

北斗地基增强系统服务性能规范

National BDS Augmentation System

Service Performance Standard

(1.0 版)



中国卫星导航系统管理办公室

二〇一七年七月

引言

北斗地基增强系统是国家重大的信息基础设施，用于提供北斗卫星导航系统增强定位精度和完好性服务。

北斗地基增强系统由地面北斗基准站系统、通信网络系统、数据综合处理系统、数据播发系统等组成。

北斗地基增强系统通过在地面按一定距离建立的若干固定北斗基准站接收北斗导航卫星发射的导航信号，经通信网络传输至数据综合处理系统，处理后产生北斗导航卫星的精密轨道和钟差、电离层修正数、后处理数据产品等信息，通过卫星、数字广播、移动通信方式等实时播发，并通过互联网提供后处理数据产品的下载服务，满足北斗卫星导航系统服务范围内广域米级和分米级、区域厘米级的实时定位和导航需求，以及后处理毫米级定位服务需求。

本规范规定了北斗地基增强系统（基本服务）可面向大众及行业用户提供的可靠稳定服务产品特征及相关性能指标。随着北斗地基增强系统建设工作的完善，北斗地基增强系统将会面向用户提供更多、更可靠和稳定的服务，这些服务将在北斗地基增强系统服务性能规范后续版本中进行规定。

目 录

1	范围.....	1
2	引用文件.....	2
3	术语和定义、缩略语.....	3
3.1	术语和定义.....	3
3.1.1	框架网.....	3
3.1.2	区域加强密度网.....	3
3.1.3	移动通信播发平台.....	3
3.1.4	广域增强数据产品.....	3
3.1.5	区域增强数据产品.....	3
3.1.6	后处理高精度数据产品.....	3
3.1.7	广域增强单频伪距定位.....	3
3.1.8	广域增强单频载波相位定位.....	4
3.1.9	广域增强双频载波相位定位.....	4
3.2	缩略语.....	4
4	北斗地基增强系统概述.....	6
4.1	北斗基准站网.....	7
4.2	通信网络系统.....	8
4.3	国家数据综合处理系统.....	8
4.4	行业数据处理系统.....	9
4.5	数据播发系统.....	9
4.6	北斗/GNSS 增强用户终端.....	9
5	北斗地基增强系统服务产品特征.....	10
5.1	产品分类.....	10
5.2	产品格式.....	11
5.2.1	广域增强数据产品格式.....	11
5.2.2	区域增强数据产品格式.....	20
5.2.3	后处理高精度数据产品格式.....	21
5.3	接入协议.....	21

5.3.1 广域增强数据产品接入协议.....	21
5.3.2 区域增强数据产品接入协议.....	27
5.3.3 后处理高精度数据产品接入协议.....	27
5.4 产品播发频率.....	27
5.5 播发手段.....	27
5.6 播发范围.....	28
5.7 用户终端/接收机要求.....	28
6 北斗地基增强系统服务性能指标.....	30
6.1 服务范围.....	30
6.2 定位精度.....	30
附录 A 广域增强数据产品用户终端解算算法.....	33
A.1 卫星轨道改正.....	33
A.2 卫星钟差改正.....	34
A.3 电离层延迟改正.....	35

图目录

图 1 北斗地基增强系统组成示意图.....	6
图 2 框架网北斗基准站分布示意图.....	7
图 3 区域加强密度网北斗基准站分布示意图.....	8
图 4 数据产品封装示意图.....	11
图 5 电文内容拼接示意图.....	16
图 6 用户注册流程图.....	22
图 7 用户认证流程图.....	22
图 8 服务申请流程图.....	23
图 9 交互信息结构图.....	23

表目录

表 1 北斗地基增强系统服务说明表.....	10
表 2 电文封装内容表.....	11
表 3 广域增强数据产品电文信息.....	12
表 4 北斗组合轨道钟差电文的电文头.....	12
表 5 北斗组合轨道钟差电文的数据内容.....	13
表 6 GPS 组合轨道钟差电文的电文头.....	13
表 7 GPS 组合轨道钟差电文的数据内容.....	14
表 8 电离层球谐模型电文的电文头.....	15
表 9 电离层球谐模型电文的数据内容.....	16
表 10 数据类型表.....	17
表 11 数据字段定义表.....	17
表 12 区域增强数据产品电文信息.....	20
表 13 信息头的数据字段.....	23
表 14 信息类型对照表.....	24
表 15 用户注册申请信息格式.....	24
表 16 注册结果响应信息格式.....	25
表 17 认证申请信息格式.....	25
表 18 认证成功结果信息格式.....	25
表 19 认证失败结果信息格式.....	26
表 20 广域增强数据产品服务申请信息格式.....	26
表 21 申请响应信息电文格式.....	26
表 22 停止服务信息格式.....	27
表 23 服务产品播发频率.....	27
表 24 各类信号的特性.....	29
表 25 北斗广域定位精度指标.....	30
表 26 北斗 GPS 组合广域定位精度指标.....	31
表 27 区域定位精度指标.....	31
表 28 后处理定位精度指标.....	32

1 范围

本规范规定了北斗地基增强系统（基本服务阶段）服务产品特征及服务性能指标。

本规范适用于北斗地基增强系统（基本服务阶段）面向大众及行业用户提供的服务。

2 引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

ERP Earth Rotation Parameter files

FTP File Transfer Protocol

IONEX Ionospheric TEC grid products

NTRIP 2.0 Networked Transport of RTCM via Internet Protocol 2.0

RINEX 3.0 The Receiver Independent Exchange Format Version 3.0

RTCM 3.2 RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Service) Standard 10403.2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services Version 3

SP3 Standard Product 3

YD/T 1214 900/1800MHz TDMA 数字蜂窝移动通信网通用分组无线业务 (GPRS) 设备技术要求：移动台

YD/T 1367 2GHz TD-SCDMA 数字蜂窝移动通信网 终端设备技术要求

YD/T 1547 2GHz WCDMA 数字蜂窝移动通信网 终端设备技术要求 (第三阶段)

YD/T 1558 800MHz/2GHz CDMA2000 数字蜂窝移动通信网设备技术要求 移动台 (含机卡一体)

YD/T 2575 TD-LTE 数字蜂窝移动通信网 终端设备技术要求 (第一阶段)

YD/T 2577 LTE FDD 数字蜂窝移动通信网 终端设备技术要求 (第一阶段)

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1 框架网

是由布设在中国区域、站间距 300km~1000km 的北斗基准站组成的骨干网，用于生成广域增强数据产品等。

3.1.2 区域加强密度网

是由布设在中国区域、站间距 50km~70km 的北斗基准站组成的加强密度网，用于生成区域增强数据产品。

3.1.3 移动通信播发平台

是通过移动通信播发方式向用户提供接入及增强数据产品播发服务的软硬件一体化平台。

3.1.4 广域增强数据产品

利用框架网观测数据，通过实时数据处理生成卫星轨道、卫星钟差、电离层等误差改正数产品及完好性产品，用于提高服务区域内 GNSS 用户实时定位导航性能。

3.1.5 区域增强数据产品

利用区域加强密度网观测数据，处理生成的位置误差改正数或观测值误差综合改正数产品，用于提高服务区域内 GNSS 实时用户定位导航性能。

3.1.6 后处理高精度数据产品

利用框架网和区域加强密度网观测数据，后处理生成高精度卫星轨道、卫星钟差等产品，用于提供用户毫米级精度的事后处理服务。

3.1.7 广域增强单频伪距定位

用户接收机采用单频伪距观测值和广域增强数据产品，确定用户位置的方法。

3.1.8 广域增强单频载波相位定位

用户接收机采用单频载波相位观测值和广域增强数据产品，确定用户位置的方法。

3.1.9 广域增强双频载波相位定位

用户接收机采用双频载波相位观测值和广域增强数据产品，确定用户位置的方法。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

