



中华人民共和国国家标准

GB/T 39414.5—2024

北斗卫星导航系统空间信号接口规范 第 5 部分：公开服务信号 B2b

Interface specification for signal in space of BeiDou satellite
navigation system—Part 5: Open service signal B2b

2024-07-24 发布

2024-07-24 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言..... V

引言..... VI

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语、定义和缩略语..... 1

 3.1 术语和定义..... 1

 3.2 缩略语..... 1

4 北斗系统概述..... 2

 4.1 空间星座..... 2

 4.2 坐标系统..... 2

 4.3 时间系统..... 2

5 信号特性..... 3

 5.1 信号结构..... 3

 5.2 信号调制..... 3

 5.3 逻辑电平..... 4

 5.4 极化方式..... 4

 5.5 载波相位噪声..... 4

 5.6 杂散..... 4

 5.7 相关损耗..... 4

 5.8 数据/码一致性..... 4

 5.9 信号一致性..... 4

 5.10 地面接收功率电平..... 4

6 测距码特性..... 5

7 导航电文结构..... 7

 7.1 导航电文概述..... 7

 7.1.1 导航电文类型..... 7

 7.1.2 校验码..... 7

 7.2 B-CNAV3 导航电文..... 8

 7.2.1 基本描述..... 8

 7.2.2 编码方案和编码参数..... 8

 7.2.3 编排格式..... 11

8 导航电文参数和算法..... 14

 8.1 测距码编号..... 14

8.2	信息类型	14
8.3	系统时间参数	14
8.4	钟差参数	15
8.4.1	参数说明	15
8.4.2	用户算法	15
8.5	群延迟修正参数	16
8.5.1	参数说明	16
8.5.2	用户算法	16
8.6	星历参数	16
8.6.1	参数说明	16
8.6.2	用户算法	18
8.7	电离层延迟改正模型参数	19
8.7.1	参数说明	19
8.7.2	用户算法	19
8.8	中等精度历书	24
8.8.1	参数说明	24
8.8.2	用户算法	25
8.9	简约历书	26
8.9.1	参数说明	26
8.9.2	用户算法	26
8.10	地球定向参数	27
8.10.1	参数说明	27
8.10.2	用户算法	27
8.11	BDT-UTC 时间同步参数	28
8.11.1	参数说明	28
8.11.2	用户算法	28
8.12	BGTO 参数	29
8.12.1	参数说明	29
8.12.2	用户算法	29
8.13	卫星健康状态	30
8.14	卫星完好性状态标识	30
8.15	空间信号精度指数	30
8.16	空间信号监测精度指数	31
9	符合性验证方法	31
9.1	概述	31
9.2	信号特性验证方法	31

9.2.1 测试设备与连接.....31

9.2.2 测试与判别方法.....31

9.3 测距码特性验证方法.....31

9.3.1 测试设备与连接.....31

9.3.2 测试与判别方法.....31

9.4 导航电文结构验证方法.....31

9.4.1 测试设备与连接.....31

9.4.2 测试与判别方法.....31

9.5 导航电文参数算法验证方法.....32

9.5.1 测试设备与连接.....32

9.5.2 测试与判别方法.....32

附录 A（资料性） 多进制 LDPC 编译码方法及示例.....33



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。

本文件是 GB/T 39414《北斗卫星导航系统空间信号接口规范》的第 5 部分。GB/T 39414 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：公开服务信号 B1C；
- 第 2 部分：公开服务信号 B2a；
- 第 3 部分：公开服务信号 B1I；
- 第 4 部分：公开服务信号 B3I；
- 第 5 部分：公开服务信号 B2b。

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。

本文件由中央军委装备发展部提出。

本文件由全国北斗卫星导航标准化技术委员会(SAC/TC 544)归口。

本文件起草单位：中国卫星导航工程中心、中国航天标准化研究所、北京卫星导航中心、中国空间技术研究院、中国科学院微小卫星创新研究院、华中科技大学、北京航空航天大学、中国航天电子技术研究院。

本文件主要起草人：宿晨庚、郭树人、高为广、卢鋈、王维嘉、高丽峰、高扬、杨晓珩、唐祖平、黄勤、王梦丽、陈颖、董海青、朱智勇、李罡、景贵飞、陈亮、任前义、陈正坤、吕飞仁。



引 言

北斗卫星导航系统分为北斗一号、北斗二号和北斗三号三个建设发展阶段。北斗卫星导航系统目前播发的定位导航授时服务公开信号包括 B1I、B2I、B3I、B1C、B2a、B2b。其中, B1I、B3I 信号在北斗二号和北斗三号的中圆地球轨道(MEO)卫星、倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和地球静止轨道(GEO)卫星上播发; B2I 信号在北斗二号所有卫星上播发, 在北斗三号卫星上将被 B2a 信号取代; B1C、B2a、B2b 信号在北斗三号中圆地球轨道(MEO)卫星和倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星上播发。

B2b 信号是北斗三号卫星(GEO/IGSO/MEO)播发的下行卫星导航信号, 包含 I 支路和 Q 支路, 同时承载了定位导航授时、全球短报文通信反向链路、国际搜救反向链路等服务。GB/T 39414 拟由五个部分构成。

- 第 1 部分: 公开服务信号 B1C。目的在于确立空间星座和用户终端之间公开服务信号 B1C 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。
- 第 2 部分: 公开服务信号 B2a。目的在于确立空间星座和用户终端之间公开服务信号 B2a 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。
- 第 3 部分: 公开服务信号 B1I。目的在于确立空间星座和用户终端之间公开服务信号 B1I 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。
- 第 4 部分: 公开服务信号 B3I。目的在于确立空间星座和用户终端之间公开服务信号 B3I 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。
- 第 5 部分: 公开服务信号 B2b。目的在于确立空间星座和用户终端之间公开服务信号 B2b 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。



北斗卫星导航系统空间信号接口规范

第5部分:公开服务信号 B2b

1 范围

本文件规定了北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)空间星座(IGSO/MEO)和用户终端之间公开服务信号 B2b 的信号特性、导航电文结构及用户算法等。

本文件适用于使用 B2b 信号实现定位导航授时产品的研制、生产和检验。

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(包含所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 39267 北斗卫星导航术语

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 39267 界定的术语和定义适用于本文件。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BDCS:北斗坐标系(BeiDou Coordinate System)

BDGIM:北斗全球电离层延迟修正模型(BeiDou Global Ionospheric delay correction Model)

BDT:北斗时(BeiDou Navigation Satellite System Time)

BGTO:BDT-GNSS 时间同步(BDT-GNSS Time Synchronous)

CRC:循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check)

EOP:地球定向参数(Earth Orientation Parameters)

GEO:地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit)

GF:伽罗瓦域(Galois Field)

GNSS:全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System)

IERS:国际地球自转服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service)

IGSO:倾斜地球同步轨道(Inclined GeoSynchronous Orbit)

LDPC:低密度奇偶校验(Low Density Parity Check)

MEO:中圆地球轨道(Medium Earth Orbit)

MSB:最高有效位(Most Significant Bit)

PRN:伪随机噪声码(Pseudo-Random Noise)

SOW:周内秒计数(Seconds of Week)

TECu:总电子含量单位(Total Electron Content unit)

UTC:协调世界时(Universal Time Coordinated)

WN:整周计数(Week Number)

4 北斗系统概述

4.1 空间星座

北斗系统标称空间星座由 3 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 24 颗 MEO 卫星组成,并视情部署在轨备份卫星。GEO 卫星轨道高度 35 786 km,分别定点于东经 80°、110.5°和 140°;IGSO 卫星轨道高度 35 786 km,轨道倾角 55°;MEO 卫星轨道高度 21 528 km,轨道倾角 55°。

4.2 坐标系统

北斗系统采用北斗坐标系(BDCS),北斗坐标系的定义符合国际地球自转服务(IERS)组织规范,与 2000 中国大地坐标系(CGCS2000)定义一致(具有完全相同的参考椭球参数),具体定义如下。

- a) 原点、轴向及尺度定义包括:
 - 1) 原点位于地球质心;
 - 2) Z 轴指向 IERS 定义的参考极(IRP)方向;
 - 3) X 轴为 IERS 定义的参考子午面(IRM)与通过原点且同 Z 轴正交的赤道面的交线;
 - 4) Y 轴与 Z、X 轴构成右手直角坐标系;
 - 5) 长度单位是国际单位制(SI)米。
- b) 参考椭球定义:BDCS 参考椭球的几何中心与地球质心重合,参考椭球的旋转轴与 Z 轴重合。BDCS 参考椭球定义的基本常数见表 1。

表 1 BDCS 参考椭球的基本常数

序号	参数	定义
1	长半轴	$a = 6\,378\,137.0\text{ m}$
2	地心引力常数(包含大气层)	$\mu = 3.986\,004\,418 \times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$
3	扁率	$f = 1/298.257\,222\,101$
4	地球自转角速度	$\dot{\Omega}_e = 7.292\,115\,0 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$

4.3 时间系统

北斗系统的时间基准为北斗时(BDT)。BDT 采用国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计,不闰秒,起始历元为 2006 年 1 月 1 日协调世界时(UTC)00 时 00 分 00 秒。BDT 通过 UTC(NTSC)与国际 UTC 建立联系,BDT 与国际 UTC 的偏差保持在 50 ns 以内(模 1 s)。BDT 与 UTC 之间的闰秒信息在导航电文中播报。



5 信号特性

5.1 信号结构

提供定位导航授时服务的 B2b 信号 I 支路的载波频率、调制方式及符号速率见表 2。

表 2 B2b 信号 I 支路信号结构

信号	载波频率/MHz	调制方式	符号速率/S/s
B2b 信号 I 支路	1 207.14	BPSK(10)	1 000

5.2 信号调制

B2b 信号 I 支路分量 $s_{B2b,I}(t)$ 由导航电文数据 $D_{B2b,I}(t)$ 和测距码 $C_{B2b,I}(t)$ 调制产生, $s_{B2b,I}(t)$ 的数学表达式见公式(1)。

$$s_{B2b,I}(t) = D_{B2b,I}(t) \cdot C_{B2b,I}(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

t ——以北斗时为基准的时间;

$s_{B2b,I}(t)$ ——B2b 信号 I 支路分量;

$D_{B2b,I}(t)$ ——B2b 信号 I 支路的导航电文数据码, 数学表达式见公式(2);

$C_{B2b,I}(t)$ ——B2b 信号 I 支路的导航电文测距码, 数学表达式见公式(3)。

$$D_{B2b,I}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{B2b,I}[k] p_{B2b,I}(t - kT_{B2b,I}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

k ——以数据码码元为单位的序号;

$d_{B2b,I}$ ——B2b 信号 I 支路的导航电文数据码;

$p_{B2b,I}(t)$ ——宽度为 $T_{B2b,I}$ 的矩形脉冲;

$T_{B2b,I}$ ——相应的数据码片宽度。

$$C_{B2b,I}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{N_{B2b,I}-1} c_{B2b,I}[m] p_{T_{c,B2b,I}}[t - (N_{B2b,I}n + m)T_{c,B2b,I}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

n ——以码序列周期为单位的序号;

m ——以测距码码元为单位的序号;

$c_{B2b,I}$ ——I 支路分量的测距码序列, 取值为 ± 1 ;

$N_{B2b,I}$ ——对应分量的测距码码长, 取值为 10 230;

$T_{c,B2b,I}$ ——B2b 信号 I 支路的测距码码片宽度, 取值为 $1/R_{c,B2b,I}$;

$R_{c,B2b,I}$ ——B2b 信号 I 支路的测距码速率, 取值为 10.23 Mb/s;

$p_{T_{c,B2b,I}}(t)$ ——宽度为 $T_{c,B2b,I}$ 的矩形脉冲。

5.3 逻辑电平

调制信号的逻辑电平与信号电平之间的对应关系见表 3。

表 3 逻辑电平与信号电平之间的映射关系

逻辑电平	信号电平
1	−1.0
0	+1.0

5.4 极化方式

卫星发射信号为右旋圆极化(RHCP)。

5.5 载波相位噪声

未调制载波的相位噪声谱密度应满足单边噪声带宽为 10 Hz 的三阶锁相环的载波跟踪精度达到 0.1 rad(RMSE)。

5.6 杂散

卫星发射的杂散信号不超过−50 dBc。

5.7 相关损耗

由星上载荷失真导致的相关损耗不超过 0.6 dB。

5.8 数据/码一致性

每个数据符号的边沿与码片的边沿对齐,周期性的测距码第一个码片的起始时刻与数据符号位起始时刻对齐。

5.9 信号一致性

任意信号分量间伪码相位互差不超过 10 ns。

5.10 地面接收功率电平

当卫星仰角大于 5°,在地球表面附近的接收机右旋圆极化天线为 0 dBi 增益(或线性极化天线为 3 dBi 增益)时,卫星发射的导航信号到达接收机天线输出端的最小功率电平见表 4。

