



中华人民共和国国家标准

GB/T 42833—2023

北斗星基增强系统单频增强服务 机载设备最低性能规范

Minimum operational performance standard for airborne equipment of
BeiDou Satellite-based Augmentation System single frequency
augmentation service

2023-08-06 发布

2024-03-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

引 言

北斗星基增强系统(BDSBAS)提供单频增强服务和双频多星座增强服务,服务信号通过北斗卫星导航系统(BDS)的地球静止轨道(GEO)卫星播发。

BDSBAS 单频增强服务的增强对象为 GPS L1C/A 频点,满足航路、终端区和进近等飞行阶段对精度、完好性、连续性和可用性的指标要求。在 BDSBAS 单频增强服务区域内,服务水平由系统服务能力与机载设备共同决定。

BDSBAS 机载设备为实施航路、终端区、侧向导航(LNAV)和无垂向引导的定位性能(LP)进近飞行的航空器提供水平导航,为实施有垂向引导的定位性能(LPV)和侧向导航/垂向导航(LNAV/VNAV)进近飞行的航空器提供水平和垂向导航。当航空器处于 BDSBAS 单频增强服务区域外时,机载设备需采用故障检测与隔离(FDE)模式实现完好性保障。

为了保持 BDSBAS 机载设备与国际标准的符合性,本文件中关于 BDSBAS 机载设备的组成、类型、约束条件、通用要求和不同飞行模式下的设备性能要求等内容与 RTCA DO-229F 保持一致。

北斗星基增强系统单频增强服务 机载设备最低性能规范

1 范围

本文件规定了使用北斗星基增强系统(BDSBAS)单频增强服务 BDSBAS-B1C 信号和 GPS L1 C/A 信号的机载设备组成、类型、约束条件、通用要求和不同飞行模式下的设备性能要求等内容。

本文件适用于北斗星基增强系统单频增强服务机载设备研制、测试等相关工作,其他星基增强系统机载设备参照使用。

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 39267—2020 北斗卫星导航术语

GB/T 42832.1—2023 北斗星基增强系统空间信号接口规范 第1部分:单频增强服务信号 BDSBAS-B1C

IS-GPS-200M NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, Version M, May 2021

RTCA DO-178C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification, December 2011

RTCA DO-228 Minimum Operational Performance Standards for Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Airborne Antenna Equipment, October 1995

RTCA DO-254 Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware, April 2000

RTCA DO-301 Minimum Operational Performance Standards for Global Navigation Satellite System (GNSS) Airborne Active Antenna Equipment for the L1 Frequency Band, December 2006

RTCA DO-316 Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Aircraft-Based Augmentation System Airborne Equipment, April 2009

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 39267—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

北斗卫星导航系统 BeiDou navigation satellite system; BDS

中国研制建设和管理的为用户提供实时三维位置、速度和时间等信息的全球卫星导航系统。

注:提供的服务包括基本导航服务、短报文通信服务、星基增强服务、国际搜救服务和精密单点定位服务等。

[来源:GB/T 39267—2020,2.1.11]

3.1.2

星基增强系统 **satellite-based augmentation system; SBAS**

利用卫星播发差分修正、完好性信息及其他信息的 GNSS 增强系统。

[来源:GB/T 39267—2020, 2.1.17]

3.1.3

定位精度 **positioning accuracy**

观测位置值与真实位置值之差的统计值。

3.1.4

完好性 **integrity**

对导航系统提供信息正确性的置信度的度量。

注: 包括当系统不能应用于导航时及时向用户提供警告的能力。

3.1.5

连续性 **continuity**

在预定运行期间不中断地维持运行的能力。

注: 一般指在该运行阶段开始时可用, 并且预计在整个运行期间内保持规定系统性能的概率。

3.1.6

可用性 **availability**

在指定覆盖范围内提供可用服务的能力。

3.1.7

误导信息 **misleading information**

输出到其他设备或显示给飞行员的任何数据, 该数据会导致误差大于告警门限(HAL/VAL), 但在适用飞行阶段的告警时间内没有任何错误指示。

3.1.8

导航模式 **navigation mode**

机载设备为满足航路、终端区、非精密进近、精密进近等不同飞行阶段要求, 所采用的对应运行模式。

3.1.9

侧向导航 **lateral navigation; LNAV**

不具备垂向引导功能的非精密进近, 在进近过程中不一定使用星基增强系统辅助导航。

注: 如果使用星基增强系统, 在星基增强系统不可用的情况下, 需要使用接收机自主完好性监测保障完好性。

3.1.10

垂向导航 **vertical navigation; VNAV**

具备垂向引导功能的进近, 在进近过程中需要使用星基增强系统或气压垂向导航系统辅助导航。

注: 如果使用星基增强系统, 在星基增强系统不可用的情况下, 需要使用接收机自主完好性监测保障完好性。

3.1.11

无垂向引导的定位性能 **localizer performance without vertical guidance; LP**

不具备垂向引导功能的非精密进近, 在进近过程中需要使用星基增强系统辅助导航。

注: 在星基增强系统不可用的情况下, 需要使用接收机自主完好性监测保障完好性性能。

3.1.12

有垂向引导的定位性能 **localizer performance with vertical guidance; LPV**

具备垂向引导功能的进近, 在进近过程中需要使用星基增强系统辅助导航。

注: 在星基增强系统不可用的情况下, 需要使用接收机自主完好性监测保障完好性性能。

3.1.13

故障检测 **fault detection; FD**

利用冗余导航卫星信号判断是否存在定位故障。

3.1.14

故障检测与隔离 **fault detection and exclusion; FDE**

利用冗余导航卫星信号判断是否存在定位故障,并剔除造成定位故障卫星信号。

3.1.15

水平告警门限 **horizontal alert limit; HAL**

以真实位置为中心,以指定概率包含水平定位位置的圆形水平区域的半径。

注:不同导航模式规定了对应的告警门限。

3.1.16

垂向告警门限 **vertical alert limit**

以真实位置为中心,以指定概率包含垂向定位位置的垂向范围的二分之一值。

注:不同导航模式规定了对应的告警门限。

3.1.17

故障检测方式下的水平保护级 **horizontal protection level under fault detection mode; HPL_{FD}**

在故障检测(FD)方式下,以真实位置为中心,以指定概率包含水平定位位置的圆形水平区域的半径。

3.1.18

故障检测方式下的垂向保护级 **vertical protection level under fault detection mode; VPL_{FD}**

在故障检测(FD)方式下,以真实位置为中心,以指定概率包含垂向定位位置的垂向范围的二分之一值。

3.1.19

星基增强方式下的水平保护级 **horizontal protection level under SBAS mode; HPL_{SBAS}**

机载设备工作于星基增强(SBAS)方式下,以真实位置为中心,以指定概率包含水平定位位置的圆形水平区域的半径。

3.1.20

星基增强方式下的垂向保护级 **vertical protection level under SBAS mode; VPL_{SBAS}**

机载设备工作于星基增强(SBAS)方式下,以真实位置为中心,以指定概率包含垂向定位位置的垂向范围的二分之一值。

3.1.21

定位故障 **positioning fault**

真实位置和定位解算值之间的差异超过相应的告警门限。

3.1.22

告警时间 **time to alert**

从定位故障开始时刻到设备发出告警时刻所经历的时间。

3.1.23

星基增强系统网络时 **SBAS Network Time; SNT**

星基增强系统建立和保持的时间基准,采用国际单位制秒的无闰秒连续时间。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BCD:二进制编码十进制(Binary Coded Decimal)

BDCS:北斗坐标系(BeiDou Coordinate System)
BDS:北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System)
BDSBAS:北斗星基增强系统(BeiDou Satellite based Augmentation System)
CRC:循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check)
CW:连续波(Continuous Wave)
DLL:延迟锁相环(Delay Lock Loop)
ECEF:地心地固坐标系(Earth Centered Earth Fixed)
FD:故障检测(Fault Detection)
FDE:故障检测与隔离(Fault Detection and Exclusion)
FEC:前向纠错(Forward Error Correction)
GDOP:几何精度因子(Geometric Dilution of Precision)
GEO:地球静止轨道(GEostationary Orbit)
GIVE:格网电离层垂向误差(Grid Ionospheric Vertical Error)
GIVEI:格网电离层垂向误差索引(Grid Ionospheric Vertical Error Indicator)
GLONASS:格洛纳斯全球卫星导航系统(GLObal NAVigation Satellite System)
GNSS:全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System)
GPS:全球定位系统(Global Positioning System)
GPST:GPS时(GPS Time)
HAL:水平告警门限(Horizontal Alert Limit)
HDOP:水平精度因子(Horizontal Dilution of Precision)
HIRF:高强度辐射场(High Intensity Radiation Fields)
HOW:交接字(Hand Over Word)
HPL:水平保护级(Horizontal Protection Level)
ICAO:国际民航组织(International Civil Aviation Organization)
IGP:电离层网格点(Ionospheric Grid Point)
IOD:数据龄期(Issue of Data)
IODE:星历数据龄期(Issue of Data Ephemeris)
IODF:快变改正数据龄期(Issue of Data Fast correction)
IODI:电离层改正数据龄期(Issue of Data Ionospheric correction)
IODP:PRN掩码数据龄期(Issue of Data PRN mask)
IPP:电离层穿刺点(Ionospheric Pierce Point)
LNAV:侧向导航(Lateral Navigation)
LNAV/VNAV:侧向导航/垂向导航(Lateral Navigation/Vertical Navigation)
LP:没有垂向引导的航标性能(Localizer Performance without vertical guidance)
LPV:具备垂向引导的航标性能(Localizer Performance with Vertical guidance)
LSB:最低有效位(Least Significant Bit)
MSB:最高有效位(Most Significant Bit)
PRN:伪随机噪声(Pseudo Random Noise)
RTCA:航空无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics)
SBAS:星基增强系统(Satellite based Augmentation System)
SNT:星基增强系统网络时(SBAS Network Time)
UDRE:用户差分距离误差(User Differential Range Error)
UDREI:用户差分距离误差索引(User Differential Range Error Indicator)

- URA:用户距离精度(User Range Accuracy)
- UTC:协调世界时(Coordinated Universal Time)
- VAL:垂向告警门限(Vertical Alert Limit)
- VDOP:垂向精度因子(Vertical Dilution of Precision)
- VPL:垂向保护级(Vertical Protection Level)
- WGS-84:世界大地坐标系-84(World Geodetic System-84)
- WN:周计数(Week Number)

4 北斗星基增强系统

4.1 系统简介

BDSBAS 分别通过 BDS GEO 卫星的 BDSBAS-B1C 信号和 BDSBAS-B2a 信号向中国及周边区域用户播发单频增强服务信息和双频增强服务信息。

BDSBAS 的空间段由 3 颗播发增强服务信号的 BDS GEO 卫星构成,分别定点于东经 80°、110.5°和 140°,对应的 GPS 伪随机噪声(PRN)码为 144、143 和 130。

BDSBAS 地面段包括监测站网、数据处理中心、运行控制中心和注入站。

4.2 坐标系统

BDSBAS 的坐标基准为 BDCS。

注: BDCS 与 WGS-84 之间偏差不大于 3 cm。

4.3 时间系统

BDSBAS 单频增强服务的网络时间($SNT_{SF} = BDT + 14\text{ s}$)与 GPST 之间的偏差不大于 50 ns。

5 机载设备组成及类型

5.1 设备组成

本文件中 BDSBAS 机载设备主要由天线、前置放大器和完成定位解算和完好性解算的传感器构成(如图 1 所示,其中,天线和前置放大器为选配项),能够将位置信息和完好性信息输出给导航系统(如飞行管理系统、多传感器导航系统)。当设备在非星基增强方式下运行时,需使用故障检测与隔离(FDE)方式实现完好性保障,并符合 RTCA DO-316 相关要求。



图 1 BDSBAS 机载设备组成示意图

5.2 设备类型

按照设备能够支持的飞行操作,BDSBAS 机载设备主要分为三类。

类型 1(Beta-1):支持洋区和内陆航路、终端区、进近(LNAV)和离场。当处于洋区和内陆航路、终端区、进近(LNAV)和离场时,设备需使用星基增强系统提供的慢变改正数和快变改正数。

类型 2(Beta-2):支持洋区和内陆航路、终端区、进近(LNAV、LNAV/VNAV)和离场。当处于洋区和内陆航路、终端区、LNAV 进近和离场时,设备需使用星基增强系统提供的慢变改正数和快变改正

数。当处于 LNAV/VNAV 进近时,设备需使用星基增强系统提供的慢变改正数、快变改正数和电离层改正数。

类型 3(Beta-3):支持洋区和内陆航路、终端区、进近(LNAV、LNAV/VNAV、LP、LPV)和离场。当处于洋区和内陆航路、终端区、LNAV 进近和离场时,设备需使用星基增强系统提供的慢变改正数和快变改正数。当处于 LPV、LP 或 LNAV/VNAV 进近时,设备需使用星基增强系统提供的慢变改正数、快变改正数和电离层改正数。

5.3 约束条件

5.3.1 完好性监测

BDSBAS 单频增强服务根据国际民航组织国际民用航空公约附件 10 第 I 卷:无线电导航设备中星基增强系统相关要求,对 GPS 卫星空间信号进行完好性监测。BDSBAS 机载设备在定位解算中选定需要使用的卫星集合,并利用 BDSBAS 播发的完好性信息实现对飞行导航的完好性保障。在 BDSBAS 单频增强服务不可用期间或用户处于服务区域之外,需使用 FDE 来保障导航的完好性。

5.3.2 射频干扰

BDSBAS 机载设备应能在附录 A 规定的干扰环境中正常运行。

5.3.3 星基增强参数的有效时间

单频增强服务电文参数的有效时间从 BDSBAS GEO 卫星播发包含该参数的电文的时刻开始。BDSBAS GEO 卫星播发电文的时刻与 BDSBAS 单频增强服务网络时间(SNT_{SF})整秒的开始时间同步。星基增强电文有效期见 6.1.4.18。

5.3.4 广播星历更新

当 GPS 广播星历更新之后,BDSBAS 地面段将在一段时间内基于旧的 GPS 星历信息生成差分完好性信息,以确保所有 BDSBAS 机载设备在接收到新的 GPS 星历之前保持连续服务。

5.3.5 电文类型 27 和 28 的接收与应用

电文类型 27 和电文类型 28 表征了残留误差在特定区域内的特征。电文类型 27 给出了指定区域内性能的降效参数;电文类型 28 给出了残余的星历误差。星基增强系统运行方只播发电文类型 27 或电文类型 28 中的一个,不会两个都播发,BDSBAS 仅播发电文类型 28。为了适应不同的 SBAS 服务,BDSBAS 机载设备必须能够解码并使用电文类型 27 和电文类型 28 中的信息。

5.3.6 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近完好性

机载设备使用 BDSBAS 空间信号或自主故障检测进行水平和垂向保护级解算,以确保 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近过程中的完好性。

6 设备性能要求

6.1 通用要求

6.1.1 基本要求

6.1.1.1 适航性

设备安装时,其设计、制造不应影响航空器的适航性。

6.1.1.2 通用性能

设备应履行本文件和制造商规定的预期功能。

6.1.1.3 耐火性

所有材料应是自熄的,不会对火势传播产生重大影响的小部件(如旋钮、紧固件、密封件、垫圈和小电器部件等)除外。

6.1.1.4 设备接口

与其他航空器设备的接口的设计,应保证 BDSBAS 机载设备不会对其他设备的运行产生影响。反之,其他设备的运行也不应影响 BDSBAS 机载设备。

6.1.1.5 测试影响

除另有规定外,设备的设计应确保应用测试不会出现对设备性能有害的情况。

6.1.2 GPS 信号处理要求

在附录 A 描述的干扰条件以及 6.1.10 所规定的最小信号条件下,设备应能处理 GPS L1C/A 信号和相关数据。在航路、终端和 LNAV 阶段,机载设备可选择不使用星基增强系统提供的电离层改正,使用 GPS 导航电文中的电离层模型参数完成定位解算。

6.1.3 星基增强系统信号处理要求

6.1.3.1 捕获与跟踪

在附录 A 描述的干扰条件和 6.1.10 所规定的最小信号条件下,能够捕获、跟踪和使用表 1 中的 PRN 号。设备在捕获或重捕过程中,应避免因互相关性,而将一颗 BDSBAS GEO 卫星误认为另一颗 BDSBAS GEO 卫星。在捕获期间,一种推荐的防止互相关性的方法是:如果从 15 min 内收到的 SBAS 电文类型 17 的历书数据解算出的 SBAS 卫星位置,与从任何未超时的 SBAS 电文类型 9 的 SBAS 星历数据解算出的位置之间的偏差超过 200 km,则不使用该 BDSBAS GEO 卫星的信号。BDSBAS GEO 卫星的 PRN 号见表 1。

表 1 BDSBAS GEO 卫星的 PRN 号

PRN 号	G2 延迟(码片)	初始 G2 设置(八进制)	前 10 个 SBAS 码片(八进制)
130	355	0341	1436
143	307	1312	0465
144	127	1060	0717

6.1.3.2 解调与前向纠错(FEC)解码

为减少解码过程中的数据错误,设备应使用 FEC 进行 BDSBAS 单频增强服务信号的解码。设备不可使用未通过 CRC 校验的星基增强电文。在附录 A 中描述的干扰条件和 6.1.10 所规定的最小信号条件下,设备接收的星基增强电文丢失率应小于 10^{-3} 。

6.1.4 星基增强电文处理

6.1.4.1 机载设备处理电文类型

机载设备应能处理电文类型 0、1、2、3、4、5、6、7、9、10、12、17、18、24、25、26、27、28、62、63，处理方法应符合附录 B 的规定。北斗星基增强系统单频增强服务电文的接口要求见 GB/T 42832.1—2023。

6.1.4.2 电文类型 0——不应用于安全应用

电文类型 0 将在 BDSBAS GEO 卫星 BDSBAS 测试中使用，如果 BDSBAS 地面系统确定已经传输的信号或数据存在问题，也可以播发电文类型 0。如果播发电文类型 0，则不保证 BDSBAS 单频增强服务的完好性，非生命安全用户自行承担使用风险。收到电文类型 0 时，设备应停止使用并丢弃从该 BDSBAS GEO 卫星 (PRN 号) 获得的任何观测数据和所有电文类型 1~7、9~10、18、24~28，并取消选用该 BDSBAS GEO 卫星 (PRN 号) 至少 1 min。

6.1.4.3 电文类型 1——PRN 掩码分配

机载设备应能储存和使用 SBAS GEO 卫星播发的电文类型 1 中新旧两个版本的 PRN 掩码信息。这可保证在 PRN 掩码变化时，设备能够同时使用不同的 IODP 对应的改正数，防止 PRN 掩码变化期间服务应用中断。

6.1.4.4 电文类型 2~5 和电文类型 24——快变改正数

设备应能处理电文类型 2、3、4、5 和 24。仅当电文类型 2、3、4、5 和 24 中的 IODP 与电文类型 1 获得的 IODP 相匹配时，才能使用相应卫星的完好性和改正数信息。

6.1.4.5 电文类型 6——完好性信息

设备应能处理电文类型 6，解码其中的完好性参数 UDREI，用于后续的定位解算和保护级计算，使用中的电文类型 6 应与最新收到的电文类型 1 中的 IODP 相匹配。电文类型 6 中包含四个 IODF_j ($j = 2, 3, 4, 5$) 参数，分别对应电文类型 2~5。如果电文类型 6 中 IODF_j = 3，则设备应使用电文类型 6 中的 UDREI 信息，不用与电文类型 2~5 或 24 中的 IODF_j 进行匹配。如果电文类型 6 中 IODF_j 小于 3，则设备只有在 IODF_j 与电文类型 2~5 或 24 中的 IODF_j 匹配时才使用相应的 UDREI 信息。

6.1.4.6 电文类型 7——快变改正数降效参数

设备应能处理电文类型 7，并确定快变改正数的超时间隔。

6.1.4.7 电文类型 9——SBAS GEO 卫星星历

设备应能处理电文类型 9 中的导航信息，主要是 SBAS GEO 卫星的轨道信息，用于确定设备所跟踪的每颗 SBAS GEO 卫星的位置。设备应始终使用最新收到的电文类型 9。

6.1.4.8 电文类型 10——降效参数

设备应能处理电文类型 10，并使用电文中的降效参数进行保护级解算。

6.1.4.9 电文类型 12——SNT 与 UTC 偏差

设备应能处理电文类型 12，该电文不是生命安全服务的必要信息。

6.1.4.10 电文类型 17——SBAS GEO 卫星历书

设备应储存至少两颗高于最低屏蔽角的 SBAS GEO 卫星的最新历书数据,以支持快速捕获新的 SBAS GEO 卫星。

6.1.4.11 电文类型 18——电离层格网掩码信息

设备应将 0~8 墨卡托投影竖直带和 9~10 水平带,共计 2 192 个格网点的经纬度信息进行预先存储。电文类型 18 中播发的电离层格网掩码信息发生变化时,IODI 会按照 0、1、2、3 的顺序进行变化。

6.1.4.12 电文类型 24 和 25——慢变改正数

设备应能处理电文类型 24 和 25,并确定所有可见 GPS 卫星 SBAS GEO 卫星的慢变时钟和星历改正数。仅当电文类型 24 和 25 中的 IODP 与电文类型 1 中的 IODP 相匹配时,才能使用相应卫星对应慢变改正数。对于 GPS 卫星,设备应将相应卫星在电文类型 24 或 25 中的 IOD 与该卫星导航电文中的 IODE 进行比较,会出现三种可能的结果。