2G—The 2nd Generation Telecommunication, 第2代移动通信技术

3G—The 3rd Generation Telecommunication, 第3代移动通信技术

4G—The 4th Generation Telecommunication, 第4代移动通信技术

ARP—Antenna Reference Point, 天线参考点

CRC—Cyclic Redundancy Check, 循环冗余校验

DF—Data Field, 数据字段

EOP—Earth Orientation Parameter, 地球自转参数

GNSS—Global Navigation Satellite System, 全球卫星导航系统

GLONASS—Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统（俄罗斯）

GPS—Global Positioning System, 全球定位系统

ID—Identification, 信息编号

IOD—Issue Of Data, 数据龄期

IODE—Issue Of Data Ephemeris, 星历数据龄期

ITRF—International Terrestrial Reference Frame, 国际地球参考框架

ITRS—International Terrestrial Reference System, 国际地球参考系统

MSB—Most Significant Bit, 最高位有效

MSM—Multiple Signal Messages, 多信号电文

PDOP—Position Dilution Of Precision, 位置精度因子

RMS—Root Mean Square, 均方根 (值)

RTD—Real Time kinematic pseudorange Difference, 实时伪距差分

RTK—Real Time Kinematic, 实时载波相位差分

SSR—State Space Representation, 状态空间表示

TOW—Time of Week, 历元时刻, 周内秒

SOD—Second of Day, 历元时刻, 天内秒

4 北斗地基增强系统概述

北斗地基增强系统由北斗基准站系统、通信网络系统、国家数据综合处理系统与数据备份系统、行业数据处理系统、区域数据处理系统和位置服务运营平台、数据播发系统、北斗/GNSS 增强用户终端等分系统组成，如图 1 所示。

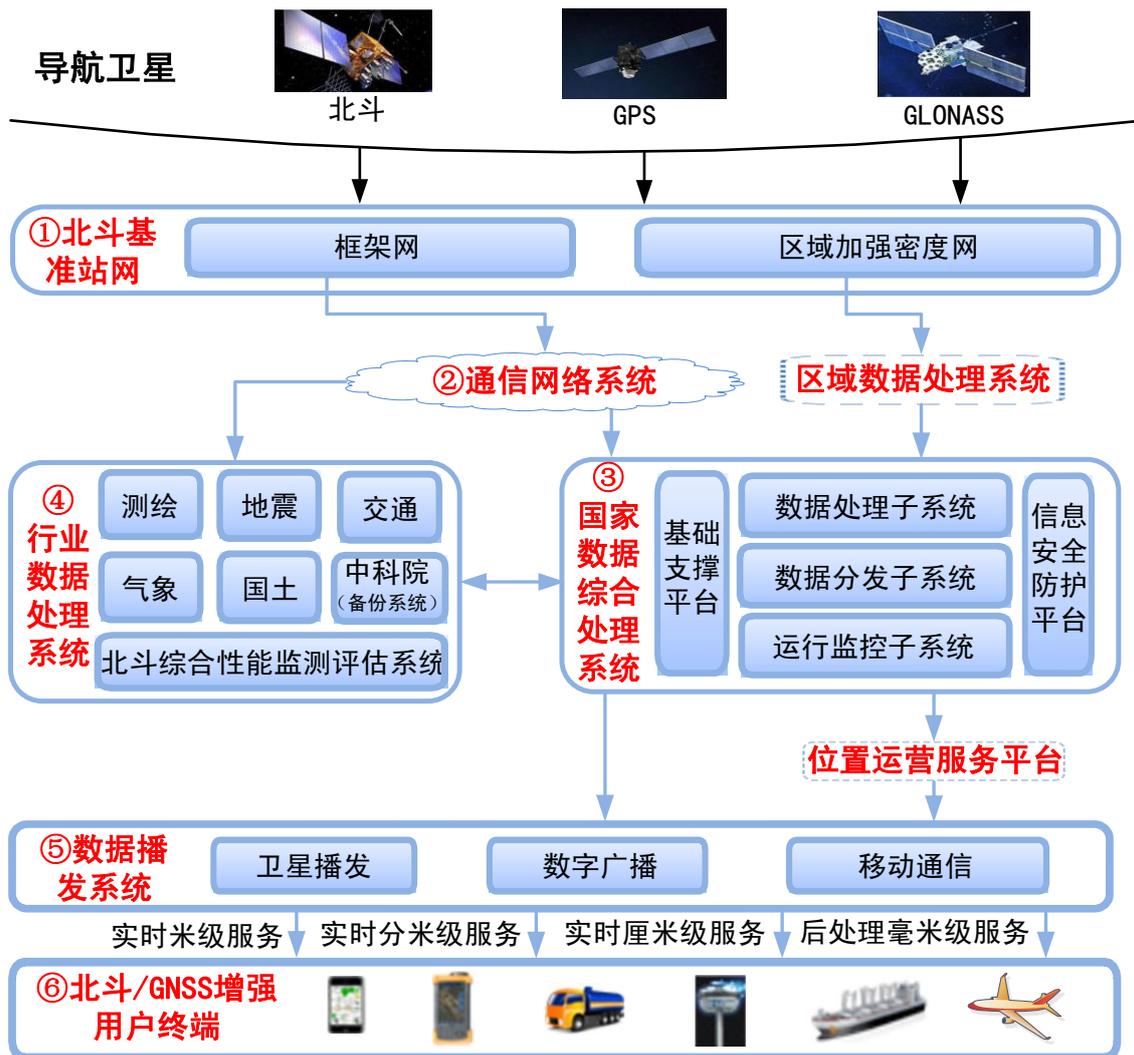


图 1 北斗地基增强系统组成示意图

北斗基准站接收北斗、GPS、GLONASS 的卫星观测数据、星历数据等，通过通信网络系统实时传输到国家数据综合处理系统，经过处理后生成北斗基准站观测数据、广域增强数据产品、区域增强数据产品、后处理高精度数据产品等，利

用卫星广播、数字广播、移动通信等手段播发至北斗/GNSS 增强用户终端，满足北斗地基增强系统服务范围内增强精度和完好性的需求。

4.1 北斗基准站网

北斗基准站网包括框架网和区域加强密度网两部分。

北斗地基增强系统框架网基准站按 155 个设计，并酌情补充，155 个框架网基准站大致均匀的布设在中国陆地和沿海岛礁（如图 2 所示），满足北斗地基增强系统提供广域实时米级、分米级增强服务以及后处理毫米级高精度服务的组网要求。