表 4 地面接收的最小功率电平

信号	卫星类型	最小接收功率/dBW
B2b 信号 I 支路	MEO 卫星	−160
	IGSO 卫星	−162

B2b 信号 I 支路具有以下特性:波束轴向相对于地球边缘滚降不超过 2 dB。

6 测距码特性

B2b 信号 I 支路测距码速率为 10.23 Mc/s,码长为 10230,由两个 13 级线性反馈移位寄存器 $[g_1(x)、g_2(x)]$ 通过移位及模二和生成的 Gold 码扩展得到。B2b 信号 I 支路码生成多项式见公式(4)。

$$\begin{cases} g_1(x)=1+x+x^9+x^{10}+x^{13} \\ g_2(x)=1+x^3+x^4+x^6+x^9+x^{12}+x^{13} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

具体实现见图 1。

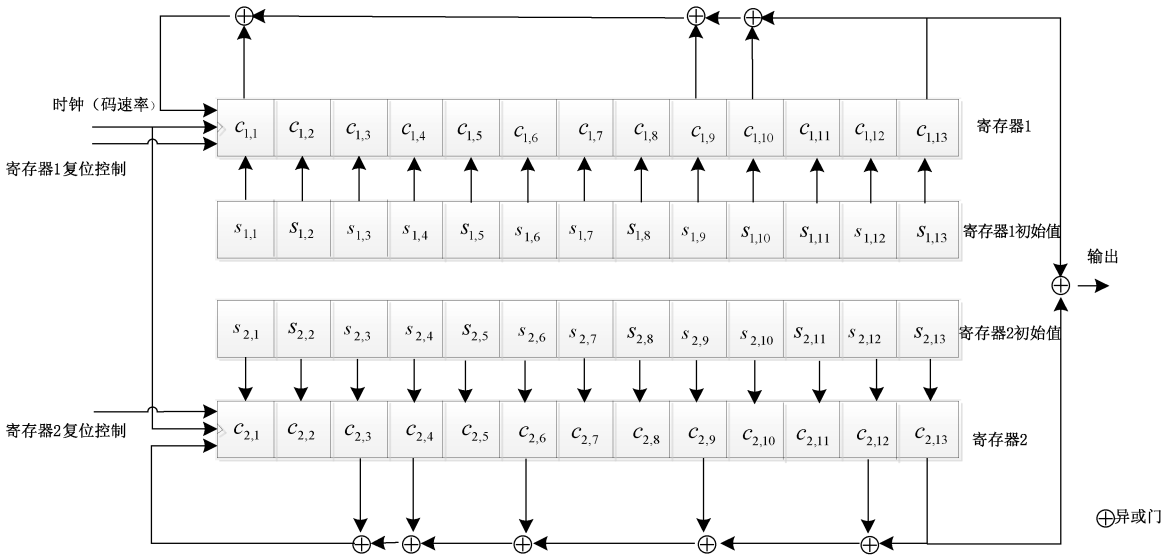


图 1 B2b 信号 I 支路测距码发生器

其中,寄存器 1 的初始值均为全 1,寄存器 2 的初始值在表 5 中给出,排列方式为 $[s_{2,1},s_{2,2},s_{2,3},\cdots,s_{2,13}]$ 。在测距码周期起始时刻,寄存器 1 和寄存器 2 同步复位;测距码周期中,第 8190 码片的结束时刻,寄存器 1 需复位。重复以上过程,得到长度为 10230 的测距码。

B2b 信号 I 支路共有 53 个测距码,具体参数见表 5。其中,头 24 个码片和末尾 24 个码片用八进制表示,高位先传。

表 5 B2b 信号 I 支路测距码参数

PRN 号	寄存器 2 初始值 (二进制)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片(八进制)
6	1 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0	42471422	44530033
7	1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0	42071026	63454537
8	1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1	10070621	52114120
9	1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1	32631660	15654621
10	1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0	51031210	12615765
11	1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1	24752203	23740542
12	1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0	67353533	07467654
13	1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1	25353617	52575257

表 5 B2b 信号 I 支路测距码参数 (续)

PRN 号	寄存器 2 初始值 (二进制)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片(八进制)
14	1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1	11351722	55226274
15	1 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0	61351343	01160270
16	1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1	16550441	50756326
17	1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1	04153547	27542214
18	1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1	37651752	10640254
19	1 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0	40652553	14350465
20	1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1	12451253	57452211
21	1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1	34450664	00071604
22	1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1	15313657	10263607
23	1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0	56312563	13020015
24	1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 0	71510447	47474176
25	1 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0	44513562	16076344
26	1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0	54112445	55540654
27	1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1	00111432	62507667
28	1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0	55610115	63416213
29	1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0	60613030	32014021
30	1 0 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 1	36410161	43533653
31	1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0	73013021	61313161
32	1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 0	65010372	03246551
33	1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1	12013173	07756360
34	1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1	14011703	01251744
35	1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1	35360744	27367153
36	1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0	65561461	77223601
37	1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1	04561533	11666400
38	1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1	35661303	35322566
39	1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1	31661552	07107560
40	1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1	12463623	46612101
41	1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1	34462214	11231514
42	1 1 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0	55062742	50710211
43	1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1	25323543	34555532
44	1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 0	64320656	03034702
45	1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1	13121550	75766350
46	1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1	05221747	50550432

表 5 B2b 信号 I 支路测距码参数 (续)

PRN 号	寄存器 2 初始值 (二进制)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片(八进制)
47	1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0	64741521	45030464
48	1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1	17540076	01547030
49	1 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1	13540627	33762036
50	1 1 1 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1	16541066	57616221
51	1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0	72540775	55327237
52	1 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 1	10640752	16072557
53	1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1	05442537	64716537
54	1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0	73301542	21130334
55	1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0	65500312	16343063
56	1 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1	31503365	21304050
57	1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0	51102623	36574544
58	1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0	70100474	31701764

7 导航电文结构

7.1 导航电文概述

7.1.1 导航电文类型

B2b 信号 I 支路采用 B-CNAV3 电文格式见 7.2。

7.1.2 校验码

B-CNAV3 导航电文采用了循环冗余校验(CRC),具体实现方式为 CRC-24Q,其生成多项式见公式(5)。

$$g(x)=\sum_{i=0}^{24}g_ix^i \dots\dots\dots(5)$$

式中：
$$g_i=\begin{cases} 1, & i=0,1,3,4,5,6,7,10,11,14,17,18,23,24; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

 $g(x)$ 见公式(6)。

$$g(x)=(1+x)p(x) \dots\dots\dots(6)$$

式中：
 $p(x)=x^{23}+x^{17}+x^{13}+x^{12}+x^{11}+x^9+x^8+x^7+x^5+x^3+1。$

长度为 k 的信息序列 $m_i(i=1\sim k)$ 可表示为公式(7)多项式：

$$m(x)=m_k+m_{k-1}x+m_{k-2}x^2+\cdots+m_1x^{k-1}\dots\dots\dots(7)$$

多项式 $m(x)x^{24}$ 除以生成多项式 $g(x)$,得到余式见公式(8)：

$$R(x) = p_{24} + p_{23}x + p_{22}x^2 + \cdots + p_1x^{23} \quad \cdots \cdots (8)$$

式中：

p_1, p_2, \cdots, p_{24} 依次输出构成 CRC 校验序列。实现过程中,寄存器初始值设为全 0。

7.2 B-CNAV3 导航电文

7.2.1 基本描述

B-CNAV3 导航电文包括基本导航信息和基本完好性信息。每帧电文长度为 1 000 符号位,符号速率为 1 000 S/s,播发周期为 1 s。基本的帧结构定义如图 2 所示。

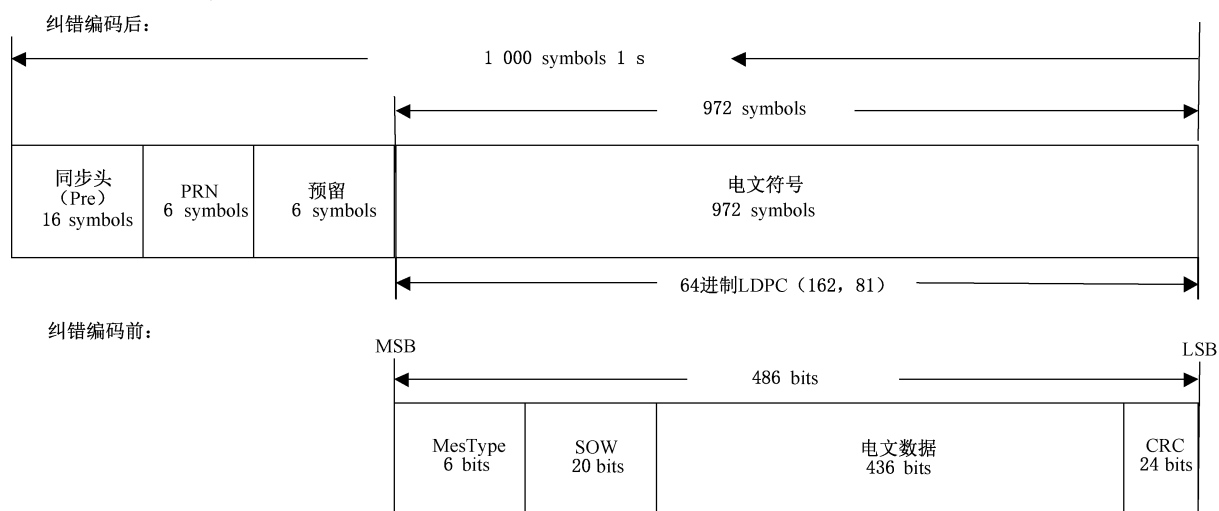


图 2 B-CNAV3 帧结构

每帧电文的前 16 符号位为帧同步头(Pre),其值为 0xEB90,即 1110 1011 1001 0000,采用高位先发。PRN 号为 6 bits,无符号整型。

每帧电文在纠错编码前的长度为 486 bits,包括信息类型(6 bits)、周内秒计数(20 bits)、电文数据(436 bits)、循环冗余校验位(24 bits)。信息类型、周内秒计数、电文数据均参与循环冗余校验计算。采用 64 进制 LDPC(162,81)编码后,长度为 972 符号位。

7.2.2 编码方案和编码参数



B-CNAV3 导航电文采用 64 进制 LDPC(162,81)编码,其每个码字符号由 6 bits 构成,定义于本原多项式为 $p(x) = 1 + x + x^6$ 的有限域 $GF(2^6)$ 。多进制符号与二进制比特的映射采用向量表示法,且高位在前。信息长度 $k=81$ 码字符号,即 486 bits。其校验矩阵是一个 81×162 稀疏矩阵 $H_{81,162}$,定义于本原多项式为 $p(x) = 1 + x + x^6$ 的有限域 $GF(2^6)$,前 81×81 部分对应信息符号,后 81×81 部分对应校验符号,其非零元素的位置定义如下：

$$H_{81,162,\text{index}}=[$$

19	67	109	130	27	71	85	161	31	78	96	122	2	44	83	125
26	71	104	132	30	39	93	154	4	46	85	127	21	62	111	127
13	42	101	146	18	66	108	129	27	72	100	153	29	70	84	160
23	61	113	126	8	50	89	131	34	74	111	157	12	44	100	145
22	60	112	128	0	49	115	151	6	47	106	144	33	53	82	140
3	45	84	126	38	80	109	147	9	60	96	141	1	43	82	124
20	77	88	158	37	54	122	159	3	65	104	149	5	47	86	128
0	42	81	123	32	79	97	120	35	72	112	158	15	57	93	138
22	75	107	143	24	69	102	133	1	50	116	152	24	57	119	135
17	59	95	140	7	45	107	145	34	51	83	138	14	43	99	144
21	77	106	142	16	58	94	139	20	68	110	131	2	48	114	150
10	52	91	133	25	70	103	134	32	41	95	153	14	56	91	137
33	73	113	156	28	73	101	154	4	63	102	147	6	48	87	129
8	46	105	146	30	80	98	121	41	68	119	150	35	52	81	139
16	63	114	124	13	55	90	136	31	40	94	155	10	61	97	142
36	56	121	161	29	74	99	155	5	64	103	148	18	75	89	156
36	78	110	148	19	76	87	157	15	65	116	123	11	53	92	134
25	58	117	136	39	66	117	151	11	62	98	143	9	51	90	132
38	55	120	160	7	49	88	130	17	64	115	125				
28	69	86	159	23	76	105	141	12	54	92	135				
40	67	118	152	37	79	108	149	26	59	118	137				

],

其中的每个元素为有限域 $GF(2^6)$ 的多进制符号,其元素按向量表示法表示,如下矩阵所示:

$H_{81,162,element}=[$

46	45	44	15	15	24	50	37	24	50	37	15	15	32	18	61
58	56	60	62	37	53	61	29	46	58	18	6	36	19	3	57
54	7	38	23	51	59	63	47	9	3	43	29	56	8	46	13
26	22	14	2	63	26	41	12	17	32	58	37	38	23	55	22
35	1	31	44	44	51	35	13	30	1	44	7	27	5	2	62
16	63	20	9	27	56	8	43	1	44	30	24	5	26	27	37
42	47	37	32	38	12	25	51	43	34	48	57	39	9	30	48
63	13	54	10	2	46	56	35	47	20	33	26	62	54	56	60
1	21	25	7	43	58	19	49	28	4	52	44	46	44	14	15
41	48	2	27	49	21	7	35	40	21	44	17	24	23	45	11
46	25	22	48	13	29	53	61	52	17	24	61	29	41	10	16
60	24	4	50	32	49	58	19	43	34	48	57	29	7	10	16
25	11	7	1	32	49	58	19	42	14	24	33	39	56	30	48
13	27	56	8	53	40	61	18	8	43	27	56	18	40	32	61
60	48	2	27	50	54	60	62	58	19	32	49	9	3	63	43
53	35	16	13	23	25	30	16	18	6	61	21	15	1	42	45
20	16	63	9	27	37	5	26	29	7	10	16	11	60	6	49
43	47	18	20	42	14	24	33	43	22	41	20	22	15	12	33
9	41	57	58	5	31	51	30	9	3	63	43				
37	53	61	29	6	45	56	19	33	45	36	34				
19	24	42	14	1	45	15	6	8	43	27	56				