- a) IOD 与 IODE 匹配。在这种情况下,使用当前 IODE 对应的 GPS 导航电文及相应的 SBAS 改正数信息计算卫星位置。
- b) IOD 与 IODE 不匹配,但 IOD 与之前接收到的 IODE 匹配。在这种情况下,使用之前 IODE 对应的 GPS 导航电文及相应的 SBAS 改正数信息计算卫星位置。
- c) IOD 与 IODE 不匹配,且 IOD 与之前接收到的 IODE 不匹配。在这种情况下,设备不应使用该颗 GPS 卫星参与解算。

设备应保留旧的 GPS 导航星历至少 5 min,或直到 IOD 与 IODE 匹配为止。设备使用慢变改正数时,应尽可能采用适用性时间早于当前时间的最新有效慢变改正数。

6.1.4.13 电文类型 26——电离层格网延迟信息

设备应能处理电文类型 26,并按照 B.2.3 和 B.2.5 的方法进行电离层改正数和 GIVE 解算。电文类型 26 通过 IODI 与电文类型 18 进行匹配。

6.1.4.14 电文类型 27——星基增强系统服务电文

如果星基增强系统播发该电文,设备使用时应检查所有电文类型 27 中包含的相关信息,以确定适用于用户定位解算的 δ_{UDRE} 参数。设备只在接收到完整的电文类型 27 之后,才能使用其中的信息。

注: BDSBAS 不广播电文类型 27。

6.1.4.15 电文类型 28——时钟-星历协方差矩阵

如果星基增强系统播发该电文,设备使用时应检查电文类型 28 中所包含的信息,以确定适用于用户定位解算的 δ_{UDRE} 参数。仅当电文类型 28 中的 IODP 与电文类型 1 中的相匹配时,才可使用电文类型 28 中的信息。如果没有接收到有效的电文类型 28,则 δ_{UDRE} 取值为 1。

6.1.4.16 电文类型 62——内部测试电文

设备收到电文类型 62 时,依然可以使用该 SBAS GEO 卫星播发的其他电文。

6.1.4.17 电文类型 63——空电文

设备无需对电文类型 63 进行处理。

6.1.4.18 电文有效期

设备只能使用未超期增强电文中的信息,针对不同的飞行阶段,增强电文的有效期见表 2。设备应使用有效期内的增强电文信息,直至接收到新的信息。针对 PRN 号和电离层的掩码信息,设备必须保存新旧两个版本的掩码信息,以实现掩码信息的平稳更替。

表 2 增强电文有效期

数据	电文类型	航路、终端区和进近(LNAV) 电文有效期 s	进近(LNAV/VNAV,LP,LPV) 电文有效期 s
不应用于安全应用	0	—	—
PRN 掩码	1	600	600
UDREI	2~6,24	18	12
快变改正数	2~5,24	见表 3	见表 3
慢变改正数	24,25	360	240
GEO 导航数据	9	360	240
快变改正数降效因子	7	360	240
降效因子参数	10	360	240
电离层掩码	18	1 200	1 200
电离层改正数,GIVEI	26	600	600
服务电文	27	86 400	86 400
时钟-星历协方差矩阵	28	360	240
系统时差	12	86 400	86 400
历书数据	17	无	无

表 3 快变改正数有效期

快变改正数降效因子索引(ai_i)	航路、终端区和进近(LNAV) 电文有效期 s	进近(LNAV/VNAV,LP,LPV) 电文有效期 s
0	180	120
1	180	120
2	153	102
3	135	90
4	135	90
5	117	78
6	99	66
7	81	54
8	63	42

表 3 快变改正数有效期（续）

快变改正数降效因子索引(ai_i)	航路、终端区和进近(LNAV) 电文有效期 s	进近(LNAV/VNAV,LP,LPV) 电文有效期 s
9	45	30
10	45	30
11	27	18
12	27	18
13	27	18
14	18	12
15	18	12

6.1.4.19 电文使用

在进近(LNAV/VNAV、LP 或 LPV)过程中,设备应从同一颗 SBAS GEO 卫星接收所有被增强卫星的改正数和完好性信息。

如果使用不同 SBAS GEO 卫星播发的增强电文,设备应考虑产生改正数参考时间的差异。

6.1.5 卫星完好性状态

6.1.5.1 卫星完好性状态分类

设备应按照 6.1.5.3~6.1.5.5 的规定,将每颗 GPS 卫星和 SBAS GEO 卫星(含 BDSBAS 卫星)标识为“SBAS UNHEALTHY”“SBAS UNMONITORED”和“SBAS HEALTHY”之一。设备还应按照 6.1.5.6和 6.1.5.7 的规定,将每颗 GPS 卫星标识为“GPS HEALTHY”或“GPS UNHEALTHY”。

6.1.5.2 跳变检测

设备应在定位解算中对大于 700 m 的伪距跳变以及导致失锁时间少于 10 s 的跳变进行检测,并将产生跳变的卫星从定位解算中排除。

6.1.5.3 “SBAS UNHEALTHY”标识

当出现以下任何情况时,设备应将 GPS 卫星或 SBAS GEO 卫星标识为“SBAS UNHEALTHY”:

- a) 该颗 GPS 卫星的 UDREI=15;
- b) 检测到该 GPS 卫星出现伪距跳变;
- c) 对于 SBAS GEO 卫星,该颗卫星的 URAI \geq 15;
- d) 对于 SBAS GEO 卫星,4 个连续增强电文 CRC 校验失败。

仅当不存在上述情况时,才可清除该卫星的“SBAS UNHEALTHY”标识。当 SBAS GEO 卫星因上述任一情况被标识为“SBAS UNHEALTHY”时,可以继续使用该卫星播发的改正数和完好性信息。

6.1.5.4 “SBAS UNMONITORED”标识

当出现以下任何情况时,设备应将 GPS 卫星或 SBAS GEO 卫星标识为“SBAS UNMONITORED”:

- a) 该 GPS 卫星的 UDREI=14;

- b) 未提供该 GPS 卫星的星基增强数据(卫星不在掩码中);
- c) 未接收到星基增强信号(影响所有卫星);
- d) 星基增强数据已超时;
- e) 在使用慢变改正数情况下,IOD 与 IODE 无法匹配。

仅当不存在上述情况时,才可清除该 GPS 卫星的“SBAS UNMONITORED”标识。

6.1.5.5 “SBAS HEALTHY”标识

如果同时满足以下条件,设备应将 GPS 卫星或 SBAS GEO 卫星标识为“SBAS HEALTHY”:

- a) 未检测出伪距跳变;
- b) 该卫星的 UDREI \neq 14 或 15。

6.1.5.6 “GPS UNHEALTHY”标识

当 GPS 卫星导航电文出现以下任何情况时,设备应将该 GPS 卫星标识为“GPS UNHEALTHY”:

- a) 子帧 1 中 6 位健康字的 MSB=1;
- b) 连续 5 个字奇偶校验失败(3 s);
- c) URAI \geq 8;
- d) HOW 的第 18 位为 1;
- e) 子帧 1、2 或 3 中的所有位都是 0;
- f) 在子帧 1、2 或 3 中传输默认的数据(1 和 0 交替);
- g) 同步头不等于 8B(十六进制)。

仅当不存在上述情况时,才可清除该卫星的“GPS UNHEALTHY”标识。

6.1.5.7 “GPS HEALTHY”标识

如果 GPS 卫星不符合 6.1.5.6 列出的任何情况(即未标识为“GPS UNHEALTHY”),则设备应将其标识为“GPS HEALTHY”。

6.1.6 卫星选择

设备应使用至少一颗提供有效信息的 SBAS GEO 卫星播发的增强电文。如果同时可接收到多颗 SBAS GEO 卫星信号,应选择使用最佳(如最佳仰角)的信号。具体要求如下。

- a) 设备应同时接收两颗 SBAS GEO 卫星信号,以确保在失去一颗 SBAS GEO 卫星信号的情况下,依然可以使用另一颗 SBAS GEO 卫星的信号。并能够在两颗 SBAS GEO 卫星数据流之间切换,以最大限度地保持功能的连续性。
- b) 设备应从定位解算中排除任何被标识为“GPS UNHEALTHY”的卫星。设备应自动选择参与导航定位解算和 FDE 算法的卫星。设备应能够将星基增强卫星的观测数据(如可用)使用到定位解算中。设备应在定位解算和保护级解算中使用同一组卫星。
- c) “SBAS HEALTHY”标识的优先级高于“GPS UNHEALTHY”标识,但不包括由于连续五个字的奇偶校验失败或由于默认数据(1 和 0 交替)而被标识为“GPS UNHEALTHY”的 GPS 卫星。
- d) 在 LNAV/VNAV、LP、LPV 阶段飞行,只有被标识为“SBAS HEALTHY”且 UDREI $<$ 12 的卫星才能用于定位解算。
- e) 设备可选用/取消使用 SBAS 单频增强服务。

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行,需要使用同一颗 SBAS GEO 卫星播发的差分改正数和完好性信息。除此以外,可以使用不同 SBAS GEO 卫星播发的差分改正数和完好性信息,设备需要

将不同电文信息之间的参考时间进行统一,与同一颗 GPS 卫星相关的所有差分改正数和完好性信息需从同一颗 SBAS GEO 卫星进行接收。

6.1.7 有效位置要求

有效位置(95%)应要满足以下所有要求:

- a) 在 5 min 内接收和处理至少一颗 SBAS GEO 卫星的信号;
- b) 定位精度满足 6.2.1 的要求,并在第一次有效定位后持续满足该要求;
- c) 完好性满足 6.2.2.2 的要求。

6.1.8 初始捕获时间

在无任何初始化信息(如时间、位置、GPS 和星基增强卫星历书信息)的情况下,设备应能够获取卫星信号并确定其位置。在下述条件下,设备从通电到第一次输出有效位置(95%)的时间应少于 5 min:

- a) 经纬度初始精度在 60 n mile 以内¹⁾;
- b) 时间和日期的准确度为 1 min 以内;
- c) 具有有效的历书数据和卫星可见性;
- d) 在附录 A 的干扰环境下;
- e) 在 6.1.10 规定的信号条件下。

6.1.9 卫星捕获时间

6.1.9.1 GPS 卫星捕获时间

在附录 A 的干扰环境下,在持续输出有效位置(95%)60 s 后,设备应能在 80 s 内将新的 GPS 卫星信号并入定位解算,并输出有效位置(95%)。

6.1.9.2 SBAS GEO 卫星捕获时间

在附录 A 的干扰环境下,在持续输出有效位置(95%)60 s 后,设备能够获取新的 SBAS GEO 卫星信号,能使用新的增强信息进行保护级解算,并在 134 s 内将该卫星信号并入定位解算,并输出有效位置(95%)。

6.1.10 卫星重捕时间

在附录 A 的干扰环境下,当卫星信号中断时间 ≤ 30 s 且其余卫星的 GDOP ≤ 6 时,设备应在重新接收到该卫星信号后的 20 s 内重新捕获该卫星。

6.1.11 灵敏度和动态范围

本条规定了有源天线的相关要求,有源天线包含一个前置放大器,天线组成如图 2 所示。有源天线应符合 RTCA DO-301 的要求。如果设备使用非标准天线,则应根据 RTCA DO-301 中规定的试验方法进行验证。

1) 1 n mile $\approx 1\,852$ m。

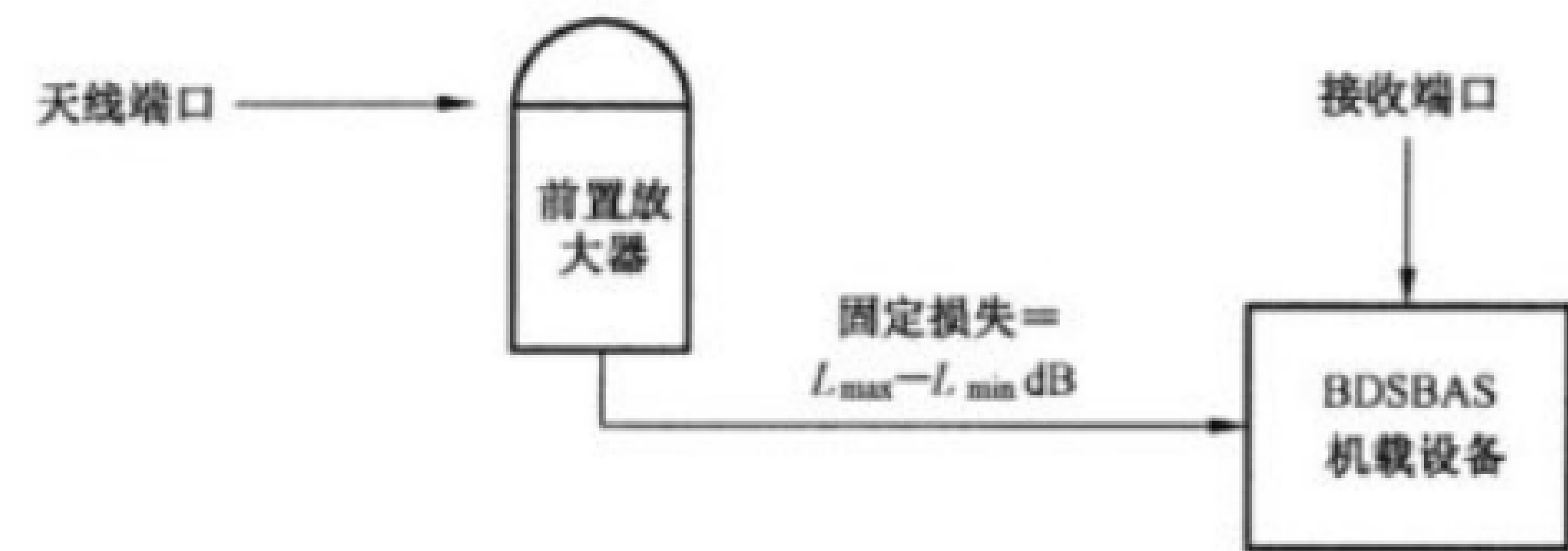


图 2 有源天线组成

天线制造商需要在天线安装说明中对前置放大器的最小和最大增益以及相应的最小和最大安装损耗进行定义。

- a) 搭载 RTCA DO-301 最小性能要求天线的设备：设备可接收 GPS 卫星和 SBAS GEO 卫星信号的最小输入功率为 -136.5 dBm ，最大输入功率为 -115.5 dBm 。在附录 A 的干扰环境和天线热噪声 ($N_{\text{sky, antenna}}$) 为 -172.5 dBm/Hz 条件下，设备能以信号最小输入功率 -134 dBm 捕获、跟踪 GPS 卫星和 SBAS GEO 卫星。该设备捕获和跟踪 GPS 卫星的信号最大功率为 -121 dBm ，捕获和跟踪 SBAS GEO 卫星的最大功率为 -115.5 dBm 。
- b) 搭载 RTCA DO-301 特定要求天线的设备：空间信号功率电平以 0 dBi 圆极化天线的输出为基准。设备可接收 GPS 卫星和 SBAS GEO 卫星信号的最小功率为 -131 dBm ，最大功率为 -119.5 dBm 。在附录 A 的干扰条件和天线热噪声 ($N_{\text{sky, antenna}}$) 存在的情况下，设备能够以 -128.5 dBm 的功率捕获和跟踪 GPS 卫星和 SBAS GEO 卫星。该设备捕获和跟踪 GPS 卫星空间信号的最大功率为 -123 dBm ，捕获和跟踪 SBAS GEO 卫星空间信号的最大功率为 -119.5 dBm 。

6.1.12 抗烧毁保护

对于符合 RTCA DO-301 或 RTCA DO-228 要求的天线，当天线端口处前置放大器的输入为 $+20\text{ dBm}$ ，设备应能接收 3 dB 带宽内的连续波信号而不被损坏。

6.1.13 存在干扰时的完好性

当干扰信号功率高于附录 A 中的要求时，对于可能输出的误导信息的情况，设备应在告警时间内提供相应的完好性保障。当干扰信号恢复到附录 A 中要求且满足初始捕获条件时，设备应在 5 min 内自动恢复到稳态运行状态。

6.1.14 非正常情况下的输出

6.1.14.1 数据输出

当出现无法导航或无法实现完好性监测等影响航空器飞行的情况时，设备依然能够提供一些基本的数据输出。

6.1.14.2 保护级

设备应能够输出星基增强方式下的水平保护级 (HPL_{SBAS}) 或故障检测方式下的水平保护级 (HPL_{FD})。从参与水平保护级解算的 SBAS 电文的最后一位到达天线端口起，设备输出 HPL_{SBAS} 的延迟不应超过 2.0 s 。当从星基增强方式降级到故障检测方式时，设备应在 8.0 s 内输出 HPL_{FD} 。设备应能显示是否可以实现水平保护级解算，当水平保护级无法解算时，无法提供完好性监测。

6.1.14.3 导航告警

设备应在下列任何情况出现后 1 s 内提供导航能力丧失的告警：

- a) 断电；
- b) 设备故障或失效；
- c) 由于可用卫星数量不足，导致持续 5 s 或更长的时间无法进行定位解算；
- d) FDE 未在 8 s 内排除检测到的故障。

在上述情况终止后，设备应立即恢复正常运行状态。

6.2 不同飞行模式下的设备性能要求

6.2.1 精度

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行，在 6.1.10 规定的信号最小功率和附录 A 规定的干扰条件下，当 HDOP 归一化为 1.5 时，水平定位误差(95%)不应超过 32 m。

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行，假设码载波偏离服从平均值为零、标准偏差为 0.012 m/s 的正态分布，且设备在平滑滤波器连续运行 360 s 之后达到稳态运行状态，GNSS 卫星和 SBAS GEO 卫星的校正伪距误差统计值(RMS_{pr_air})要求如下：

- a) GPS 卫星信号最小功率情况下： $RMS_{pr_air, GPS} \leq 0.36$ m；
- b) GPS 卫星信号最大功率情况下： $RMS_{pr_air, GPS} \leq 0.15$ m；
- c) SBAS GEO 卫星最小功率情况下： $RMS_{pr_air, GEO} \leq 1.8$ m；
- d) SBAS GEO 卫星最大功率情况下： $RMS_{pr_air, GEO} \leq 1.0$ m。

6.2.2 完好性

6.2.2.1 开发保证

设备的硬件和软件设计应保证在出现故障的情况下，设备能够提供有效的完好性保障。

硬件应符合 RTCA DO-178C 或 RTCA DO-254 中关于硬件设备的相关要求。

软件应符合 RTCA DO-178C 中关于软件的相关要求。

6.2.2.2 完好性监测

6.2.2.2.1 完好性监测的基本要求

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行模式，设备应能计算 HPL_{SBAS} 或 HPL_{FD} 。

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行模式，设备应能计算 HPL_{SBAS} 和 VPL_{SBAS} 。如从星基增强方式降级至故障检测方式，设备应能计算 HPL_{FD} 和 VPL_{FD} 。

6.2.2.2.2 星基增强完好性监测

设备应仅使用标识为“SBAS HEALTHY”的卫星进行保护级解算。

6.2.2.2.3 FDE 完好性监测

6.2.2.2.3.1 FDE 提供的完好性监测

设备应具有 FDE 功能，并符合 RTCA DO-316 相关要求。

6.2.2.2.3.2 告警时间

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行模式，基于 FDE 的完好性监测应在 8 s 内发出告警。

6.2.2.2.3.3 故障检测频度

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行模式,设备应至少每分钟执行一次故障检测,或在参与定位解算的卫星发生变化后的 6 s 内执行一次。

6.2.2.2.3.4 漏警率

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行模式,漏警率应 $\leq 10^{-3}$ 。

6.2.2.2.3.5 误警率

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行模式,每个检测样本的误警概率应 $\leq 3.33 \times 10^{-7}$ 。

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行模式,每个检测样本的误警概率应 $\leq 1.6 \times 10^{-5}$ 。

6.2.2.2.3.6 故障隔离率

针对航路、终端区、LNAV 进近飞行模式,故障隔离率应 $\leq 10^{-3}$ 。

6.2.2.2.3.7 可用性

针对航路、终端区飞行模式,在屏蔽角为 5° ,HAL 为 0.3 n mile,且满足 6.2.2.2.3.1~6.2.2.2.3.6 要求的条件下,FDE 的检测可用性应优于 99.95%,隔离可用性应优于 99.30%;在屏蔽角为 5° ,HAL 为 1 n mile,且满足 6.2.2.2.3.1~6.2.2.2.3.6 要求的条件下,FDE 的检测可用性应优于 99.90%,隔离可用性应优于 98.45%。

针对 LNAV 进近飞行模式,在屏蔽角为 5° ,HAL 为 2 n mile,且满足 6.2.2.2.3.1~6.2.2.2.3.6 要求的条件下,FDE 的检测可用性应优于 99.80%,隔离可用性应优于 93.10%;在屏蔽角为 5° ,HAL 为 1 n mile,且满足 6.2.2.2.3.1~6.2.2.2.3.6 要求的条件下,FDE 的检测可用性应优于 96.30%,隔离可用性应优于 45.40%。

针对 LNAV/VNAV、LP 和 LPV 进近飞行模式,在屏蔽角为 5° ,VAL 为 25 m,且满足 6.2.2.2.3.1~6.2.2.2.3.6 要求的条件下,FDE 可用性应优于 95%。

6.2.3 可靠性

设备应可靠运行,平均无故障时间应 $> 20\,000$ h。

6.2.4 卫星跟踪能力

设备应同时跟踪至少 8 颗 GPS 卫星,或者同时跟踪至少 6 颗 GPS 卫星和 2 颗 SBAS GEO 卫星,并能解调和存储 2 颗 SBAS GEO 卫星的数据。