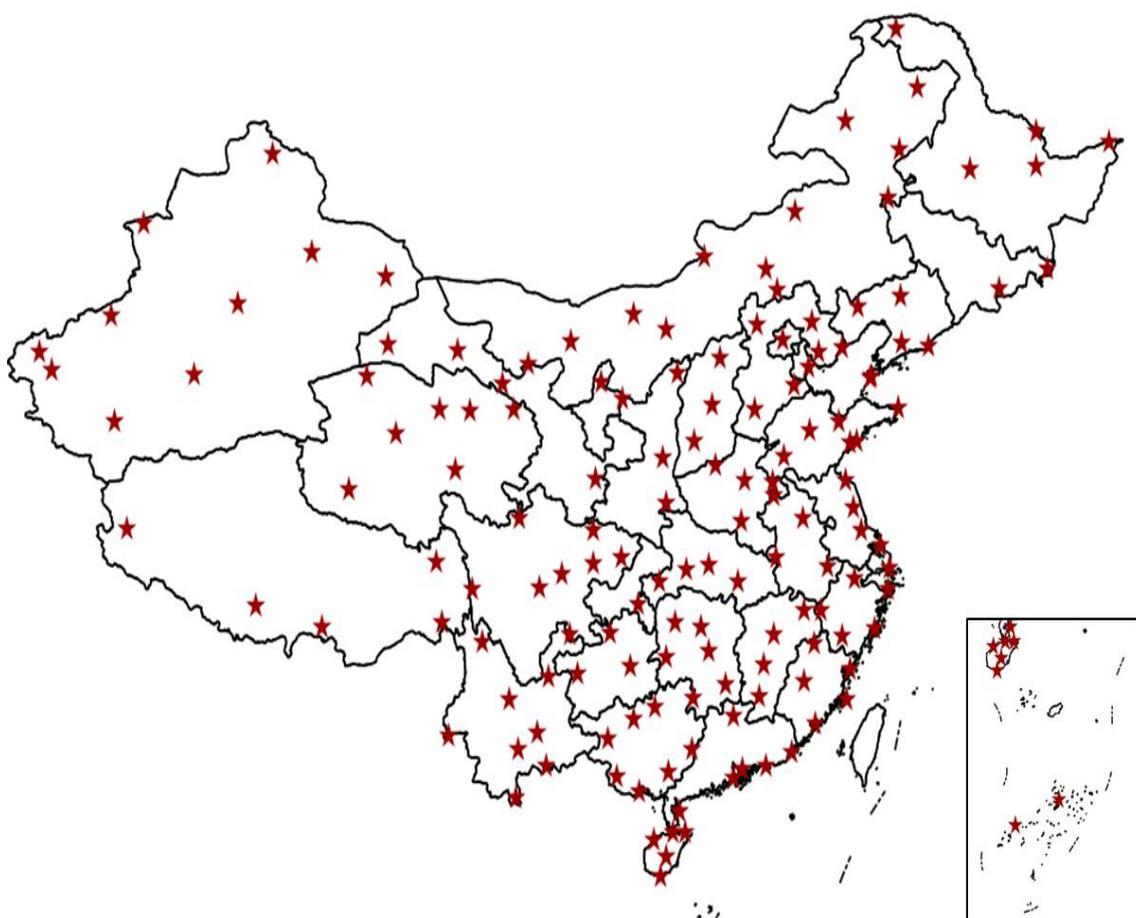


图 2 框架网北斗基准站分布示意图

1200 个区域加强密度网基准站以省、直辖市或自治区为区域单位布设（如图 3 所示），根据各自的面积、地理环境、人口分布、社会经济发展情况进行覆盖，满足北斗地基增强系统提供区域实时厘米级增强服务、后处理毫米级高精度服务所需的组网要求。

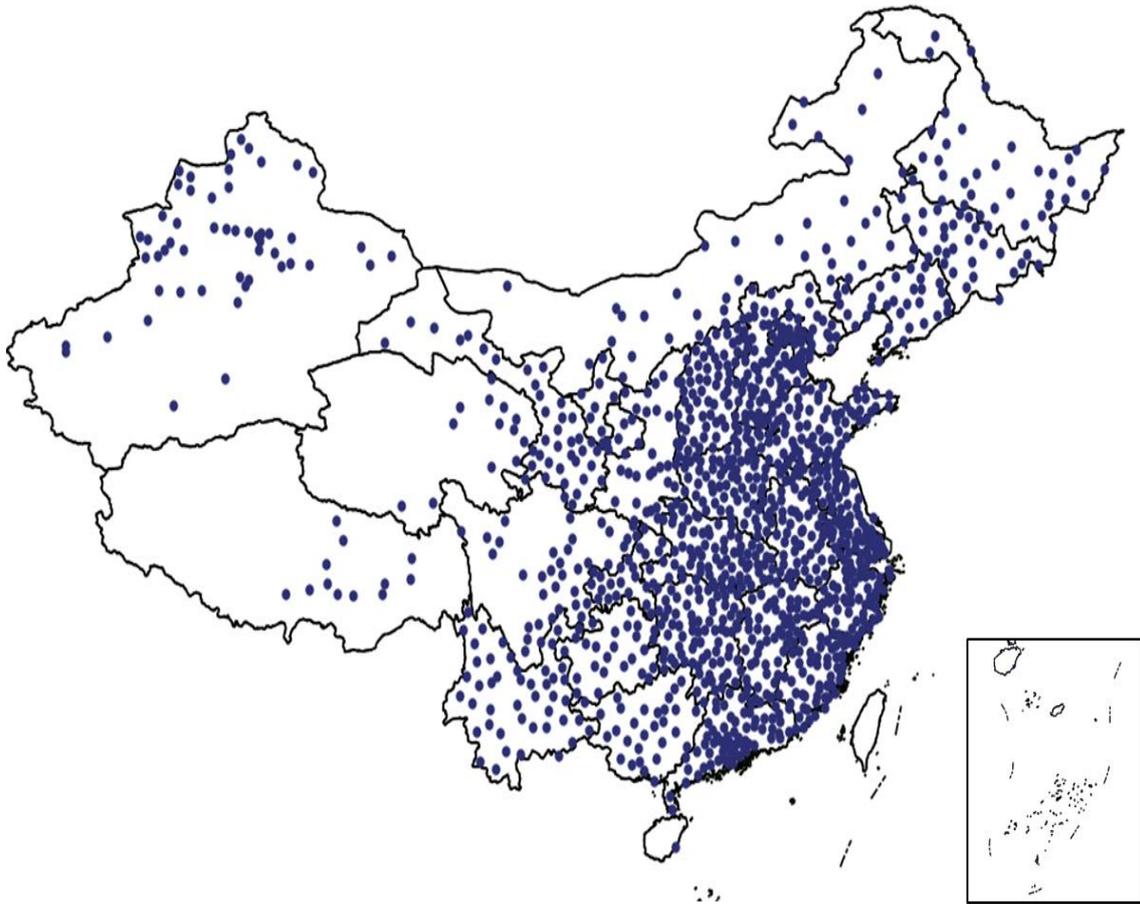


图 3 区域加强密度网北斗基准站分布示意图

4.2 通信网络系统

通信网络系统包括从框架网和区域加强密度网到国家数据综合处理系统/数据备份系统，从国家数据综合处理系统到行业数据处理系统、北斗综合性能监测评估系统、位置服务运营平台、数据播发系统间的通信网络及相关设备，实现数据传输，网络配置与监控等功能。

4.3 国家数据综合处理系统

北斗地基增强系统的国家数据综合处理系统负责从北斗基准站网实时接收北斗、GPS、GLONASS 卫星的观测数据流，生成北斗基准站观测数据文件、广域增强数据产品、区域增强数据产品、后处理高精度数据产品等，并推送至行业数据处理系统、位置服务运营平台、数据播发系统。

4.4 行业数据处理系统

行业数据处理系统包括交通运输部、国家测绘地理信息局、中国地震局、中国气象局、国土资源部及中国科学院共 6 个行业数据处理子系统以及国家北斗数据处理备份系统。

交通运输部、国家测绘地理信息局、中国地震局、中国气象局、国土资源部及中国科学院共 6 个行业数据处理子系统接收国家数据综合处理系统的北斗基准站观测数据和生成的增强数据产品，针对行业应用特点进行增强数据产品的再处理，形成支持各自行业深度应用的增强数据产品。

北斗地基增强系统的国家数据处理备份系统为北斗地基增强系统基准站网观测数据提供基本的远程数据备份服务，确保当国家数据综合处理系统观测数据丢失或损坏后，能够从远程备份系统进行恢复。

4.5 数据播发系统

数据播发系统接收国家数据综合处理系统生成的各类增强数据产品，针对各类数据产品播发需求进行处理和封装，再通过各类播发手段将处理封装后的增强数据产品传输至用户终端/接收机，供用户使用。

数据播发系统利用卫星广播、数字广播和移动通信等方式播发增强数据产品。

4.6 北斗/GNSS 增强用户终端

北斗/GNSS 增强用户终端(接收机)用于接收北斗卫星导航系统的导航信号和数据播发系统播发的增强数据产品，实现所需的高精度定位、导航功能。

5 北斗地基增强系统服务产品特征

5.1 产品分类

北斗地基增强系统提供北斗卫星导航系统增强精度和完好性服务，见表 1。

表 1 北斗地基增强系统服务说明表

序号	服务分类	服务方式	服务类型
1	广域增强服务	卫星广播、数字广播、移动通信	公开免费
2	区域增强服务	移动通信	公开收费
3	后处理高精度服务	文件下载	公开免费
4	北斗基准站观测数据服务	移动通信、文件下载	授权
5	地基增强系统完好性服务	卫星广播、移动通信	公开免费

基于公开服务原则，结合北斗地基增强系统现阶段（截至 2017 年 6 月）建设情况，北斗地基增强系统现提供广域增强服务、区域增强服务、后处理高精度服务（表 1 中序号 1、2、3）共 3 类服务，分别对应广域增强数据产品、区域增强数据产品、后处理高精度数据产品共 3 类产品，广域增强数据产品、区域增强数据产品通过移动通信方式提供服务，后处理高精度数据产品通过文件下载方式提供服务。