$]$ 。

以上矩阵自上而下按栏读取,一栏读完后自左向右换下一栏继续读取。一栏中,每行的 4 个数字对应矩阵中一行 4 个非零元素。 $H_{81,162}$ 的读取规则如图 3 所示。



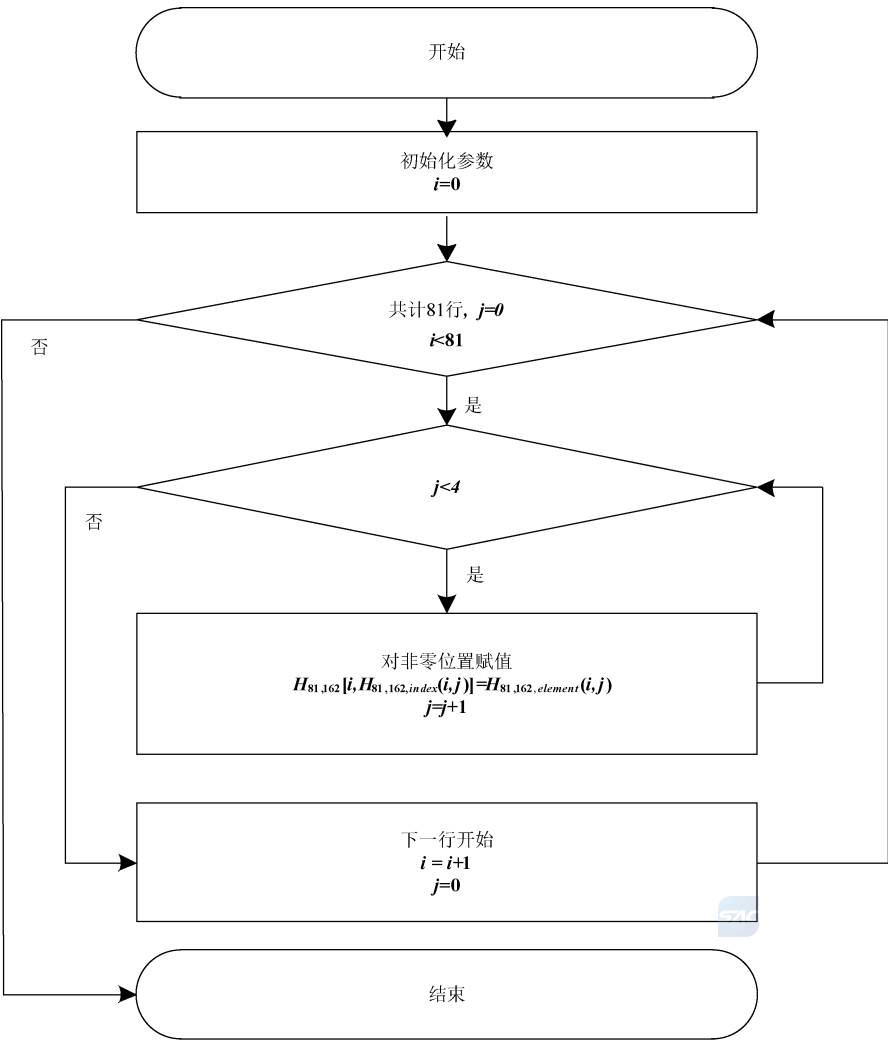


图 3 $H_{81,162}$ 读取流程图

编译码方法及示例参见附录 A。

7.2.3 编排格式

B-CNAV3 导航电文当前定义了 3 个有效信息类型,分别为信息类型 10、30、40,其编排格式见图 4~图 6。

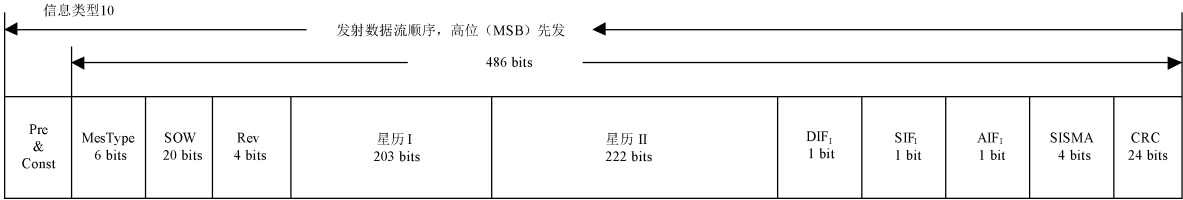


图 4 B-CNAV3 信息类型 10 编排格式

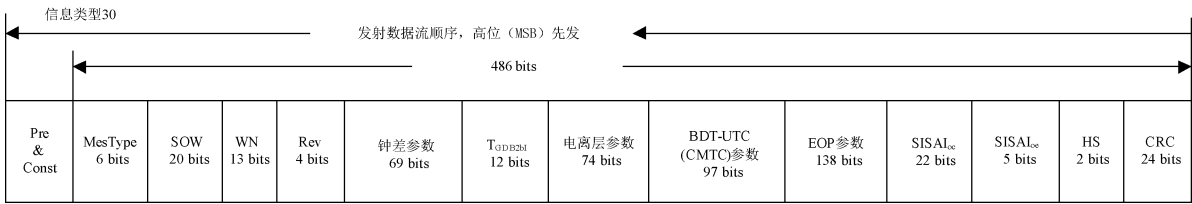


图 5 B-CNAV3 信息类型 30 编排格式

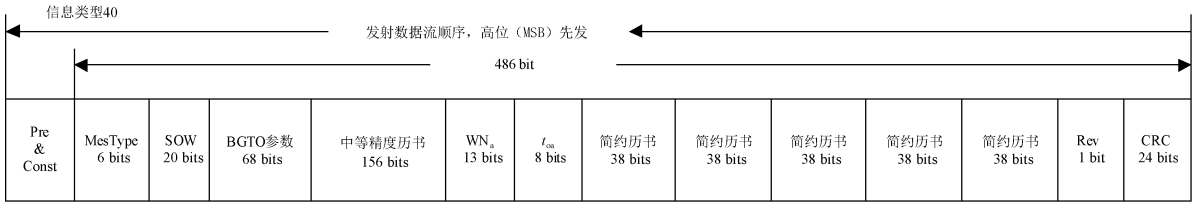


图 6 B-CNAV3 信息类型 40 编排格式

其中,“星历 I”“星历 II”“钟差参数”“SISAIoc”“电离层延迟改正模型参数”“BDT-UTC 时间同步参数”“简约历书”“EOP 参数”“BGTO 参数”“中等精度历书”均为一组参数构成的数据块,且“星历 I”与“星历 II”构成一组完整的星历参数。各数据块的详细编排格式见图 7~图 16。

MSB					LSB				
t_{oc}	SatType	ΔA	\dot{A}	Δn_0	$\Delta \dot{n}_0$	M_0	e	ω	
11 bits	2 bits	26 bits	25 bits	17 bits	23 bits	33 bits	33 bits	33 bits	

图 7 星历 I (共 203 bits)

MSB					LSB				
Ω_0	i_0	$\dot{\Omega}$	\dot{i}_0	C_{is}	C_{ic}	C_{rs}	C_{rc}	C_{us}	C_{uc}
33 bits	33 bits	19 bits	15 bits	16 bits	16 bits	24 bits	24 bits	21 bits	21 bits

图 8 星历 II (共 222 bits)

MSB		LSB	
t_{oc}	a_0	a_1	a_2
11 bits	25 bits	22 bits	11 bits

图 9 钟差参数 (共 69 bits)

MSB		LSB	
t_{op}	SISAI _{ocb}	SISAI _{oc1}	SISAI _{oc2}
11 bits	5 bits	3 bits	3 bits

图 10 ISAIoc (共 22 bits)

MSB					LSB			
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
10 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits

图 11 电离层延迟改正模型参数 (共 74 bits)

MSB					LSB			
A_{0UTC}	A_{1UTC}	A_{2UTC}	Δt_{LS}	t_{ot}	WN_{ot}	WN_{LSF}	DN	Δt_{LSF}
16 bits	13 bits	7 bits	8 bits	16 bits	13 bits	13 bits	3 bits	8 bits

图 12 BDT-UTC 时间同步参数(共 97 bits)

MSB			LSB		
PRN _a	SatType	δ_A	Ω_0	Φ_0	Health
6 bits	2 bits	8 bits	7 bits	7 bits	8 bits

图 13 简约历书(共 38 bits)

MSB					LSB	
t_{EOP}	PM_X	\dot{PM}_X	PM_Y	\dot{PM}_Y	$\Delta UT1$	$\dot{\Delta UT1}$
16 bits	21 bits	15 bits	21 bits	15 bits	31 bits	19 bits

图 14 EOP 参数(共 138 bits)

MSB			LSB		
GNSS ID	WN_{0BGTO}	t_{0BGTO}	A_{0BGTO}	A_{1BGTO}	A_{2BGTO}
3 bits	13 bits	16 bits	16 bits	13 bits	7 bits

图 15 BGTO 参数(共 68 bits)

MSB												LSB	
PRN _a	SatType	WN _a	t_{ca}	e	δ_i	\sqrt{A}	Ω_0	$\dot{\Omega}$	ω	M_0	a_{f0}	a_{f1}	Health
6 bits	2 bits	13 bits	8 bits	11 bits	11 bits	17 bits	16 bits	11 bits	16 bits	16 bits	11 bits	10 bits	8 bits

图 16 中等精度历书(共 156 bits)

B-CNAV3 导航电文中各参数说明见表 6 中的标示。

表 6 B-CNAV3 导航电文各参数说明

序号	电文参数	参数定义及描述
1	CRC	见 7.1.2
2	PRN	见 8.1
3	MesType	见 8.2
4	SOW	见 8.3
5	WN	见 8.3
6	钟差参数	见 8.4
7	T_{GDB2b1}	见 8.5
8	星历参数(星历 I、星历 II)	见 8.6
9	电离层延迟改正模型参数	见 8.7
10	中等精度历书	见 8.8

表 6 B-CNAV3 导航电文各参数说明 (续)

序号	电文参数	参数定义及描述
11	WN_a	见 8.9
12	t_{0a}	见 8.9
13	简约历书	见 8.9
14	EOP 参数	见 8.10
15	BDT-UTC 时间同步参数	见 8.11
16	BGTO 参数	见 8.12
17	HS	见 8.13
18	DIF_1	见 8.14
19	SIF_1	见 8.14
20	AIF_1	见 8.14
21	$SISAI_{oc}$	见 8.15
22	$SISAI_{oc}$	见 8.15
23	SISMA	见 8.16

8 导航电文参数和算法


8.1 测距码编号

导航电文中播发的测距码 PRN 号为 6 bits,无符号整型。

8.2 信息类型

信息类型(MesType)用于标识 B-CNAV3 每帧电文的类型,共 6 bits,无符号整型。其定义见表 7。

表 7 信息类型定义

MesType(二进制)	信息类型
 000000	无效
001010	信息类型 10
011110	信息类型 30
101000	信息类型 40
其他	预留

8.3 系统时间参数

B-CNAV3 导航电文播发的系统时间参数包括周内秒计数(SOW)和整周计数(WN),各参数定义及特性说明见表 8。

表 8 系统时间参数定义及说明

参数	定义	比特数	比例因子	有效范围	单位
SOW	周内秒计数	20	1	0~604 799	s
WN	整周计数	13	1	0~8 191	周

周内秒计数(SOW)在 B-CNAV3 所有信息类型中播发。SOW 对应的秒时刻表示本帧同步头第一个脉冲上升沿所对应的秒时刻。SOW 在北斗时每周日 00 时 00 分 00 秒从零开始计数,在每周的结束时刻被重置为零。

整周计数(WN)为北斗时的整周计数,在 B-CNAV3 信息类型 30 中播发,共 13 bits。WN 以北斗时的起始历元(2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒 UTC)为起点,从零开始计数。

8.4 钟差参数

8.4.1 参数说明

一组钟差参数包括 t_{oc} 、 α_0 、 α_1 、 α_2 ,钟差参数定义及特性说明见表 9。

表 9 钟差参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	t_{oc}	钟差参数参考时刻	11	300	0~604 500	s
2	α_0	卫星钟偏差系数	25 ^a	2^{-34}	—	s
3	α_1	卫星钟漂移系数	22 ^a	2^{-50}	—	s/s
4	α_2	卫星钟漂移率系数	11 ^a	2^{-66}	—	s/s ²
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。						
^b 除非在“有效范围”栏中有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。						