6.2.5 跟踪约束

6.2.5.1 概述

在卫星运行过程中,可能会由下述原因导致发生故障,影响卫星性能,应对延迟锁相环(DLL)鉴相器相关器间距、接收机带宽和接收机差分群时延等接收设备性能进行约束。

- a) 多个相关峰导致卫星信号失真;
- b) 由杂散信号引起的相关峰不对称;
- c) 射频滤波器失真导致的相干杂散信号;
- d) 相关峰导致过多的噪声或漂移;

e) 基于瞬态卫星信号畸变条件的鉴相器响应。

6.2.5.2 GPS 信号跟踪约束

表 4 规定了用于跟踪 GPS 卫星信号的早-迟(E-L)DLL 鉴相器,设备的预相关带宽、相关器间距(d)和差分群时延参数的范围。

表 4 用于 GPS 信号跟踪的(E-L)DLL 鉴相器参数

区域 (如图 3 所示)	3 dB 预相关带宽 BW	平均相关器间距 chip	瞬时相关器间距 chip	设备差分群时延
1	$2\text{ MHz} < BW \leq 7\text{ MHz}$	0.045~1.1	0.04~1.200	$\leq 600\text{ ns} - N$
2	$7\text{ MHz} < BW \leq 16\text{ MHz}$	0.045~0.21	0.04~0.235	$\leq 150\text{ ns} - N$
3	$16\text{ MHz} < BW \leq 20\text{ MHz}$	0.045~0.12	0.04~0.150	$\leq 150\text{ ns} - N$

注： N 是通过前置放大器输出的天线分量。对于标准天线， N 是 25 ns。瞬时相关器间距定义为相关函数的一组特定早-迟样本之间的间距。平均相关器间距定义为瞬时相关器间距的 1 s 平均值。平均值适用于任何一秒钟的时间范围。

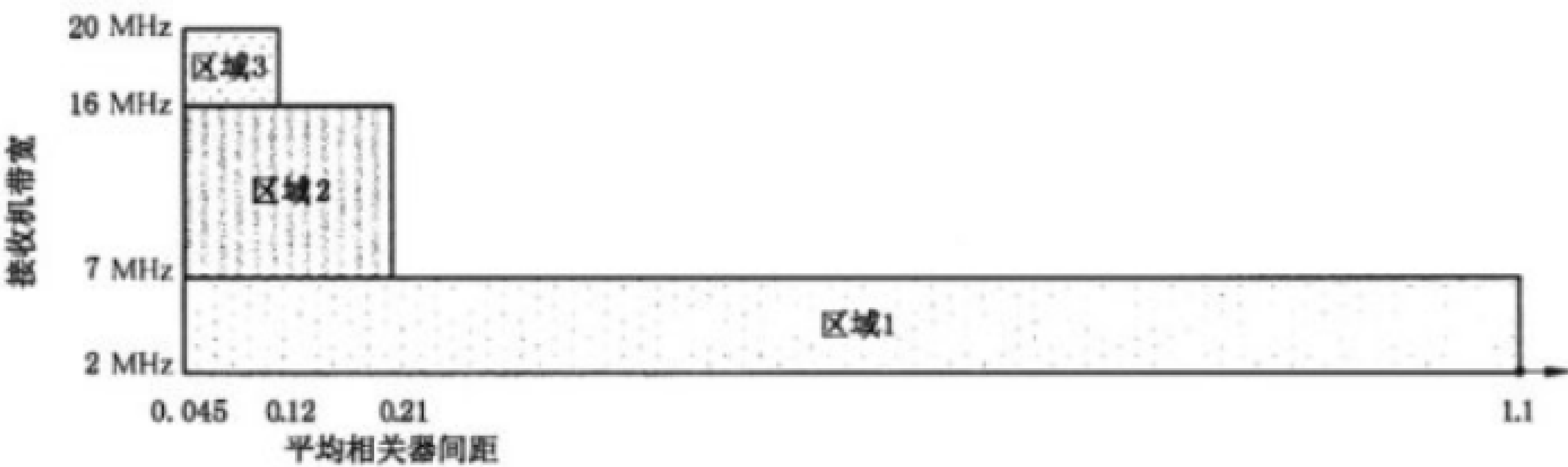


图 3 (E-L)DLL 鉴相器的接收机带宽和平均相关器间距

表 5 规定了用于 $\Delta = 2\Delta_{d_1} - \Delta_{2d_1}$ 型跟踪 GPS 卫星的双增量(DD)DLL 鉴相器,设备的预相关带宽、相关器间距(d_1 和 $2d_1$)和差分群时延参数的范围。鉴相器(Δ)应基于规定范围内相关器间距的平均值。可以使用相干或非相干鉴相器。

表 5 用于 GPS 跟踪的(DD)DLL 鉴相器参数

区域 (如图 4 所示)	3 dB 预相关带宽 BW	平均相关器间距 (d_1 和 $2d_1$) chip	瞬时相关器间距 (d_1 和 $2d_1$)	设备差分 群时延
1	$-50x + 12\text{ MHz} < BW \leq 7\text{ MHz}$	0.1~0.2	0.09~0.22	$\leq 600\text{ ns} - N$
	$2\text{ MHz} < BW \leq 7\text{ MHz}$	0.2~0.6	0.18~0.65	
2	$-50x + 12\text{ MHz} < BW \leq 40x + 11.2\text{ MHz}$	0.045~0.07	0.04~0.077	$\leq 150\text{ ns} - N$
	$-50x + 12\text{ MHz} < BW \leq 14\text{ MHz}$	0.07~0.1	0.062~0.11	

表 5 用于 GPS 跟踪的(DD)DLL 鉴相器参数 (续)

区域 (如图 4 所示)	3 dB 预相关带宽 BW	平均相关器间距 (d_1 和 $2d_1$) chip	瞬时相关器间距 (d_1 和 $2d_1$)	设备差分 群时延
2	$7\text{ MHz} < BW \leq 14\text{ MHz}$	$0.1 \sim 0.24$	$0.09 \sim 0.26$	$\leq 150\text{ ns} - N$
3	$14\text{ MHz} < BW \leq 16\text{ MHz}$	$0.07 \sim 0.24$	$0.06 \sim 0.26$	$\leq 150\text{ ns} - N$
注 1: 其中 x 是平均相关器间距。 注 2: N 是通过前置放大器输出的天线分量。对于标准天线, N 是 25 ns 。				

设备差分群延迟由公式(1)定义。

$$\frac{1}{360} \cdot \left| \frac{d[\phi(f_1)]}{df} - \frac{d[\phi(f_2)]}{df} \right| \dots\dots\dots (1)$$

式中，
 f_1, f_2 ——预相关滤波器的 3 dB 带宽内的任何频率；
 $\phi(f)$ ——设备的组合相位响应，单位为度(不包括天线)；
 f ——频率，单位为赫兹(Hz)。
对于(DD)DLL 鉴相器，预相关滤波器应在过渡带中每倍频程至少衰减 30 dB。

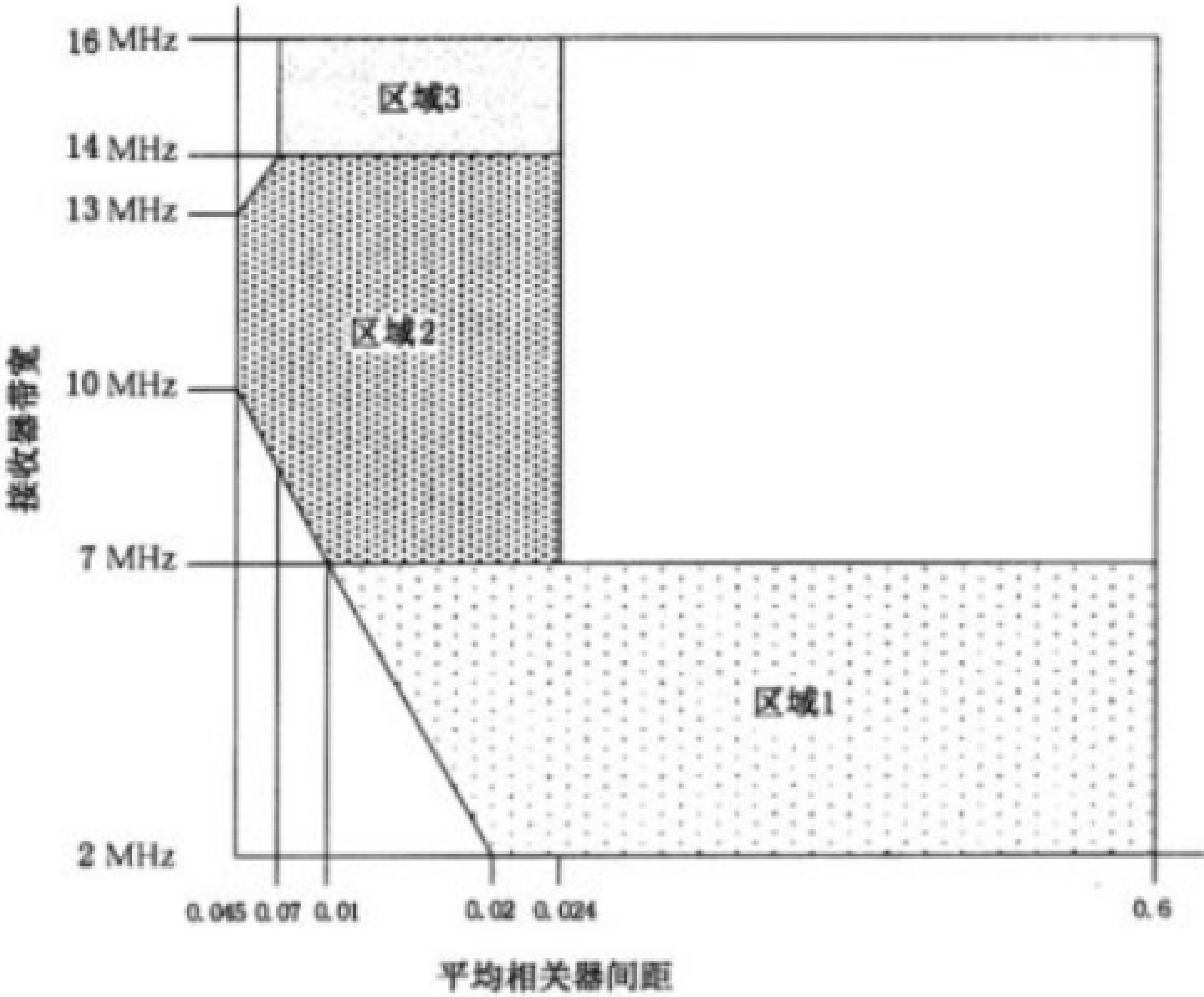


图 4 (DD)DLL 鉴相器的接收机带宽和平均相关器间距

6.2.5.3 SBAS 信号跟踪约束

表 6 规定了用于跟踪 SBAS GEO 卫星的(E-L)DLL 和(DD)DLL 鉴相器,设备的预相关带宽、相关器间距(d 、 d_1 和 $2d_1$)和差分群时延参数的范围。

表 6 SBAS GEO 卫星信号跟踪参数

区域	3 dB 预相关带宽 BW	平均相关器间距 (d, d_1 和 $2d_1$) chip	瞬时相关器间距 (d, d_1 和 $2d_1$) chip	设备差分 群时延
1	$2\text{ MHz} < BW \leq 7\text{ MHz}$	0.045~1.1	0.04~1.2	$\leq 600\text{ ns} - N$
2	$7\text{ MHz} < BW \leq 20\text{ MHz}$	0.045~1.1	0.04~1.2	$\leq 150\text{ ns} - N$
注：N 是通过前置放大器输出的天线分量。对于标准天线，N 是 25 ns。				

对于(DD)DLL 鉴相器，预相关滤波器应在过渡带中每倍频程至少衰减 30 dB。

6.2.6 相关峰验证

设备应获取用于导航解算的每颗 GPS 卫星的主码相关峰值。对于(DD)DLL 鉴相器，设备应在主码相关峰值内最强峰值相对应的跟踪点处工作。

6.2.7 动态跟踪

6.2.7.1 航路、终端区

当航空器在表 7 所列最大地速和加速度条件下进行机动时，设备应满足 6.2.1 的精度要求、6.1.8 的卫星捕获时间要求和 6.1.9 的卫星重捕要求。

表 7 航路、终端区阶段航空器正常机动参数最大值

参数	地速	水平加速度	垂向加速度	加加速度
取值	800 kn	0.58 g	0.5 g	0.25 g/s
注：1 kn(节)=1 n mile/h=0.514 444 m/s，重力加速度 $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。				

当航空器的最大地速和加速度超过表 8 所列数值时，认为航空器出现异常机动。在异常机动情况下，设备不应输出误导性信息，导航监测和完好性监测功能应按规定运行。当航空器从异常机动恢复到正常机动时，应满足 6.1.9 的卫星重捕要求。

表 8 航路、终端区阶段航空器异常机动参数最大值

参数	地速	水平加速度	垂向加速度	加加速度
取值	800 kn	2 g	1.5 g	0.74 g/s

6.2.7.2 LNAV、LNAV/VNAV、LP、LPV

当航空器在表 9 所列最大地速和加速度条件下进行机动时，设备应满足 6.2.1 的精度要求、6.1.8 的卫星捕获时间要求和 6.1.9 的卫星重捕要求。

表 9 LNAV、LNAV/VNAV、LP、LPV 阶段航空器正常机动参数最大值

参数	地速	水平加速度	垂向加速度	加加速度
取值	250 kn	0.58 g	0.5 g	0.25 g/s

当航空器的最大地速和加速度超过表 10 所列数值时，认为航空器出现异常机动。在异常机动情况

下,设备不应输出误导性信息,导航监测和完好性监测功能应按规定运行。当航空器从异常机动恢复到正常机动时,应满足 6.1.9 的卫星重捕要求。

表 10 LNAV、LNAV/VNAV、LP、LPV 阶段航空器异常机动参数最大值

参数	地速	水平加速度	垂向加速度	加加速度
取值	250 kn	2 g	1.5 g	0.74 g/s

6.2.8 位置输出

6.2.8.1 基本要求

设备应能输出在 BDCS 坐标系下的位置数据(包括位置、速度、保护级等)。

6.2.8.2 输出频度

航路、终端区、LNAV、LNAV/VNAV 阶段,位置数据的最小计算和输出频度为 1 Hz。

LP、LPV 阶段,无其他传感器(如惯导)辅助情况下,位置数据的最小计算和输出频度为 1 Hz;有其他传感器辅助情况下,位置数据的最小计算和输出频度为 5 Hz。

6.2.8.3 输出延迟

航路、终端区、LNAV、LNAV/VNAV 阶段,位置数据的输出延迟应 ≤ 500 ms。

LP、LPV 阶段,无其他传感器(如惯导)辅助情况下,位置数据的输出延迟应 ≤ 300 ms;有其他传感器辅助情况下,位置数据的输出延迟应 ≤ 400 ms。

附 录 A
(规范性)
标准接收信号和干扰环境

A.1 概述

本附录规定了 BDSBAS 机载设备 L 频段带内及其带外的射频干扰环境。描述了标准天线的频率选择要求。

所有信号电平均以天线端口处测得的 dBm 为单位。就本设备的最小性能规范而言：

- a) 带内和近带频率定义在 $1\,575.42\text{ MHz} \pm 20\text{ MHz}$ 的范围内；
- b) 带外频率定义为在带内和近带频率范围之外。

A.2 干扰环境

A.2.1 概述

干扰电平的参考基准为天线端口，与天线辐射方向图无关。图 A.1 显示了运行干扰环境，包括带内和近带干扰，天线口面总干扰功率与接收带宽的函数关系如图 A.2 所示。最低标准天线的频率选择性如图 A.3 所示，用于定义使用这种天线的设备的工作环境。

A.2.2 带外干扰

在天线端口进行测量，带外连续波(CW)干扰信号可能达到如图 A.1 所示的水平。1 500 MHz 以下的连续波干扰电平在 1 315 MHz 时线性增加到 25.5 dBm。高强度辐射场(HIRF)连续波电平在 1 640 GHz 以上线性增加，在 2k GHz 时达到 21.5 dBm。

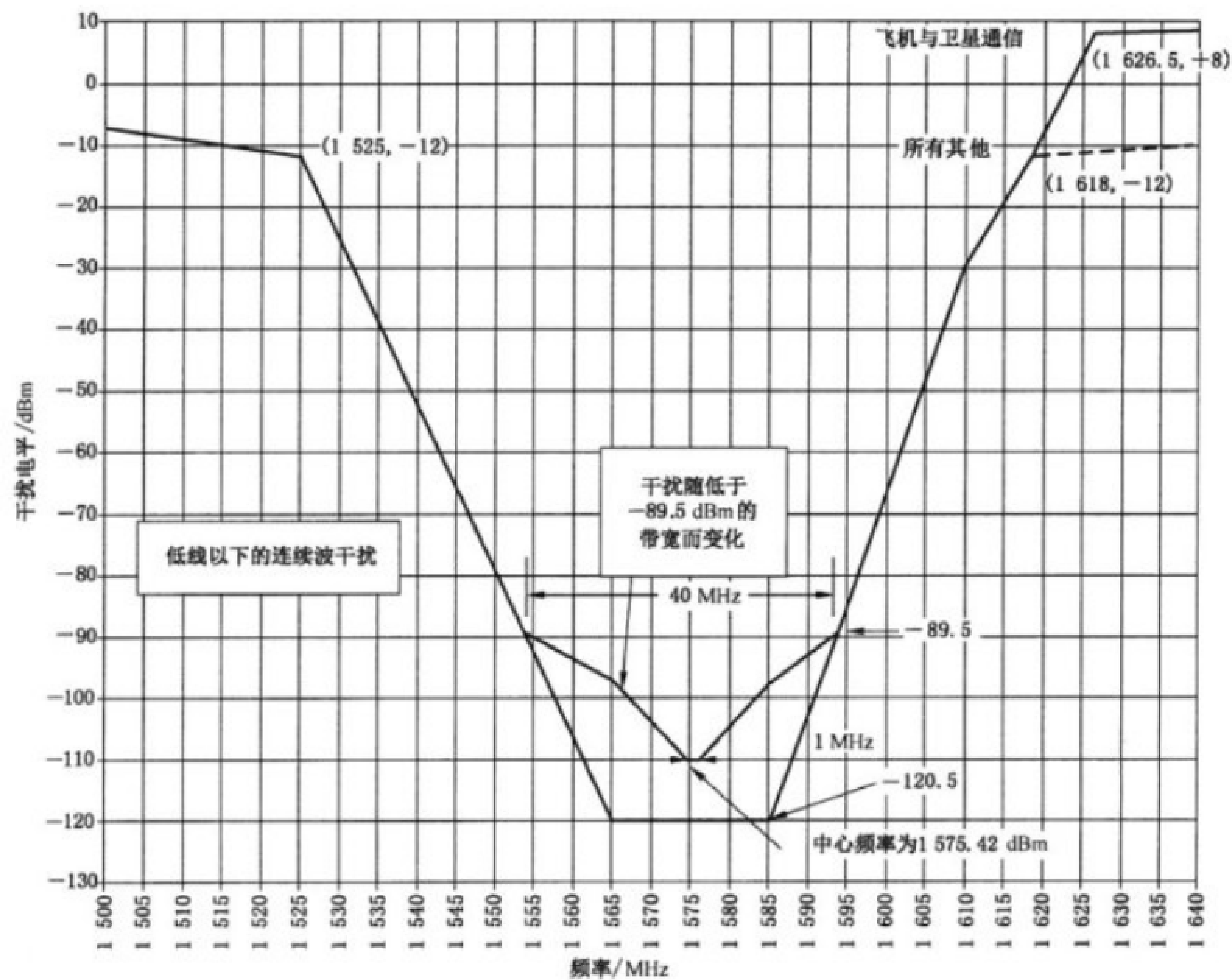


图 A.1 天线端口的干扰电平

所有飞行阶段运行的设备在建立稳态导航后,可在上述规定的带外频率范围内承受脉冲干扰。其特性见表 A.1。

表 A.1 带外脉冲干扰

	GPS/SBAS
峰值功率	+30 dBm
脉冲宽度	125 μ s
脉冲占空比	1%

A.2.3 带内和近带干扰

带内和近带干扰环境基线适用于稳态导航。对于 GPS 和 SBAS 信号的初始捕获,其带内和近带干扰比稳态导航低 6 dB。干扰带宽为 3 dB。

稳态导航建立后,设备可承受频率范围为 $1575.42 \pm BW_1/2$ MHz 的干扰信号,该信号与表 A.2 中定义的电平一样高,是干扰信号带宽(BW_1)的函数。

表 A.2 带内和近带干扰带宽定义

带宽	干扰电平
$0 \leq BW_1 \leq 700 \text{ Hz}$	-120.5 dBm
$700 \text{ Hz} < BW_1 \leq 10 \text{ kHz}$	从 -120.5 dBm ~ -113.5 dBm 线性增长 ^a
$10 \text{ kHz} < BW_1 \leq 100 \text{ kHz}$	从 -113.5 dBm ~ -110.5 dBm 线性增长 ^a
$100 \text{ kHz} < BW_1 \leq 1 \text{ MHz}$	-110.5 dBm
$1 \text{ MHz} < BW_1 \leq 20 \text{ MHz}$	从 -110.5 dBm ~ -97.5 dBm ^b 线性增长 ^a
$20 \text{ MHz} < BW_1 \leq 30 \text{ MHz}$	从 -97.5 dBm ~ -97.1 dBm ^b 线性增长 ^a
$30 \text{ MHz} < BW_1 \leq 40 \text{ MHz}$	从 -97.1 dBm ~ -89.5 dBm ^b 线性增长 ^a
$40 \text{ MHz} < BW_1$	-89.5 dBm

