遅延

時計誤差

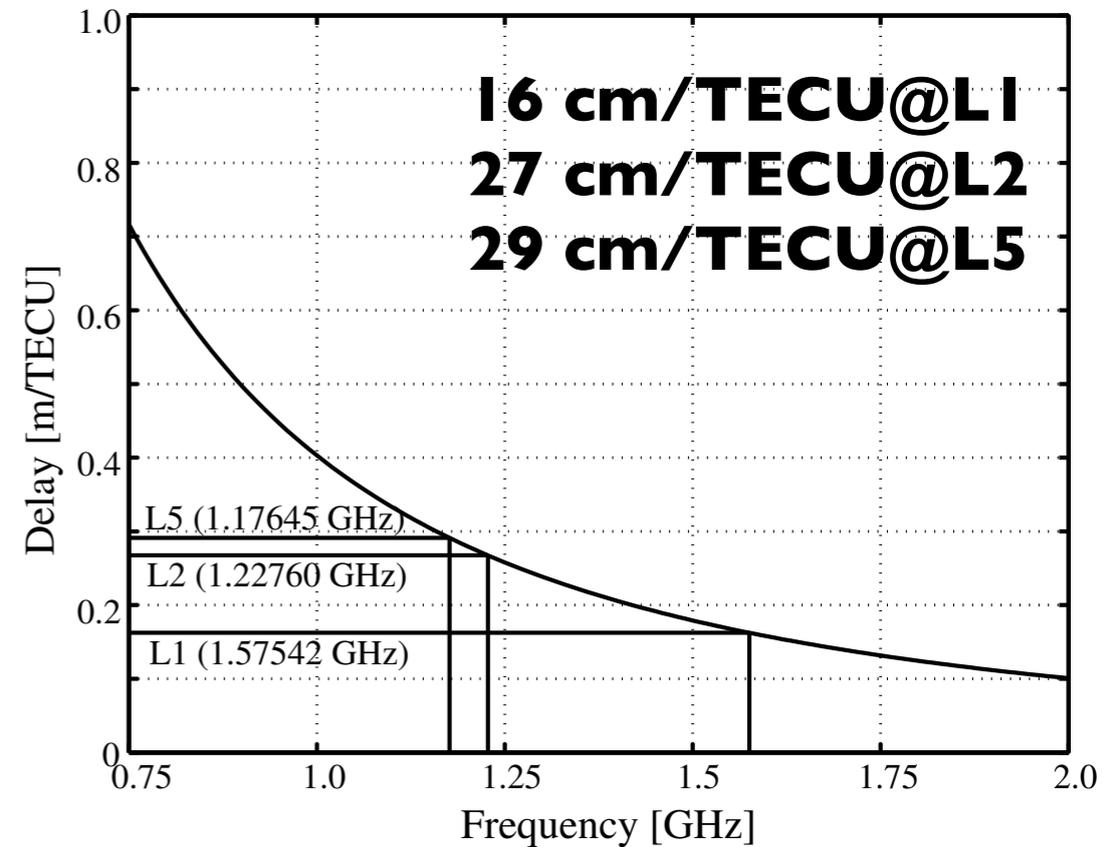
疑似距離 $\rho = r + c [\delta t_u - \delta t^s] + I_\rho + T_\rho + \epsilon_\rho$
 真距離 $\phi = \lambda^{-1} [r + I_\phi + T_\phi] + \frac{c}{\lambda} [\delta t_u - \delta t^s] + N + \epsilon_\phi$

電離圏 I_ρ I_ϕ 対流圏 T_ρ T_ϕ マルチパス、受信機ノイズ等 ϵ_ρ ϵ_ϕ

時計誤差 $\delta t_u - \delta t^s$ 整数不定性 N

$$I_\rho = -I_\phi = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}$$

- * 誤差のうち、電離圏によるものが最も大きい
- * 電離圏プラズマにより電波の伝搬速度が変化し、測距誤差を生じる
- * 距離の変化量は疑似距離と位相で符号が逆で同じ大きさ。全電子数に比例し、周波数の2乗に反比例



