次世代DFMC GBASの標準化の動向

齋藤 享、吉原 貴之
電子航法研究所航法システム領域

- DFMC GBASは、補強方式を含むコンセプト立案の段階にある。
- 現在、2方式が提案されており検討中
  - SESAR GAST F
  - GAST X
- 電子航法研究所では、磁気低緯度地域におけるGBAS性能向上を主眼として、DFMC GBAS基準策定に貢献する
  - DFMC GBASテストベッド（石垣）を用いたデータ収集・解析

	SESAR GAST F	GAST X
平滑化方式	SF/IFree併用	DFree/IFree併用
平滑化時定数	100 sec	600 sec (可変)
DFMC用GBASメッセージ	L5帯レンジ補正値(MT-42, 50)	基準局レンジ測定値(MT-23)
利点	GAST Dの自然な拡張、設計単純	方式選択が柔軟、位相測位へ拡張可
欠点	拡張性が低い	機上計算複雑化、補強情報量大

2022年末	方式決定
2024年末	ベースライン SARPs/MOPS
2028年末	検証完了SARPs/MOPS
2030年	SARPs/MOPS発効

*2021年11月時点での予定

GBAS標準化の進行状況

	GAST C	GAST D	DFMC GBAS
衛星系・周波数	GPS/GLONASS L1	GPS/GLONASS L1	GPS/GLONASS/Galileo/ BDS L1/L5
運航カテゴリー	CAT I	CAT II/III	CAT II/III
SARPs発効	2001年	2018年	2030年頃 (補強方式検討中)
地上装置対応状況	実用化済み	プロトタイプ開発済み 実用化検討中	未定
機上装置対応状況	標準搭載(B787, 747-8他) オプション対応多数	オプション対応(B777-X) 検討中(B737 MAX他)	未定

DFMC GBAS標準化の現状

* DFMC GBAS補強方式の検討中
  - 2020年12月から検討開始
* これまでに2つの方式が提案されている
  - SESAR GAST F
  - GAST X
* ICAO NSP GBAS WG (GWG)のアドホックグループにおいて検討中
  - DFMC GBASの運用コンセプト、ニーズの収集
  - 提案方式の利点・欠点の比較、実現可能性の検討
  - ✓ 2022年末までに基本的な方針を決定する予定

提案方式の特徴

	SESAR GAST F*	GAST X**
平滑化方式	1周波(SF)/電離圏フリー(IFree)併用 通常時: SF 電離圏異常時: IFree	ダイバージェンスフリー(DFree)/ 電離圏フリー(IFree)併用 通常時: DFree 電離圏異常時: IFree
平滑化時定数	100 sec	600 sec (可変)
DFMC用GBASメッセージ	L5帯レンジ補正値(MT-42, 50)	基準局レンジ測定値(MT-23)
利点	GAST Dの自然な拡張、設計単純	方式選択が柔軟、位相測位へ拡張可
欠点	拡張性が低い	機上計算複雑化、補強情報量大
共通点	電離圏異常モニタが必要 （利用できる情報が異なるため、可能な方式は異なる）	
背景	欧州のSESARにおいて検討・提案	Boeingを中心にRTK測位を参考に考案

*ICAO Working Paper, NSP4 WP41, DFMC GBAS Conceptual Framework – SESAR Joint Undertaking.
**Murphy, T., Harris, M., McGraw, G., Wichgers, J., Lavik, L., Topland, M., Tuffaha, M., Saito, S., Alternative Architecture for Dual Frequency Multi-Constellation GBAS, Proc. ION GNSS+ 2021, September 2021, pp. 1334-1374.