^a 对于图 A.2 所示的装置,干扰功率的增加是线性的。

^b 在 $1\,575.42 \pm 10 \text{ MHz}$ 的频率范围内,干扰水平不应超过 -110.5 dBm/MHz。

这些干扰电平作为带宽的函数,如图 A.2 所示。

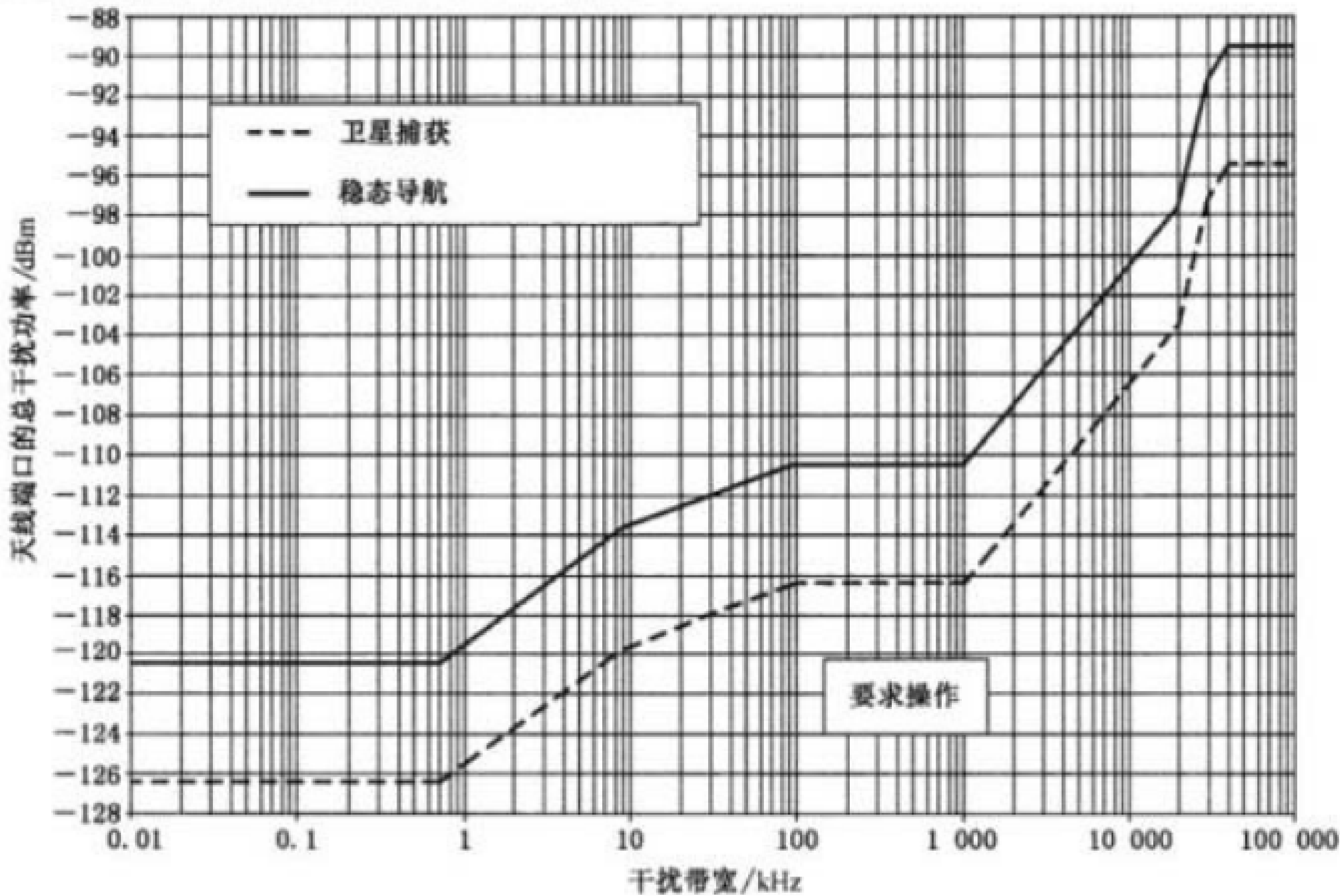


图 A.2 带内和近带干扰环境

稳态导航建立后,在所有飞行阶段运行的设备可在上述规定的带内和近带频率范围内承受脉冲干扰,其特性见表 A.3。

表 A.3 带内和近带脉冲干扰

参数	GPS/SBAS
功率峰值	+10 dBm
脉冲宽度	125 μs
脉冲占空比	1%
信号带宽	1 MHz

A.2.4 GNSS 噪声

GNSS 噪声是一种宽带噪声,其频谱密度对设备的影响相当于 GNSS 环境的总功率,包括来自 GPS 星座的 GPS C/A、P/Y 和 M 码信号、来自所有星基增强系统增强服务的 C/A 码信号。由于不同的信号耦合和操作要求,表 A.4 中规定了不同接收器功能的值。

表 A.4 所有 GNSS 源的有效噪声密度

接收机功能	有效噪声密度 dBm/Hz
GPS 信号初始捕获	-172.2
GPS 信号跟踪和重捕	-171.9
SBAS 信号跟踪和重捕	-172.8
注:假设接收机首先捕获 GPS 卫星信号,因此无需 SBAS 信号的初始捕获。	

A.3 天线频率选择性最低标准

当使用最低标准天线接收时,干扰信号至少满足表 A.5 和图 A.3 中所示的频率衰减特性。

表 A.5 频率选择性

频率	衰减特性
$1\,315\text{ MHz} \leq f < 1\,504.42\text{ MHz}$	-50 dB
$1\,504.42\text{ MHz} \leq f < 1\,554.42\text{ MHz}$	从-50 dB~-5 dB 线性增长
$1\,554.42\text{ MHz} \leq f < 1\,558.52\text{ MHz}$	从-5 dB 线性增长
$1\,558.42\text{ MHz} \leq f < 1\,591.92\text{ MHz}$	0 dB
$1\,591.92\text{ MHz} \leq f < 1\,605.42\text{ MHz}$	从-25.35 dB 线性增长
$1\,605.42\text{ MHz} \leq f < 1\,625.42\text{ MHz}$	从-25.35 dB~-50 dB 线性增长
$1\,625.42\text{ MHz} \leq f < 2\,000\text{ MHz}$	-50 dB

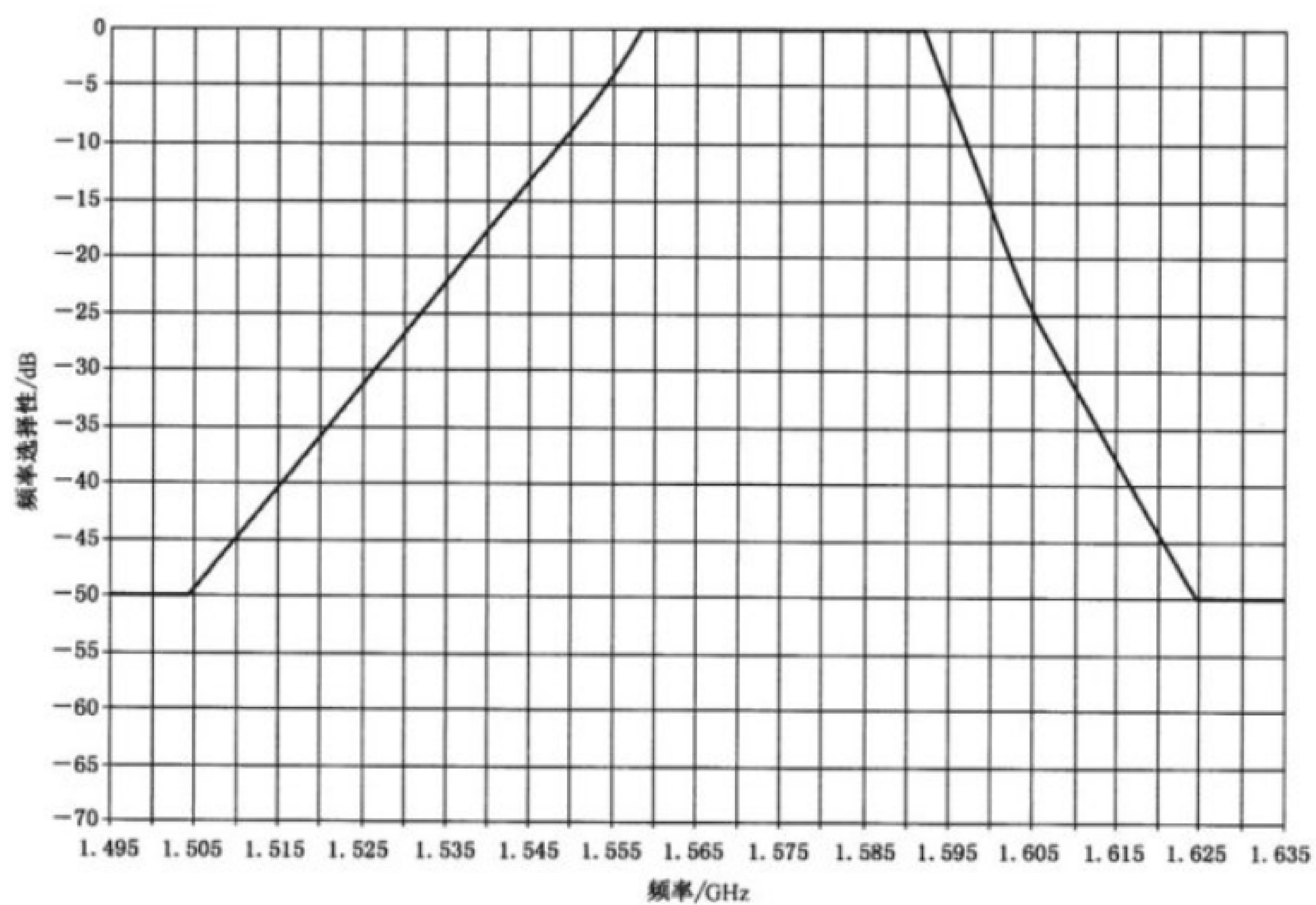


图 A.3 频率选择性

附录 B

(规范性)

单频星基增强服务机载用户端数据处理方法

B.1 导航电文解算

B.1.1 导航电文参数获取

GPS 导航电文获取应符合 IS-GPS-200M 中的规定。

B.1.2 GPS 卫星星历位置解算

GPS L1C/A 信号广播星历中的轨道参数见表 B.1。

表 B.1 GPS 卫星星历参数

编号	符号	描述
1	t_{oe}	星历参考时间
2	$\sqrt{a_e}$	卫星轨道半长轴 a_e 的平方根
3	e_e	轨道偏心率
4	i_0	t_{oe} 时的轨道倾角
5	Ω_0	周内秒等于 0 时的轨道升交点赤经
6	ω	轨道近地点角距
7	M_0	平近点角
8	Δn	平均运动角速度校正值
9	\dot{i}	轨道倾角对时间的变化率
10	$\dot{\Omega}$	轨道升交点赤经对时间的变化率
11	C_{uc}	升交点角距余弦调和校正振幅
12	C_{us}	升交点角距正弦调和校正振幅
13	C_{rc}	轨道半径余弦调和校正振幅
14	C_{rs}	轨道半径正弦调和校正振幅
15	C_{ic}	轨道倾角余弦调和校正振幅
16	C_{is}	轨道倾角正弦调和校正振幅

在开普勒轨道参数中,真近点角 ν 不便于测量,因此提供了两个辅助量用于计算:偏近点角 E 和平近点角 M 。偏近点角 E 如图 B.1 所示,为 $\angle QCN$ 。

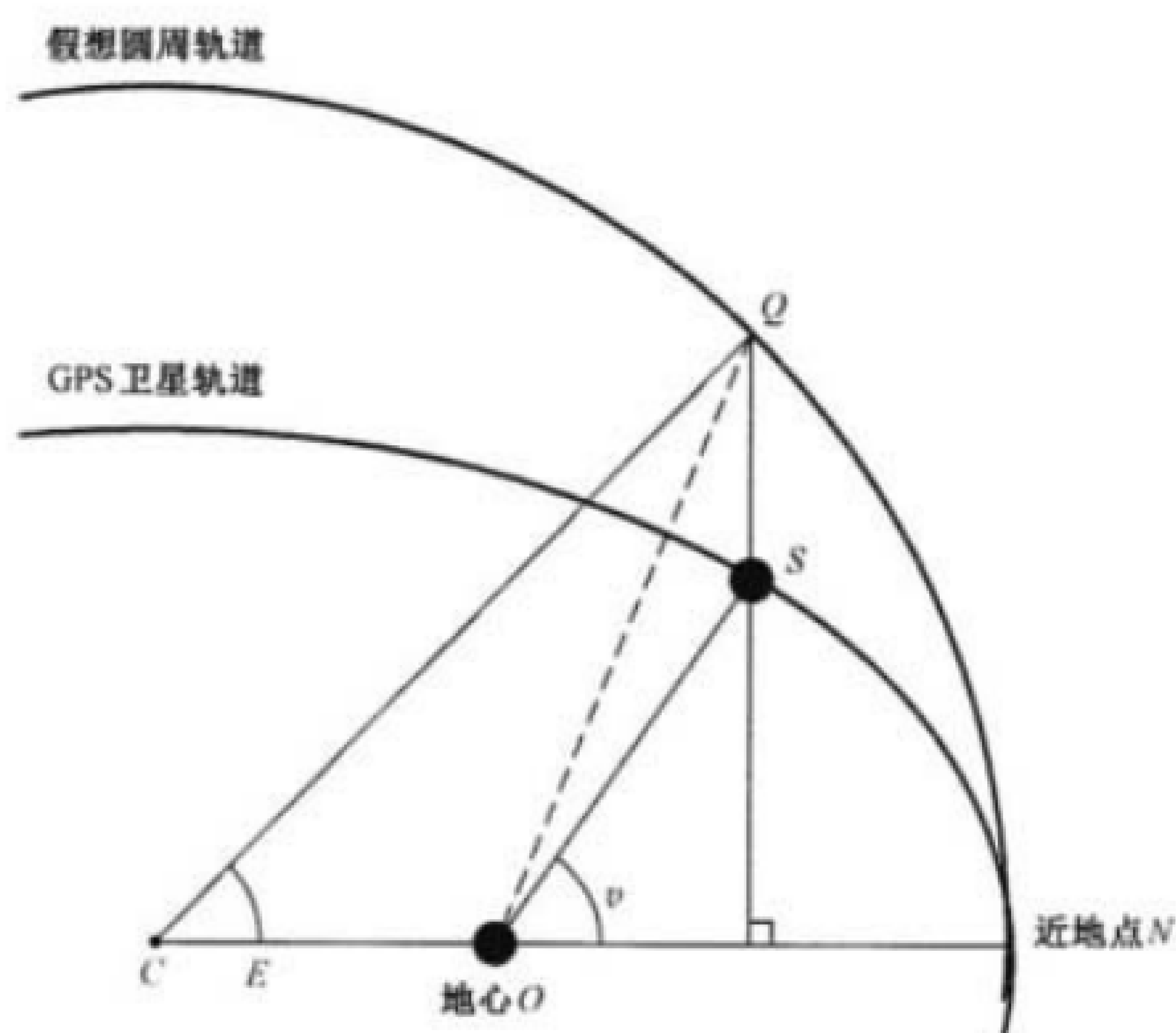


图 B.1 偏近点角示意图

平近点角 M 为一个虚构量,不是图 B.1 中的真实角,但在计算中有实际意义。假设有一颗卫星在以 C 为圆心、 NC 为半径的圆周轨道上运行,角速度与 GNSS 卫星的平均角速度 n 相等,且与 GNSS 卫星在 t_0 时刻同时经过近地点 N 并运行方向一致,那么这颗假想卫星在 t 时刻的运行角距就是平近点角 M ,见公式(B.1)。

$$M = n(t - t_0) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

在 GNSS 卫星实际运行过程中,不只受到地球的作用力,所以卫星运行轨道并非无摄轨道,所以在 GNSS 星历中提供了扩展轨道参数。利用这些参数解算卫星位置的过程如下所示。

第 1 步:计算归化时间 t_k

卫星星历给出的轨道参数均是以星历参考时间 t_{oe} 为基准的。需先计算参考时间 t_{oe} 与 GNSS 系统时间之间的差值,见公式(B.2)。

$$t_k = t - t_{oe} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

计算得到的 t_k 为相对于 t_{oe} 的归化时间,其绝对值应控制在 3.5 天之内。若 t_k 大于 302 400 s,则 t_k 应减去 604 800 s,当 t_k 小于 -302 400 s 时, t_k 应加上 604 800 s。

第 2 步:计算卫星的平均角速度 n

根据开普勒第三定律,计算上文中提到的做圆周运动的假想卫星的角速度,见公式(B.3),

$$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{a_s^3}} = \sqrt{\frac{\mu}{a_s^3}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

卫星角速度校正见公式(B.4),

$$n = n_0 + \Delta n \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

a_s ——卫星轨道半长轴;

Δn ——角速度校正值;

μ —— $3.986\ 005 \times 10^{14}$ 。

第 3 步:计算信号发射时刻的平近点角 M_k

将星历参数中的平近点角 M_0 代入公式(B.5)。

$$M_k = M_0 + nt_k \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

M_0 ——平近点角。

若求出的 M_k 值不在 $0 \sim 2\pi$ 之间,应对 M_k 值采取加上 2π 或减去 2π 处理,使其值变成在 $0 \sim 2\pi$ 范围内。

第4步:计算信号发射时刻的偏近点角 E_k 。

平近点角 M_k 与偏近点角 E_k 的关系由开普勒方程式给出,见公式(B.6)。

$$M = E - e_s \sin E \quad \text{.....(B.6)}$$

运用迭代法,将 E 的初始值设为 M_k ,一般迭代 10 次以内即可得到精确的 E_k 值。

第5步:计算信号发射时刻的真近地角 v_k 。

真近地角 v_k 与偏近点角 E_k 、偏心率 e_s 的关系见公式(B.7)~公式(B.9),代入 E_k 可求得在 $(-\pi, \pi]$ 范围内的 v_k 值。

$$\cos v = \frac{\cos E_k - e_s}{1 - e_s \cos E_k} \quad \text{.....(B.7)}$$

$$\sin v = \frac{\sqrt{1 - e_s^2} \sin E_k}{1 - e_s \cos E_k} \quad \text{.....(B.8)}$$

$$v = \arctan \left[\frac{\sqrt{1 - e_s^2} \sin E_k}{\cos E_k - e_s} \right] \quad \text{.....(B.9)}$$

第6步:计算信号发射时刻的升交点角距 Φ_k 。

计算升交点角距 Φ_k 见公式(B.10),

$$\Phi_k = v_k + \omega \quad \text{.....(B.10)}$$

式中:

ω ——轨道近地角距。

第7步:计算信号发射时刻的摄动校正项 δu_k 、 δr_k 和 δi_k 。

将星历中给出的参数 C_{uc} 、 C_{us} 、 C_{rc} 、 C_{rs} 、 C_{ic} 、 C_{is} 以及之前计算出的升交点角距 Φ_k 代入公式(B.11)~公式(B.13),

$$\delta u_k = C_{us} \sin(2 \Phi_k) + C_{uc} \cos(2 \Phi_k) \quad \text{.....(B.11)}$$

$$\delta r_k = C_{rs} \sin(2 \Phi_k) + C_{rc} \cos(2 \Phi_k) \quad \text{.....(B.12)}$$

$$\delta i_k = C_{is} \sin(2 \Phi_k) + C_{ic} \cos(2 \Phi_k) \quad \text{.....(B.13)}$$

第8步:计算摄动校正后的升交点角距 u_k 、卫星矢径长度 r_k 和轨道倾角 i_k 。

将上一步的计算结果带入公式(B.14)~公式(B.16)。

$$u_k = \Phi_k + \delta u_k \quad \text{.....(B.14)}$$

$$r_k = a_s (1 - e_s \cos E_k) + \delta r_k \quad \text{.....(B.15)}$$

$$i_k = i_0 + \Delta i \cdot t_k + \delta i_k \quad \text{.....(B.16)}$$

第9步:计算信号发射时刻卫星在轨道平面的位置 (x'_k, y'_k) 。

将极坐标系下的 (r_k, u_k) 转换为平面直角坐标系中的坐标 (x'_k, y'_k) , 计算见公式(B.17)。

$$\begin{cases} x'_k = r_k \cos u_k \\ y'_k = r_k \sin u_k \end{cases} \quad \text{.....(B.17)}$$

求得卫星在轨道平面的位置 (x'_k, y'_k) , 同时 $z'_k = 0$ 。此处的直角坐标系 X 轴为地心指向卫星升交点。

第10步:计算信号发射时刻的升交点赤经 Ω_k 。

由于存在扰动,升交点赤经不是一个常数,其线性化模型公式见公式(B.18)。

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{0e} \quad \text{.....(B.18)}$$

式中:

$\dot{\Omega}_e$ ——地球自转角速度常数。

公式(B.18)中已考虑了地球自转效应对卫星升交点与格林尼治子午面之间相对位置的影响。即得到的 Ω_k 值为 WGS-84 地心地固坐标系中的经度。

第 11 步:计算卫星在 WGS-84 地心地固坐标系(X_T, Y_T, Z_T)中的坐标(x_k, y_k, z_k)

公式(B.17)中求出的坐标值为轨道平面直角坐标系,将其转换到地心地固坐标系应利用公式(B.19)。

$$\begin{cases} x_k = x'_k \cos \Omega_k - y'_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ y_k = x'_k \sin \Omega_k + y'_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ z_k = y'_k \sin i_k \end{cases} \dots\dots\dots (B.19)$$

B.1.3 GPS 卫星运行速度解算

若要对用户位置进行解算,一般只需要应用卫星空间位置。但若需要求解用户的速度,则需求出卫星的速度。卫星的运行速度可由卫星位置求导得出,求出用星历参数表示的卫星速度,见公式(B.20)。

$$\begin{cases} \dot{x}_k = -y_k \dot{\Omega}_k - (\dot{y}'_k \cos i_k - z_k \Delta i_k) \sin \Omega_k + \dot{x}'_k \cos \Omega_k \\ \dot{y}_k = x_k \dot{\Omega}_k + (\dot{y}'_k \cos i_k - z_k \Delta i_k) \cos \Omega_k + \dot{x}'_k \sin \Omega_k \\ \dot{z}_k = \dot{y}'_k \sin i_k + y'_k \Delta i_k \cos i_k \end{cases} \dots\dots\dots (B.20)$$