8.4.2 用户算法

接收机用户可通过下式计算出信号发射时刻的 BDT 时间:

$$t_1 = t_{sv} - \Delta t_{sv1} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- t_1 ——由钟差参数计算的信号发射时刻的 BDT 时间,单位为秒(s);
- t_{sv} ——信号发射时刻的卫星测距码相位时间,单位为秒(s);
- Δt_{sv1} ——由钟差参数计算的卫星测距码相位时间偏移,单位为秒(s),由公式(10)计算:

$$\Delta t_{sv1} = \alpha_0 + \alpha_1(t_1 - t_{oc}) + \alpha_2(t_1 - t_{oc})^2 + \Delta t_r \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- t_1 ——由钟差参数计算的信号发射时刻的 BDT 时间,可用 t_{sv} 替代;

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin E_k \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- F ——常数,取值为 $-2\mu^{1/2}/c^2$;
- μ ——地心引力常数,取值为 $3.986\ 004\ 418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$;
- c ——光速,取值为 $2.997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$;

- e ——卫星轨道偏心率,由本卫星星历参数得到;
- \sqrt{A} ——卫星轨道长半轴的开方,由本卫星星历参数计算得到;
- E_k ——卫星轨道偏近点角,由本卫星星历参数计算得到。

8.5 群延迟修正参数

8.5.1 参数说明

星上设备群延迟是指卫星信号从星载频率源到卫星发射天线相位中心的传输时延。星上设备群延迟对码相位测量的影响可通过钟差参数 α_0 和群延迟修正参数共同补偿。导航电文播发的 α_0 包含了 B3I 信号的星上设备群延迟,见表 10。

注: 星上设备群延迟 (T_{GDB2bI}) 在 B-CNAV3 电文中播发,以 B3I 信号为基准,用于补偿 B2b 信号 I 支路的时延差。

表 10 群延迟参数定义及说明

参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
T_{GDB2bI}	B2b 信号 I 支路时延差	12 ^a	2^{-34}	—	s
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。					
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。					

8.5.2 用户算法

用户算法包括如下内容:

对于使用 B2b 信号 I 支路的单频接收机用户,码相位修正量计算方法见公式(12)。

$$(\Delta t_{\text{SV1}})_{\text{B2bI}} = \Delta t_{\text{SV1}} - T_{\text{GDB2bI}} \dots\dots\dots (12)$$

8.6 星历参数

8.6.1 参数说明

卫星的星历由 18 个准开普勒轨道参数和 1 个卫星轨道类型参数构成,星历参数定义见表 11。



表 11 星历参数定义

序号	参数	定义
1	t_{oe}	星历参考时刻
2	SatType	卫星轨道类型
3	ΔA	参考时刻长半轴相对于参考值的偏差
4	\dot{A}	长半轴变化率
5	Δn_0	参考时刻卫星平均角速度与计算值之差
6	$\Delta \dot{n}_0$	参考时刻卫星平均角速度与计算值之差的变化率
7	M_0	参考时刻的平近点角
8	e	偏心率
9	ω	近地点幅角
10	Ω_0	周历元零时刻计算的升交点经度
11	i_0	参考时刻的轨道倾角

表 11 星历参数定义 (续)

序号	参数	定义
12	$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率
13	\dot{i}_0	轨道倾角变化率
14	C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项的振幅
15	C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项的振幅
16	C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项的振幅
17	C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项的振幅
18	C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项的振幅
19	C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项的振幅

星历参数的特性说明见表 12。

表 12 星历参数说明

序号	参数	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	t_{oe}	11	300	0 ~604 500	s
2	SatType ^d	2	—	—	—
3	ΔA^c	26 ^a	2^{-9}	—	m
4	\dot{A}	25 ^a	2^{-21}	—	m/s
5	Δn_0	17 ^a	2^{-44}	—	π/s
6	$\Delta \dot{n}_0$	23 ^a	2^{-57}	—	π/s^2
7	M_0	33 ^a	2^{-32}	—	π
8	e	33 ^a	2^{-34}	—	无量纲
9	ω	33 ^a	2^{-32}	—	π
10	Ω_0	33 ^a	2^{-32}	—	π
11	i_0	33 ^a	2^{-32}	—	π
12	$\dot{\Omega}$	19 ^a	2^{-44}	—	π/s
13	\dot{i}_0	15 ^a	2^{-44}	—	π/s
14	C_{is}	16 ^a	2^{-30}	—	rad
15	C_{ic}	16 ^a	2^{-30}	—	rad
16	C_{rs}	24 ^a	2^{-8}	—	m
17	C_{rc}	24 ^a	2^{-8}	—	m
18	C_{us}	21 ^a	2^{-30}	—	rad
19	C_{uc}	21 ^a	2^{-30}	—	rad

^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。
^c 长半轴参考值 $A_{ref} = 279\,061\,00\text{ m}$ (MEO), $A_{ref} = 421\,622\,00\text{ m}$ (IGSO/GEO)。
^d SatType 含义(2 进制数):01 代表 GEO 卫星,10 代表 IGSO 卫星,11 代表 MEO 卫星,00 为预留。

8.6.2 用户算法

用户接收机根据接收到的星历参数,可计算相应卫星(实际是卫星天线相位中心)在北斗坐标系中的坐标,相应的算法如表 13。

表 13 星历用户算法

公式	说明
$\mu = 3.986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$	BDCS 坐标系下的地心引力常数
$\dot{\Omega}_e = 7.292\,115\,0 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	BDCS 坐标系下的地球自转角速度
$\pi = 3.141\,592\,653\,589\,8$	圆周率
$t_k = t_1 - t_{\text{oe}}^a$	计算与参考时刻的时间差
$A_0 = A_{\text{ref}} + \Delta A^b$	计算参考时刻的长半轴
$A_k = A_0 + (\dot{A})t_k$	计算长半轴
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A_0^3}}$	计算参考时刻的卫星平均角速度
$\Delta n_A = \Delta n_0 + 1/2 \Delta \dot{n}_0 t_k$	计算卫星平均角速度的偏差
$n_A = n_0 + \Delta n_A$	计算改正后的卫星平均角速度
$M_k = M_0 + n_A t_k$	计算平近点角
$M_k = E_k - e \sin E_k$	迭代计算偏近点角
$\begin{cases} \sin \nu_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k}{1-e \cos E_k} \\ \cos \nu_k = \frac{\cos E_k - e}{1-e \cos E_k} \end{cases}$	计算真近点角
$\phi_k = \nu_k + \omega$	计算纬度幅角
$\begin{cases} \delta u_k = C_{\text{us}} \sin(2\phi_k) + C_{\text{uc}} \cos(2\phi_k) \\ \delta r_k = C_{\text{rs}} \sin(2\phi_k) + C_{\text{rc}} \cos(2\phi_k) \\ \delta i_k = C_{\text{is}} \sin(2\phi_k) + C_{\text{ic}} \cos(2\phi_k) \end{cases}$	计算纬度幅角改正项 计算径向距离改正项 计算轨道倾角改正项
$u_k = \phi_k + \delta u_k$	计算改正后的纬度幅角
$r_k = A_k(1 - e \cos E_k) + \delta r_k$	计算改正后的径向距离
$i_k = i_0 + \dot{i}_0 \cdot t_k + \delta i_k$	计算改正后的轨道倾角
$\begin{cases} x_k = r_k \cos u_k \\ y_k = r_k \sin u_k \end{cases}$	计算卫星在轨道平面内的坐标
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t_k - \dot{\Omega}_e t_{\text{oe}}$	计算改正后的 MEO/IGSO 卫星升交点经度
$\begin{cases} X_k = x_k \cos \Omega_k - y_k \sin \Omega_k \\ Y_k = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos \Omega_k \\ Z_k = y_k \sin i_k \end{cases}$	计算 MEO/IGSO 卫星在 BDCS 坐标系中的坐标
^a 表达式中, t_1 是由钟差参数计算的信号发射时刻的 BDT 时间,即修正信号传播时延后的系统时间。 t_k 是 t_1 和星历参考时刻 t_{oe} 之间的总时间差,并考虑了跨过一周开始或结束的时间,即:如果 $t_k > 302\,400$,就从 t_k 中减去 $604\,800$;如果 $t_k < -302\,400$ 时,就对 t_k 加上 $604\,800$ 。	
^b 长半轴参考值 $A_{\text{ref}} = 27\,906\,100 \text{ m}$ (MEO), $A_{\text{ref}} = 42\,162\,200 \text{ m}$ (IGSO/GEO)。	

8.7 电离层延迟改正模型参数

8.7.1 参数说明


北斗全球电离层延迟修正模型(BDGIM)包含 9 个参数,用于单频用户接收机修正信号传播过程中的电离层延迟效应,各参数特性说明见表 14。对于双频用户,可采用双频无电离层组合伪距算法来修正电离层延迟效应。

表 14 电离层延迟改正模型参数说明

参数	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
α_1	10	2^{-3}	—	TECu
α_2	8 ^a	2^{-3}	—	TECu
α_3	8	2^{-3}	—	TECu
α_4	8	2^{-3}	—	TECu
α_5	8	-2^{-3}	—	TECu
α_6	8 ^a	2^{-3}	—	TECu
α_7	8 ^a	2^{-3}	—	TECu
α_8	8 ^a	2^{-3}	—	TECu
α_9	8 ^a	2^{-3}	—	TECu
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。				
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。				

8.7.2 用户算法

北斗全球电离层延迟修正模型(BDGIM)以改进的球谐函数为基础,用户接收机根据 BDGIM 计算电离层延迟改正值见公式(13):


$$T_{\text{ion}} = M_F \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot \left[A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

T_{ion} —— 卫星与接收机视线方向电离层延迟改正值,单位为米(m);

M_F —— 投影函数,用于垂向和斜向电离层总电子含量(TEC)之间的转换,计算见公式(24);

f —— 当前信号对应的载波频率,单位为赫兹(Hz);

α_i —— 电离层延迟改正模型参数(见表 14),单位为 TECu, ($i = 1 \sim 9$);

A_i —— 根据式(18)计算得到的数值, ($i = 1 \sim 9$);

A_0 —— 根据式(21)计算得到的电离层延迟预报值,单位为 TECu。

用户接收机采用 BDGIM 计算卫星与接收机视线方向电离层延迟的具体步骤如下:

a) 电离层穿刺点位置的计算

以 Φ 表示用户和电离层穿刺点之间的地心张角,单位为弧度,其计算见公式(14):

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + H_{\text{ion}}} \cdot \cos E\right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

E ——卫星高度角,单位为弧度;

H_{ion} ——电离层薄层高度;

R_e ——地球平均半径。

电离层穿刺点在地球表面投影的地理纬度 φ_g 和地理经度 λ_g 的计算见公式(15):

$$\begin{cases} \varphi_g = \arcsin(\sin \varphi_u \cdot \cos \varphi + \cos \varphi_u \cdot \sin \varphi \cdot \cos A) \\ \lambda_g = \lambda_u + \arctan\left(\frac{\sin \varphi \cdot \sin A \cdot \cos \varphi_u}{\cos \varphi - \sin \varphi_u \cdot \sin \varphi_g}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

φ_u ——用户地理纬度,单位为弧度(rad);

λ_u ——用户地理经度,单位为弧度(rad);

A ——卫星方位角,单位均为弧度。

地固坐标系下,电离层穿刺点在地球表面投影的地磁纬度 φ_m 和地磁经度 λ_m 的计算见公式(16):

$$\begin{cases} \varphi_m = \arcsin[\sin \varphi_M \cdot \sin \varphi_g + \cos \varphi_M \cdot \cos \varphi_g \cdot \cos(\lambda_g - \lambda_M)] \\ \lambda_m = \arctan\left[\frac{\cos \varphi_g \cdot \sin(\lambda_g - \lambda_M) \cdot \cos \varphi_M}{\sin \varphi_M \cdot \sin \varphi_m - \sin \varphi_g}\right] \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

φ_M ——地磁北极的地理纬度,单位为弧度(rad);

λ_M ——地磁北极的地理经度,单位为弧度(rad)。

日固坐标系下,电离层穿刺点的地磁纬度 φ' 和地磁经度 λ' 的计算见公式(17):

$$\begin{cases} \varphi' = \varphi_m \\ \lambda' = \lambda_m - \arctan\left[\frac{\sin(S_{\text{lon}} - \lambda_M)}{\sin \varphi_M \cdot \cos(S_{\text{lon}} - \lambda_M)}\right] \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

S_{lon} ——平太阳地理经度,单位为弧度(rad);

计算公式为 $S_{\text{lon}} = \pi \cdot \{1 - 2 \cdot [t - \text{int}(t)]\}$ 。其中, t 表示计算时刻,以约化儒略日(MJD)表示,单位为天(d); $\text{int}(\bullet)$ 表示向下取整。

b) $A_i (i=1\sim 9)$ 的计算

A_i 的具体计算见公式(18):

$$A_i = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_i|, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_i \cdot \lambda'), m_i \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_i|, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_i \cdot \lambda'), m_i < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

式中, n_i 和 m_i 对应的取值见表 15。

表 15 n_i 和 m_i 对应取值

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_i/m_i	0/0	1/0	1/1	1/-1	2/0	2/1	2/-1	2/2	2/-2

