

ICS 07.040

CCS A 77

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

星载 SAR 电离层探测系统性能评价

Performance evaluation of spaceborne SAR ionosphere detection system
(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 评价原则与要求 1

 4.1 评价机构 1

 4.2 评价人员 2

 4.3 评价公正性 2

5 评价指标 2

 5.1 指标体系 2

 5.2 TEC 反演精度指标 2

 5.3 法拉第旋转角测量精度指标 2

 5.4 闪烁指数测量精度指标 3

 5.5 空间分辨率指标 3

 5.6 探测动态范围指标 3

6 试验方法 3

 6.1 一般要求 3

 6.2 TEC 反演精度试验方法 3

 6.3 法拉第旋转角测量精度试验方法 4

 6.4 闪烁指数测量精度试验方法 4

 6.5 空间分辨率试验方法 5

 6.6 探测动态范围试验方法 5

7 取值规则 5

 7.1 数据有效性判定 5

 7.2 指标值计算 5

 7.3 取值精度 5

8 评价结果 6

 8.1 单项指标判定 6

 8.2 综合评价结论 6

 8.3 评价报告 6

 8.4 结果公布 6

 8.5 复评 6

附 录 A （规范性） 评价数据记录表 7

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

星载 SAR 电离层探测系统性能评价

1 范围

本文件规定了星载SAR电离层探测系统性能评价的评价原则与要求、评价指标、试验方法、取值规则、评价结果。

本文件适用于工作频段为L波段（1GHz~2GHz）和P波段（0.3GHz~1GHz）的星载SAR电离层探测系统的性能评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14950 摄影测量与遥感术语

3 术语和定义

GB/T 14950 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

星载 SAR 电离层探测系统 spaceborne SAR ionospheric sounding system

以星载 SAR 为主要探测载荷，通过对 SAR 回波信号中电离层传播效应的提取与分析，实现电离层参数反演与探测的系统。

3.2

电离层总电子含量 total electron content; TEC

沿无线电波传播路径单位截面积柱体内的电子总数。单位为 TECU，1TECU = 10^{16} 电子数/ m^2 。

3.3

法拉第旋转角 faraday rotation angle; FRA

线极化波在磁化电离层介质中传播时，极化面发生的旋转角度，单位为度（°）。

3.4

闪烁指数 S_4 index

信号强度的标准差与信号强度均值之比，用于量化电离层幅度闪烁强度，无量纲。

4 评价原则与要求

4.1 评价机构

星载 SAR 电离层探测系统性能评价应由具有相应资质和能力的第三方评价机构实施。评价机构应具备以下条件：

- a) 具有独立法人资格；

- b) 具有从事星载 SAR 或电离层探测领域技术评价的专业人员，专业人员不少于 5 人；
- c) 具有开展评价所需的 SAR 数据处理设备和软件环境；
- d) 具有可追溯的 GNSS TEC 参考数据获取渠道。

4.2 评价人员

- 参与评价工作的人员应满足以下要求：
- a) 具有遥感、雷达或空间物理相关专业背景，本科及以上学历；
 - b) 从事星载 SAR 数据处理或电离层探测领域工作不少于 3 年；
 - c) 熟悉本文件规定的评价方法和判定规则；
 - d) 与评价对象无利害关系。

4.3 评价公正性

评价机构应独立、客观、公正地开展评价工作，不受任何可能影响评价结果的利益因素干扰。

5 评价指标

5.1 指标体系

星载 SAR 电离层探测系统的性能评价应包括表 1 规定的全部指标。

表 1 评价指标体系

序号	指标名称	单位
1	TEC 反演精度 (σ_{TEC})	TECU
2	法拉第旋转角测量精度 (σ_{FRA})	°
3	闪烁指数测量精度 (σ_{S_4})	无量纲
4	水平方向分辨率 (R_h)	km
5	垂直方向分辨率 (R_v)	km
6	电离层总电子含量 (TEC) 探测动态范围	TECU
7	S_4 探测动态范围	无量纲