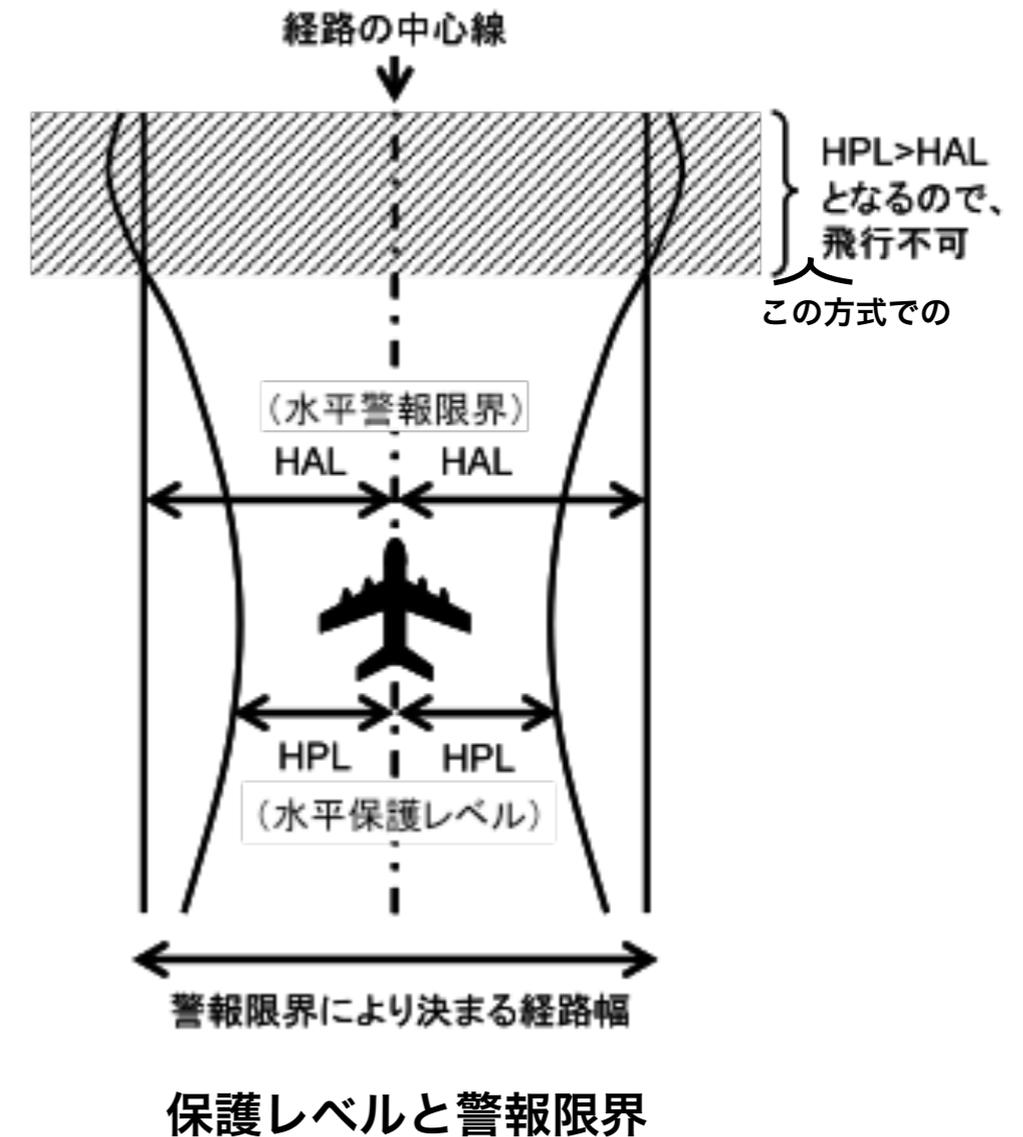
GPSにおける影響と対策

- * GPSの航法メッセージではKlobucherモデル（係数8個）を放送
- * 精密測量では2周波の搬送波位相を用いて電離圏遅延を除去
- * 航空航法では、1周波の疑似距離を主に用いる（搬送波位相は補助的に用いる）
 - リアルタイム性を重視
 - L2帯は国際的に保護されていない
- * 単独測位における補正：放送されるモデルパラメータを用い、薄殻モデルを用いて衛星仰角に応じた傾斜係数を乗じて補正
- * ディファレンシャル補正：位置が既知の基準局の観測を用いて補正