φ' 与 λ' 根据式(16)计算得到; $\tilde{P}_{n,m}$ 表示 n 度 m 阶的归化勒让德函数, $\tilde{P}_{n,m} = N_{n,m} \cdot P_{n,m}$ ($\tilde{P}_{n,m}$ 计算时, n, m 均取绝对值); $N_{n,m}$ 为正则化函数, 其计算见公式(19):

$$\begin{cases} N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)! \cdot (2n+1) \cdot (2-\delta_{0,m})}{(n+m)!}} \\ \delta_{0,m} = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m>0 \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

$P_{n,m}$ 为标准的勒让德函数,其递推计算见公式(20):

$$\begin{cases} P_{n,n}(\sin \varphi') = (2n-1)!! \left[1 - (\sin \varphi')^2 \right]^{n/2}, & n=m \\ P_{n,m}(\sin \varphi') = \sin \varphi' \cdot (2m+1) \cdot P_{m,m}(\sin \varphi'), & n=m+1 \\ P_{n,m}(\sin \varphi') = \frac{(2n-1) \cdot \sin \varphi' \cdot P_{n-1,m}(\sin \varphi') - (n+m-1) \cdot P_{n-2,m}(\sin \varphi')}{n-m}, & \text{其他} \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$(2n-1)!! = (2n-1) \cdot (2n-3) \cdot \dots \cdot 1$, 且 $P_{0,0}(\sin \varphi') = 1$ 。

c) 电离层延迟预报值 A_0 的计算

A_0 的具体计算见公式(21):

$$\begin{cases} A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j \cdot B_j, \\ B_j = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_j \cdot \lambda') & m_j \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_j \cdot \lambda') & m_j < 0 \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

n_j 及 m_j 的具体取值参见表 16, $\tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi')$ 的计算见公式(19)和公式(20); β_j ($j=1 \sim 17$) 由公式(22)计算得到:

$$\begin{cases} \beta_j = a_{0,j} + \sum_{k=1}^{12} [a_{k,j} \cdot \cos(\omega_k \cdot t_p) + b_{k,j} \cdot \sin(\omega_k \cdot t_p)] \\ \omega_k = \frac{2\pi}{T_k} \end{cases} \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$a_{k,j}$ 与 $b_{k,j}$ ——表 16 中 BDGIM 模型的非发播系数,单位为 TECu;

T_k ——表 16 中各非发播系数对应的预报周期;

t_p ——对应当天约化儒略日的奇数整点时刻(01:00:00, 03:00:00, 05:00:00, ..., 23:00:00), 单位为天(d), 用户计算时选取距离当前计算时刻最近的 t_p 使用。

d) 穿刺点处垂直方向电离层延迟的计算

穿刺点处垂直方向电离层延迟 VTEC(单位为 TECu)的计算见公式(23):

$$\text{VTEC} = A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \dots\dots\dots (23)$$

e) 穿刺点电离层投影函数 M_F 的计算

电离层穿刺点处的投影函数 M_F 的计算见公式(24):

$$M_F = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{R_e}{R_e + H_{\text{ion}}} \cdot \cos(E) \right]^2}} \dots\dots\dots (24)$$

式中 R_e 、 H_{ion} 及 E 参数含义同公式(14)。

f) 计算信号传播路径上的电离层延迟改正值

结合穿刺点处的垂向电离层延迟及投影函数,按公式(13)即可计算得到信号传播路径上电离层延迟改正值。

上述计算中,相关参数取值建议如下:

电离层薄层高度: $H_{\text{ion}} = 400 \text{ km}$;

地球平均半径: $R_{\text{e}} = 6\,378 \text{ km}$;

地磁北极的地理经度: $\lambda_{\text{M}} = \frac{-72.58^{\circ}}{180^{\circ}} \cdot \pi \text{ rad}$;

地磁北极的地理纬度: $\varphi_{\text{M}} = \frac{80.27^{\circ}}{180^{\circ}} \cdot \pi \text{ rad}$ 。

表 16 BDGIM 模型的非发播系数及预报周期

编号 k	编号 j n_j/m_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	周期 T_k/d
		3/0	3/1	3/-1	3/2	3/-2	3/3	3/-3	4/0	4/1	4/-1	4/2	4/-2	5/0	5/1	5/-1	5/2	5/-2	
0	$a_{0,j}$	-0.61	-1.31	-2.00	-0.03	0.15	-0.48	-0.40	2.28	-0.16	-0.21	-0.10	-0.13	0.21	0.68	1.06	0	-0.12	—
	$a_{k,j}$	-0.51	-0.43	0.34	-0.01	0.17	0.02	-0.06	0.30	0.44	-0.28	-0.31	-0.17	0.04	0.39	-0.12	0.12	0	
	$b_{k,j}$	0.23	-0.20	-0.31	0.16	-0.03	0.02	0.04	0.18	0.34	0.45	0.19	-0.25	-0.12	0.18	0.40	-0.09	0.21	
1	$a_{k,j}$	-0.06	-0.05	0.06	0.17	0.15	0	0.11	-0.05	-0.16	0.02	0.11	0.04	0.12	0.07	0.02	-0.14	-0.14	0.5
	$b_{k,j}$	0.02	-0.08	-0.06	-0.11	0.15	-0.14	0.01	0.01	0.04	-0.14	-0.05	0.08	0.08	-0.01	0.01	0.11	-0.12	
2	$a_{k,j}$	0.01	-0.03	0.01	-0.01	0.05	-0.03	0.05	-0.03	-0.01	0	-0.08	-0.04	0	-0.02	-0.03	0	-0.03	0.33
	$b_{k,j}$	0	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01	-0.07	-0.03	-0.01	0.02	-0.01	0.03	-0.10	0.01	0.05	-0.01	0.04	0.00	
3	$a_{k,j}$	-0.01	0	0.01	0	0.01	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14.6
	$b_{k,j}$	0	-0.02	0.01	0	-0.01	0.01	0	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	$a_{k,j}$	0	0	0.03	0.01	0.02	0.01	0	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.0
	$b_{k,j}$	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	$a_{k,j}$	-0.19	-0.02	0.12	-0.10	0.06	0	-0.02	-0.08	-0.02	-0.07	0.01	0.03	0.15	0.06	-0.05	-0.03	-0.10	121.6
	$b_{k,j}$	-0.09	0.07	0.03	0.06	0.09	0.01	0.02	0	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	-0.10	0	-0.01	0.02	0.05	
6	$a_{k,j}$	-0.18	0.06	-0.55	-0.02	0.09	-0.08	0	0.86	-0.18	-0.05	-0.07	0.04	0.14	-0.03	0.37	-0.11	-0.12	182.51
	$b_{k,j}$	0.15	-0.31	0.13	0.05	-0.09	-0.03	0.06	-0.36	0.08	0.05	0.06	-0.02	-0.05	0.06	-0.20	0.04	0.07	
7	$a_{k,j}$	1.09	-0.14	-0.21	0.52	0.27	0	0.11	0.17	0.23	0.35	-0.05	0.02	-0.60	0.02	0.01	0.27	0.32	365.25
	$b_{k,j}$	0.50	-0.08	-0.38	0.36	0.14	0.04	0	0.25	0.17	0.27	-0.03	-0.03	-0.32	-0.10	0.20	0.10	0.30	
8	$a_{k,j}$	-0.34	-0.09	-1.22	0.05	0.15	-0.29	-0.17	1.58	-0.06	-0.15	0.00	0.13	0.28	-0.08	0.62	-0.01	-0.04	4 028.71
	$b_{k,j}$	0	-0.11	-0.22	0.01	0.02	-0.03	-0.01	0.49	-0.03	-0.02	0.01	0.02	0.04	-0.04	0.16	-0.02	-0.01	
9	$a_{k,j}$	-0.13	0.07	-0.37	0.05	0.06	-0.11	-0.07	0.46	0.00	-0.04	0.01	0.07	0.09	-0.05	0.15	-0.01	0.01	2 014.35
	$b_{k,j}$	0.05	0.03	0.07	0.02	-0.01	0.03	0.02	-0.04	-0.01	-0.01	0.02	0.03	0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0	
10	$a_{k,j}$	-0.06	0.13	-0.07	0.03	0.02	-0.05	-0.05	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 342.90
	$b_{k,j}$	0.03	-0.02	0.04	-0.01	-0.03	0.02	0.01	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	$a_{k,j}$	-0.03	0.08	-0.01	0.04	0.01	-0.02	-0.02	-0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 007.18
	$b_{k,j}$	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.01	0	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

8.8 中等精度历书

8.8.1 参数说明

中等精度历书包括 14 个参数,参数定义及特性说明见表 17。

表 17 中等精度历书参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	PRN _a	本组历书数据对应的卫星编号	6	1	1~63	—
2	SatType ^c	卫星轨道类型	2	—	—	—
3	WN _a	历书参考时刻周计数	13	1	—	周
4	t_{oa}	历书参考时刻	8	2^{12}	0~602 112	s
5	e	偏心率	11	2^{-16}	—	—
6	δ_i	参考时刻轨道倾角相对于参考值的偏差	11 ^a	2^{-14}	—	π
7	\sqrt{A}	长半轴的平方根	17	2^{-4}	—	m ^{1/2}
8	Ω_0	周历元零时刻计算的升交点经度	16 ^a	2^{-15}	—	π
9	$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率	11 ^a	2^{-33}	—	π/s
10	ω	近地点幅角	16 ^a	2^{-15}	—	π
11	M_0	参考时刻的平近点角	16 ^a	2^{-15}	—	π
12	a_{f0}	卫星钟偏差系数	11 ^a	2^{-20}	—	s
13	a_{f1}	卫星钟漂移系数	10 ^a	2^{-37}	—	s/s
14	Health	卫星健康信息	8	—	—	—
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。 ^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。 ^c SatType 含义(二进制数):01 代表 GEO 卫星,10 代表 IGSO 卫星,11 代表 MEO 卫星,00 为预留。						

Health 表示卫星健康信息,共 8 bits,具体含义见表 18。

表 18 卫星健康信息定义

信息位	数值	定义
第 8 位(MSB)	0	卫星钟健康
	1	^a
第 7 位	0	B1C 信号正常
	1	B1C 信号不正常 ^b
第 6 位	0	B2a 信号正常
	1	B2a 信号不正常 ^b

表 18 卫星健康信息定义 (续)

信息位	数值	定义
第 5 位	0	B2b_1 信号正常
	1	B2b_1 信号不正常 ^b
第 4 位~第 1 位	0	预留
	1	预留

^a 当第 8 位为 1, 后 7 位均为 0 时表示卫星钟不可用, 后 7 位均为 1 时表示卫星故障或永久关闭。
^b 信号不正常指信号功率比额定值低 10 dB 以上。

8.8.2 用户算法

接收机用户可通过公式(25)计算出信号发射时刻的 BDT 时间。

$$t_2 = t_{sv} - \Delta t_{sv2} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- t_2 ——由历书参数计算的信号发射时刻的 BDT 时间, 单位为秒(s);
- t_{sv} ——信号发射时刻的卫星测距码相位时间, 单位为秒(s);
- Δt_{sv2} ——由历书参数计算的卫星测距码相位时间偏移, 单位为秒(s), 由公式(26)计算:

$$\Delta t_{sv2} = a_{f0} + a_{f1}(t_2 - t_{oa}) \dots\dots\dots (26)$$

其中, 历书参考时刻 t_{oa} 是以历书周计数(WN_a)的起始时刻为基准的。

接收机用户利用历书参数计算卫星位置的用户算法见表 19。

表 19 中等精度历书参数的用户算法

公式	说明
$\mu = 3.986\ 004\ 418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$	BDCS 坐标系下的地心引力常数
$\dot{\Omega}_e = 7.292\ 115\ 0 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	BDCS 坐标系下的地球自转角速度
$\pi = 3.141\ 592\ 653\ 589\ 8$	圆周率
$A = (\sqrt{A})^2$	计算长半轴
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$	计算参考时刻的卫星平均角速度
$t_k = t_2 - t_{oa}^a$	计算与参考时刻的时间差
$M_k = M_0 + n_0 t_k$	计算平近点角
$M_k = E_k - e \sin E_k$	迭代计算偏近点角
$\begin{cases} \sin \nu_k = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E_k}{1 - e \cos E_k} \\ \cos \nu_k = \frac{\cos E_k - e}{1 - e \cos E_k} \end{cases}$	计算真近点角
$\phi_k = \nu_k + \omega$	计算纬度幅角
$r_k = A(1 - e \cos E_k)$	计算径向距离

表 19 中等精度历书参数的用户算法 (续)

公式	说明
$\begin{cases} x_k = r_k \cos \phi_k \\ y_k = r_k \sin \phi_k \end{cases}$	计算卫星在轨道平面内的坐标
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{0a}$	计算改正后的升交点经度
$i = i_0 + \delta_i^b$	计算参考时刻的轨道倾角
$\begin{cases} X_k = x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i \sin \Omega_k \\ Y_k = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i \cos \Omega_k \\ Z_k = y_k \sin i \end{cases}$	计算卫星在 BDCS 坐标系中的坐标
<p>^a 式中, t_2 是由历书参数计算的信号发射时刻的 BDT 时间, 即修正信号传播时延后的系统时间。 t_k 是 t_2 和历书参考时刻 t_{0a} 之间的总时间差, 并考虑了跨过一周开始或结束的时间, 即: 如果 $t_k > 302\,400$, 则 t_k 减去 $604\,800$; 如果 $t_k < -302\,400$, 则 t_k 加上 $604\,800$。</p> <p>^b 对于 MEO/IGSO 卫星, $i_0 = 0.30\pi$; 对于 GEO 卫星, $i_0 = 0.00$。</p>	