DFMC GBAS標準化の予定

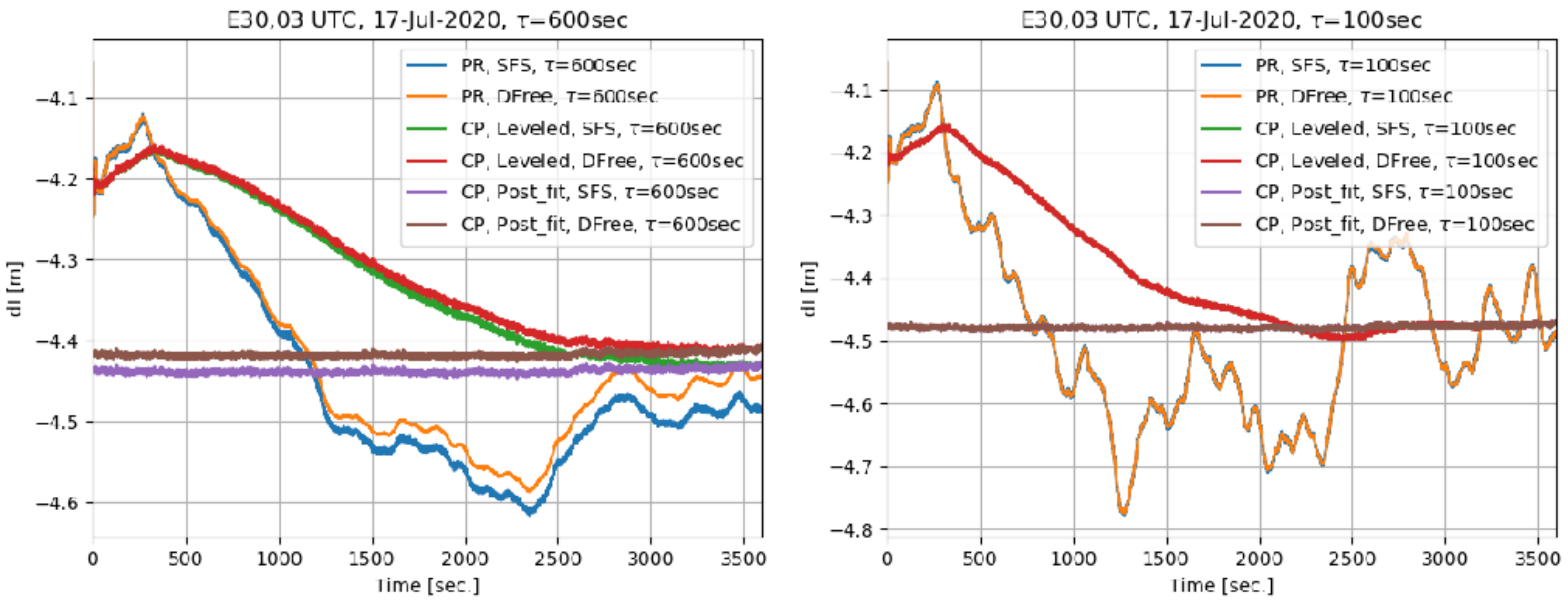
2021年11月時点での予定

方式決定	ベースラインSARPs/MOPS	検証完了SARPs/MOPS	SARPs/MOPS発効
2022年末	2024年末	2028年末	2030年

* 欧州などが求めるGAST DのGalileo、BDS対応(GAST D+)との関連で変更されうる。

電子航法研究所の研究方針

- DFMC GBASの方式の性能評価を進める
  - ✓ 磁気低緯度地域における厳しい電離圏環境への対応
  - - 新石垣空港に設置したDFMC GBASテストベッド*を利用
    - - SESAR GAST F, GAST Xのメッセージ生成に対応
  - - 変動の大きい電離圏環境下における電離圏勾配モニタの検証
    - - 地上連続観測、飛行実験（電離圏擾乱が発生する夜間を含む）



DFMC GBAS電離圏モニタ方式の比較例**。左:平滑化時定数100秒、右:600秒

*齋藤, 吉原, MC/MF GBAS実験用装置の開発, 2019年度電子航法研究所研究発表会

**Murphy, T., Harris, M., Balvedi, G., McGraw, G., Wichgers, J., Lavik, L., Topland, M., Tuffaha, M., Saito, S., Ionospheric Gradient Monitoring for Dual Frequency Multi-Constellation GBAS, Proc. ION ITM 2022, 2022.