GPSの航空利用

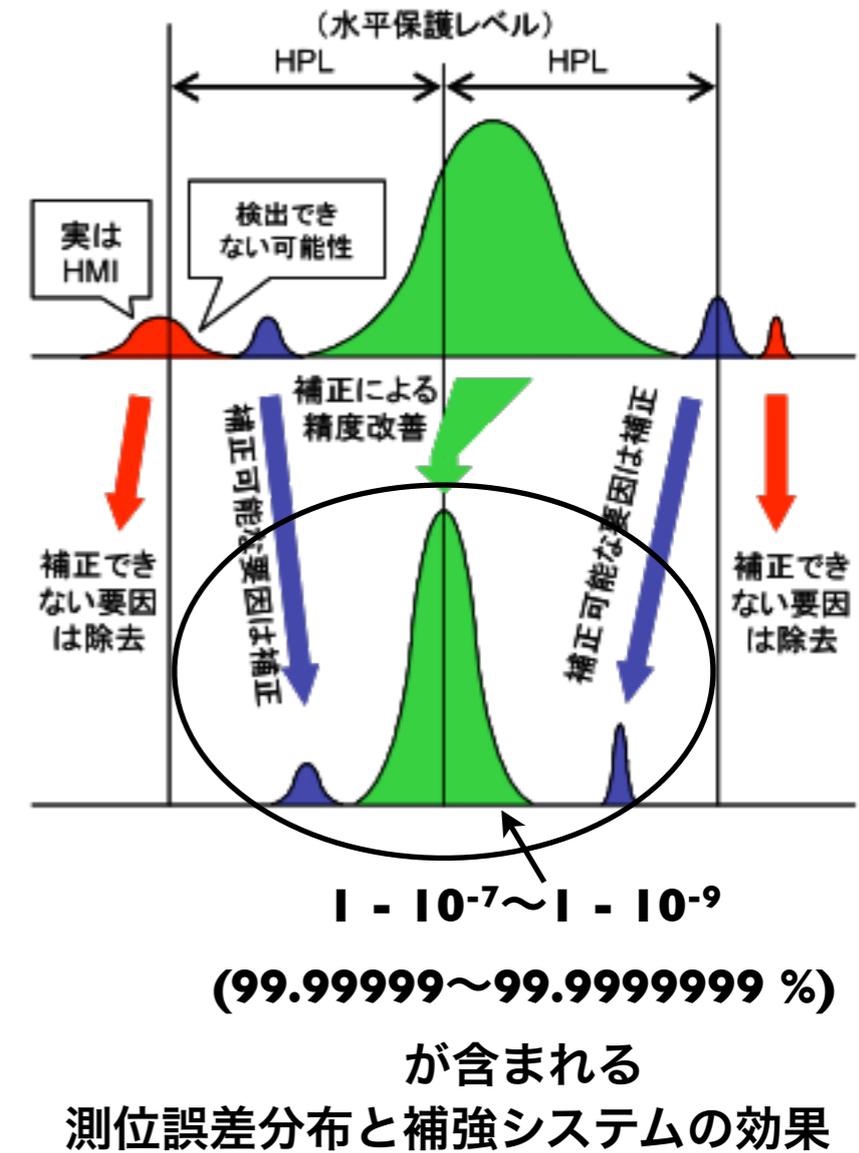
- * 精度だけでなく安全性（インテグリティ）を重視
 - インテグリティ：誤りが無いことを保証し、使用すべきではない場合に迅速に警報を発すること
- * 国際民間航空機関（ICAO）において国際標準を策定
- * GPS単独では所要のインテグリティを満足できないため、補強システムが必要
 - SBAS (Satellite-based Augmentation System)：衛星、広域
 - GBAS (Ground-based Augmentation System)：狭域、地上
 - ABAS (Aircraft-based Augmentation System)：航空機単独