5.2 TEC 反演精度指标

TEC 反演精度以均方根误差 σ_{TEC} 表征。不同工作频段和条件下的指标要求见表 2。

表 2 TEC 反演精度指标要求

工作频段	条件	σ_{TEC} 要求
L 波段	单频模式，信噪比 $\geq 10\text{dB}$	≤ 2.0 TECU
L 波段	双频模式，频差 $\geq 100\text{MHz}$ ，信噪比 $\geq 15\text{dB}$	≤ 1.8 TECU
P 波段	信噪比 $\geq 10\text{dB}$	≤ 1.5 TECU

5.3 法拉第旋转角测量精度指标

法拉第旋转角测量精度以均方根误差 σ_{FRA} 表征。不同工作频段的指标要求见表 3。

表 3 法拉第旋转角测量精度指标要求

工作频段	条件	σ_{FRA} 要求
L 波段	全极化模式，信噪比 $\geq 12\text{dB}$	$\leq 0.5^\circ$
P 波段	全极化模式，信噪比 $\geq 12\text{dB}$	$\leq 0.3^\circ$

5.4 闪烁指数测量精度指标

闪烁指数测量精度以均方根误差 σ_{S_4} 表征。不同闪烁强度下的指标要求见表 4。

表 4 闪烁指数测量精度指标要求

闪烁强度等级	S_4 范围	σ_{S_4} 要求
弱闪烁	$S_4 \leq 0.3$	≤ 0.05
中等强度闪烁	$0.3 \leq S_4 \leq 0.6$	≤ 0.08
强闪烁	$S_4 > 0.6$	≤ 0.10

5.5 空间分辨率指标

空间分辨率指标要求见表 5。

表 5 空间分辨率指标要求

指标	要求
水平方向分辨率 R_h	$\leq 50\text{km}$
垂直方向分辨率 R_v	$\leq 20\text{km}$

5.6 探测动态范围指标

探测动态范围指标要求见表 6。

表 6 探测动态范围指标要求

指标	要求
TEC 探测动态范围	覆盖[2, 150]TECU
S_4 探测动态范围	覆盖[0.02, 0.90]

6 试验方法

6.1 一般要求

各项指标的试验应在系统正常工作状态下进行。用于试验的数据应满足以下要求：

- a) 数据样本量不少于 30 景（即 30 幅 SAR 图像）；
- b) 数据应覆盖低（ $F10.7 \leq 100$ ）、中（ $100 \leq F10.7 \leq 150$ ）、高（ $F10.7 > 150$ ）三种电离层活动水平；
- c) 单景 SAR 图像信噪比不应低于 10dB。

6.2 TEC 反演精度试验方法

6.2.1 方法原理

采用距离向频带分割法，利用 SAR 宽带信号上频带和下频带之间的相位差反演 TEC。按公式（1）计算：

$$TEC = \frac{cf_c^2}{4\pi K} \cdot \frac{\Delta\phi}{B} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 c ——光速， 3×10^8 m/s；
 f_c ——SAR 系统中心频率，单位为 MHz；
 K ——常数， $40.28 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ；
 $\Delta\phi$ ——上下频带相位差，单位为 rad；
 B ——系统带宽，单位为 MHz。

6.2.2 试验步骤

TEC 反演精度试验按以下步骤执行：

- 选取不少于 30 景 SAR 数据，记录每景数据的中心频率 f_c 、带宽 B 和成像时间；
- 对每景数据进行距离向频带分割，分别提取上频带和下频带相位信息；
- 按公式（1）计算每景数据的 TEC 值；
- 获取与每景数据时空匹配的参考 TEC 值（来源于 GNSS 观测数据，时间差不超过 30min，距离不超过 100km）；
- 按公式（2）计算均方根误差 σ_{TEC} ：

$$\sigma_{TEC} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (TEC_{SAR,i} - TEC_{ref,i})^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