8.9 简约历书

8.9.1 参数说明

简约历书的参数定义及特性说明见表 20。

表 20 简约历书参数定义

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	PRN _a	本组历书数据对应的卫星编号	6	1	1~63	—
2	SatType ^e	卫星轨道类型	2	—	—	—
3	δ_A^c	参考时刻长半轴相对于参考值的偏差	8 ^a	2 ⁹	—	m
4	Ω_0	周历元零时刻计算的升交点经度	7 ^a	2 ⁻⁶	—	π
5	Φ_0^d	参考时刻纬度幅角	7 ^a	2 ⁻⁶	—	π
6	Health	卫星健康信息	8	—	—	—
<p>^a 为 2 进制补码, 最高有效位 (MSB) 是符号位 (+ 或 -)。</p> <p>^b 除非在“有效范围”栏中另有说明, 否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。</p> <p>^c δ_A 对应的参考值为 $A_{\text{ref}} = 27\,906\,100\text{ m}$ (MEO), $A_{\text{ref}} = 42\,162\,200\text{ m}$ (IGSO/GEO)。</p> <p>^d $\Phi_0 = M_0 + \omega$; 相关参考值: $e = 0$; $\delta_i = 0$, $i = 55^\circ$ (MEO/IGSO), $i = 0^\circ$ (GEO)。</p> <p>^e SatType 含义: 01 表 GEO 卫星, 10 代表 IGSO 卫星, 11 代表 MEO 卫星, 00 为预留。</p>						

8.9.2 用户算法

简约历书的用户算法与中等精度历书用户算法相同。对于中等精度历书用户算法中出现的参数, 但简约历书没有给出的参数值, 将相应参数初始值设为 0。

简约历书的历书参考时刻周计数 (WN_a) 和历书参考时刻 (t_{0a}) 的定义及特性说明见表 21。

表 21 历书参考时刻参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围	单位
1	WN_a	历书参考时刻周计数	13	1	0~8 191	周
2	t_{0a}	历书参考时刻	8	2^{12}	0~602 112	s

8.10 地球定向参数

8.10.1 参数说明

地球定向参数(EOP)的定义及特性说明见表 22。

表 22 地球定向参数定义及说明

参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
t_{EOP}	EOP数据参考时间	16	2^4	0~604 784	s
PM_X	参考时间 X轴极移	21 ^a	2^{-20}	—	弧秒
$\dot{PM_X}$	参考时间 X轴极移漂移率	15 ^a	2^{-21}	—	弧秒/d
PM_Y	参考时间 Y轴极移	21 ^a	2^{-20}	—	弧秒
$\dot{PM_Y}$	参考时间 Y轴极移漂移率	15 ^a	2^{-21}	—	弧秒/d
$\Delta UT1$	参考时间 UT1-UTC 的差值	31 ^a	2^{-24}	—	s
$\dot{\Delta UT1}$	参考时间 UT1-UTC 的差值变化率	19 ^a	2^{-25}	—	s/d
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。					
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。					

8.10.2 用户算法

用户使用星历参数计算得到的是卫星天线相位中心在北斗坐标系中的坐标,如果用户需要将其转换到相应的地心惯性坐标系(ECI)中的坐标,则需使用表 23 中提供的算法来获得坐标转换矩阵。完整坐标系转换算法遵循 IERS 规范。

表 23 地球定向参数用户算法

公式	说明
$UT1 - UTC = \Delta UT1 + \dot{\Delta UT1}(t - t_{EOP})$	计算 t 时刻的世界协调时之差
$x_p = PM_X + \dot{PM_X}(t - t_{EOP})$ $y_p = PM_Y + \dot{PM_Y}(t - t_{EOP})$	计算 t 时刻的 X轴和 Y轴极移

8.11 BDT-UTC 时间同步参数

8.11.1 参数说明

BDT-UTC 时间同步参数反映了北斗时(BDT)与协调世界时(UTC)之间的关系。BDT-UTC 时间同步参数的定义及特性说明见表 24。

表 24 BDT-UTC 时间同步参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	A_{0UTC}	BDT 时标相对于 UTC 时标的偏差系数	16 ^a	2^{-35}	—	s
2	A_{1UTC}	BDT 时标相对于 UTC 时标的漂移系数	13 ^a	2^{-51}	—	s/s
3	A_{2UTC}	BDT 时标相对于 UTC 时标的漂移率系数	7 ^a	2^{-68}	—	s/s ²
4	Δt_{LS}	新的闰秒生效前 BDT 相对于 UTC 的累积闰秒改正数	8 ^a	1	—	s
5	t_{ot}	参考时刻对应的周内秒	16	2^4	0~604 784	s
6	WN_{ot}	参考时间周计数	13	1	—	周
7	WN_{LSF}	闰秒参考时间周计数	13	1	—	周
8	DN	闰秒参考时间日计数	3	1	0~6	d
9	Δt_{LSF}	新的闰秒生效后 BDT 相对于 UTC 的累积闰秒改正数	8 ^a	1	—	s

^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。

8.11.2 用户算法

BDT 和 UTC 的时间偏差计算方法分为三种情况:

- a) 由闰秒参考周数 WN_{LSF} 与日计数 DN 确定的闰秒时刻还没有来临,并且用户当前时间与闰秒时刻之差大于 6 h,计算方法见公式(27)和公式(28)。

$$t_{UTC} = (t_E - \Delta t_{UTC}) \bmod 86\,400 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{UTC} = & \Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC}[t_E - t_{ot} + 604\,800(WN - WN_{ot})] + \dots\dots\dots (28) \\ & A_{2UTC}[t_E - t_{ot} + 604\,800(WN - WN_{ot})]^2 \end{aligned}$$

式中:

t_E ——用户估计的 BDT 时间,单位为秒(s)。

- b) 用户当前时间处于由闰秒参考周数 WN_{LSF} 与日计数 DN 确定的闰秒时刻的前 6 h 与闰秒后 6 h 之内,计算方法见公式(29)和公式(30)。

$$t_{UTC} = W \bmod (86\,400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$W = [(t_E - \Delta t_{UTC} - 43\,200) \bmod 86\,400] + 43\,200 \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中：

Δt_{UTC} ——UTC时间,单位为秒(s)。计算方法见公式(28)。

- c) 由闰秒参考周数 WN_{LSF} 与日计数 DN 确定的闰秒时刻已经过去,并且用户当前时间与闰秒时刻之差大于 6 h,计算方法见公式(31)和公式(32)。

$$t_{UTC} = (t_E - \Delta t_{UTC}) \bmod 86\,400 \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LSF} + A_{0UTC} + A_{1UTC}[t_E - t_{ot} + 604\,800(WN - WN_{ot})] + \dots\dots\dots (32)$$
$$A_{2UTC}[t_E - t_{ot} + 604\,800(WN - WN_{ot})]^2$$

8.12 BGTO 参数

8.12.1 参数说明

BGTO 参数用于计算 BDT 与其他 GNSS 系统时之间的时间偏差。BGTO 参数的定义及特性说明见表 25。

表 25 BDT-GNSS 时间同步参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	GNSS ID	GNSS 系统标识	3	—	—	无量纲
2	WN_{0BGTO}	参考时间周计数	13	1	—	周
3	t_{0BGTO}	参考时刻对应的周内时间	16	2^4	0~604 784	s
4	A_{0BGTO}	BDT 时标相对 GNSS 时标的偏差系数	16^a	2^{-35}	—	s
5	A_{1BGTO}	BDT 时标相对 GNSS 时标的漂移系数	13^a	2^{-51}	—	s/s
6	A_{2BGTO}	BDT 时标相对 GNSS 时标的漂移率系数	7^a	2^{-68}	—	s/s ²
^a 为 2 进制补码,最高有效位(MSB)是符号位(+或-)。						
^b 除非在“有效范围”栏中另有说明,否则参数的有效范围是所给定的位数与比例因子共同确定的最大范围。						

其他 GNSS 以 GNSS ID 区分,其含义为：

- a) 000 为无效,表示本组数据不可用；
- b) 001 表示 GPS 系统；
- c) 010 表示 Galileo 系统；
- d) 011 表示 GLONASS 系统；
- e) 100~111 为预留。

在一帧中播发的 WN_{0BGTO} 、 t_{0BGTO} 、 A_{0BGTO} 、 A_{1BGTO} 、 A_{2BGTO} 是针对本帧中 GNSS ID 标识的系统,不同帧中播发的 GNSS 系统可能不同,用户应当区分接收。



8.12.2 用户算法

北斗时与其他 GNSS 系统时之间转换的时间偏差可由公式(33)实现：

$$\Delta t_{Systems} = t_{BD} - t_{GNSS} = A_{0BGTO} + A_{1BGTO}[t_{BD} - t_{0BGTO} + 604\,800(WN - WN_{0BGTO})] + \dots\dots\dots (33)$$
$$A_{2BGTO}[t_{BD} - t_{0BGTO} + 604\,800(WN - WN_{0BGTO})]^2$$

式中：

$\Delta t_{\text{Systems}}$ ——北斗时与其他 GNSS 系统时之间转换的时间偏差,单位为秒(s)；

t_{BD} ——BDT 时间,单位为秒(s)；

t_{GNSS} ——其他 GNSS 系统时间,单位为秒(s)。

8.13 卫星健康状态

卫星健康状态(HS),共 2 bits,无符号整型,用于描述本卫星当前健康状态。其定义见表 26。

表 26 卫星健康状态参数定义

HS 值	定义	说明
0	卫星健康	该颗卫星提供服务
1	卫星不健康或在测试中	该颗卫星不提供服务
2	预留	预留
3	预留	预留

8.14 卫星完好性状态标识

卫星完好性状态采用电文完好性标识(DIF)、信号完好性标识(SIF)和系统告警标识(AIF)三个参数进行描述。三个标识参数均为 1 bits,其定义见表 27。

表 27 卫星完好性状态标识定义

标识	数值	定义
DIF ₁	0	本信号播发的电文参数误差未超出预测精度
	1	本信号播发的电文参数误差超出预测精度
SIF ₁	0	本信号正常
	1	本信号不正常
AIF ₁	0	本信号 SISMAI ^a 值有效
	1	本信号 SISMAI值无效
^a SISMAI定义见 7.16。		

8.15 空间信号精度指数

空间信号精度描述的是导航电文中播发的轨道和钟差的预测精度,包括 2 个参数,分别是卫星轨道切向和法向精度(SISA_{oe})、卫星轨道径向和卫星钟差精度(SISA_{oc})。

为计算 SISA_{oe}和 SISA_{oc},导航电文中给出了空间信号精度指数参数,分别为：

- a) SISA_{Ioe}:卫星轨道的切向和法向精度(SISA_{oe})指数；
- b) SISA_{Ioch}:卫星轨道的径向及卫星钟固定偏差精度(SISA_{och})指数；
- c) SISA_{Ioc1}:卫星钟频偏精度(SISA_{oc1})指数；
- d) SISA_{Ioc2}:卫星钟频漂精度(SISA_{oc2})指数；
- e) t_{op} :数据预测的周内时刻。

8.16 空间信号监测精度指数

利用零均值高斯分布模型对空间信号精度的估计误差进行描述,该高斯分布的方差称为空间信号监测精度(SISMA),用空间信号监测精度指数(SISMAI)表征。

9 符合性验证方法

9.1 概述

针对北斗卫星导航系统空间信号接口相关内容的符合性验证主要是验证导航卫星、信号模型器等导航信号生成设备产生的信号是否符合本文件第5章~第8章的相关要求,本章给出了符合性验证的基本方法。

9.2 信号特性验证方法

9.2.1 测试设备与连接

测试设备包括频谱仪、导航接收机、导航信号质量分析设备等。

测试设备可通过有线连线或者无线连接方式接收卫星、模拟源发射的信号:在有线连接方式下,将卫星、模拟源输出信号适当衰减后,通过信号线缆直接连接在频谱仪、导航接收机、导航信号质量分析设备射频入口端;在无线连接方式下,将接收天线的信号线缆连接在频谱仪、导航接收机、信号质量分析设备射频入口端。

9.2.2 测试与判别方法

利用频谱仪对载波相位噪声、杂散、极化方式、地面接收功率电平进行分析,获得结果并判别是否符合规范要求。

利用导航接收机和信号质量分析设备对信号结构、信号调制、电平映射、相关损耗、数据/码一致性、信号一致性进行分析,获得结果并判别是否符合规范要求。

9.3 测距码特性验证方法

9.3.1 测试设备与连接

同 9.2.2 信号特性验证方法设备与连接内容。

9.3.2 测试与判别方法

导航接收机能够捕获锁定所有指定的信号,则判定信号结构符合规范。

9.4 导航电文结构验证方法

9.4.1 测试设备与连接

同 9.2.2 信号特性验证方法设备与连接内容。

9.4.2 测试与判别方法

导航接收机能够进行信息 bits 的同步,解调出电文信息内容与预期一致,则判定电文结构符合规范。

9.5 导航电文参数算法验证方法

9.5.1 测试设备与连接

同 9.2.2 信号特性验证方法设备与连接内容。

9.5.2 测试与判别方法

导航接收机能够根据电文信息进行计算,解算结果与预期一致,则判定电文参数和算法符合规范。

附录 A

(资料性)