- * インテグリティが確保される範囲を保護レベル (Protection Level; PL) という
- * 保護レベルは、実際の誤差がそれ以上になる確率が $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 以下となるように保証
- * 飛行フェーズごとに設定されている 警報限界 (Alert Limit; AL) を 保護レベルが超えない場合に利用可能

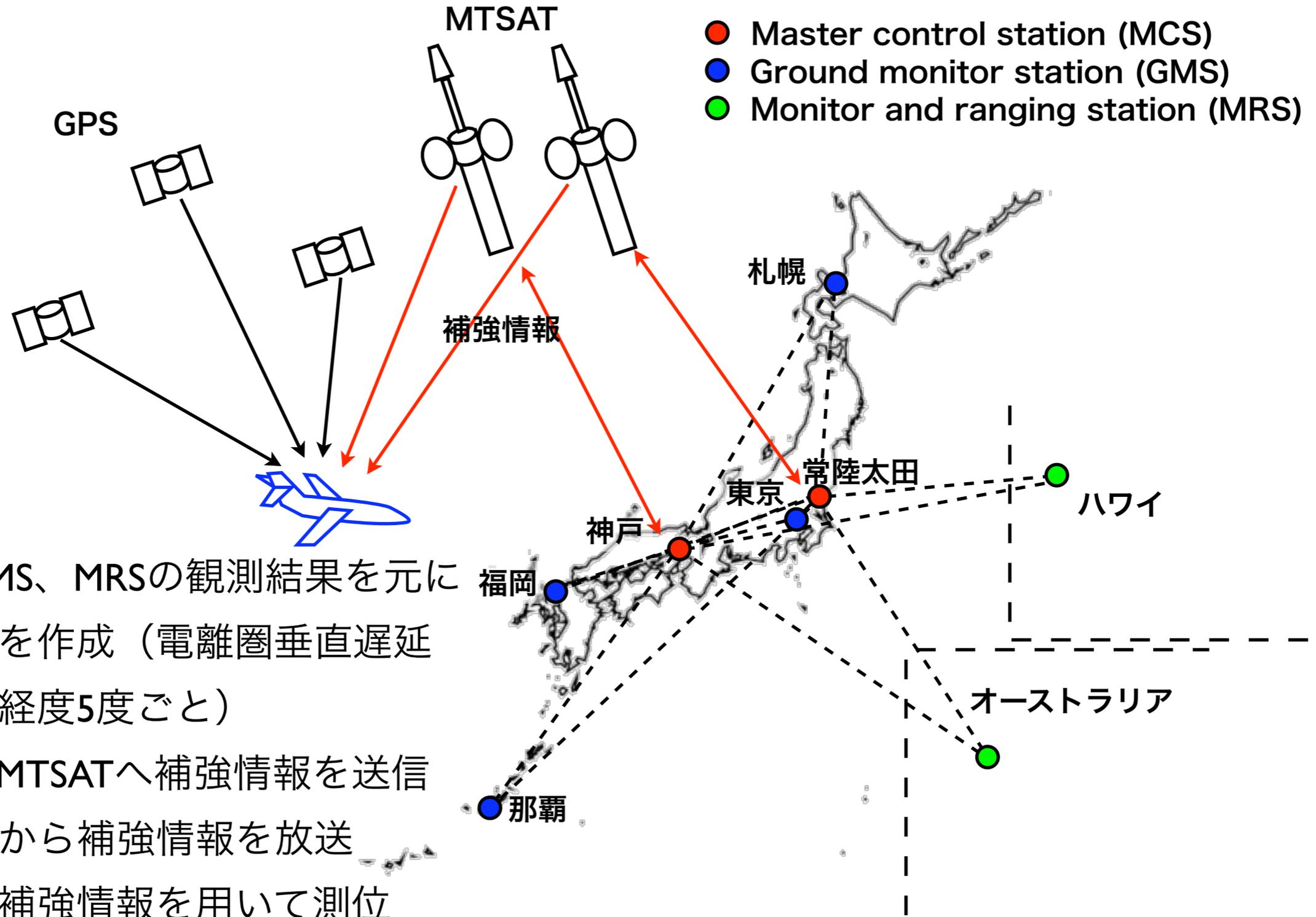


インテグリティに対する脅威と対策

- * 計算された保護レベルが警報限界を超えないのに、実際の誤差が警報限界を超えることを Hazardous Misleading Information (HMI) という
- * HMIとなり得る脅威をモニタ等により確実に排除（インテグリティの確保）
- * 補正により保護レベルを縮小→PL > ALとなり利用できない場合を減らす（可用性（アベイラビリティ）の向上）
- * 実用システムとして成立するためには、安全性（インテグリティ）と可用性（アベイラビリティ）の両立が必要



実例：SBAS (MSAS)