N ——有效样本总数（ $N \geq 30$ ）；

$TEC_{SAR,i}$ ——第 i 个样本由 SAR 数据反演的 TEC 值，单位为 TECU；

$TEC_{ref,i}$ ——第 i 个样本的参考 TEC 值，单位为 TECU。

6.3 法拉第旋转角测量精度试验方法

6.3.1 方法原理

采用全极化 SAR 数据提取法拉第旋转角。全极化 SAR 观测的极化散射矩阵 M 与真实散射矩阵 S 之间的关系按公式（3）：

$$M = \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix} = R(\Omega) \cdot S \cdot R(\Omega) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

M_{HH} 、 M_{HV} 、 M_{VH} 、 M_{VV} ——分别为 HH、HV、VH、VV 四种极化组合的实测复散射系数；

Ω ——法拉第旋转角；

$R(\Omega)$ ——旋转矩阵。

6.3.2 试验步骤

法拉第旋转角测量精度试验按以下步骤执行：

- 选取不少于 30 景全极化 SAR 数据；
- 采用极化分解算法从全极化数据中提取 FRA 测量值；
- 按公式（4）计算 FRA 参考值：

$$\Omega_{ref} = \frac{2.365 \times 10^4}{f_c^2} \times TEC_{ref} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

Ω_{ref} ——法拉第旋转角参考值，单位为度（°）；

2.365×10^4 ——法拉第旋转常数，由基本物理常数推导得出；

f_c ——SAR 系统中心频率，单位为 MHz；

TEC_{ref} ——参考总电子含量，单位为 TECU；

- 按公式（5）计算均方根误差 σ_{FRA} ：

$$\sigma_{FRA} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (FRA_{SAR,i} - FRA_{ref,i})^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

σ_{FRA} ——法拉第旋转角测量均方根误差，单位为度（°）；

N ——有效样本总数（ $N \geq 30$ ），无量纲；

$FRA_{SAR,i}$ ——第 i 个样本由 SAR 全极化数据提取的法拉第旋转角测量值，单位为度（°）；

$FRA_{ref,i}$ ——第 i 个样本的法拉第旋转角参考值，单位为度（°）；

6.4 闪烁指数测量精度试验方法

6.4.1 方法原理

采用子孔径分割法，将 SAR 方位向全孔径分为若干子孔径，按公式（6）计算 S_4 ：

$$S_4 = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

S_4 ——幅度闪烁指数，无量纲；

I ——接收信号强度（SAR 回波信号幅度平方或功率），无量纲。

6.4.2 试验步骤

闪烁指数测量精度试验按以下步骤执行：

- a) 选取不少于 30 景 SAR 数据，覆盖低、中、高不同闪烁强度；
- b) 将方位向全孔径分割为 8~16 个子孔径；
- c) 对各子孔径图像计算信号强度 I ，按公式（6）计算 S_4 值；
- d) 与参考值比较，按公式（7）计算均方根误差 σ_{S_4} ：

$$\sigma_{S_4} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{4SAR,i} - S_{4ref,i})^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

σ_{S_4} ——闪烁指数测量均方根误差，无量纲；

N ——有效样本总数（ $N \geq 30$ ），无量纲；

$S_{4SAR,i}$ ——第 i 个样本由 SAR 数据提取的闪烁指数测量值，无量纲；

$S_{4ref,i}$ ——第 i 个样本的闪烁指数参考值（来源于 GNSS 闪烁监测仪或理论模型），无量纲。

6.5 空间分辨率试验方法

6.5.1 水平分辨率 R_h

采用点目标响应法，测量 SAR 电离层探测图像中点目标冲激响应的-3dB 宽度，以 km 为单位记录。

6.5.2 垂直分辨率 R_v

采用层析反演点扩展函数（PSF）法，对已知电子密度垂直分布的电离层模型进行层析反演，测量 PSF 的半高全宽，以 km 为单位记录。

6.6 探测动态范围试验方法

利用信号模拟器生成不同 TEC 值（0.5TECU~250TECU）和不同 S_4 值（0.005~1.00）的 SAR 回波模拟信号，分别输入被评价系统，记录系统能有效反演或测量的 TEC 和 S_4 范围。