多进制 LDPC 编译码方法及示例

A.1 多进制 LDPC 编码

A.1.1 生成方法

由多进制 LDPC(n, k)编码的校验矩阵 $H=[H_1, H_2]$ 计算得到生成矩阵 G 。再利用生成矩阵 G , 对长度为 k 的输入信息序列 m 进行编码, 得到长度为 n 的码字。其中, c_j ($0 \leq j < n$) 为码字 c 中的第 j 个码字符号, $p = m \cdot (H_2^{-1} \cdot H_1)^T$ 为校验序列。

生成矩阵 G 的产生方法如下。

- 第 1 步: 将大小为 $(n-k) \times n$ 的矩阵 H 表示为 $H=[H_1, H_2]$, 其中, H_1 大小为 $(n-k) \times k$, H_2 大小为 $(n-k) \times (n-k)$ 。
- 第 2 步: 将矩阵 H 转化为系统形式, 用 H_2^{-1} 左乘 H , 得到右边为单位阵的校验矩阵 $\hat{H}=[H_2^{-1} \cdot H_1, I_{n-k}]$, 其中, I_{n-k} 为 $(n-k) \times (n-k)$ 单位阵。
- 第 3 步: 得到矩阵 $G=[I_k, (H_2^{-1} \cdot H_1)^T]$, 其中, I_k 为 $k \times k$ 单位阵。

A.1.2 编码示例

以 B-CNAV3 导航电文采用 64 进制 LDPC(162, 81) 编码为例, 若输入信息为:

[
001010 110010 010011 100001 001010 100110 010000 101001 101100 101111 011100 000101 001110
111010 001001 110100 100010 111111 000101 011100 000110 111101 000000 110001 110100 110111
000101 011001 010000 110011 011011 111010 001011 010000 001001 001000 110111 100101 100011
001001 110110 100111 010110 100000 011001 000100 001111 000111 001011 001111 011010 000011
111001 111100 011111 011111 010101 111001 010111 000111 110001 011000 001111 011001 000110
001000 111100 111101 100100 000011 001111 010110 110100 000000 000010 001010 101001 101110
101001 011100 100011
];

];

其对应的 64 进制信息为:

[10 50 19 33 10 38 16 41 44 47 28 5 14 58 9 52 34 63 5 28 6 61
0 49 52 55 5 25 16 51 27 58 11 16 9 8 55 37 35 9 54 39 22
32 25 4 15 7 11 15 26 3 57 60 31 31 21 57 23 7 49 24 15 25
6 8 60 61 36 3 15 22 52 0 2 10 41 46 41 28 35];

经过编码, 输出码字为:

[001010 110010 010011 100001 001010 100110 010000 101001 101100 101111 011100 000101 001110
111010 001001 110100 100010 111111 000101 011100 000110 111101 000000 110001 110100 110111
000101 011001 010000 110011 011011 111010 001011 010000 001001 001000 110111 100101 100011
001001 110110 100111 010110 100000 011001 000100 001111 000111 001011 001111 011010 000011
111001 111100 011111 011111 010101 111001 010111 000111 110001 011000 001111 011001 000110
001000 111100 111101 100100 000011 001111 010110 110100 000000 000010 001010 101001 101110
];

101001 011100 100011 100100 101110 111001 000000 110111 000001 010110 101101 110010 001001
 011011 001001 011010 000011 001011 101001 010101 011111 001101 101011 011110 001101 111101
 011111 010100 001000 000110 100100 000011 101101 001100 111001 111011 010111 001010 101011
 101101 111111 000001 111100 001111 101111 001010 000110 101000 111000 011000 000010 010011
 010011 101110 101011 010011 111101 011010 000001 000111 111101 001011 110111 110000 101011
 110001 101100 110010 011011 011111 011011 001100 111100 110011 111010 001111 000110 011101
 111101 100111 100110 000101 110101 100010];

其对应的 64 进制码字为：

[10 50 19 33 10 38 16 41 44 47 28 5 14 58 9 52 34 63 5 28 6 61
 0 49 52 55 5 25 16 51 27 58 11 16 9 8 55 37 35 9 54 39 22
 32 25 4 15 7 11 15 26 3 57 60 31 31 21 57 23 7 49 24 15 25
 6 8 60 61 36 3 15 22 52 0 2 10 41 46 41 28 35 36 46 57 0
 55 1 22 45 50 9 27 9 26 3 11 41 21 31 13 43 30 13 61 31 20
 8 6 36 3 45 12 57 59 23 10 43 45 63 1 60 15 47 10 6 40 56
 24 2 19 19 46 43 19 61 26 1 7 61 11 55 48 43 49 44 50 27 31
 27 12 60 51 58 15 6 29 61 39 38 5 53 34]。

A.1.3 映射关系

64 进制 LDPC 编码后,每个码字符号由 6 bits 构成,定义于本原多项式为 $p(x)=1+x+x^6$ 的有限域 $GF(2^6)$ 。有限域中的每个元素采用向量表示法和幂次表示法。

64 个元素的向量表示法到幂次表示法的映射表如下：

[∞ 0 1 6 2 12 7 26 3 32 13 35 8 48 27 18
 4 24 33 16 14 52 36 54 9 45 49 38 28 41 19 56
 5 62 25 11 34 31 17 47 15 23 53 51 37 44 55 40
 10 61 46 30 50 22 39 43 29 60 42 21 20 59 57 58];

63 个非零元素从幂次表示法到向量表示法的映射表如下：

[1 2 4 8 16 32 3 6 12 24 48 35 5 10 20 40
 19 38 15 30 60 59 53 41 17 34 7 14 28 56 51 37
 9 18 36 11 22 44 27 54 47 29 58 55 45 25 50 39
 13 26 52 43 21 42 23 46 31 62 63 61 57 49 33]。

A.2 多进制 LDPC 译码

A.2.1 生成方法

多进制 LDPC(n, k)编码生成的码字 $c=(c_0, c_1, \dots, c_{n-1})$ 在信号调制后进行信道传输,经过信道传输后,接收端可得到相应的接收序列 $y=(y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$ 。其中, $y_j=(y_{j,0}, y_{j,1}, \dots, y_{j,r-1})$ 为码字符号 c_j 对应的信道接收信息, $c_j \in GF(q)$, $q=2^r$, $0 \leq j < n$ 。

利用多进制 LDPC 码的校验矩阵 H 对接收序列 y 进行校验,具体方法是:对接收序列 y 进行逐比特硬判决,得到硬判决码字 $\hat{c}=(\hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{n-1})$,据此计算校验和 $s=\hat{c}H^T$ 。若 $s=0$,则将 \hat{c} 作为正确的译码结果输出,否则表明 \hat{c} 是错误的译码信息。

校验矩阵 H 给出了 LDPC 码校验节点和变量节点之间的连接关系,相互连接的校验节点和变量节点之间能够传递置信度信息。对于大小为 $m \times n$ 的校验矩阵 H ,记 $h_{i,j} \in GF(q)$ 为 H 矩阵中第 i 行第 j 列的元素, H 中的每一行对应一个校验节点 CN,每一列对应一个变量节点 VN。两个序数集合定

义见公式(A.1)和公式(A.2):

$$M_j = \{i: 0 \leq i < m, h_{i,j} \neq 0\}, 0 \leq j < n \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$N_i = \{j: 0 \leq j < n, h_{i,j} \neq 0\}, 0 \leq i < m \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

若 $h_{i,j} \neq 0$, 则校验节点 CN_i 与变量节点 VN_j 之间相连并相互传递置信度信息。由变量节点 VN_j 传递给相连校验节点 $CN_i (i \in M_j)$ 的置信度向量表示为 $V2C_{j \rightarrow i}$, 可用于计算校验节点 CN_i 的校验和; 由校验节点 CN_i 传递给相连变量节点 $VN_j (j \in N_i)$ 的置信度向量表示为 $C2V_{i \rightarrow j}$, 可用于估算变量节点 VN_j 的符号值。采用置信度传播译码算法, 迭代更新 $V2C_{j \rightarrow i}$ 和 $C2V_{i \rightarrow j}$, 能够纠正接收序列 y , 从而实现对传输码字 c 的估计。

下面给出两种迭代的置信度传播译码算法, 用以估计传输码字 c 。

A.2.2 扩展最小和法

A.2.2.1 算法流程

设加性高斯白噪声信道的噪声均值为 0, 方差为 σ^2 。根据每个码字符号对应的接收符号向量 y_j 计算其置信度向量 L_j 。所有 q 个有限域元素 $x \in GF(q)$ 及其对应的对数似然比(LLR)值 $LLR(x)$ 一起构成了置信度向量 L_j , 其中向量 L_j 的第 l 个元素 ($0 \leq l < q$) 由第 l 个有限域符号 x 及其 LLR 值组成。置信度向量 L_j 中有限域元素 x 的对数似然比计算见公式(A.3):

$$LLR(x) = \log \left[\frac{P(y_j | \hat{x})}{P(y_j | x)} \right] = \frac{2 \sum_{b=0}^{r-1} |y_{j,b}| \Delta_{j,b}}{\sigma^2} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

其中, \hat{x} 是 $GF(q)$ 中使概率 $P(y_j | x)$ 最大的有限域元素, 即直接对接收符号 y_j 逐比特作硬判决得到的元素。有限域元素 x 和 \hat{x} 对应的比特序列分别为 $x = (x_0, x_1, \dots, x_{r-1})$ 和 $\hat{x} = (\hat{x}_0, \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{r-1})$, $\Delta_{j,b} = x_b \text{ XOR } \hat{x}_b$, XOR 为异或运算, 即若 x_b 和 \hat{x}_b 相同则 $\Delta_{j,b} = 0$, 否则 $\Delta_{j,b} = 1$ 。

在扩展最小和译码算法中, 传递的置信度向量 L_j 的长度从 q 个有限域元素减至 $n_m (n_m \ll q)$ 个, 即在置信度向量中只保留 LLR 值最小 (即置信度最高) 的 n_m 个元素。扩展最小和译码的算法流程如下。

- 初始化: 设置最大迭代次数 itr_{\max} , 当前迭代次数 $\text{itr} = 0$ 。根据接收向量 y_j 计算置信度向量 L_j ($0 \leq j < n$)。利用 L_j 初始化各变量节点 VN_j 的所有 $V2C_{j \rightarrow i}$ 向量。
- 第 1 步: 对各变量节点 $VN_j (0 \leq j < n)$, 根据变量节点更新规则计算判决符号 \hat{c}_j 与置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i}$ 。
- 第 2 步: 利用多进制 LDPC 码的校验矩阵 H , 计算校验和 $s = \hat{c}H^T$ 。若 $s = 0$, 则将判决值序列 \hat{c} 作为译码输出并终止译码; 否则执行第 3 步。
- 第 3 步: 对各校验节点 $CN_i (0 \leq i < m)$, 根据校验节点更新规则计算置信度向量 $C2V_{i \rightarrow j}$ 。
- 第 4 步: 令 $\text{itr} = \text{itr} + 1$ 。若 $\text{itr} = \text{itr}_{\max}$, 则终止译码并声明失败; 否则转至第 1 步。

A.2.2.2 变量节点更新规则

若当前迭代次数 $\text{itr} = 0$, 对于每个码字符号的置信度向量 L_j , 按照其 q 个有限域元素的 LLR 值进行升序排列, 取排序后 L_j 中的前 n_m 个元素构成截断置信度向量 $L'_{j,n_m} = [x_{n_m}, LLR(x_{n_m})]$ 。将 $V2C_{j \rightarrow i}$ 初始化为 L'_{j,n_m} , 见公式(A.4):

$$V2C_{j \rightarrow i} = L'_{j,n_m} = L_{j,n_m} \cdot h_{i,j} = [x_{n_m} \cdot h_{i,j}, LLR(x_{n_m})] \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- x_{n_m} —— 被截取的前 n_m 个有限域元素组成的向量;
- $x_{n_m} \cdot h_{i,j}$ —— 截取的 n_m 个有限域元素与 $h_{i,j}$ 的有限域乘法。

若当前迭代次数 $\text{itr} \neq 0$, 设 $\mathbf{C2V}_{f \rightarrow j}$ 是校验节点 CN_f 传递给相连变量节点 VN_j 的长度为 n_m 的置信度向量, 利用 VN_j 收到的所有置信度向量 $\mathbf{C2V}_{f \rightarrow j} (f \in M_j, f \neq i)$, 计算 VN_j 传递给相连校验节点 CN_i 的置信度向量 $\mathbf{V2C}_{j \rightarrow i}$, 计算见公式(A.5):

$$\mathbf{V2C}_{j \rightarrow i} = h_{i,j} \cdot \left(\sum_{f \in M_j, f \neq i} \mathbf{C2V}_{f \rightarrow j} \cdot h_{f,j}^{-1} + L_j \right)_{n_m} = (\mathbf{R}_{s_{j \rightarrow i}}, \mathbf{R}_{j \rightarrow i}) \cdots \cdots \cdots (\text{A.5})$$