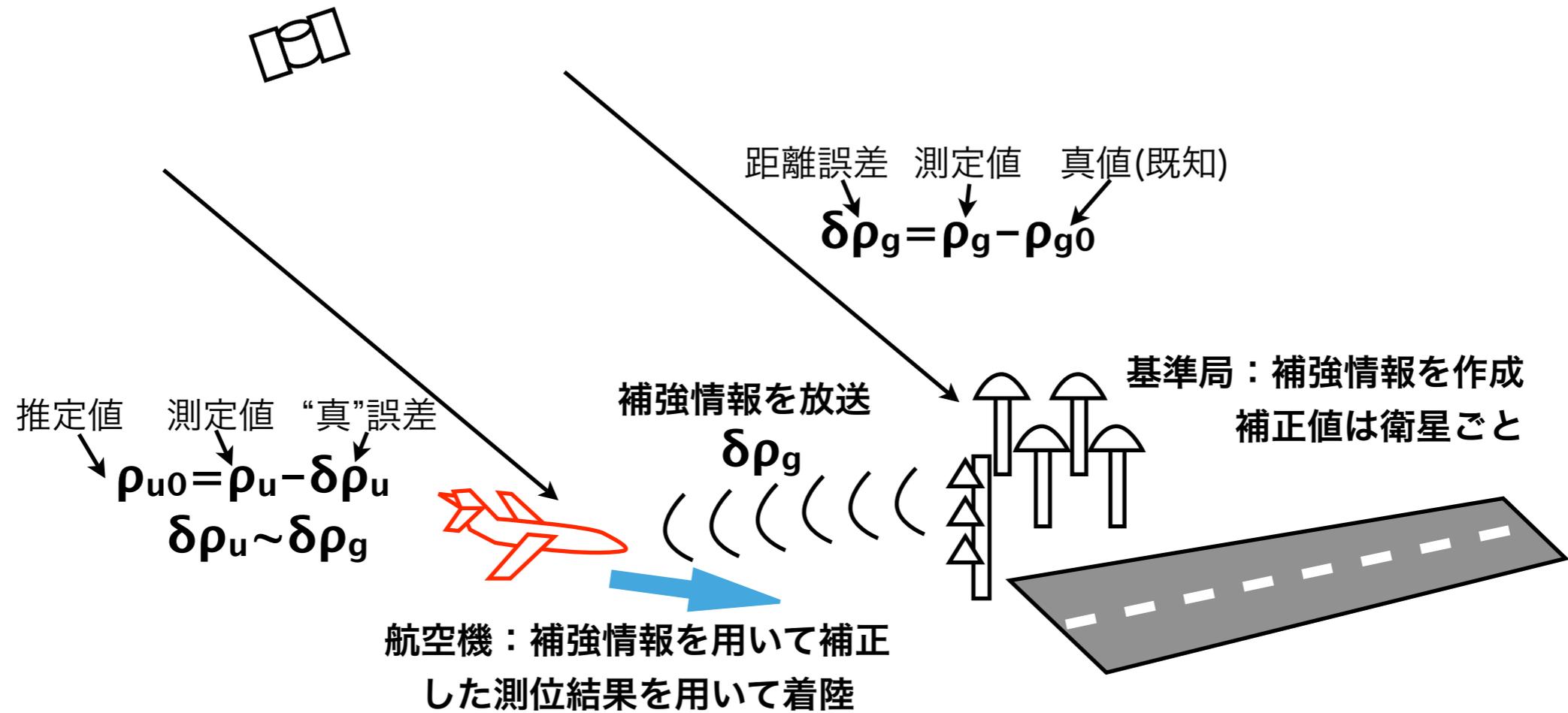


- * MCS、GMS、MRSの観測結果を元に補強情報を作成（電離圏垂直遅延量は緯度経度5度ごと）
- * MCSからMTSATへ補強情報を送信しMTSATから補強情報を放送
- * 航空機は補強情報を用いて測位
- * 1システムで広域をカバー

SBASにおける電離圏の影響