其中, \dot{x}'_k 和 \dot{y}'_k 可以对时间求导求出,计算见公式(B.21)。

$$\begin{cases} \dot{x}'_k = \dot{r}_k \cos u_k - r_k \dot{u}_k \sin u_k \\ \dot{y}'_k = \dot{r}_k \sin u_k + r_k \dot{u}_k \cos u_k \end{cases} \dots\dots\dots (B.21)$$

B.1.4 GPS 卫星时钟偏差解算

GPS 卫星时钟偏差计算见公式(B.22)。

$$\Delta t^{(s)} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oe}) + a_{f2}(t - t_{oe})^2 \dots\dots\dots (B.22)$$

式中:

a_{f0} ——参考时刻的卫星时钟偏差;

a_{f1} ——卫星时钟漂移速度;

t_{oe} ——参考时间;

a_{f2} ——卫星时钟漂移速度的变化率的一半。

注:以上参数均由 GPS 卫星导航电文给出。

B.2 增强电文解算

B.2.1 快变改正数解算

快变改正数信息由单频星基增强系统的增强电文类型 2~5 和 24 播发,计算见公式(B.23)。

$$\text{PRC}(t) = \text{PRC}(t_{of}) + \text{RRC}(t_{of}) \times (t - t_{of}) \dots\dots\dots (B.23)$$

如果 $a_{i_i} \neq 0$ (由电文类型 7 播发),计算公式见公式(B.24)。

$$\text{RRC}(t_{of}) = \frac{\text{PRC}_{\text{current}} - \text{PRC}_{\text{previous}}}{\Delta t} \dots\dots\dots (B.24)$$

式中:

$\text{PRC}_{\text{current}}$ ——最新接收到的快变改正数(由电文类型 2~5、24 播发);

$PRC_{previous}$ —— $PRC_{current}$ 之前接收到的快变改正数(由电文类型 2~5、24 播发);

$\Delta t = (t_{of} - t_{of, previous})$;

t_{of} —— $PRC_{current}$ 的参考时刻,为星基增强系统系统时(SNT)的整秒开始,星基增强系统 GEO 卫星播发电文第一比特的时间;

$t_{of, previous}$ —— $PRC_{previous}$ 的参考时刻。

如果 $ai_i = 0$, 则 $RRC = 0$ 。

当 $\Delta t > I_{ic,j}$ ($I_{ic,j}$ 根据电文类型 7 UDRE 降效因子 ai_i 对应的映照表推算)或者 $(t - t_{of} - 1) > 8\Delta t$, 则认为超时。

B.2.2 慢变改正数解算

慢变改正数信息由单频星基增强系统的增强电文类型 25 播发,慢变改正数信息包括卫星时钟慢变改正数和卫星星历慢变改正数。

卫星时钟慢变改正数按公式(B.25)计算。

$$\delta\Delta t_{sv}(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0) + \delta a_{IG0} \dots\dots\dots (B.25)$$

式中:

δa_{f0} ——时钟偏差(电文类型 25);

δa_{f1} ——时钟偏差变化率(电文类型 25,速度标识为 1;如果速度标识为 0 该值为 0);

t_0 ——改正数参考时刻(电文类型 25,速度模式标识为 1);

δa_{IG0} ——GLONASS 卫星改正参数,在电文类型 12 中播发,针对非 GLONASS 卫星,该值为 0。

卫星星历慢变改正数通过公式(B.26)计算(坐标系 WGS-84 ECEF)。

$$\begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \\ \delta \dot{z} \end{bmatrix} (t - t_0) \dots\dots\dots (B.26)$$

当速度标识为 0 时,公式(B.26)中的速度分量为 0。

B.2.3 电离层改正数解算

B.2.3.1 穿刺点解算

首先计算穿刺点纬度 ϕ_{pp} (单位为 rad),通过公式(B.27)和公式(B.28)计算。

$$\phi_{pp} = \sin^{-1}(\sin\phi_u \cos\psi_{pp} + \cos\phi_u \sin\psi_{pp} \cos A) \dots\dots\dots (B.27)$$

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{R_e + h_1} \cos E\right) \dots\dots\dots (B.28)$$

式中:

ψ_{pp} ——地球中心角,单位为弧度(rad),如图 B.2 所示;

A ——方位角;

E ——仰角;

R_e ——地球半径,6 378.136 3 km;

h_1 ——最大电子密度层的高度,350 km。

ϕ_u ——用户椭球纬度。

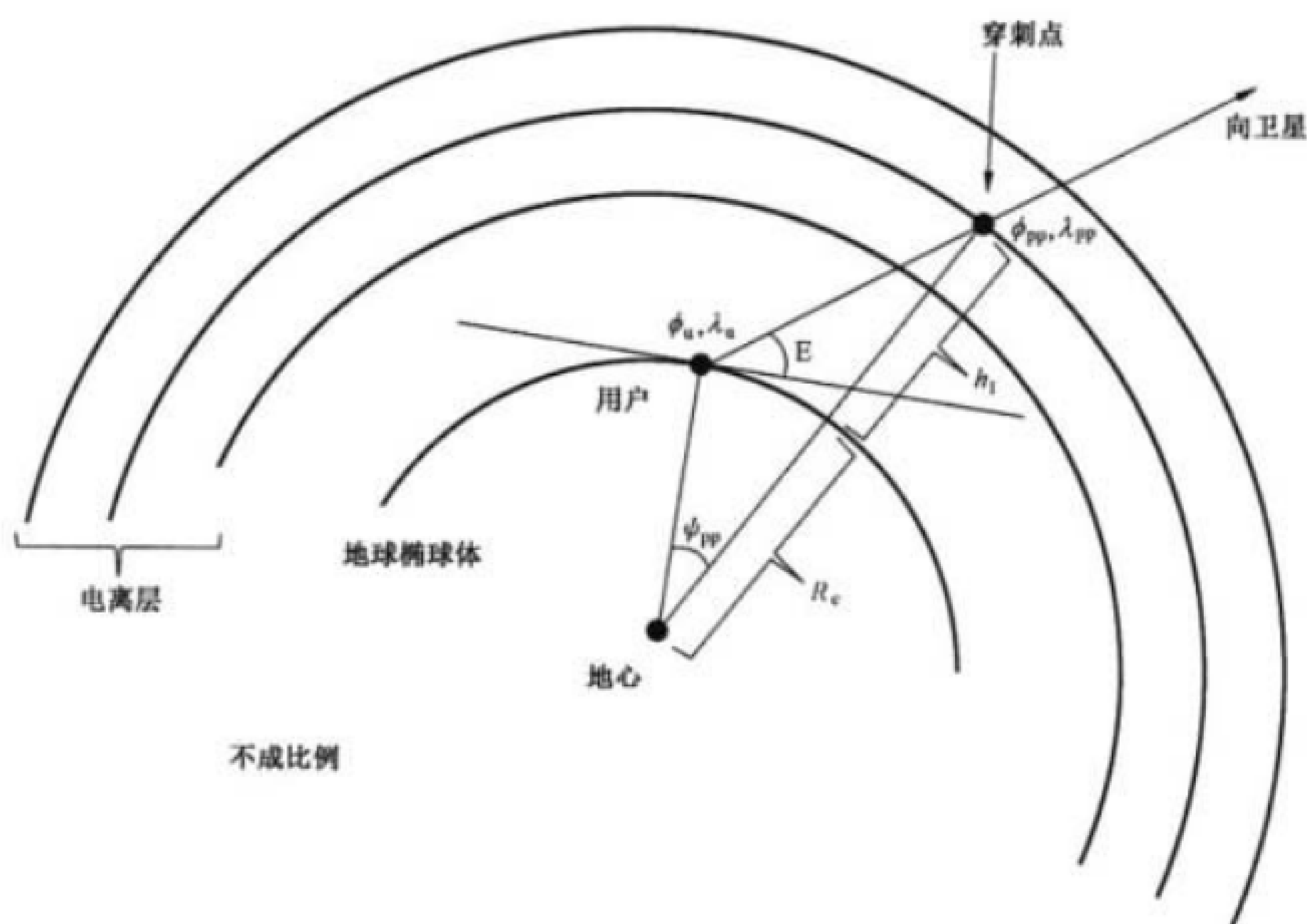


图 B.2 电离层穿刺点示意图

穿刺点经度 λ_{pp} (单位为 rad) 通过公式(B.29)和公式(B.30)计算。

- a) 当 $\phi_u > 70^\circ$ 且 $\tan\phi_{pp}\cos A > \tan(\pi/2 - \phi_u)$ 或者 $\phi_u < -70^\circ$ 且 $\tan\phi_{pp}\cos(A + \pi) > \tan(\pi/2 + \phi_u)$ 时, λ_{pp} 计算公式见公式(B.29)。

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \pi - \sin^{-1}\left(\frac{\sin\phi_{pp}\sin A}{\cos\phi_{pp}}\right) \quad \dots\dots\dots (B.29)$$

- b) 其他情况下, λ_{pp} 计算公式见公式(B.30)。

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin\phi_{pp}\sin A}{\cos\phi_{pp}}\right) \quad \dots\dots\dots (B.30)$$

B.2.3.2 格网点选择

计算完穿刺点经纬度后, 用户需要确定使用的电离层格网点, 格网点选择规则如图 B.3 所示。

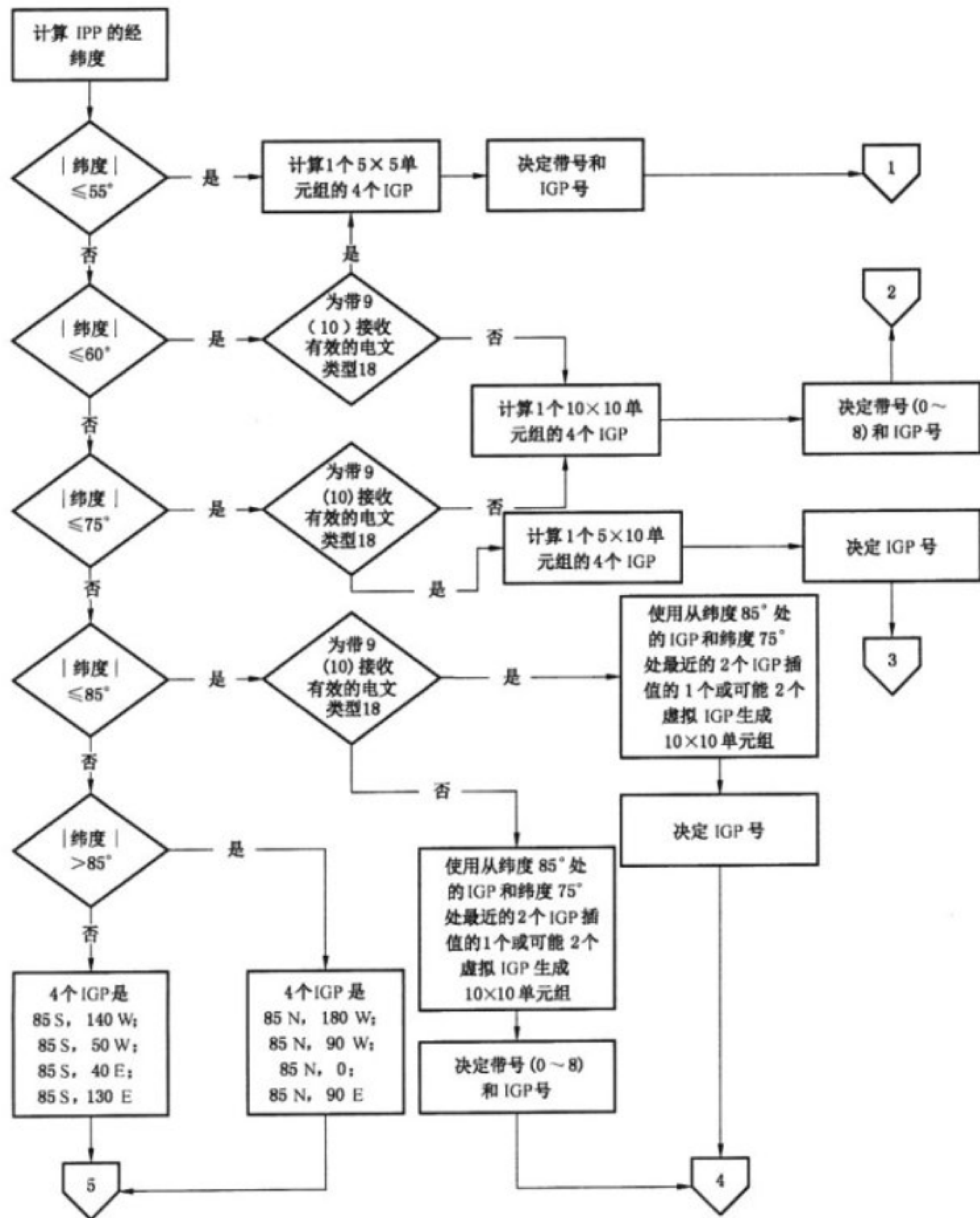


图 B.3 格网点选择规则

电离层格网点的选择与穿透点所在的纬度有关,选取策略如下。

- a) 穿刺点位于南北纬 60°之间,选择规则如图 B.4~图 B.6 所示:
- 1) 如果穿刺点的周围有 4 个格网点构成 5°×5°的四边形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 4 个格网点,否则采用下面的选择;
 - 2) 如果穿刺点的周围有 3 个格网点构成 5°×5°的三角形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 3 个格网点,否则采用下面的选择;
 - 3) 如果穿刺点的周围有 4 个格网点构成 10°×10°的四边形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 4 个格网点,否则采用下面的选择;
 - 4) 如果穿刺点的周围有 3 个格网点构成 10°×10°的三角形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,

则选取这 3 个格网点, 否则认为电离层改正数不可用。

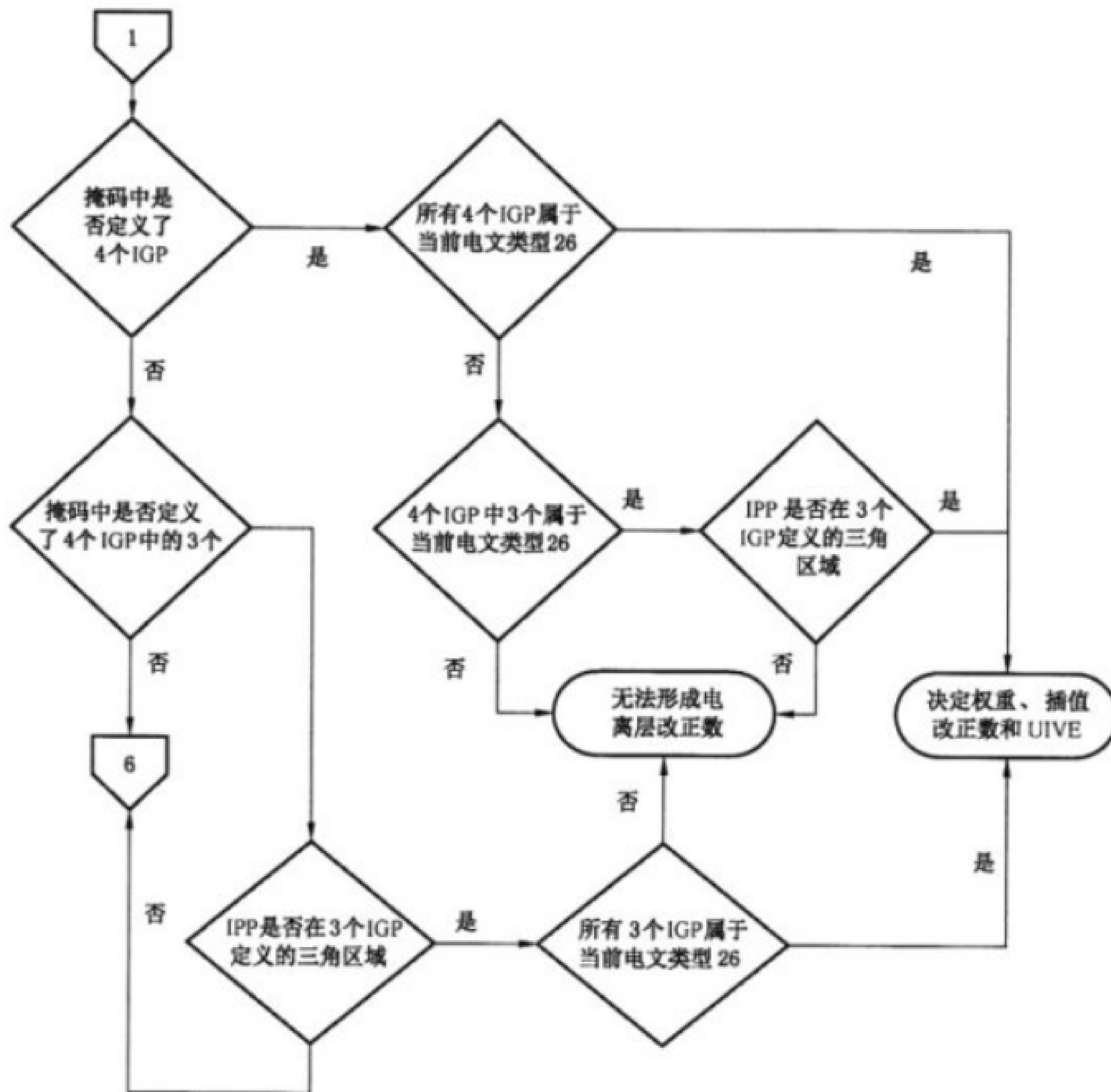


图 B.4 穿刺点位于南北纬 60° 之间 ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$)

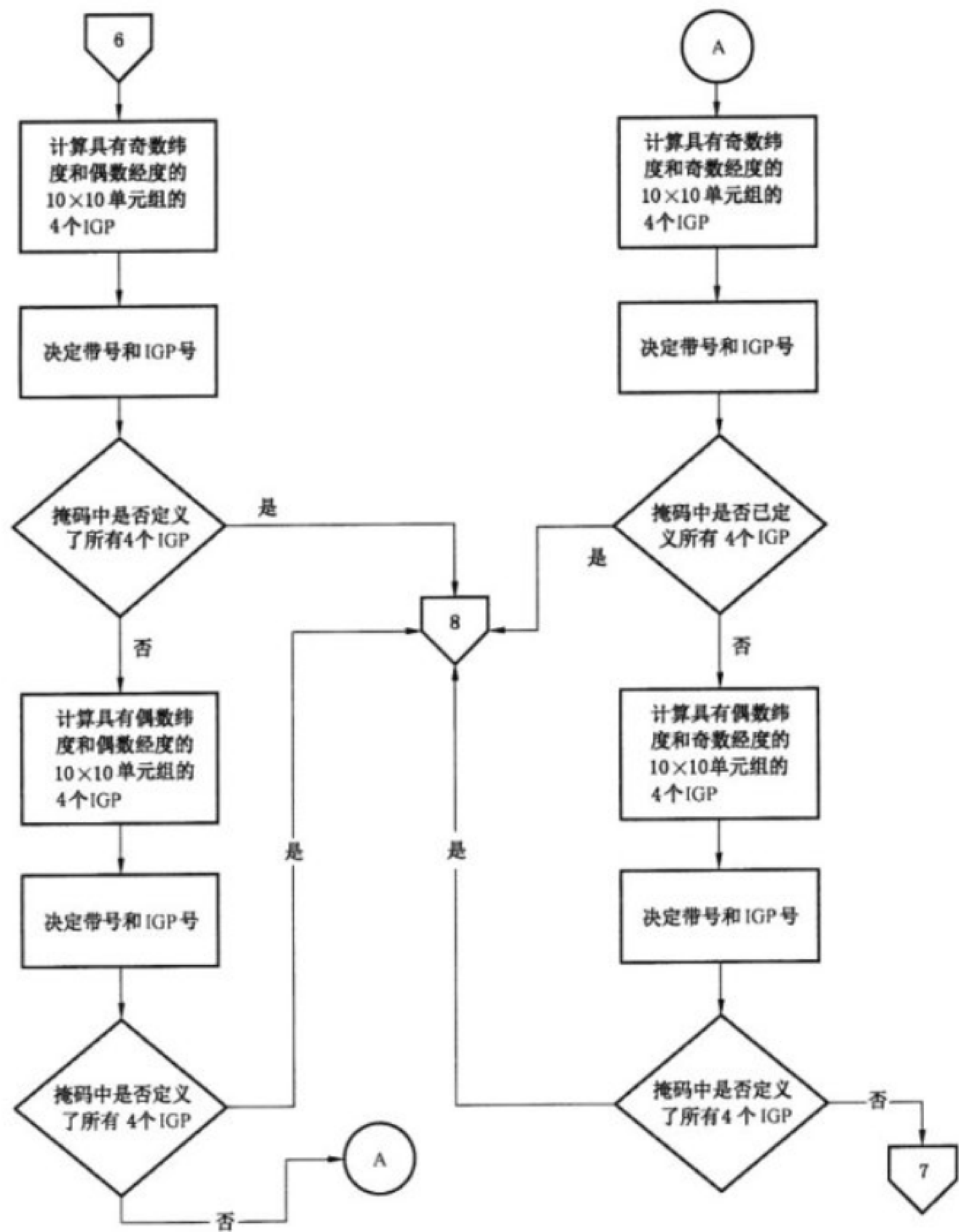


图 B.5 穿刺点位于南北纬 60°之间(10°×10°的方形区域)