广域增强数据产品包括：北斗/GPS 卫星精密轨道改正、钟差改正数、电离层改正数等。

区域增强数据产品包括：北斗/GPS/GLONASS 区域综合误差改正数。

后处理高精度数据产品包括：北斗/GPS 事后处理的精密轨道、精密钟差、EOP、电离层产品等。

5.2 产品格式

5.2.1 广域增强数据产品格式

5.2.1.1 封装格式

北斗地基增强系统提供的广域增强数据产品由多条电文组成，参照 RTCM3.2 的数据封装格式进行封装。每条电文分别进行封装（电文内容长度不超过 1023 字节），封装格式见图 4。

前导码 (8比特)	保留位 (6比特)	电文长度 (10比特)	电文内容 (≤1023字节)	校验位 (24比特)
--------------	--------------	----------------	-------------------	---------------

图 4 数据产品封装示意图

电文由前导码、保留位、电文长度、以及可变长度的电文内容和循环冗余校验（CRC）位组成，电文封装的内容见表 2。

表 2 电文封装内容表

名称	长度	备注
前导码	8 比特	固定比特“11010011”
保留位	6 比特	保留字段“000000”
电文长度	10 比特	值由电文内容长度确定
电文内容	0 字节~1023 字节	包含电文头和数据内容，长度可变，最大不超过 1023 字节，内容长度非整字节时在最后的字节处补 0 至整字节。
校验位	24 比特	采用 CRC-24Q 校验算法

注1：电文内容由各数据字段组成，按比特位进行拼接，若电文内容的有效比特数不为8的整数倍（内容长度非整字节），为保证差分电文内容最后一个字节的完整性，在最后的字节处补‘0’至整字节；电文长度按不小于实际电文内容字节数的最小整数计算，如55.125字节按照56字节计算。

注2：CRC-24Q算法详见RTCM3.2。

5.2.1.2 电文内容及组成

北斗地基增强系统提供的广域增强数据产品包含北斗组合轨道钟差改正电文、GPS 组合轨道钟差改正电文、电离层球谐模型电文共 3 条电文，各电文编号及长度见表 3。

表 3 广域增强数据产品电文信息

电文编号	电文名称	电文内容字节数
1303	北斗组合轨道钟差改正电文	$8.5+25.625*N_s$
1060	GPS 组合轨道钟差改正电文	$8.5+25.625*N_s$
1330	电离层球谐模型电文	$9.5+2.25*N_i$
注：Ns为北斗/GPS卫星数量，Ni=（球谐阶数+1）*（球谐次+1），最大不超过128		

a) 北斗组合轨道钟差改正电文

北斗组合轨道钟差电文将卫星钟差改正和轨道改正组合成一条电文，保证轨道和钟差改正数据的时间一致性。北斗组合轨道钟差电文包含电文头和数据内容两部分，北斗组合轨道钟差电文的电文头详细情况见表 4。

表 4 北斗组合轨道钟差电文的电文头

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
电文编号	DF002	uint12	12	电文编号 1303
北斗历元时间 (TOW)	DF549	uint20	20	-
SSR 更新间隔	DF391	bit(4)	4	-
多电文标识	DF388	bit(1)	1	-
卫星参考基准	DF375	bit(1)	1	-
IOD SSR	DF413	uint4	4	-
SSR 提供者 ID	DF414	uint16	16	-
SSR 解算方案 ID	DF415	uint4	4	-
卫星数量	DF387	uint6	6	-
合计			68	-

北斗组合轨道钟差电文的数据内容详细情况见表 5。

表 5 北斗组合轨道钟差电文的数据内容

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
北斗卫星号	DF532	uint6	6	-
北斗 IODE	DF541	uint8	8	-
轨道面径向改正值	DF365	int22	22	-
轨道面切向改正值	DF366	int20	20	-
轨道面法向改正值	DF367	int20	20	-
轨道面径向改正值变化率	DF368	int21	21	-
轨道面切向改正值变化率	DF369	int19	19	-
轨道面法向改正值变化率	DF370	int19	19	-
钟差改正系数 C0	DF376	int22	22	-
钟差改正系数 C1	DF377	int21	21	-
钟差改正系数 C2	DF378	int27	27	-
合计	-	-	205	-

b) GPS 组合轨道钟差改正电文

GPS 组合轨道钟差电文将卫星的钟差改正和轨道改正合成一条电文，保证轨道和钟差改正数据的时间一致性。GPS 组合轨道钟差电文包含电文头和数据内容两部分，GPS 组合轨道钟差电文的电文头详细情况见表 6。

表 6 GPS 组合轨道钟差电文的电文头

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
电文编号	DF002	uint12	12	电文编号 1060
GPS 历元时间 (TOW)	DF385	uint20	20	-
SSR 更新间隔	DF391	bit(4)	4	-

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
多电文标识	DF388	bit(1)	1	-
卫星参考基准	DF375	bit(1)	1	-
IOD SSR	DF413	uint4	4	-
SSR 提供者 ID	DF414	uint16	16	-
SSR 解算方案 ID	DF415	uint4	4	-
卫星数量	DF387	uint6	6	-
合计	-	-	68	-

GPS 组合轨道钟差电文的数据内容详细情况见表 7。

表 7 GPS 组合轨道钟差电文的数据内容

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
GPS 卫星号	DF068	uint6	6	-
GPS IODE	DF071	uint8	8	-
轨道面径向改正值	DF365	int22	22	-
轨道面切向改正值	DF366	int20	20	-
轨道面法向改正值	DF367	int20	20	-
轨道面径向改正值 变化率	DF368	int21	21	-
轨道面切向改正值 变化率	DF369	int19	19	-
轨道面法向改正值 变化率	DF370	int19	19	-
钟差改正系数 C0	DF376	int22	22	-
钟差改正系数 C1	DF377	int21	21	-
钟差改正系数 C2	DF378	int27	27	-
合计	-	-	205	-

c) 电离层球谐模型电文

电离层球谐模型不依赖于具体使用的卫星导航系统，该电文可用于计算电离层延迟信息，其数据内容详细情况见表 8 及表 9。

表 8 电离层球谐模型电文的电文头

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
电文编号	DF002	uint12	12	电文编号 1330
历元时间 (TOW)	DF385	uint20	20	周内秒
SSR 更新间隔	DF391	bit(4)	4	-
多电文标识	DF388	bit(1)	1	-
IOD SSR	DF413	uint4	4	-
SSR 提供者 ID	DF414	uint16	16	-
SSR 解算方案 ID	DF415	uint4	4	-
电离层高度	DF501	uint7	7	比例系数为 10000
球谐阶数	DF502	uint4	4	-
球谐次数	DF503	uint4	4	-
合计	-	-	76	-

注：表中的球谐阶数不小于球谐次数。

电离层球谐模型电文的数据内容包含球谐系数 C 和球谐系数 S。

对球谐系数 C 和 S 的编码顺序按照公式 (1) 矩阵 (从上到下, 从左到右) 的顺序进行编码:

$$\begin{matrix}
 c_{00} \\
 s_{11} & c_{10} & c_{11} \\
 s_{22} & s_{21} & c_{20} & c_{21} & c_{22} \\
 \dots \\
 s_{n,n} & \dots & s_{n,1} & c_{n,0} & c_{n,1} & \dots & c_{n,n}
 \end{matrix}
 \dots \dots \dots (1)$$

式中:

c_{ij} 、 s_{ij} ——第 i 阶 j 次所对应的余弦、正弦系数;

n ——球谐模型电文头的球谐阶数。

上述矩阵中默认球谐阶数（设为 n ）与球谐次数(设为 m)相同；若 $n > m$ ，则从第 m 行开始, 每一行均为 $2m+1$ 个系数, 即系数变成为: $S_{k,m}, S_{k,m-1}, \dots, S_{k,1}, C_{k,0}, C_{k,1}, \dots, C_{k,m}$, 其中 $m \leq k \leq n$ 。

表 9 电离层球谐模型电文的数据内容

数据字段	数据字段号	数据类型	比特数	备注
球谐系数 C	DF504	int18	18	-
球谐系数 S	DF505	int18	18	-
合计	-	-	36	-