詳細資料

I周波キャリアスムージング方式(SF)

* I周波平滑化擬似距離を用いて測位
  - 雑音が少ない搬送波位相の時間変化分を用いて、コード擬似距離を平滑化

平滑化擬似距離

$$\tilde{\rho}_{1,j} = k\rho_{1,j} + (1-k)(\tilde{\rho}_{1,j-1} + \underline{\phi_{1,j} - \phi_{1,j-1}})$$

$$k = \frac{1}{\tau}$$

平滑化時定数

↑ 搬送波位相の時間変化分

- I周波GBAS (GAST C/D)で用いられる方式

+ DFMC GBASにおいて利用する場合、GAST C/Dとの共用が可能
  ➡ 補正値データ量・計算量の節約

+ 2周波利用に伴う雑音増加がない

– 電離圏勾配による誤差（空間差、コード・キャリア・ダイバージェンスによる誤差蓄積）あり
  ➡ 有効な電離圏異常モニタの開発が必要

2周波電離圏フリー補強方式(IFree)

* 電離圏フリー線形結合により、電離圏遅延を消去した擬似距離を用いて測位

電離圏フリー線形結合

L1 　 L5

コード擬似距離 $\rho_{IF} = (1+\alpha)\rho_1 - \alpha\rho_5$

搬送波位相 $\phi_{IF} = (1+\alpha)\phi_1 - \alpha\phi_5$

$$\alpha = \frac{1}{(f_1/f_5)^2 - 1}$$

L1/L5周波数比

平滑化擬似距離

$$\tilde{\rho}_{IF,j} = k\rho_{IF,j} + (1-k)(\tilde{\rho}_{IF,j-1} + \phi_{IF,j} - \phi_{IF,j-1})$$

$$k = \frac{1}{\tau}$$

平滑化時定数

雑音増加分 $\sqrt{((1+\alpha)^2 + \alpha^2))} = 2.59$

+ 電離圏遅延成分(1次項)を数学的に消去
  ➡ 電離圏異常時の測位性能が向上
+ L5コード擬似距離補正値の追加で実現可能
  ➡ 補正値メッセージの汎用性が高い
– コード擬似距離線形結合により雑音成分が増加
  ➡ 通常時の測位性能が劣化

2周波ダイバージェンスフリー補強方式(DFree)