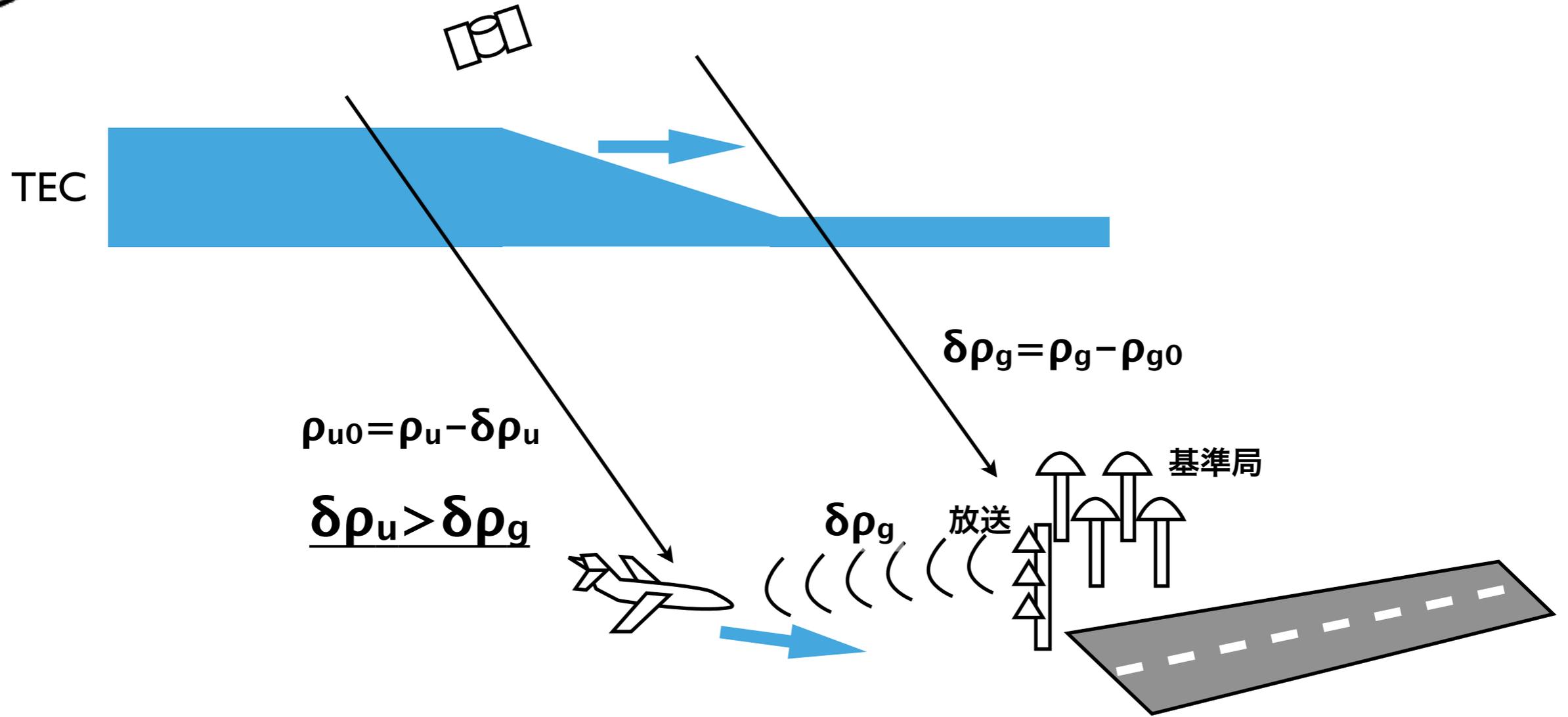
- * 基準局密度と衛星配置で決まる観測密度以下の規模の現象は検出できない
- * 5°グリッドより小さい範囲で急激に変化する現象は表現できない
- * 赤道異常に伴う勾配、プラズマバブル、SED等
- * 送信する補正值を1°グリッドにするなどの変更は非常に難しい（国際標準が既に決まり受信機製品も存在すること、データレートの制限など）