5.2.1.3 电文内容拼接

电文内容一般由电文头和数据区组成，如北斗组合轨道钟差电文（电文编号 1303）。

电文内容的电文头在前，数据区在后，进行拼接。若电文的数据区包含多个相同结构的数据内容，则各数据内容按照先后顺序依次拼接。

电文头和数据内容分别由若干数据字段组成，每个数据字段根据定义的先后顺序依次拼接，组成电文头和数据内容，拼接过程按比特对齐。

北斗组合轨道钟差改正电文（电文编号 1303）内容的拼接示意图见图 5。

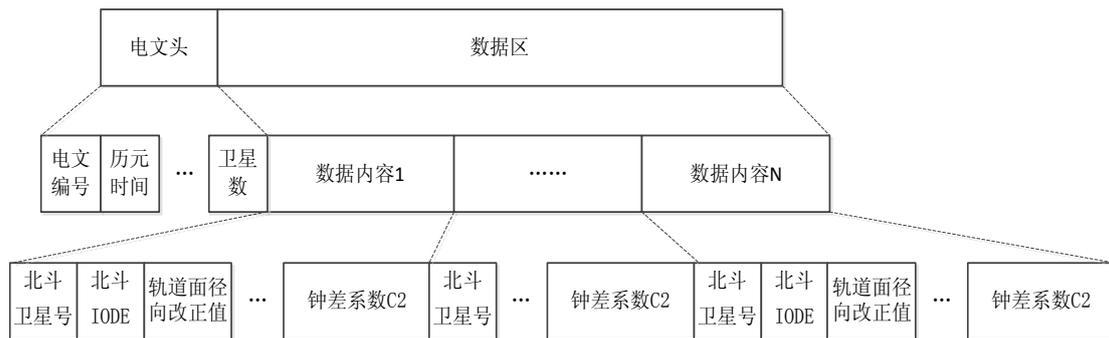


图 5 电文内容拼接示意图

5.2.1.4 数据说明

本文件所涉及的数据类型，见表 10。

表 10 数据类型表

数据类型	描述	范围	备注
bit(N)	N 位二进制比特	每比特为 0 或 1	-
intN	N 比特的有符号整数, 采用二进制补码	$\pm(2^{N-1}-1)$	-2^{N-1} 表示数据无效, N=8~38
uintN	N 比特的无符号整数	$0\sim 2^N-1$	N=2~36
char8(N)	N 个字符, 采用 ISO8859-1 编码, 每个字符 8 比特	字符集	0x00 表示保留位或未用字符

注: $\pm X$ 表示范围为 $-X\sim +X$; 正数的最高有效位 (MSB) 为 0, 负数为 1, 其余位为数值, 其中 0 未使用。

5.2.1.5 数据字段

数据字段为各电文中可能使用的数据。广域增强数据产品各数据字段的定义见表 11。

表 11 数据字段定义表

字段号	字段名称	取值范围	比例因子	数据类型	备注
DF002	电文编号	0~4095	-	uint12	不同电文的标志。
DF068	GPS 卫星号	1~32	1	uint6	表示 GPS 卫星号。
DF071	GPS IODE	-	1	uint8	广播星历的数据龄期用于差分改正的计算
DF365	轨道面径向改正值	$\pm 209.7151\text{m}$	$1*10^{-4}\text{m}$	int22	广播星历径向轨道修正。
DF366	轨道面切向改正值	$\pm 209.7148\text{m}$	$4*10^{-4}\text{m}$	int20	广播星历切向轨道修正。
DF367	轨道面法向改正值	$\pm 209.7148\text{m}$	$4*10^{-4}\text{m}$	int20	广播星历法向轨道修正。

字段号	字段名称	取值范围	比例因子	数据类型	备注
DF368	轨道面径向改正值变化率	$\pm 1.048575\text{m/s}$	$1 \times 10^{-7}\text{m/s}$	int21	广播星历径向轨道修正值的变化率。
DF369	轨道面切向改正值变化率	$\pm 1.048572\text{m/s}$	$4 \times 10^{-7}\text{m/s}$	int19	广播星历切向轨道修正值的变化率。
DF370	轨道面法向改正值变化率	$\pm 1.048572\text{m/s}$	$4 \times 10^{-7}\text{m/s}$	int19	广播星历法向轨道修正值的变化率。
DF375	卫星参考基准	0~1	N/A	bit(1)	轨道改正采用的卫星参考基准。0-国际地球参考框架基准 (ITRF); 1-区域性的 (Regional)。
DF376	钟差改正系数 C0	$\pm 209.7151\text{m}$	0.1mm	int22	广播卫星时钟校正多项式系数。参考时刻 t_0 是历元时间 (DF385, DF549) 加上 $\frac{1}{2}$ SSR 更新间隔。参考时刻 t_0 对应 SSR 更新间隔“0”时历元时刻。
DF377	钟差改正系数 C1	$\pm 1.048575\text{m/s}$	$1 \times 10^{-6}\text{m/s}$	int21	广播卫星时钟校正多项式系数。参考时刻 t_0 见 DF376 中的说明。
DF378	钟差改正系数 C2	$\pm 1.34217726\text{m/s}^2$	$2 \times 10^{-8}\text{m/s}^2$	int27	广播卫星时钟校正多项式系数。参考时刻 t_0 见 DF376 中的说明。
DF385	GPS 历元时间 1s	0s~604799s	1s	uint20	从当前 GPS 周开始的整秒数(TOW)。
DF387	卫星数量	0~63	1	uint6	电文中包含的卫星总数。
DF388	多电文标识	0~1	-	bit(1)	相同历元时刻下, 同种电文分多条传输的标志: 0—非多电文序列或最后一

字段号	字段名称	取值范围	比例因子	数据类型	备注
					条信息序列;1—后续还要传输其他系列电文。
DF391	SSR 更新间隔	0~15	1	bit(4)	0=1s; 1=2s; 2=5s; 3=10s; 4=15s; 5=30s; 6=60s; 7=120s; 8=240s; 9=300s; 10=600s; 11=900s; 12=1800s; 13=3600s; 14=7200s; 15=10800s。 为确保多模系统的同步操作,所有GNSS的SSR更新间隔,所有SSR参数起始于每周(北斗或GPS)时间00:00:00。
DF413	SSR 数据龄期	0~15	1	uint4	SSR数据龄期变化表明SSR生成配置的变化,它可能与流动站操作有关。
DF414	SSR 提供者ID	0~65535	1	uint16	SSR提供者ID是由RTCM对SSR服务请求识别的,提供者ID是全球唯一的。
DF415	SSR 解算方案ID	0~15	1	uint4	SSR解算ID表明了一个SSR提供者提供的不同SSR服务。
DF501	电离层高度	0m~128*10 ⁴ m	10 ⁴ m	uint7	表示电离层高度,其默认值为450000m。
DF502	球谐次数	0~15	1	uint4	最高次数为15。
DF503	球谐阶数	0~15	1	uint4	最高阶数为15。
DF504	球谐系数C	0~2048	2 ⁻⁶	int18	编码的时候球谐系数乘以64。
DF505	球谐系数S	0~2048	2 ⁻⁶	int18	编码的时候球谐系数乘以64。
DF532	北斗卫星号	0~63	1	uint6	本字段标识北斗系统的卫星号,可表示范围为0~63,全零表示64号卫星。

字段号	字段名称	取值范围	比例因子	数据类型	备注
DF541	北斗 IODE	0~255	1	uint8	本字段表示差分改正所采用的 IODE 值。目前北斗广播星历中该 IODE 项所有卫星所有时刻保持一个常数，无法作为差分电文中 IODE 为用户提供使用。为了保证与广播星历的正确且唯一的匹配，北斗和 GPS 差分改正电文采用自定义的 IODE 生成算法，（广播星历的 IODE 计算）算法如下： $iode = (t_{oe} / 720) \text{ Mod } 240$
DF549	北斗历元时刻	0~604799s	1s	uint20	从当前北斗周开始的整秒数（TOW）。

5.2.1.6 解算算法

广域增强数据产品解算算法可以参见附录 A。

5.2.2 区域增强数据产品格式

北斗地基增强系统提供的区域增强数据产品由多条电文组成，具体为扩展的 RTK L1&L2 GPS 观测值电文、固定基准站 ARP 及天线高度电文、天线描述和序列号电文、扩展的 GLONASS L1&L2 RTK 观测值电文、GPS MSM4 电文、北斗 MSM4 电文、GLONASS MSM4 电文共 7 条电文。各电文编号及长度见表 12。