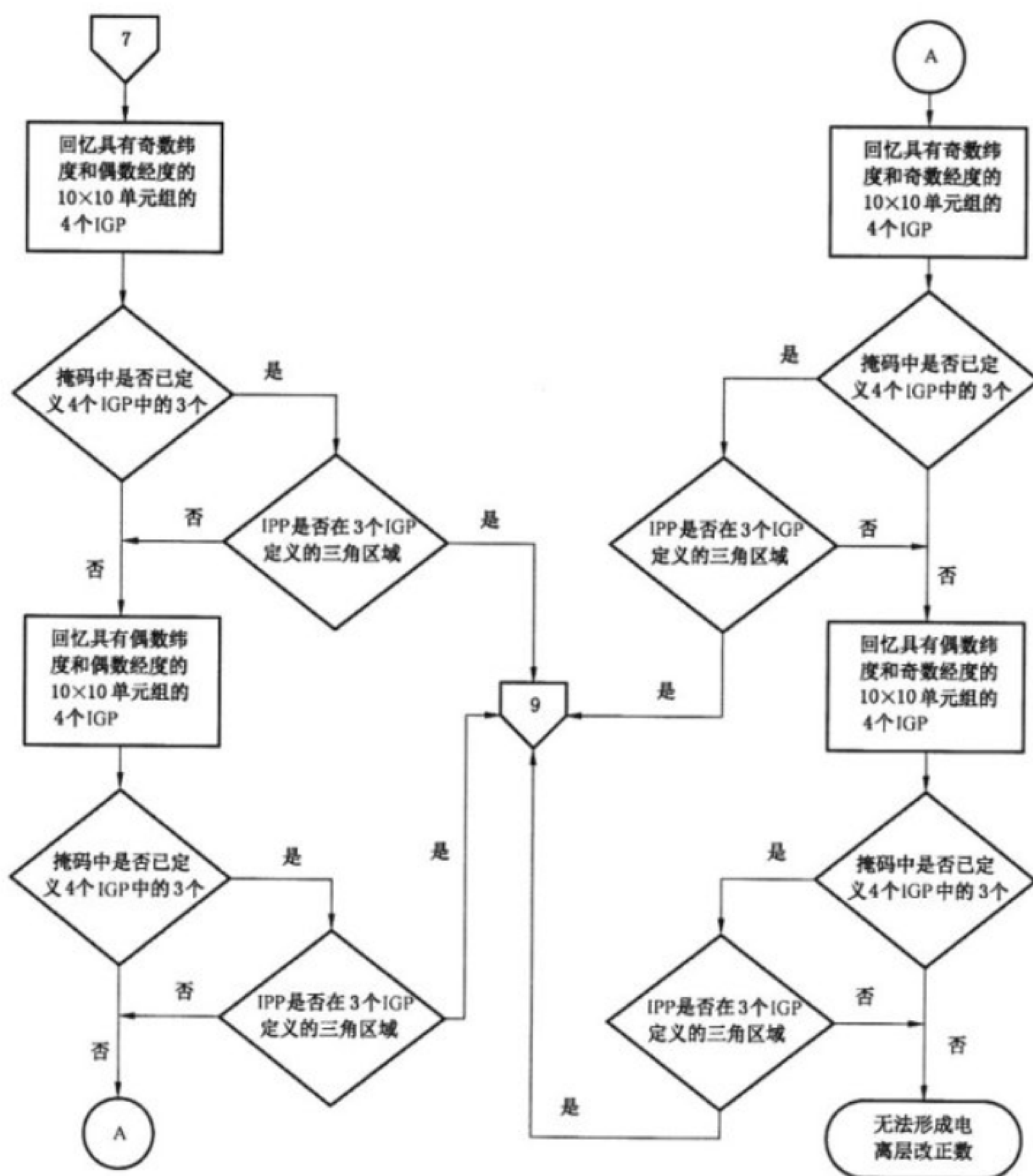


图 B.6 穿刺点位于南北纬 60°之间(10°×10°的三角区域)

b) 穿刺点位于北纬 60°~75°之间或者南纬 60°~75°之间,选择规则如图 B.7~图 B.9 所示:

- 1) 如果穿刺点的周围有 4 个格网点构成 5°(纬度)×10°(经度)的四边形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 4 个格网点,否则采用下面的选择;
- 2) 如果穿刺点的周围有 3 个格网点构成 5°(纬度)×10°(经度)的三角形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 3 个格网点,否则采用下面的选择;
- 3) 如果穿刺点的周围有 4 个格网点构成 10°×10°的四边形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 4 个格网点,否则采用下面的选择;
- 4) 如果穿刺点的周围有 3 个格网点构成 10°×10°的三角形区域且对应的 IGP 掩码为 1 时,则选取这 3 个格网点,否则认为电离层改正数不可用。

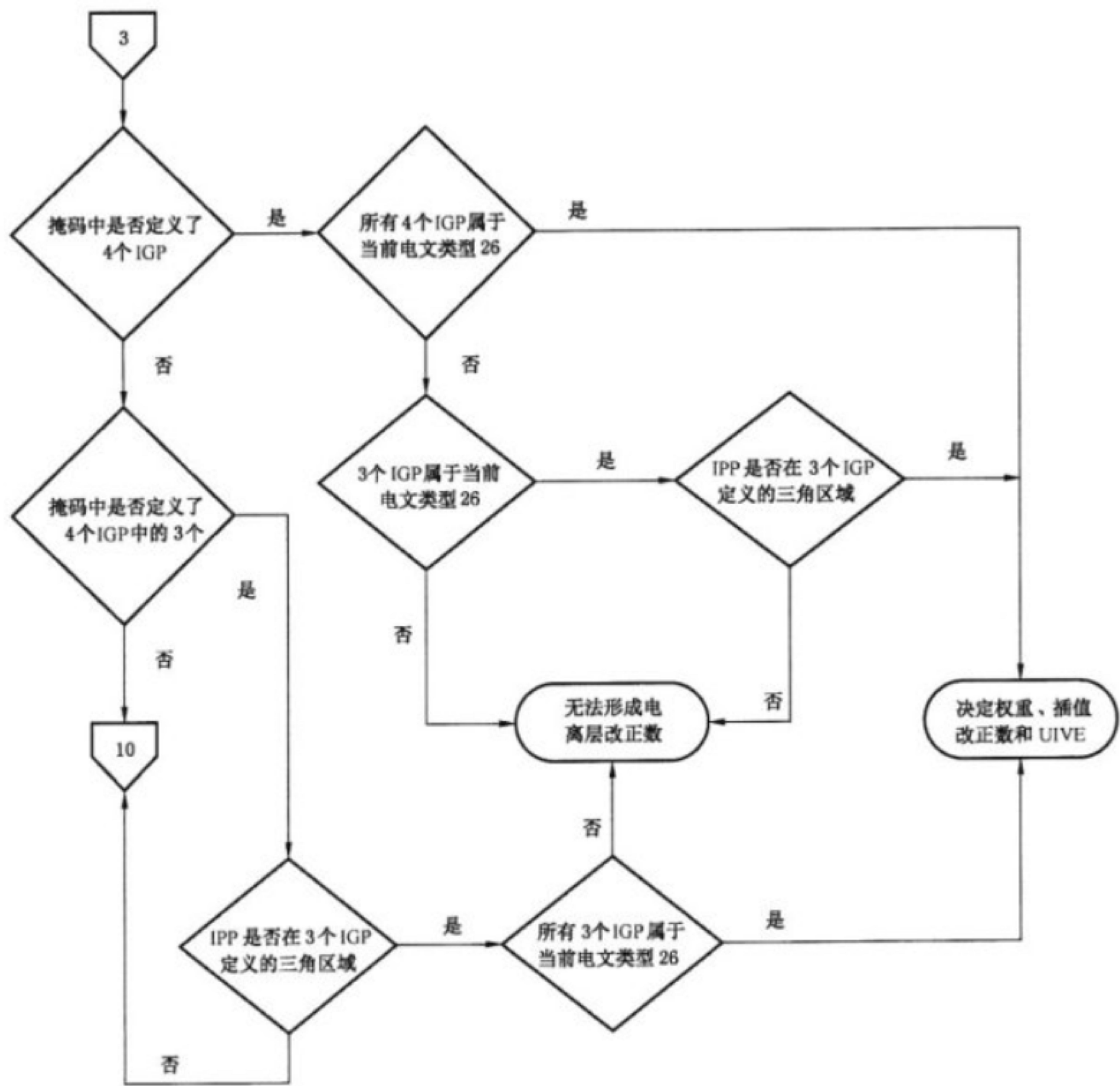


图 B.7 穿刺点位于北纬 60°~75°之间或者南纬 60°~75°之间

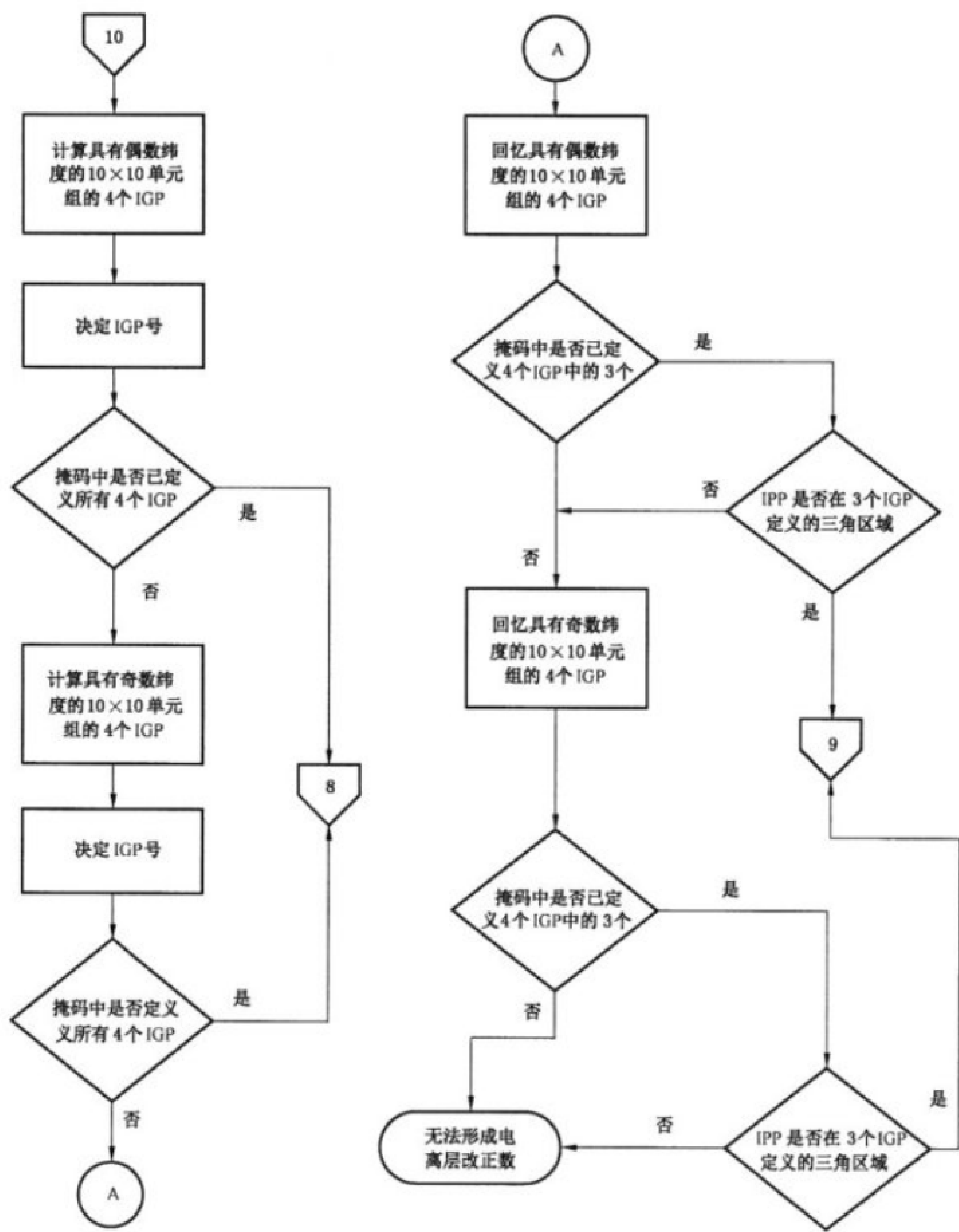


图 B.8 带 9 或 10 中穿刺点位于北纬 60°~75°之间或者南纬 60°~75°之间(第一部分)

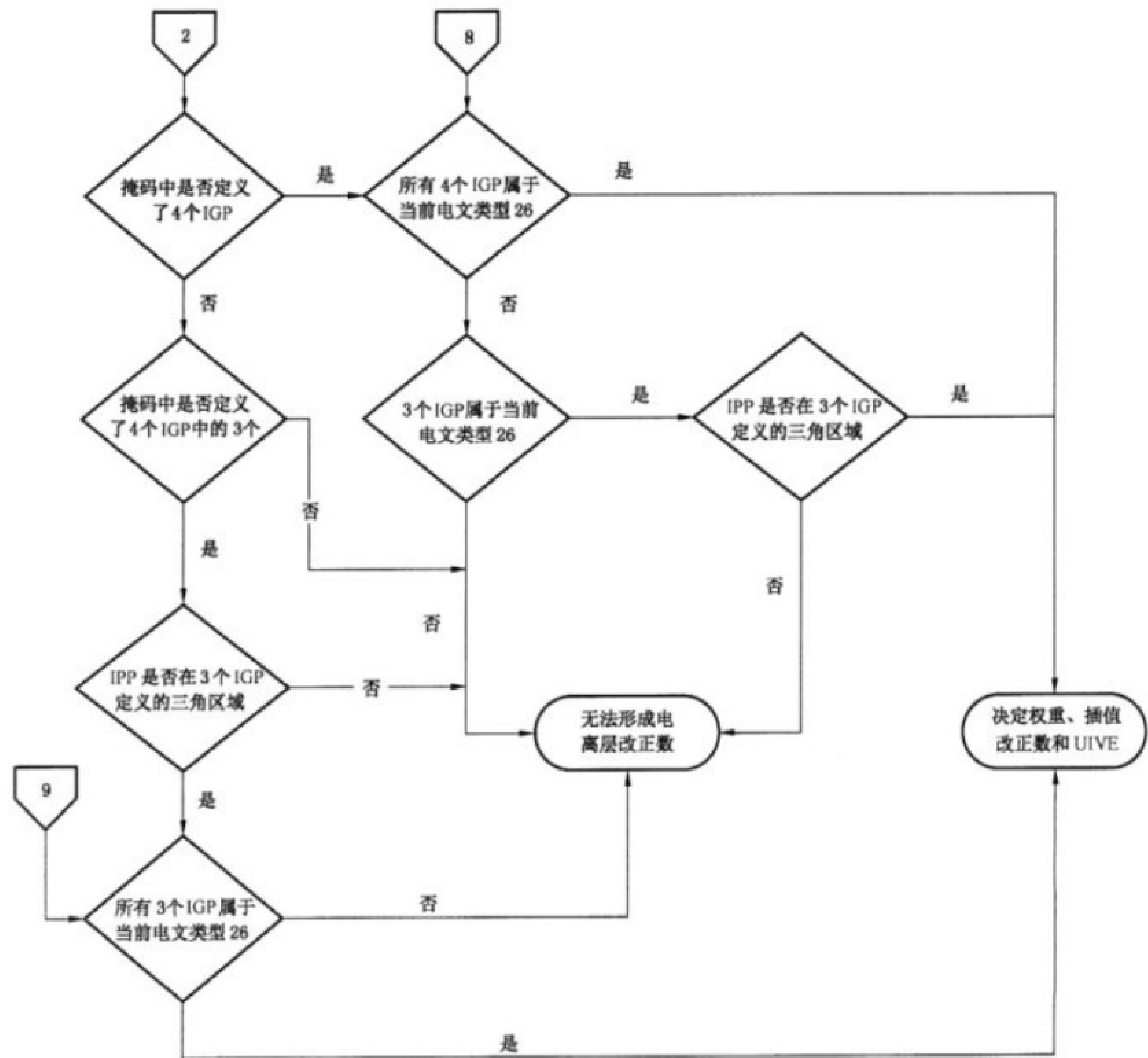


图 B.9 带 9 或 10 中穿刺点位于北纬 60°~75°之间或者南纬 60°~75°之间(第二部分)

c) 穿刺点位于北纬 75°~85°之间或者南纬 75°~85°之间,选择规则如图 B.10 所示:如果两个最近的格网点位于 75°,两个最近的格网点位于 85°(使用带 9 或 10 的话,经度相距 30°,否则相距 90°)且对应的 IGP 掩码为 1 时,通过线性内插得到虚拟格网点构建出 10°×10°的四边形区域,则选取这四个网格点(虚拟网格点),否则认为电离层改正数不可用。

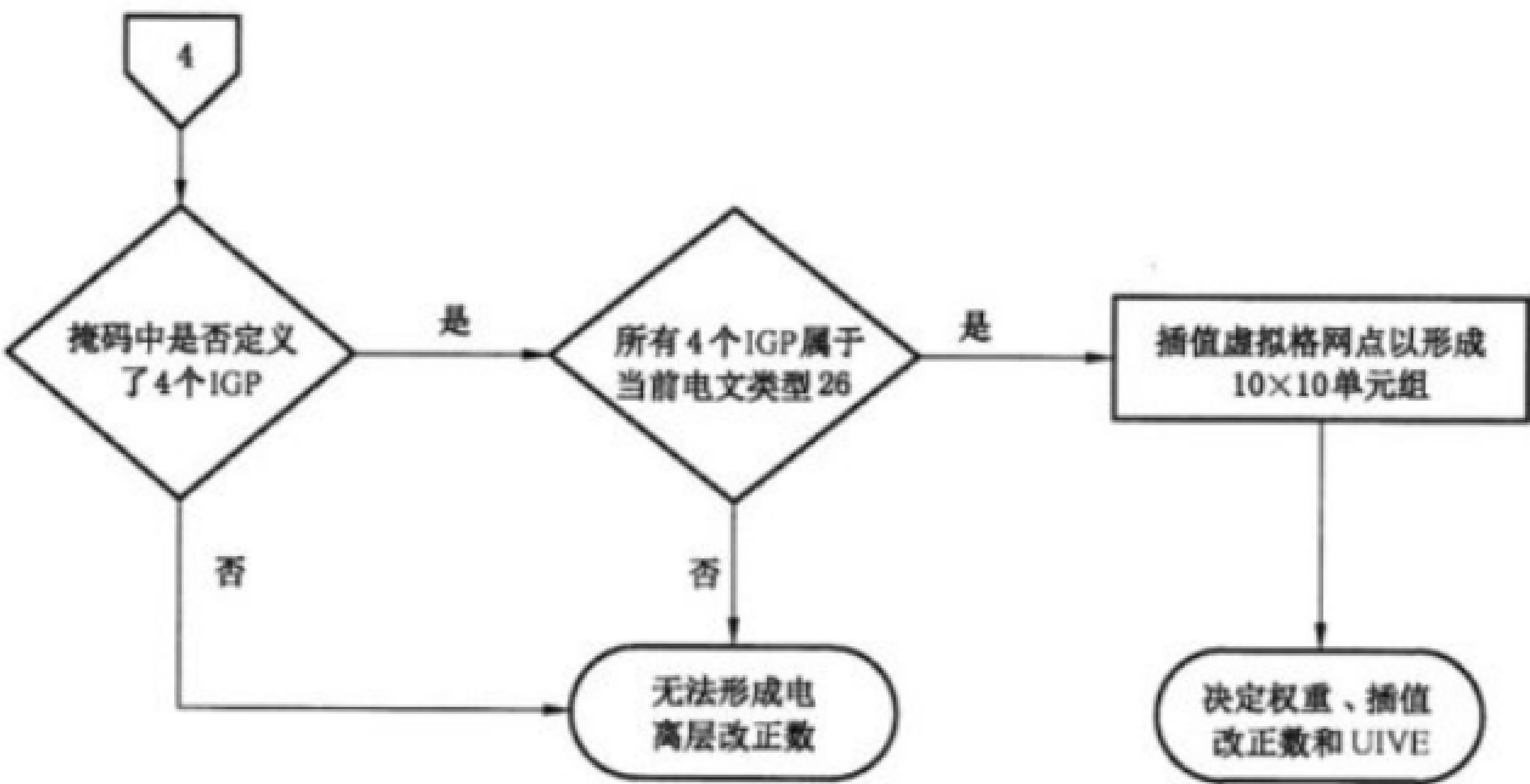


图 B.10 穿刺点纬度在 75°与 85°之间

- d) 穿刺点位于北纬 85°，选择规则如图 B.11 所示：如果四个格网点位于北纬 85°，西经 180°、西经 90°、0°、东经 90°，且对应的 IGP 掩码为 1 时，则选取这四个格网点，否则认为电离层改正数不可用。
- e) 穿刺点位于南纬 85°，选择规则如图 B.11 所示：如果四个格网点位于南纬 85°，西经 140°、西经 50°、东经 40°、东经 130°，且对应的 IGP 掩码为 1 时，则选取这四个格网点，否则认为电离层改正数不可用。