実例：GBAS



- * 空港に設けた基準局の測定結果を用いて、各衛星ごとの遅延量補強情報を各空港から放送
- * 航空機は補強情報を用いて測位
- * 空港周辺約40 kmの範囲を対象

GBASにおける電離圏の影響



- * サービス範囲内で電離圏補正量が一様であることが前提
- * 局所的な電離圏勾配が誤差の要因となる
- * 搬送波位相を用いたスムージング（時定数100秒）を行うため、誤差が蓄積（遅延量勾配の2倍×時定数×速度）



衛星航法高度利用の障害となる電離圏異常

* 電離圏遅延量勾配

- 補正誤差の原因

- 基準局で未検出→ 安全性（インテグリティ）の脅威
- 危険になる確率が許容値以下になるように対策を取る（モニタの追加、危険になる衛星組み合わせを排除するなど）
- 対策の結果として可用性（アベリラビリティ）が低下する場合がある

* 電離圏小規模不規則構造

- シンチレーション、衛星信号ロック外れの原因

- インテグリティの脅威とはなりにくいだがアベリラビリティの低下の原因となる

電離圏問題に対する航空航法分野の動き

- * 国際民間航空機関(ICAO)において、高カテゴリGBAS（より悪い視程条件でも使用可能なGBAS）の実現のため、電離圏勾配を伴う現象のモデル化と対策の標準化が行われている
- * アジア太平洋航空航法計画会議(APANPIRG)において、衛星航法の航空利用に必要な電離圏特性を知るためのデータ収集・共有を推進することで合意
- * 国際GBAS作業部会(I-GWVG)においても、GBASに必要なデータ収集・共有を速やかに行うことで合意
- * 外部モニタ（WAAS、宇宙天気情報等）の利用の可能性も一部で検討



電子航法研究所の取り組み

- * 国内観測による電離圏異常の特徴付け
 - TEC・シンチレーションの稠密観測、大気光イメージャ、GEONET 1秒値のリアルタイム収集
- * 高カテゴリGBASにおける電離圏脅威モデルに関する国際基準策定への参加
- * アジア太平洋域の衛星航法の航空利用に必要な電離圏特性を知るためのデータ収集・共有の推進、coordination
- * プラズマバブルの広域監視法の研究開発



衛星航法の航空利用と宇宙（電離圏）天気

- * 衛星航法の航空利用においては、安全性が重要
- * 未検出確率を考慮し、誤差が生じることは想定して様々な対策をとるが、その分利用に制限がつく
- * 電離圏不均一構造の存在は衛星航法の高度な利用の障害
- * 高度利用への方策
 - 電離圏異常特性（発生確率、勾配の大きさ、移動速度等）の明確化によるSBAS/GBASモニタの性能向上
 - SBAS/GBAS以外の電離圏監視による電離圏異常検出
- * **宇宙（電離圏）天気情報の定量性、インテグリティの担保、監視のリアルタイム性が重要**