7 取值规则

7.1 数据有效性判定

按第 6 章试验方法获得的各指标测量数据，应满足以下条件方为有效：

- a) 每个指标的样本量不少于 30 个；
- b) 剔除信噪比低于 8dB 的样本数据；
- c) 剔除明显异常值（偏离均值 ± 3 倍标准差以外的数据点）。

7.2 指标值计算

各项指标的最终测量值按以下规则确定：

- a) σ_{TEC} 、 σ_{FRA} 、 σ_{S_4} 按公式（2）、公式（5）、公式（7）计算均方根误差；
- b) R_h 和 R_v 取多次测量结果的平均值；
- c) TEC 动态范围和 S_4 动态范围取系统能有效探测的最小值至最大值的连续区间。

7.3 取值精度

各项指标测量值的取值精度应符合表 7 的规定。

表 7 取值精度要求

指标	取值精度
σ_{TEC}	0.1TECU
σ_{FRA}	0.1°
σ_{S_4}	0.01
R_h	1km
R_v	1km

8 评价结果

8.1 单项指标判定

将第 7 章获得的各指标测量值与第 5 章规定的指标要求进行比较，逐项做出“合格”或“不合格”的判定。

8.2 综合评价结论

- 综合评价结论按以下规则确定：
- a) 合格：所有评价指标均满足第 5 章规定的指标要求；
 - b) 不合格：第 5 章规定的 7 项评价指标中，有任何一项不满足指标要求。

8.3 评价报告

- 评价报告数据记录表宜按附录 A 执行，评价报告应包含以下内容：
- a) 被评价系统基本信息（系统名称、型号、工作频段、极化方式、轨道高度等）；
 - b) 评价依据（本文件编号）；
 - c) 评价数据说明（数据来源、数据量、覆盖时段）；
 - d) 各项指标的测量值、指标要求和单项判定结果；
 - e) 综合评价结论（合格/不合格）；
 - f) 评价机构名称、评价人员签名、评价日期。

8.4 结果公布

评价结论为“合格”的，可向社会公布；评价结论为“不合格”的，应向被评价单位出具不合格通知，说明不合格指标项及原因。

8.5 复评

- 被评价系统对评价结论有异议或经整改后，可申请复评。复评应满足以下要求：
- a) 复评应在初次评价结论出具后 90 日内提出书面申请；
 - b) 复评应采用与初次评价相同的评价指标、试验方法和判定标准；
 - c) 同一系统复评次数不宜超过 2 次。

附 录 A
(规范性)
评价数据记录表

评价报告数据记录表宜按表A. 1进行记录。

表 A. 1 星载 SAR 电离层探测系统性能评价结果汇总表

序号	评价指标	测量值	指标要求	单项判定
1	σ_{TEC}	____ TECU	$\leq$ ____ TECU	合格/不合格
2	σ_{FRA}	____ (°)	$\leq$ ____ (°)	合格/不合格
3	σ_{S_4} (弱闪烁)	____	≤ 0.05	合格/不合格
4	σ_{S_4} (中等闪烁)	____	≤ 0.08	合格/不合格
5	σ_{S_4} (强闪烁)	____	≤ 0.10	合格/不合格
6	R_h	____ km	$\leq 50\text{km}$	合格/不合格
7	R_v	____ km	$\leq 20\text{km}$	合格/不合格
8	TEC 动态范围	[,]TECU	覆盖[2, 150]	合格/不合格
9	S_4 动态范围	[,]	覆盖[0.02, 0.90]	合格/不合格
综合评价结论				合格/不合格
评价机构: _____ 评价人员: _____ 评价日期: _____				