表 12 区域增强数据产品电文信息

电文编号	电文名称	电文内容字节数
1004	扩展的 RTK L1&L2 GPS 观测值电文	8.00+15.625*Ns
1006	固定基准站 ARP 及天线高度	21
1008	天线描述和序列号	6~68

电文编号	电文名称	电文内容字节数
1012	扩展的 GLONASS L1&L2 RTK 观测值电文	$7.625+16.25*N_s$
1074	GPS MSM4	$169+N_s*(18+49*N_{sig})$
1085	GLONASS MSM5	$169+N_s*(36+64*N_{sig})$
1124	北斗 MSM4	$169+N_s*(18+49*N_{sig})$
注：Ns为北斗/GPS/GLONASS卫星数量，Nsig表示传输的信号类型数		

区域增强数据产品中的所有电文都与 RTCM3.2 中对应编号的电文相同，封装格式、电文格式、数据字段等内容详见 RTCM3.2。

5.2.3 后处理高精度数据产品格式

后处理高精度数据产品中，北斗/GPS 事后精密轨道采用 SP3 格式，事后精密钟差采用 RINEX 3.0 格式，EOP 采用 ERP 格式，电离层产品采用 IONEX 格式。

5.3 接入协议

5.3.1 广域增强数据产品接入协议

5.3.1.1 用户接入流程

广域增强数据产品服务用户接入包括用户注册、用户认证、服务申请 3 个步骤。

a) 用户注册流程

用户注册流程见图 6，用户向移动通信播发平台发送用户注册申请信息，其中包含用户 ID、密码等信息，移动通信播发平台收到对用户信息进行审核，并根据审核结果发送注册结果响应信息。若注册成功，则用户 ID 和密码作为用户认证的输入信息。

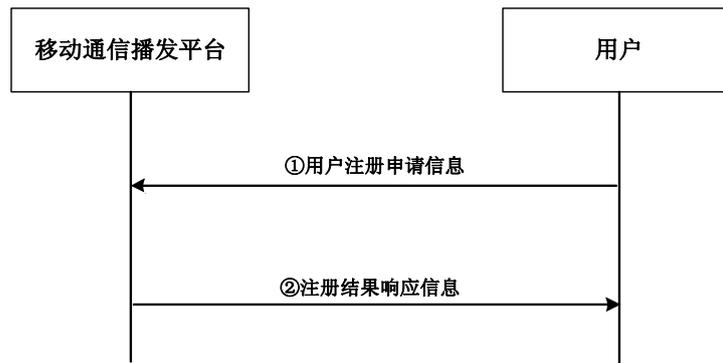


图 6 用户注册流程图

b) 用户认证流程

用户认证流程见图 7，在完成用户注册流程后，用户向移动通信播发平台发送认证申请信息，其中包含用户 ID、密码等信息，移动通信播发平台收到后对用户信息进行判别，并将认证结果响应信息发送发往用户，如认证成功，则认证结果中包括授权码。

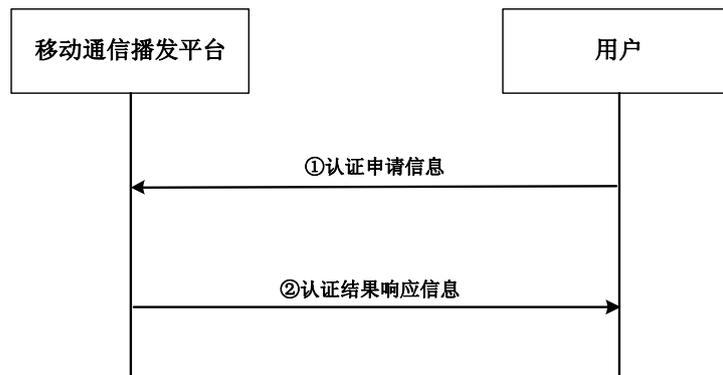


图 7 用户认证流程图

c) 服务申请流程

在完成用户认证流程后，用户向移动通信播发平台发送广域增强数据产品服务申请信息，其中包含用户名、授权码等信息，移动通信播发平台收到后对授权码进行检测，并将检测结果通过服务申请响应信息发往用户，若检测成功，则向用户持续提供广域增强数据产品播发服务。用户向移动通信播发平台发送服务终止申请信息后，移动通信播发平台停止提供广域增强数据产品播发服务，广域增强数据产品服务申请流程见图 8。

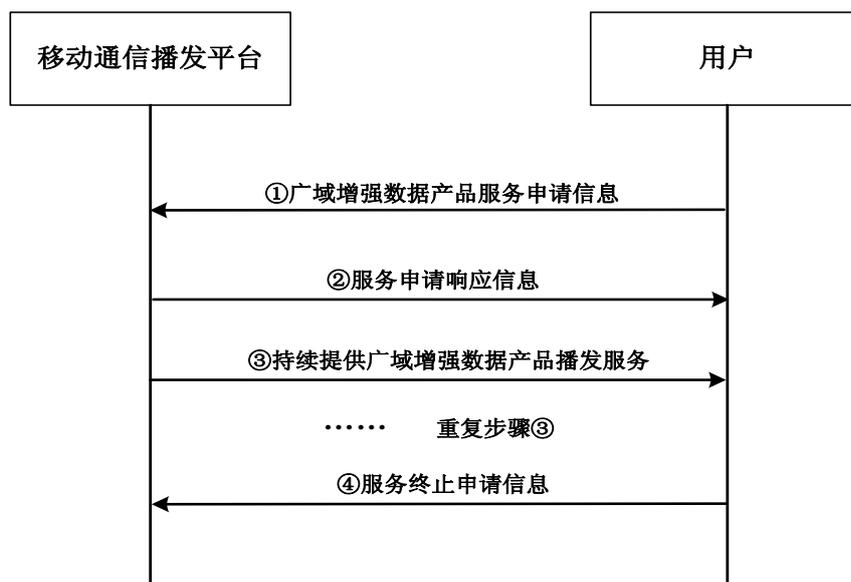


图 8 服务申请流程图

5.3.1.2 信息结构

用户与服务器的交互信息由信息头和信息体组成。信息头包含信息标识符、信息类型、信息长度，信息体包含若干字段组成。信息结构见图 9。



图 9 交互信息结构图

信息头的各项内容见表 13:

表 13 信息头的数据字段

名称	类型	比特数	备注
标识符	char8(8)	64	填充包头“BDS-CHN”，包含结束符(0x00)
信息类型	bit(16)	16	标识不同的信息，见下表
信息长度	uint16	16	该字段表示信息体的长度（不包括前面的信息头）。

用户接入信息的信息类型见表 14。

表 14 信息类型对照表

信息名称	信息类型参数	备注
用户注册申请信息	0x0001	-
注册结果响应信息	0x0002	-
认证申请信息	0x0011	-
认证结果响应信息	0x0012	-
广域增强数据产品服务申 请信息	0x0021	-
服务申请响应信息	0x0023	-
服务终止申请信息	0x0025	-

5.3.1.3 信息内容

a) 用户注册申请信息

用户注册申请信息格式及各字段详细说明见表 15。

表 15 用户注册申请信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
用户 ID	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号 @和_
密码	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号 @和_
用户类型	bit(8)	8	
合计	-	328	-

b) 注册结果响应信息

注册结果信息格式及各字段详细说明见表 16。

表 16 注册结果响应信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
注册结果标识	bit(8)	8	0 表示注册成功，1 表示用户名已存在，其他预留
合计	-	8	-

c) 认证申请信息

认证申请信息格式及各字段详细说明见表 17。

表 17 认证申请信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
用户 ID	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号 @和_等
密码	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号 @和_等
用户类型	bit(8)	8	
保留	char8(6)	48	预留字段
合计	-	376	-

d) 认证结果响应信息

若认证成功，认证结果信息格式及各字段详细说明见表 18。

表 18 认证成功结果信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
授权码	char8(n)	8*n	授权码为变长，长度由消息头中相应字段确定，授权码长度不小于 20 字节。
合计	-	-	-