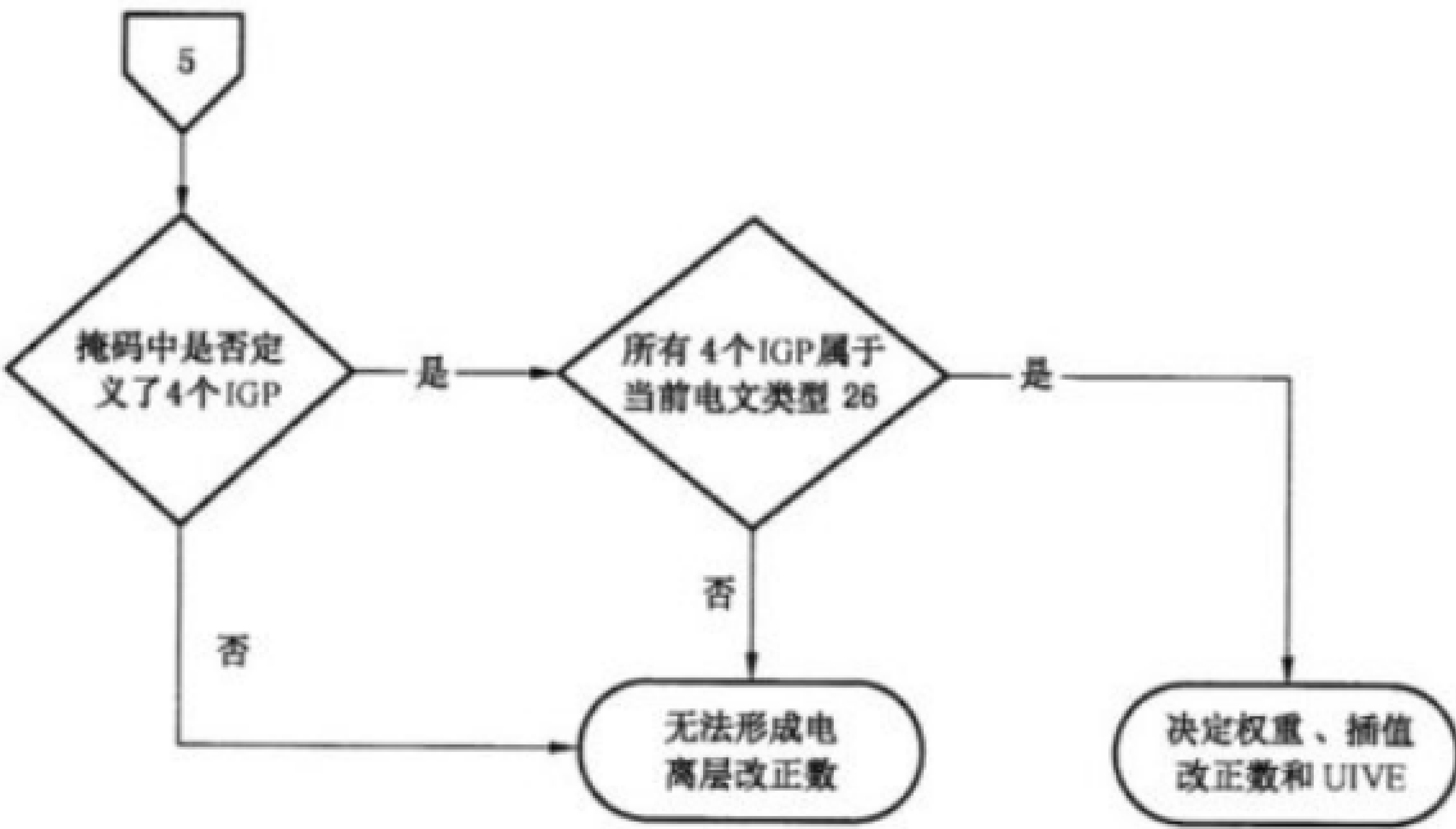


图 B.11 穿刺点纬度在北纬 85°或南纬 85°

B.2.3.3 穿刺点电离层垂向延迟解算

B.2.3.3.1 周边 4 个格网点

如果在穿刺点周围选取了 4 个格网点，则穿刺点处的电离层垂向延迟 $\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ 计算见公式(B.31)。

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \dots\dots\dots (B.31)$$

式中：

- ϕ_{pp} —— 穿刺点的纬度；
- λ_{pp} —— 穿刺点的经度；

τ_{ref} ——格网点处的电离层垂向延迟；
 $W_i(x_{pp}, y_{pp})$ ——格网点的权重函数, 计算过程见公式(B.32)~公式(B.37)。

$$W_1(x_{pp}, y_{pp}) = x_{pp} y_{pp}$$
$$W_2(x_{pp}, y_{pp}) = (1 - x_{pp}) y_{pp}$$
$$W_3(x_{pp}, y_{pp}) = (1 - x_{pp}) (1 - y_{pp})$$
$$W_4(x_{pp}, y_{pp}) = x_{pp} (1 - y_{pp})$$
$$\Delta \lambda_{pp} = \lambda_{pp} - \lambda_1$$
$$\Delta \phi_{pp} = \phi_{pp} - \phi_1$$

.....(B.32)

.....(B.33)

.....(B.34)

.....(B.35)

.....(B.36)

.....(B.37)

格网点与穿刺点分布如图 B.12 所示。

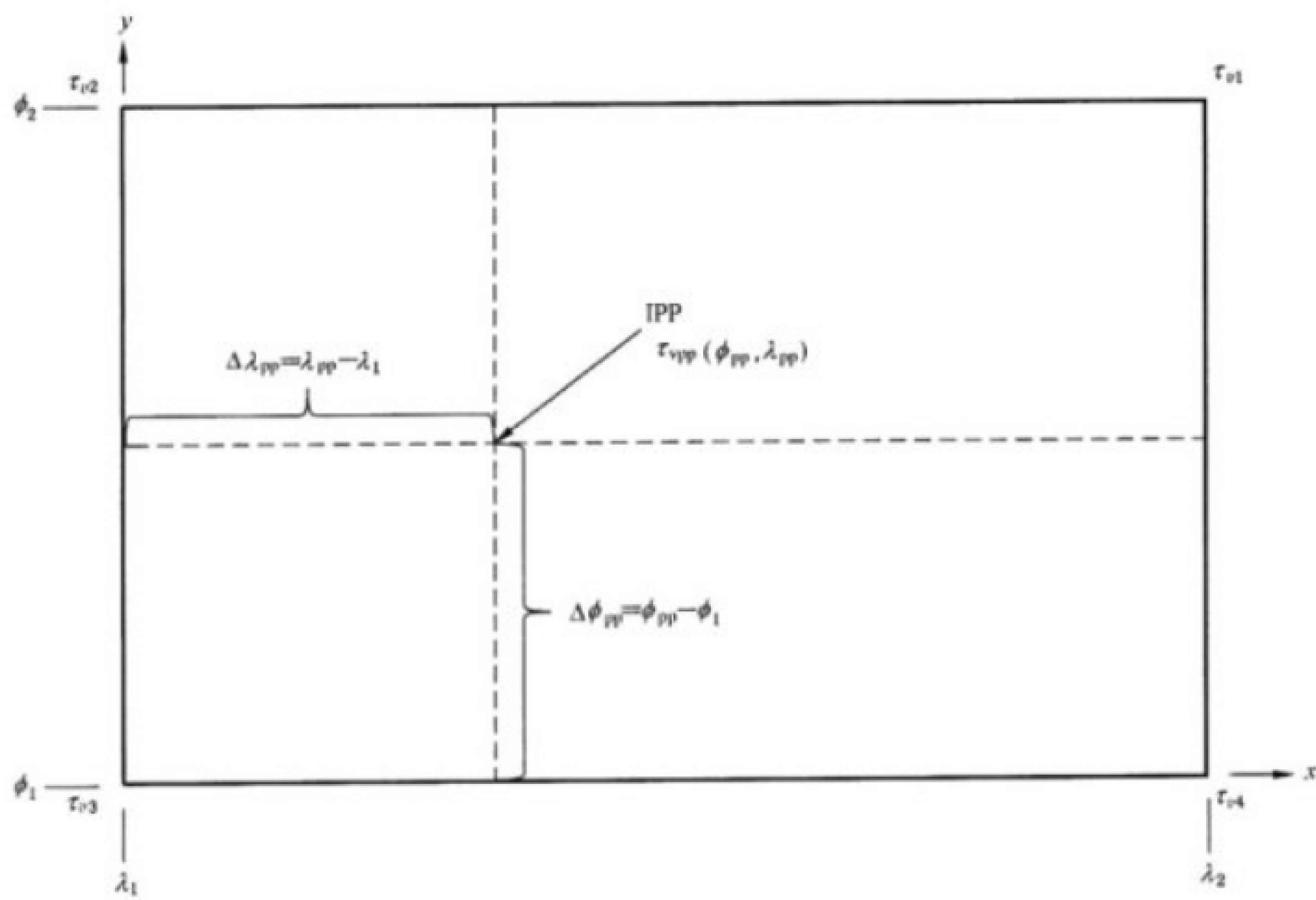


图 B.12 4 个格网点与穿刺点分布示意图

如果穿刺点位于北纬 85°和南纬 85°之间, x_{pp} 和 y_{pp} 计算见公式(B.38)与公式(B.39)。

$$x_{pp} = \frac{\Delta \lambda_{pp}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$
$$y_{pp} = \frac{\Delta \phi_{pp}}{\phi_2 - \phi_1}$$

.....(B.38)

.....(B.39)

式中:

- λ_1 ——穿刺点西边格网点的经度;
- λ_2 ——穿刺点东边格网点的经度;
- ϕ_1 ——穿刺点南边格网点的纬度;
- ϕ_2 ——穿刺点北边格网点的纬度。

如果位于北纬 85°或南纬 85°, x_{pp} 和 y_{pp} 计算见公式(B.40)与公式(B.41)。

$$y_{pp} = \frac{|\phi_{pp}| - 85}{10}$$
$$x_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_3}{90}, (1 - 2y_{pp}) + y_{pp}$$

.....(B.40)

.....(B.41)

用户利用格网点的 $\sigma_{\text{ionogrid}}^2$ 计算穿刺点处的 σ_{UIVE}^2 , 见公式(B.42)。

$$\sigma_{\text{UIVE}}^2 = \sum_{n=1}^4 W_n(x_{pp}, y_{pp}) \cdot \sigma_{n, \text{ionogrid}}^2 \quad \text{..... (B.42)}$$

B.2.3.3.2 周边 3 个格网点

如果在穿刺点周围选取了 3 个格网点且位于北纬 75°和南纬 75°之间,则穿刺点处的电离层垂向延迟 $\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ 计算见公式(B.43)。

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^3 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \quad \text{..... (B.43)}$$

式中:

ϕ_{pp} —— 穿刺点的纬度;

λ_{pp} —— 穿刺点的经度;

τ_{vi} —— 格网点处的电离层垂向延迟;

$W_i(x_{pp}, y_{pp})$ —— 格网点的权重函数,计算过程见公式(B.44)~公式(B.46)。

$$W_1(x_{pp}, y_{pp}) = y_{pp} \quad \text{..... (B.44)}$$

$$W_2(x_{pp}, y_{pp}) = 1 - x_{pp} - y_{pp} \quad \text{..... (B.45)}$$

$$W_3(x_{pp}, y_{pp}) = x_{pp} \quad \text{..... (B.46)}$$

格网点与穿刺点分布如图 B.13 所示。

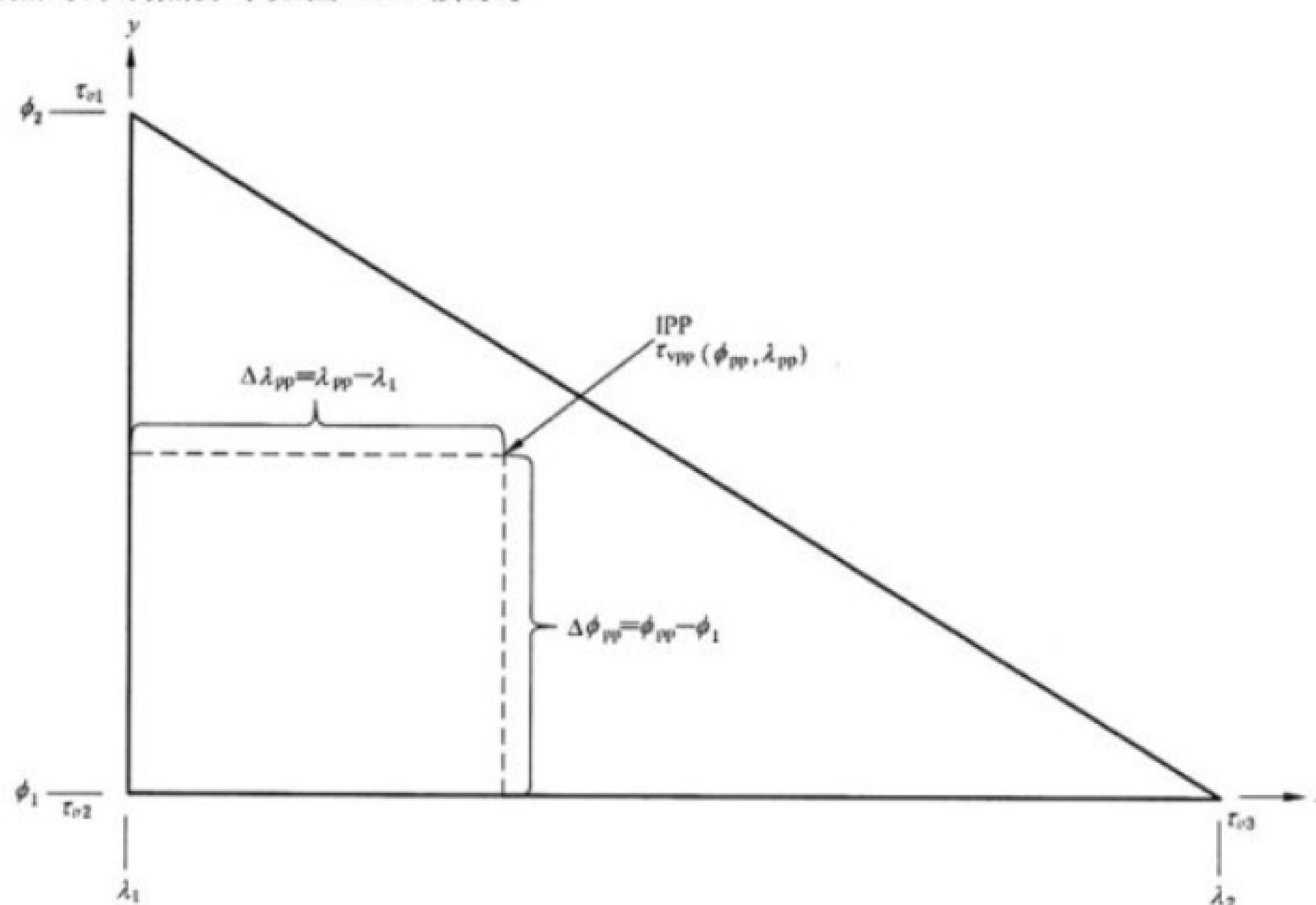


图 B.13 3 个格网点与穿刺点分布示意图

用户利用格网点的 $\sigma_{\text{ionogrid}}^2$ 计算穿刺点处的 σ_{UIVE}^2 , 见公式(B.47)。

$$\sigma_{\text{UIVE}}^2 = \sum_{n=1}^3 W_n(x_{pp}, y_{pp}) \cdot \sigma_{n, \text{ionogrid}}^2 \quad \text{..... (B.47)}$$

B.2.3.4 穿刺点电离层改正数解算

穿刺点处的电离层改正数 IC_i 计算见公式(B.48)。

$$IC_i = -\tau_{app}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = -F_{pp} \cdot \tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) \quad \text{..... (B.48)}$$

式中:

$\tau_{app}(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ —— 穿刺点处电离层倾斜延迟;

F_{pp} ——倾斜因子,计算见公式(B.49)。

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

.....(B.49)

穿刺点处的 σ_{UIRE}^2 计算见公式(B.50)。

$$\sigma_{UIRE}^2 = F_{pp}^2 \cdot \sigma_{UIVE}^2$$

.....(B.50)

B.2.4 用户差分距离误差(UDRE)解算

用户差分距离误差(UDRE)以户差分距离误差索引(UDREI)的形式通过电文类型 2、电文类型 3、电文类型 4、电文类型 5、电文类型 6 播发。UDREI 与 UDRE 之间的转换关系是固定的,见表 B.2。

表 B.2 UDREI 与 UDRE 转换表

UDREI	UDRE m	σ_{UDRE}^2 m ²
0	0.75	0.052 0
1	1.0	0.092 4
2	1.25	0.144 4
3	1.75	0.283 0
4	2.25	0.467 8
5	3.0	0.831 5
6	3.75	1.299 2
7	4.5	1.870 9
8	5.25	2.546 5
9	6.0	3.326 0
10	7.5	5.196 8
11	15.0	20.787 0
12	50.0	230.966 1
13	150.0	2 078.695
14	未被监测	未被监测
15	不可用	不可用

UDRE 和 σ_{UDRE} 的关系如公式(B.51)所示:

$$UDRE = 3.29\sigma_{UDRE}$$

.....(B.51)

B.2.5 格网电离层垂向误差(GIVE)解算

格网电离层垂向误差(GIVE)以格网电离层垂向误差索引(GIVEI)的形式通过电文类型 26 播发。GIVEI 与 GIVE 之间的转换关系是固定的,见表 B.3。

表 B.3 GIVEI 与 GIVE 转换表

GIVEI	GIVE m	σ_{GIVE}^2 m ²
0	0.3	0.008 4
1	0.6	0.033 3
2	0.9	0.074 9
3	1.20	0.133 1
4	1.5	0.207 9
5	1.8	0.299 4
6	2.1	0.407 5
7	2.4	0.532 2
8	2.7	0.673 5
9	3.0	0.831 5
10	3.6	1.197 4
11	4.5	1.870 9
12	6.0	3.326 0
13	15.0	20.787 0
14	45.0	187.082 6
15	未被监测	未被监测

GIVE 和 σ_{GIVE} 的关系如公式(B.52)所示。

$$\text{GIVE} = 3.29\sigma_{\text{GIVE}} \dots\dots\dots (\text{ B.52 })$$

B.2.6 协方差矩阵解算

协方差矩阵由单频星基增强系统的增强电文类型 28 播发,利用电文中的信息计算上三角矩阵 **R**,见公式(B.53)。

$$\mathbf{R} = \text{SF} \cdot \mathbf{E} \dots\dots\dots (\text{ B.53 })$$

其中,

$$\text{SF} = 2^{(\text{scale exponent} - 5)};$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & E_{1,4} \\ 0 & E_{2,2} & E_{2,3} & E_{2,4} \\ 0 & 0 & E_{3,3} & E_{3,4} \\ 0 & 0 & 0 & E_{4,4} \end{bmatrix};$$

scale exponent——比例因子,通过电文类型 28 播发。

利用矩阵 **R** 可以计算协方差矩阵 **C**,计算见公式(B.54)。

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R} \dots\dots\dots (\text{ B.54 })$$

投影到用户上的 UDRE 降效参数,见公式(B.55)。

$$\delta\text{UDRE} = \sqrt{\mathbf{I}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{I}} + \epsilon_e \dots\dots\dots (\text{ B.55 })$$

式中:

I——卫星到用户的 4 维方向矢量(前三维是单位方向矢量,第四维是 1);

$\epsilon_c = C_{\text{covariance}} \cdot \text{SF}$, $C_{\text{covariance}}$ 由电文类型 10 播发, 如果电文类型 10 中的 $C_{\text{covariance}}$ 无效, 则该值为 0。

B.2.7 快变和慢变降效参数解算

B.2.7.1 快变和慢变降效参数

通过快变改正数和慢变改正数修正后的残差方差通过降效参数计算, 计算见公式(B.56)。

$$\sigma_{\text{fit}}^2 = \begin{cases} (\sigma_{\text{UDRE}} \cdot \delta_{\text{UDRE}} + \epsilon_{\text{fc}} + \epsilon_{\text{rrc}} + \epsilon_{\text{ltc}} + \epsilon_{\text{er}})^2, & \text{当 } \text{RSS}_{\text{UDRE}} = 0 \\ (\sigma_{\text{UDRE}} \cdot \delta_{\text{UDRE}})^2 + \epsilon_{\text{fc}}^2 + \epsilon_{\text{rrc}}^2 + \epsilon_{\text{ltc}}^2 + \epsilon_{\text{er}}^2, & \text{当 } \text{RSS}_{\text{UDRE}} = 1 \end{cases} \quad \text{..... (B.56)}$$

式中:

RSS_{UDRE} ——电文类型 10 播发;

σ_{UDRE} ——电文类型 2~6、24 播发;

δ_{UDRE} ——电文类型 28 播发, 按照 B.2.6 的公式(B.55)计算;

ϵ_{fc} ——快变改正降效参数;

ϵ_{rrc} ——距离变化改正降效参数;

ϵ_{ltc} ——慢变改正降效参数;

ϵ_{er} ——应用模式降效参数。

B.2.7.2 快变改正降效参数

快变改正降效参数 ϵ_{fc} , 计算见公式(B.57)。

$$\epsilon_{\text{fc}} = a(t - t_u + t_{\text{lat}})^2 / 2 \quad \text{..... (B.57)}$$