- ダイバージェンスフリー線形結合により、電離圏遅延誤差の蓄積のない擬似距離を用いて測位

ダイバージェンスフリー線形結合

$$\alpha = \frac{1}{(f_1/f_5)^2 - 1}$$

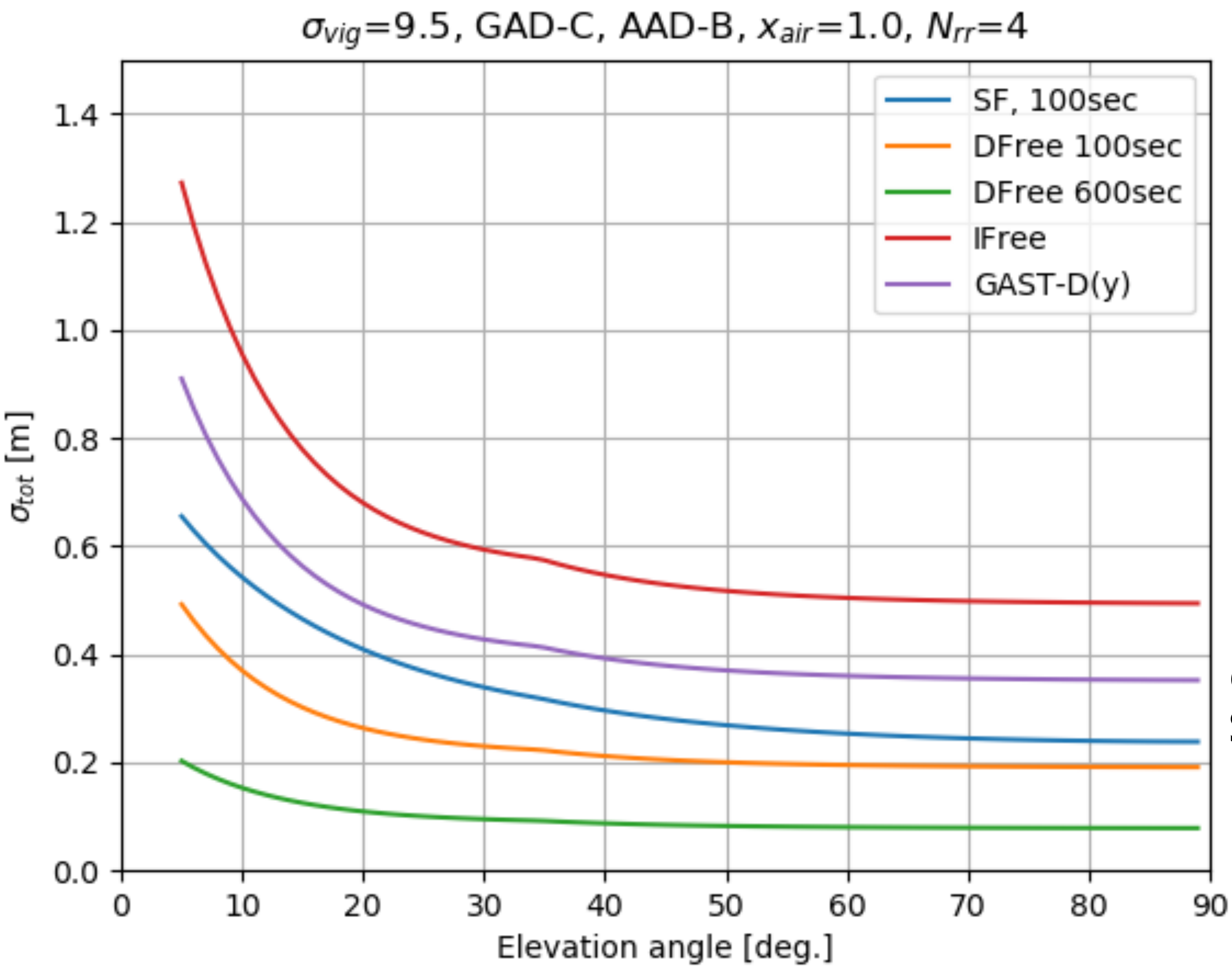
搬送波位相 $\phi_{DF} = \phi_1 + 2\alpha(\phi_1 - \phi_5)$

平滑化擬似距離

$$\tilde{\rho}_{DF,j} = k\rho_{1,j} + (1-k)(\tilde{\rho}_{DF,j-1} + \phi_{DF,j} - \phi_{DF,j-1})$$

＋ 線形結合は搬送波位相のみであり、雑音の増加は無視できる
➡ 大半を占める通常時の測位性能の劣化なし
＋ 電離圏異常誤差の平滑化に伴う蓄積なし
➡ 電離圏異常時の誤差低減
– ダイバージェンスフリー線形結合による専用補正値が必要
➡ VDB伝送帯域の有効活用において不利
– 電離圏遅延空間差による誤差が残る
➡ 一定の電離圏異常モニタが必要

平滑化方式と雑音



IFree (100sec)

GAST-D(y)

SF (100sec) (GAST-C/GAST-D(x)/GAST-F SF)

DFree (100sec)

DFree (600sec)

方式	SESAR GAST F		GAST X
平滑化方式	SF (100秒)	IFree (100秒)	DFree (600秒)
雑音 (SFを基準)	1.0	2.6	0.4
電離圏誤差	G*(x+200*v)	0	G*x

G:電離圏勾配, x:航空機-基準局距離, v:航空機速度

GAST D+

	GAST D	GAST D+	DFMC GBAS
衛星系・周波数	GPS/GLONASS L1	GPS/GLONASS/Galileo/ BDS L1	GPS/GLONASS/Galileo/ BDS L1/L5
運航カテゴリー	CAT II/III	CAT II/III	CAT II/III

- GAST Dに対して、Galileo, BDSへの対応を追加するもの
  - 1周波2衛星系GBAS ➡ 電離圏異常対策はGAST D同様に必要
  - GBASメッセージには領域を確保済み ➡ SARPs変更は最小限
  - 衛星系特有の脅威検証が必要 ➡ 検証作業は少なくない
  - 地上・機上装置開発が必要 ➡ 実用化には時間と資金が必要
- 欧州がGalileo利用拡大のために強く推進
  - GAST Dの実用化推進にも寄与する可能性