若认证失败，认证结果信息格式及各字段详细说明见表 19。

表 19 认证失败结果信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
认证结果	uint8	8	0~255，对应不同的认证失败原因。
合计	-	8	-

e) 广域增强数据产品服务申请信息

广域增强数据产品服务申请信息格式及各字段详细说明见表 20。

表 20 广域增强数据产品服务申请信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
用户名	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号 @和_
用户类型	bit(8)	8	
服务选项	bit(16)	16	用户可根据自身情况选择不接收某些电文（默认情况下都提供），该字段待定
授权码长度	uint8	8	表示授权码长度，与认证结果信息表中的认证结果相同
授权码	char8(n)	8*n	对应于认证结果信息中的授权码，授权码为变长，长度可从授权码长度获取
保留	char8(6)	48	
合计	-	-	-

f) 服务申请响应信息

服务申请响应信息格式及各字段详细说明见表 21。

表 21 申请响应信息电文格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
申请响应结果	unsigned char	8	0x00 表示数据服务申请成功；其它表示授权码校验失败，其中 0xFF 表示授权码过期
合计	-	8	-

g) 服务终止申请信息

停止服务信息格式及各字段详细说明见表 22。

表 22 停止服务信息格式

数据字段	数据类型	比特数	备注
用户名	char8(20)	160	合法字符包括 26 个大小写英文字母，数字 0-9，符号@和_
服务终止申请信息	unsigned char	8	标明不同的终止服务的原因。0 表示直接断开，其他预留
合计	-	-	-

5.3.1.4 数据说明

广域增强数据产品接入协议中的数据类型说明见表 10。

5.3.2 区域增强数据产品接入协议

区域增强数据产品播发接入协议采用 NTRIP 2.0。

5.3.3 后处理高精度数据产品接入协议

后处理高精度数据产品播发接入协议采用 FTP 协议。

5.4 产品播发频率

北斗地基增强系统各类服务产品播发频率见表 23。

表 23 服务产品播发频率

产品分类	产品播发频率
广域增强数据产品	钟差、轨道改正数：1s 电离层改正数：30s
区域增强数据产品	1s

5.5 播发手段

北斗地基增强系统服务产品目前通过移动通信手段进行播发。

5.6 播发范围

北斗地基增强系统各类服务产品目前播发范围为：中华人民共和国境内 2G/3G/4G 移动通信网络覆盖范围。

5.7 用户终端/接收机要求

目前北斗地基增强系统服务产品通过移动通信手段进行播发，因此接收机应配备相应的 2G/3G/4G 移动通信模块以接收相应的服务产品，2G/3G/4G 信号特性如表 24 所示。

表 24 各类信号的特性

信号类别	特性					依据标准	
	制式及采用技术		工作方式	带宽	码片速率		工作频段
2G	GSM	频分复用	频分双工 (FDD)	200 kHz (有效)	-	700MHz ~ 2.7GHz	YD/T 1214
3G	WCDMA	CDMA多址 接入	频分双工 (FDD)	5MHz(载波)	3.84Mcps	700MHz ~ 2.7GHz	YD/T 1547
	TD-SCDMA		时分双工 (TDD)	1.6MHz (载波)	1.28Mcps	800MHz ~ 3.6GHz	YD/T 1367
	CDMA2000		频分双工 (FDD)	1.25MHz (载波)	1.2288Mcps	450MHz ~ 2.5GHz	YD/T 1558
4G	LTE/LTE-Advanced	正交频分复用 (OFDM) 和正交频分复用多址 (OFDMA)	时分双工 (TDD)和频分双工 (FDD)	1.4MHz、 3MHz、 5MHz、 10MHz、 15MHz、 20MHz (基础), 100MHz (最大)	-	450MHz ~ 3.8GHz	YD/T 2575、 YD/T 2577

6 北斗地基增强系统服务性能指标

6.1 服务范围

广域增强精度服务范围为播发范围内中国陆地及领海。

区域增强精度服务范围参照区域加强密度网站点分布（区域加强密度站分布见图 3），以区域服务系统发布的服务范围为准。

后处理高精度服务范围为播发范围内中国陆地及领海。

6.2 定位精度

定位精度是指在约束条件下，各服务范围内用户使用相应产品后所获得的位置与用户的真实位置之差的统计值，包括水平定位精度和垂直定位精度。

北斗地基增强系统定位精度指标见表 25、表 26、表 27、表 28，未说明连续观测时间要求的默认为连续观测 24 小时后的定位精度指标。

表 25 北斗广域定位精度指标

产品分类	定位精度 (95%)	约束条件
广域增强数据产品	单频伪距定位: 水平 $\leq 2\text{m}$ 垂直 $\leq 4\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4
	单频载波相位 精密单点定位: 水平 $\leq 1.2\text{m}$ 垂直 $\leq 2\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4
	双频载波相位 精密单点定位: 水平 $\leq 0.5\text{m}$ 垂直 $\leq 1\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4 初始化时间 $30\text{min} \sim 60\text{min}$

表 26 北斗 GPS 组合广域定位精度指标

产品分类	定位精度 (95%)	约束条件
广域增强数据产品	单频伪距定位: 水平 $\leq 2\text{m}$ 垂直 $\leq 3\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 GPS 有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4
	单频载波相位 精密单点定位: 水平 $\leq 1.2\text{m}$ 垂直 $\leq 2\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 GPS 有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4
	双频载波相位 精密单点定位: 水平 $\leq 0.5\text{m}$ 垂直 $\leq 1\text{m}$	北斗有效卫星数 > 4 GPS 有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4 初始化时间 $30\text{min}\sim 60\text{min}$

表 27 区域定位精度指标

产品分类	定位精度 (RMS)	约束条件
区域增强数据产品	水平 $\leq 5\text{cm}$ 垂直 $\leq 10\text{cm}$	北斗有效卫星数 > 4 或 GPS 有效卫星数 > 4 或 GLONASS 有效卫星数 > 4 PDOP 值 < 4 初始化时间 $\leq 60\text{s}$

表 28 后处理定位精度指标

产品分类	定位精度 (RMS)	约束条件
后处理高精度数据产品	水平 $\leq 5\text{mm} \pm 1\text{ppm} \times D$ 垂直 $\leq 10\text{mm} \pm 2\text{ppm} \times D$	北斗有效卫星数 >4 或 GPS 有效卫星数 >4 PDOP 值 <4 连续观测 2 小时以上
注：D 表示基线距离		

附录 A

广域增强数据产品用户终端解算算法

A.1 卫星轨道改正

轨卫星轨道改正向量 δO （分为径向、切向和法向三个分量），完整的轨道改正矢量 δO 需要采用改正项和它们的速度项联合计算得到，见公式（1）：

$$\delta O = \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{O}_{radial} \\ \delta \dot{O}_{along} \\ \delta \dot{O}_{cross} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1)$$

式中：

t —— 接收机当前历元时间；

t_0 —— 从SSR电文信息获取的轨道改正数的参考时间：参考时间为北斗历元时间加上SSR更新时间间隔的一半；特殊情况下，SSR更新时间间隔为“0”，此时使用北斗历元时间为参考时间。

δO ， $\delta \dot{O}$ —— 从SSR电文信息获取的轨道改正项与速度项。

在用户使用过程中，需要将该得到的上述改正向量 δO 转换至地固系下，转换方法，见公式（2）到公式（5）：

$$e_{along} = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \quad (2)$$

$$e_{cross} = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \quad (3)$$

$$e_{radial} = e_{along} \times e_{cross} \quad (4)$$

$$\delta X = \begin{bmatrix} e_{radial} & e_{along} & e_{cross} \end{bmatrix} \delta O \quad (5)$$

式中：

$r = X_{broadcast}$ —— 广播星历计算的地固系下的卫星位置矢量；

$\dot{r} = \dot{X}_{broadcast}$ —— 广播星历计算的地固系下的卫星位置矢量；

e_i —— 径向、法向、切向方向单位矢量， $i = \{radial, along, cross\}$ ；

δX —— 地固系下卫星位置的改正量。

用户获得地固系下的轨道改正量 δX 后，对广播星历解算得到的卫星位置进行修正，见公式（6）：

$$X_{orbit} = X_{broadcast} - \delta X \quad (6)$$

式中：

X_{orbit} ——改正数改正后得到的地固系下卫星精确位置；

$X_{broadcast}$ ——广播星历计算得到的卫星位置，其 IODE 与 SSR 轨道改正电文的 IOD 匹配；

另外，需要说明的是目前播发的 SSR 改正数是基于卫星质心的，因此得到的 X_{orbit} 是卫星质心的地固系位置。

A.2 卫星钟差改正

卫星钟差改正 δC 通过多项式表达某一段时间内的钟差偏差，计算方法见公式（7）：

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 \quad (7)$$

式中：

t ——接收机当前历元时间；

t_0 ——从SSR电文信息获取的钟差改正数的参考时间：多项式项的参考时间为北斗历元时间加上SSR更新时间间隔的一半；特殊情况下，SSR更新时间间隔为“0”，此时使用北斗历元时间为参考时间；