式中:

a ——快变改正数降效因子, 由电文类型 7 播发;

t ——当前时刻;

t_u ——快变改正数的参考时间, 如果使用的 UDREI 是由电文类型 2~5、24 播发的, 则 t_u 为快变改正数的参考时间; 如果 UDREI 是由电文类型 6 播发并且 IODF=3, 则 t_u 也为快变改正数的参考时间; 如果 IODF≠3, 则 t_u 为 GEO 播发电文类型 6 第一比特的时间;

t_{lat} ——系统延迟时间, 由电文类型 7 播发。

B.2.7.3 距离变化改正降效参数

如果电文类型 7 播发的 $ai_i = 0$, 则 $\epsilon_{\text{rrc}} = 0$ 。否则, ϵ_{rrc} 将分为两种情况进行计算, 见公式(B.58)~公式(B.59)。

a) 当前最新的 IODF 和前一个 IODF 都不为 3

$$\epsilon_{\text{rrc}} = \begin{cases} 0, & \text{当 } (\text{IODF}_{\text{current}} - \text{IODF}_{\text{previous}}) \text{ 模 } 3 = 1 \\ \left(\frac{aI_{\text{fc},j}}{4} + \frac{B_{\text{rrc}}}{\Delta t} \right) (t - t_{\text{ol}}), & \text{当 } (\text{IODF}_{\text{current}} - \text{IODF}_{\text{previous}}) \text{ 模 } 3 \neq 1 \end{cases} \quad \text{..... (B.58)}$$

b) 当前最新的 IODF 和前一个 IODF 至少有一个为 3

$$\epsilon_{\text{rrc}} = \begin{cases} 0, & \text{当 } \left| \Delta t - \frac{I_{\text{fc},j}}{2} \right| = 0 \\ \left(\frac{a \left| \Delta t - I_{\text{fc},j}/2 \right|}{2} + \frac{B_{\text{rrc}}}{\Delta t} \right) (t - t_{\text{ol}}), & \text{当 } \left| \Delta t - \frac{I_{\text{fc},j}}{2} \right| \neq 0 \end{cases} \quad \text{..... (B.59)}$$

式中:

a ——即 ai_i , 为快变改正数的降效因子, 由电文类型 7 播发;

t ——当前时刻;

$I_{\text{fc},j}$ ——电文类型 2~5 或 24 的最短超时间隔, 根据电文类型 7 播发的 ai_i 来推算;

- B_{rrc} ——电文类型 10 播发；
 $IODF_{current}$ ——最新接收的快变改正数信息中的 IODF；
 $IODF_{previous}$ ——在收到最新信息之前收到的快变改正数信息中的 IODF；
 t_{of} ——最新接收的快变改正数信息的参考时间；
 $t_{of,previous}$ ——收到最新信息之前收到的快变改正数信息的参考时间；
 $\Delta t = t_{of} - t_{of,previous}$

B.2.7.4 慢变改正降效参数

与慢变改正相关的降效参数取决于电文中是否同时包含偏差和偏差变化量,分为两种情况(1)包含偏差和偏差变化量(电文类型 24、电文类型 25 且速度模式标识为 1);(2)仅包含偏差(电文类型 24、电文类型 25 且速度模式标识为 0)。

- a) 包含偏差和偏差变化量,计算见公式(B.60)。

$$\epsilon_{lrc} = \begin{cases} 0 & , \text{当 } t_0 < t < t_0 + I_{lrc_v1} \\ C_{lrc_lsb} + C_{lrc_vl} \cdot \max(0, t_0 - t, t - t_0 - I_{lrc_vl}) & , \text{其他情况} \end{cases} \quad \dots (B.60)$$

式中:

- t ——当前时刻;
 t_0 ——慢变改正数的参考时间,由电文类型 25 播发;
 I_{lrc_v1} ——更新间隔,由电文类型 10 播发;
 C_{lrc_lsb} ——电文类型 10 播发;
 C_{lrc_vl} ——电文类型 10 播发。
 b) 仅包含偏差,计算见公式(B.61)。

$$\epsilon_{lrc} = C_{lrc_v0} \cdot \left\lfloor \frac{t - t_{lrc}}{I_{lrc_v0}} \right\rfloor \quad \dots\dots\dots (B.61)$$

式中:

- t ——当前时刻;
 t_{lrc} ——GEO 播发慢变改正数电文第一比特的时间;
 I_{lrc_v0} ——最小更新间隔,由电文类型 10 播发;
 C_{lrc_v0} ——电文 10 播发;
 $\lfloor x \rfloor$ ——表示向下取整。

- c) GEO 卫星导航信息降效参数,计算见公式(B.62)。

$$\epsilon_{lrc} = \begin{cases} 0 & , \text{当 } t_0 < t < t_0 + I_{geo} \\ C_{geo_lsb} + C_{geo_v} \cdot \max(0, t_0 - t, t - t_0 - I_{geo}) & , \text{其他情况} \end{cases} \quad \dots\dots (B.62)$$

式中:

- t ——当前时刻;
 t_0 ——GEO 卫星导航信息的参考时间;
 I_{geo} ——GEO 卫星导航信息的更新间隔,由电文类型 10 播发;
 C_{geo_lsb} ——电文类型 10 播发;
 C_{geo_v} ——电文类型 10 播发。

B.2.7.5 应用模式降效参数

应用模式降效参数 ϵ_{er} 的计算见公式(B.63)。

$$\epsilon_{er} = \begin{cases} 0 & , (\text{LNAV/VNAV, LP, LPV}) \text{ 模式下快变和慢变改正数都超时} \\ C_{er} & , (\text{LNAV/VNAV, LP, LPV}) \text{ 模式下快变改正数或慢变改正数超时} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (B.63)$$

式中：

C_{er} ——电文类型 10 播发。

B.2.8 电离层改正降效参数

通过电离层改正数修正后的降效参数(残差方差)按公式(B.64)和公式(B.65)计算。

$$\sigma_{\text{ionogrid}}^2 = \begin{cases} (\sigma_{\text{GIVE}} + \epsilon_{\text{iono}})^2 & , \text{RSS}_{\text{iono}} = 0 \\ \sigma_{\text{GIVE}}^2 + \epsilon_{\text{iono}}^2 & , \text{RSS}_{\text{iono}} \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (\text{B.64})$$

$$\epsilon_{\text{iono}} = C_{\text{iono_step}} \left\lfloor \frac{t - t_{\text{iono}}}{I_{\text{iono}}} \right\rfloor + C_{\text{iono_ramp}} (t - t_{\text{iono}}) \quad \dots\dots\dots (\text{B.65})$$

式中：

RSS_{iono} ——电文类型 10 播发；

σ_{GIVE} ——电文类型 26 播发；

t ——当前时刻；

t_{iono} ——GEO 卫星播发第一比特电离层改正数信息的时间；

$C_{\text{iono_step}}$ ——电文类型 10 播发；

$C_{\text{iono_ramp}}$ ——电文类型 10 播发；

I_{iono} ——电离层改正数信息的最小更新间隔,由电文类型 10 播发；

$\lfloor x \rfloor$ ——表示向下取整。

B.2.9 星基增强系统 GEO 卫星位置解算

星基增强系统 GEO 卫星星历信息由单频星基增强系统的增强电文类型 9 播发,利用电文信息计算 GEO 卫星位置公式见公式(B.66)和公式(B.67)。

$$t = t_G - \Delta t_G = t_G - [a_{\text{GB}} + a_{\text{GB}}(t_G - t_0)] \quad \dots\dots\dots (\text{B.66})$$

$$\begin{bmatrix} X_{Gk} \\ Y_{Gk} \\ Z_{Gk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{X}_G \\ \dot{Y}_G \\ \dot{Z}_G \end{bmatrix} (t - t_0) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \ddot{X}_G \\ \ddot{Y}_G \\ \ddot{Z}_G \end{bmatrix} (t - t_0)^2 \quad \dots\dots\dots (\text{B.67})$$

式中：

t_G ——GEO 播发该电文的时间,其余相关信息均由电文类型 9 播发,此电文中的参数范围允许 GEO 卫星的倾角在 $\pm 8^\circ$ 之间。

B.3 载波平滑

用户接收机观测到卫星 j 的单频码伪距观测量和载波相位观测量计算见公式(B.68)和公式(B.69)。

$$\rho^j = d^j + T^j + b - B^j + I^j + v^j \quad \dots\dots\dots (\text{B.68})$$

$$\phi^j = d^j + T^j + b - B^j - I^j + N\lambda + \varphi^j \quad \dots\dots\dots (\text{B.69})$$

式中：

ρ^j ——L1 频点上的伪距观测量；

ϕ^j ——L1 频点上的载波相位观测量；

d^j ——用户和卫星 j 间的几何距离；

T^j ——对流层延迟；

b ——用户接收机时钟与 GNSS 系统时之间的偏差；

B^j ——卫星时钟与 GNSS 系统时之间的偏差；

I^j ——电离层延迟,对伪距观测量的影响是滞后,对载波相位观测量的影响是超前；

v^j ——伪距观测量上的观测噪声；

N ——整周模糊度；

λ ——载波 L1 的波长；

φ^j ——载波相位观测量上的观测噪声,该噪声远远小于伪距观测量上的观察噪声。

利用 $\phi^j(t) - \phi^j(t-1)$ 来平滑伪距观测量,计算见公式(B.70)。

$$\bar{\rho}^j(t) = \frac{1}{\tau} \rho^j(t) + \frac{\tau-1}{\tau} [\rho^j(t-1) + \phi^j(t) - \phi^j(t-1)] \quad \text{.....(B.70)}$$

式中：

$\bar{\rho}^j(t)$ ——平滑后的伪距观测量,单位为米(m)；

τ ——平滑加权系数(无量纲),由以秒为单位的采样间隔除以 100 s 确定。

B.4 定位解算

B.4.1 对流层延迟估计

对流层延迟估计需要考虑当地温度、水汽压、高度和气压等的影响,使用对流层模型进行修正。对流层延迟计算见公式(B.71)。

$$TC_i = -(d_{\text{hyd}} + d_{\text{wet}}) \times m(El_i) \quad \text{.....(B.71)}$$

式中, $m(El_i)$ 表示对流层延迟的映射函数,与卫星仰角有关,对于大于高度截止角的卫星,可利用公式(B.72)计算。

$$m(El_i) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002\ 001 + \sin^2(El_i)}} \quad \text{.....(B.72)}$$

d_{hyd} 与 d_{wet} 分别表示对流层的干分量和湿分量,由用户高度信息及五个气象参数的估值计算,见公式(B.73)与公式(B.74)。

$$d_{\text{hyd}} = \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{g}{R_d \beta}} \times z_{\text{hyd}} \quad \text{.....(B.73)}$$

$$d_{\text{wet}} = \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1} \times z_{\text{wet}} \quad \text{.....(B.74)}$$

在计算 d_{hyd} 与 d_{wet} 之前应先计算相应天顶方向的值 z_{hyd} 与 z_{wet} ,见公式(B.75)与公式(B.76)。

$$z_{\text{hyd}} = \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m} \quad \text{.....(B.75)}$$

$$z_{\text{wet}} = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \cdot \frac{e}{T} \quad \text{.....(B.76)}$$

式中,

g ——9.806 65 m/s²；

g_m ——9.784 m/s²；

H ——高度,m；

k_1 ——77.604 K/mbar；

k_2 ——382 000 K²/mbar；

R_d ——287.054 J/kg/K。

气象参数气压 P (mbar)、温度 T (K)、水汽压 e (mbar)、温度变化率 β (k/m)、水汽变化率 λ 可由当前纬度 ϕ 和年积日 D 插值计算,插值公式见公式(B.77)。

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \cos\left(\frac{2\pi(D - D_{\min})}{365.25}\right) \dots\dots\dots (B.77)$$

式中：
 $D_{\min} = 28$ (当 ϕ 为北纬)；
 $D_{\min} = 211$ (当 ϕ 为南纬)；
 ξ_0 ——不同纬度的气象参数平均值，按表 B.4 经公式(B.78) 插值得到；
 $\Delta\xi$ ——不同纬度的气象参数季节变化值，按表 B.5 经公式(B.79)插值得到。

$$\xi_0(\phi) = \xi_0(\phi_i) + [\xi_0(\phi_{i+1}) - \xi_0(\phi_i)] \cdot \frac{\phi - \phi_i}{\phi_{i+1} - \phi_i} \dots\dots\dots (B.78)$$

$$\Delta\xi(\phi) = \Delta\xi(\phi_i) + [\Delta\xi(\phi_{i+1}) - \Delta\xi(\phi_i)] \cdot \frac{\phi - \phi_i}{\phi_{i+1} - \phi_i} \dots\dots\dots (B.79)$$

表 B.4 对流层延迟的气象参数平均值

纬度 $\phi/(^{\circ})$	平均值				
	P_0/mbar	T_0/K	e_0/mbar	$\beta_0/(\text{K/m})$	λ_0
≤ 15	1 013.25	299.65	26.31	$6.30e-3$	2.77
30	1 017.25	294.15	21.79	$6.05e-3$	3.15
45	1 015.75	283.15	11.66	$5.58e-3$	2.57
60	1 011.75	272.15	6.78	$5.39e-3$	1.81
≥ 75	1 013.00	263.65	4.11	$4.53e-3$	1.55

表 B.5 对流层延迟的气象参数季节变化值

纬度 $\phi/(^{\circ})$	参数季节变化值				
	$\Delta P/\text{mbar}$	$\Delta T/\text{K}$	$\Delta e/\text{mbar}$	$\Delta \beta/(\text{K/m})$	$\Delta \lambda$
≤ 15	0.00	0.00	0.00	$0.00e-3$	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	$0.25e-3$	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	$0.32e-3$	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	$0.81e-3$	0.74
≥ 75	-0.50	14.50	3.39	$0.62e-3$	0.30

对流层延迟修正后的残留误差方差计算见公式(B.80)。

$$\sigma_{i, \text{tropo}} = \sigma_{\text{TVE}} \times m(El_i) \dots\dots\dots (B.80)$$

式中：
 σ_{TVE} ——对流层垂向误差，一般取为 0.12 m。

B.4.2 用户位置解算

可以利用卫星播发的测距信号获得卫星到接收机之间的伪距值，至少能够观测到 4 颗卫星时，应用最小二乘法可以解算出用户的位置。

卫星 i 星历位置 $[x_{k,i} \ y_{k,i} \ z_{k,i}]$ 经星历慢变改正数 $[\delta x_{k,i} \ \delta y_{k,i} \ \delta z_{k,i}]$ 改正后的位置 $[\hat{x}_{k,i} \ \hat{y}_{k,i} \ \hat{z}_{k,i}]$ 经公式(B.81)计算。

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,i} = x_{k,i} + \delta x_{k,i} \\ \hat{y}_{k,i} = y_{k,i} + \delta y_{k,i} \\ \hat{z}_{k,i} = z_{k,i} + \delta z_{k,i} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{B.81})$$

卫星 i 时钟偏差 $\Delta t_i^{(s)}$ 经时钟慢变改正数 $\delta \Delta t_{SV,i}$ 改正后的时钟偏差 B_i 经公式(B.82)计算。

$$B_i = c(\Delta t_i^{(s)} + \delta \Delta t_{SV,i}) \dots\dots\dots (\text{B.82})$$

式中:

c ——光速,取值为 $2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

平滑后的伪距 $\bar{\rho}^i$ 经快变改正数 PRC_i 修正,电离层改正数 IC_i 修正,并消除对流层延迟 TC_i 、卫星时钟偏差 B_i 后的伪距 $\tilde{\rho}_i$ 经公式(B.83)计算。

$$\tilde{\rho}_i = \bar{\rho}^i + PRC_i + B_i - TC_i + IC_i = \sqrt{(\hat{x}_{k,i} - x_u)^2 + (\hat{y}_{k,i} - y_u)^2 + (\hat{z}_{k,i} - z_u)^2} + ct_u \dots (\text{B.83})$$

式中:

$[x_u \ y_u \ z_u]$ ——用户位置;

t_u ——用户接收机时钟偏差。

该伪距方程为非线性方程,要用泰勒级数展开,并取一阶量,将伪距方程转化为线性方程,见公式(B.84)。

$$\tilde{\rho}_i = \hat{\rho}_i - \frac{\hat{x}_{k,i} - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} \Delta x_u - \frac{\hat{y}_{k,i} - \hat{y}_u}{\hat{r}_i} \Delta y_u - \frac{\hat{z}_{k,i} - \hat{z}_u}{\hat{r}_i} \Delta z_u + c \Delta t_u \dots\dots\dots (\text{B.84})$$

其中,

$$\hat{\rho}_i = \hat{r}_i + c \hat{t}_u;$$

$$\hat{r}_i = \sqrt{(\hat{x}_{k,i} - \hat{x}_u)^2 + (\hat{y}_{k,i} - \hat{y}_u)^2 + (\hat{z}_{k,i} - \hat{z}_u)^2};$$

$$[x_u \ y_u \ z_u] = [\hat{x}_u \ \hat{y}_u \ \hat{z}_u] + [\Delta x_u \ \Delta y_u \ \Delta z_u];$$

$$t_u = \hat{t}_u + \Delta t_u。$$

式中:

$[\hat{x}_u \ \hat{y}_u \ \hat{z}_u]$ ——用户位置估计值;

$[\Delta x_u \ \Delta y_u \ \Delta z_u]$ ——用户位置与估计值之间的差值;

\hat{t}_u ——用户时钟偏差估计值;

Δt_u ——用户时钟偏差与估计值之间的差值。

将上式进行变换可以得到公式(B.85):

$$\Delta \tilde{\rho}_i = l_{x,i} \Delta x_u + l_{y,i} \Delta y_u + l_{z,i} \Delta z_u - c \Delta t_u \dots\dots\dots (\text{B.85})$$

其中,

$$\Delta \tilde{\rho}_i = \hat{\rho}_i - \tilde{\rho}_i,$$

$$l_{x,i} = \frac{\hat{x}_{k,i} - \hat{x}_u}{\hat{r}_i},$$

$$l_{y,i} = \frac{\hat{y}_{k,i} - \hat{y}_u}{\hat{r}_i},$$

$$l_{z,i} = \frac{\hat{z}_{k,i} - \hat{z}_u}{\hat{r}_i}。$$

上式对应的矩阵形式见公式(B.86)。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} \dots\dots\dots (\text{B.86})$$

式中:

$$\mathbf{Z} = [\Delta \tilde{\rho}_1 \ \Delta \tilde{\rho}_2 \ \dots \ \Delta \tilde{\rho}_N]^T,$$

$$H = \begin{bmatrix} l_{x,1} & l_{y,1} & l_{z,1} & 1 \\ l_{x,2} & l_{y,2} & l_{z,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{x,N} & l_{y,N} & l_{z,N} & 1 \end{bmatrix},$$

$$X = [\Delta x_u \quad \Delta y_u \quad \Delta z_u \quad -c \Delta t_u]^T,$$

N ——用户观测到的卫星数量。

利用最小二乘法可以得到公式(B.87)。

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W Z \quad \text{..... (B.87)}$$

其中 W 为权重矩阵,由公式(B.88)和(B.89)定义。

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_N \end{bmatrix}, w_i = 1/\sigma_i^2 \quad \text{..... (B.88)}$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,\text{air}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2 \quad \text{..... (B.89)}$$

用户位置和时钟偏差按公式(B.90)与公式(B.91)计算。

$$[x_u \quad y_u \quad z_u] = [\hat{x}_u \quad \hat{y}_u \quad \hat{z}_u] + [\Delta x_u \quad \Delta y_u \quad \Delta z_u] \quad \text{..... (B.90)}$$

$$t_u = \hat{t}_u + \Delta t_u \quad \text{..... (B.91)}$$

通过若干次迭代后,可以得到精确的用户位置和时钟偏差。

B.5 保护级解算

在计算保护级之前,用户接收机应计算用户与可观测卫星间的观测矩阵 G ,该矩阵的第 i 行见公式(B.92):

$$G_i = [-\cos El_i \sin Az_i \quad -\cos El_i \cos Az_i \quad -\sin El_i \quad 1] \quad \text{..... (B.92)}$$

式中,

El ——用户接收机与卫星间的仰角;

Az ——方位角。

用户与第 i 个可观测的卫星间观测伪距的噪声方差经公式(B.93)计算。

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,\text{air}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2 \quad \text{..... (B.93)}$$

式中:

$\sigma_{i,\text{flt}}^2$ ——经过卫星星历和时钟改正后的残差方差;

$$\sigma_{i,\text{UIRE}}^2 = F_{\text{pp}}^2 \cdot \sigma_{i,\text{UIRE}}^2;$$

$$\sigma_{i,\text{air}}^2 = (0.074 \cdot 1 + 0.18 e^{(El_i/27.7^\circ)})^2;$$

$$\sigma_{i,\text{tropo}}^2 = [0.12 m(El_i)]^2.$$

用户与卫星间观测伪距的协方差矩阵为 W ,其对角线元素 $W_{ii} = \sigma_i^{-2}$,通过 G 和 W 可得公式(B.94)。

$$(G^T W G)^{-1} = \begin{bmatrix} d_{\text{east}}^2 & d_{\text{EN}} & d_{\text{EU}} & d_{\text{ET}} \\ d_{\text{EN}} & d_{\text{north}}^2 & d_{\text{NU}} & d_{\text{NT}} \\ d_{\text{EU}} & d_{\text{NU}} & d_{\text{U}}^2 & d_{\text{UT}} \\ d_{\text{ET}} & d_{\text{NT}} & d_{\text{UT}} & d_{\text{T}}^2 \end{bmatrix} \quad \text{..... (B.94)}$$

水平保护级(HPL)和垂向保护级(VPL)可由公式(B.95)与公式(B.96)计算。

$$\text{HPL}_{\text{SBAS}} = \begin{cases} K_{H,\text{NPA}} \cdot d_{\text{major}} & \text{从航路到 LNAV} \\ K_{H,\text{PA}} \cdot d_{\text{major}} & \text{LNAV/VNAV, LP, LPV} \end{cases} \quad \text{..... (B.95)}$$

$$\text{VPL}_{\text{SBAS}} = K_v d_U \quad \dots\dots\dots (\text{B.96})$$

式中：

$$d_{\text{major}} = \sqrt{\frac{d_{\text{east}}^2 + d_{\text{north}}^2}{2}} + \sqrt{\left(\frac{d_{\text{east}}^2 - d_{\text{north}}^2}{2}\right)^2 + d_{\text{EN}}^2},$$

$K_{H,\text{NPA}}$ —— 6.18；

$K_{H,\text{PA}}$ —— 6.0；

K_v —— 5.33。