C_i ——从SSR钟差改正电文获取的多项式系数， $i = \{0,1,2\}$ 。

卫星钟差改正 δC 是相对于广播星历钟差的改正，用户使用方法见公式（8）：

$$t_{satellite} = t_{broadcast} - \frac{\delta C}{c} \quad (8)$$

式中：

$t_{broadcast}$ ——广播星历计算得到的卫星钟差参数，其IOD与SSR轨道改正电文的 IOD匹配；

$t_{satellite}$ ——经过SSR钟差改正信息改正得到的卫星钟差；

c ——光速。

由于，SSR 卫星钟差改正数使用双频（B1B2）无电离层组合观测值确定，为了保证与 SSR 改正数使用相同的时间基准，对于单频用户使用该改正数产品时，需要进行相应的码偏差改正，改正方法见公式（9）：

$$\begin{aligned}\tilde{B}_1 &= B_1 - (TGD_1 - TGD_2) / (1 - \gamma) \\ \tilde{B}_2 &= B_2 - (TGD_1 - TGD_2) / \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \\ \tilde{B}_3 &= B_3 - (\gamma \cdot TGD_1 - TGD_2) / (1 - \gamma) \\ \gamma &= \frac{f_1^2}{f_2^2}\end{aligned}\quad (9)$$

其中 \tilde{B}_i ($i=1,2,3$) 为 B_i 经过硬件延迟改正后的码观测值， f_1 、 f_2 为 BDS 的 B_1 、 B_2 频率值， TGD_1 和 TGD_2 分别是广播星历中的硬件延迟偏差（单位转为米）。

A.3 电离层延迟改正

电离层延迟改正采用电离层球谐模型，改正数信息提供电离层改正球谐系数（ \tilde{C}_{nm} ， \tilde{S}_{nm} ），观测量 L_x 斜路径上的电离层延迟 $(T_{iono}(t))_{L_x}$ 的计算方法见公式（10）：

$$(T_{iono}(t))_{L_x} = \gamma_{L_x} F(t) \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) (\tilde{C}_{nm} \cos(m \cdot s) + \tilde{S}_{nm} \sin(m \cdot s)) \quad (10)$$

其中， $(T_{iono}(t))_{L_x}$ ——斜路径上的电离层延迟计算量；

γ_{L_x} —— $\gamma_{L_x} = 40.3 \cdot 10^6 / f^2$ ， f 为 L_x 观测值频率；

$F(t)$ —— 倾斜因子；

n_{\max} —— 球谐展开式阶数，即电离层球谐模型电文头中的球谐阶数；

\tilde{P}_{nm} —— 标准化后的 n 阶 m 次勒让德函数；

φ —— 电离层穿刺点纬度（日固地磁坐标系）；

\tilde{C}_{nm} —— 电离层余弦函数系数，通过电离层球谐模型电文播发；

\tilde{S}_{nm} —— 电离层正弦函数系数，通过电离层球谐模型电文播发；

s —— 穿刺点经度（日固地磁坐标系）。

倾斜因子 $F(t)$ 的计算公式见公式 (11) :

$$F(t) = 1 / \sqrt{1 - \left(\frac{a \cos El(t)}{a + H_{iono}} \right)^2} \quad (11)$$

式中:

El —— 用户和卫星之间的高度角[rad];

a —— ITRS定义的地球赤道半径;

H_{iono} —— 地球上方电离层高度, 默认值为450000m。

标准化的勒让德函数计算见公式 (12) ~公式 (14) :

$$\tilde{P}_{n,m}(\sin \varphi) = N_{n,m} \cdot P_{n,m}(\sin \varphi) \quad (12)$$

$$N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1) \cdot (2-\delta_{0,m})}{(n+m)!}} \quad (13)$$

其中 $\delta_{0,m}$ 为克罗内克函数, 当 $m=0$ 时, $\delta_{0,m}=1$, 反之则 $\delta_{0,m}=0$ 。

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{0,0}(\sin \varphi) = 1 & n=m=0 \\ P_{n,n}(\sin \varphi) = (2n-1)!! \left(1 - (\sin \varphi)^2\right)^{n/2} & n=m \neq 0 \\ P_{n,m}(\sin \varphi) = \sin \varphi \cdot (2m+1) \cdot P_{m,m}(\sin \varphi) & n=m+1 \\ P_{n,m}(\sin \varphi) = \frac{(2n-1) \cdot \sin \varphi \cdot P_{n-1,m}(\sin \varphi) - (n+m-1) \cdot P_{n-2,m}(\sin \varphi)}{n-m} & \text{其它} \end{array} \right. \quad (14)$$

以下分别给出穿刺点计算以及将地固系穿刺点转换至地磁日固系下的转换方法。

(1) 地固系电离层穿刺点的计算见公式 (15) ~公式 (17)

$$\phi_{pp} = \sin^{-1} \left\{ \sin \phi_r \cos \psi_{pp} + \cos \phi_r \sin \psi_{pp} \cos Az \right\} \quad (15)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_r + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin Az}{\cos \psi_{pp} \cos \phi_r - \sin \psi_{pp} \cos Az \sin \phi_r} \right) \quad (16)$$

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - El - \sin^{-1} \left(\frac{a}{a + H_{iono}} \cdot \cos El \right) \quad (17)$$

式中, ϕ_{pp}, λ_{pp} 为观测时刻 t 穿刺点的地理经纬度, ψ_{pp} 为穿刺点-地心-用户接收机形成的夹角, El 是用户接收机和卫星之间的高度角; Az 是用户接收机和卫星之

间的方位角； φ_r 为用户接收机在地固坐标系中的地理纬度； λ_r 为用户接收机在地固坐标系中的地理经度； a 为 ITRS 定义的地球赤道半径； H_{iono} 为地球上空电离层高度，默认 $H_{iono}=450000m$ 。

(2) 地固系穿刺点到地磁日固系的转换

已知观测历元时刻的简化儒略日 mjd ，穿刺点地理经纬度 ϕ_{pp}, λ_{pp} ，

$$pole2 = -1.267, \quad pole1 = 1.40, \quad sunlon = \pi - (mjd - (\text{int})mjd) \times 2\pi。$$

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3(pole2) \mathbf{R}_2\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) \mathbf{R}_3(-pole2) \mathbf{rtmp} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} sunr_0 \\ sunr_1 \\ sunr_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3(pole2) \mathbf{R}_2\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) \mathbf{R}_3(-pole2) \mathbf{surtmp} \quad (19)$$

其中，

$$\mathbf{rtmp} = [\cos\phi_{pp} \cos\lambda_{pp} \quad \cos\phi_{pp} \sin\lambda_{pp} \quad \sin\phi_{pp}]^T$$

$$\mathbf{surtmp} = [\cos(sunlon) \quad \sin(sunlon) \quad 0]^T$$

$$\mathbf{R}_3(pole2) = \begin{bmatrix} \cos(pole2) & \sin(pole2) & 0 \\ -\sin(pole2) & \cos(pole2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_3(-pole2) = \begin{bmatrix} \cos(-pole2) & \sin(-pole2) & 0 \\ -\sin(-pole2) & \cos(-pole2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_2\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) & 0 & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} - pole1\right) \end{bmatrix}$$

日固地磁经纬度 φ, s 计算见公式 (20) ~ 公式 (24)：

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{r_2}{\sqrt{r_0^2 + r_1^2}} \quad (20)$$

$$smlon = \tan^{-1} \frac{r_1}{r_0} \quad (21)$$

$$lons = \tan^{-1} \frac{sunr_1}{sunr_0} \quad (22)$$

$$lon = smlon - lons \quad (23)$$

$$s = \begin{cases} lon + 2\pi & lon < 0 \\ lon & lon \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$