其中, 有限域元素 $h_{f,j}^{-1}$ 是 $h_{f,j}$ 的逆元, 即 $h_{f,j}^{-1} \cdot h_{f,j} = 1$ 。上式中的加和运算将各置信度向量 $\mathbf{C2V}_{f \rightarrow j} \cdot h_{f,j}^{-1}$ 中相同元素的 LLR 值进行相加, $(\cdot)_{n_m}$ 操作表示将置信度向量中的元素进行升序排序并截取前 n_m 个元素, 且这 n_m 个有限域元素互不相同。 $\mathbf{R}_{s_{j \rightarrow i}}$ 是前 n_m 个有限域元素组成的向量, $\mathbf{R}_{j \rightarrow i}$ 是对应的 LLR 值向量。被置信度向量 $\mathbf{C2V}_{f \rightarrow j}$ 舍弃的 $q - n_m$ 个有限域元素的 LLR 值取为 $\mathbf{C2V}_{f \rightarrow j}$ 中最大的 LLR 值与一个固定偏移量之和。在每个置信度向量 $\mathbf{V2C}_{j \rightarrow i}$ 计算完成后, 找到该置信度向量中 LLR 的最小值 LLR_{\min} , 将该置信度向量中各元素的 LLR 值减去 LLR_{\min} 。

此外, 每个变量节点在每次计算时都进行一次判决, 选取长度为 q 的置信度向量 $\left\{ \sum_{f \in M_j} \mathbf{C2V}_{f \rightarrow j} \cdot h_{f,j}^{-1} + L_j \right\}$ 中 LLR_{\min} 对应的有限域元素作为判决值, 判决方法见公式(A.6):

$$\hat{c}_j = \arg \min_{x \in \text{GF}(q)} \left\{ \sum_{f \in M_j} \mathbf{C2V}_{f \rightarrow j} \times h_{f,j}^{-1} + L_j \right\}, 0 \leq j < n \cdots \cdots \cdots (\text{A.6})$$

判决符号 \hat{c}_j 与置信度向量 $\mathbf{V2C}_{j \rightarrow i}$ 一起传递给对应的校验节点。检查当前迭代译码结果 $\hat{\mathbf{c}} = (\hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{n-1})$ 是否能通过校验矩阵校验, 即 $\mathbf{s} = \hat{\mathbf{c}}\mathbf{H}^T$ 是否为零向量。

A.2.2.3 校验节点更新规则

对每个校验节点 $\text{CN}_i (0 \leq i < m)$, 接收所有与之相连的变量节点传递的置信度向量 $\mathbf{V2C}_{j \rightarrow i}$, 计算置信度向量 $\mathbf{C2V}_{i \rightarrow j}$, 见公式(A.7):

$$\mathbf{C2V}_{i \rightarrow j} = \sum_{\gamma \in N_i, \gamma \neq j} \mathbf{V2C}_{\gamma \rightarrow i} \cdots \cdots \cdots (\text{A.7})$$

其中, 每次加和运算定义为校验节点基本计算: 输入两个 n_m 长的置信度向量 (各包含 n_m 长的有限域元素向量及对应的 LLR 向量), 对来自不同置信度向量的有限域元素做加法得到候选元素并计算对应的 LLR 值, 将所有候选元素的 LLR 值升序排列, 截取前 n_m 个最小的 LLR 值及其对应的有限域元素构成输出置信度向量。设校验节点基本计算的输入置信度向量分别为 $(\mathbf{U}_s, \mathbf{U})$ 和 $(\mathbf{Q}_s, \mathbf{Q})$, 输出置信度向量为 $(\mathbf{V}_s, \mathbf{V})$, 其中 $\mathbf{U}, \mathbf{Q}, \mathbf{V}$ 为升序排列的 n_m 长 LLR 向量, $\mathbf{U}_s, \mathbf{Q}_s, \mathbf{V}_s$ 为相对应的有限域元素向量。根据输入置信度向量, 构建大小为 $n_m \times n_m$ 的置信度矩阵 \mathbf{M} 和有限域元素矩阵 \mathbf{M}_s 。 \mathbf{M}_s 和 \mathbf{M} 的计算见公式(A.8)和公式(A.9):

$$\mathbf{M}_s[d, \rho] = \mathbf{U}_s[d] \oplus \mathbf{Q}_s[\rho] \cdots \cdots \cdots (\text{A.8})$$

$$\mathbf{M}[d, \rho] = \mathbf{U}[d] + \mathbf{Q}[\rho] \cdots \cdots \cdots (\text{A.9})$$

其中, $d, \rho \in \{0, 1, \dots, n_m - 1\}$, \oplus 为有限域加法。校验节点基本计算见公式(A.10):

$$\mathbf{V}[\epsilon] = \min_{d, \rho \in \{0, 1, \dots, n_m - 1\}} \{ \mathbf{M}[d, \rho] \}_{\mathbf{V}_s[\epsilon] = \mathbf{M}_s[d, \rho]}, 0 \leq \epsilon < n_m \cdots \cdots \cdots (\text{A.10})$$

上式的具体实现通过对大小为 n_m 的寄存器 \mathbf{S} 进行如下操作完成。

- 初始化: 将 \mathbf{M} 的第 1 列存入 \mathbf{S} , 使 $\mathbf{S}[\zeta] = \mathbf{M}[\zeta, 0]$, $\zeta \in \{0, 1, \dots, n_m - 1\}$ 。令 $\epsilon = 0$ 。
- 第 1 步: 找到 \mathbf{S} 中的最小值。(假设 $\mathbf{M}[d, \rho]$ 对应 \mathbf{S} 中的最小值)。
- 第 2 步: 若 \mathbf{S} 中最小值对应的有限域元素不存在于向量 \mathbf{V}_s 中, 则将 \mathbf{S} 中的最小值给 $\mathbf{V}[\epsilon]$, 将对应的有限域元素给 $\mathbf{V}_s[\epsilon]$, $\epsilon = \epsilon + 1$; 否则, 不执行操作。
- 第 3 步: 将 \mathbf{S} 中的最小值替换为其在 \mathbf{M} 中对应元素的右边元素, (即假设当前 \mathbf{S} 中的最小值为 $\mathbf{M}[d, \rho]$, 则将其替换为 $\mathbf{M}[d, \rho + 1]$)。

e) 第4步:转至第1步,直到 $\epsilon = n_m$ 。

A.2.3 固定路径译码算法

固定路径译码算法是一种高效的译码算法,其整个算法流程和扩展最小和译码算法一致。不同的地方在于具体的校验节点更新规则。以校验节点的行重值 $d_c=4$ 为例(即每个校验节点接收到4个输入信息向量),固定路径译码算法校验节点更新规则介绍如下:

对于每个校验节点 $CN_i (0 \leq i < m)$,利用与之相连的变量节点传递的4个置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i} = (Rs_{j \rightarrow i}, R_{j \rightarrow i}) (j \in N_i)$,计算长为 $8+2n_m$ 的固定路径偏差值向量 $E_i = (Rs_i, R_i)$,其中 Rs_i 是长度为 $8+2n_m$ 的有限域元素向量(向量中可能存在重复的有限域元素), R_i 是对应的LLR向量。

每次计算时,将4个置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i}$ 按照其第二个元素 $V2C_{j \rightarrow i}[1] = (Rs_{j \rightarrow i}[1], R_{j \rightarrow i}[1])$ (索引下标为1)的LLR值 $R_{j \rightarrow i}[1]$ 从小到大排序,排序后的4个新向量定义为 $(Rs_{l,i}, R_{l,i})$, $0 \leq l < 4$,即 $R_{0,i}[1] \leq R_{1,i}[1] \leq R_{2,i}[1] \leq R_{3,i}[1]$ 。其中, $Rs_{l,i}$ 为排序后的 n_m 长度的有限域元素向量, $R_{l,i}$ 是对应的LLR向量。根据4个新向量 $(Rs_{l,i}, R_{l,i})$ 计算固定路径偏差值向量 $E_i = (Rs_i, R_i)$,各元素 $Rs_i[e]$ 及其LLR值 $R_i[e]$ 计算见公式(A.11)和公式(A.12):

$$Rs_i[e] = \begin{cases} \sum_{0 \leq l < 4} Rs_{l,i}[0], & e = 0 \\ Rs_{e-1,i}[1] \oplus \sum_{0 \leq l < 4, l \neq e-1} Rs_{l,i}[0], & 1 \leq e \leq 4 \\ Rs_{0,i}[1] \oplus Rs_{e-4,i}[1] \oplus \sum_{1 \leq l < 4, l \neq e-4} Rs_{l,i}[0], & 5 \leq e \leq 7 \\ Rs_{0,i}[0] \oplus Rs_{1,i}[1] \oplus Rs_{2,i}[1] \oplus Rs_{3,i}[0], & e = 8 \\ Rs_{0,i}[0] \oplus Rs_{1,i}[1] \oplus Rs_{2,i}[0] \oplus Rs_{3,i}[1], & e = 9 \\ Rs_{e-10,i}[2] \oplus \sum_{0 \leq l < 4, l \neq e-10} Rs_{l,i}[0], & 10 \leq e < 14 \\ Rs_{\theta,i}[e-11] \oplus \sum_{0 \leq l < 4, l \neq \theta} Rs_{l,i}[0], & 14 \leq e < 11+n_m \\ Rs_{\beta,i}[e-8-n_m] \oplus \sum_{0 \leq l < 4, l \neq \beta} Rs_{l,i}[0], & 11+n_m \leq e < 8+2n_m \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

$$R_i[e] = \begin{cases} 0, & e = 0 \\ R_{e-1,i}[1], & 1 \leq e \leq 4 \\ R_{0,i}[1] + R_{e-4,i}[1], & 5 \leq e \leq 7 \\ R_{1,i}[1] + R_{e-6,i}[1], & 8 \leq e \leq 9 \\ R_{e-10,i}[2], & 10 \leq e < 14 \\ R_{\theta,i}[e-11], & 14 \leq e < 11+n_m \\ R_{\beta,i}[e-8-n_m], & 11+n_m \leq e < 8+2n_m \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

其中, θ 和 β 分别表示全部 $R_{l,i}$ 向量中第 $\lfloor n_m/2 \rfloor + 1$ 个LLR值(索引下标为 $\lfloor n_m/2 \rfloor$)的最小值和次小值所对应的 $R_{l,i}$ 向量下标 l ,加和运算及 \oplus 为有限域加法运算。

设定两个长为 $8+2n_m$ 的标志向量 T 和 \bar{T} 并将其初始化为全1向量。对于 $0 \leq k_R < 8+2n_m$,标志向量 T 和 \bar{T} 的更新见公式(A.13)和公式(A.14):

$$T[k_R] = \begin{cases} 1, R_i[k_R] \leq R_{\theta,i}[\lfloor n_m/2 \rfloor] \\ 0, R_i[k_R] > R_{\theta,i}[\lfloor n_m/2 \rfloor] \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

$$\overline{T}[k_R] = \begin{cases} 1, R_i[k_R] \leq R_{\beta,i}[\lfloor n_m/2 \rfloor] \\ 0, R_i[k_R] > R_{\beta,i}[\lfloor n_m/2 \rfloor] \end{cases} \dots\dots\dots (\text{A.14})$$

根据固定路径偏差和标志向量更新 4 个长度为 n_m 的输出置信度向量 ($Us_{i,1}, U_{i,1}$), 计算见公式 (A.15) 和公式 (A.16):

$$Us_{i,1} = (Rs_i[w] \oplus Rs_{i,i}[0])_{n_m} \dots\dots\dots (\text{A.15})$$

$$U_{i,1} = (R_i[w])_{n_m} \dots\dots\dots (\text{A.16})$$

其中, $0 \leq l < 4$; w 的取值范围由不同的情况决定, 对于 $l=0$ 的情况, 如果 $\theta \neq 0$, w 的取值范围见公式 (A.17):

$$\{w | \overline{T}[w] = 1\} \cap \{\{w=0\} \cup \{1 < w \leq 4\} \cup \{8 \leq w < 10\} \cup \{10 < w < 11 + n_m\}\} \dots\dots\dots (\text{A.17})$$

否则, w 的取值范围见公式 (A.18):

$$\{w | \overline{T}[w] = 1\} \cap \{\{w=0\} \cup \{1 < w \leq 4\} \cup \{8 \leq w < 10\} \cup \{10 < w < 14\} \cup \{w \geq 11 + n_m\}\} \dots\dots\dots (\text{A.18})$$

对于 $1 \leq l < 4$ 的情况, 如果 $l = \theta$ 时, w 的取值范围见公式 (A.19):

$$\{w | \overline{T}[w] = 1\} \cap \{\{0 \leq w \leq 7\} \cup \{10 \leq w < 14\} \cup \{w \geq 11 + n_m\}\} \cap \{\{w \neq l+1\} \cap \{w \neq 4+l\} \cap \{w \neq 10+l\}\} \dots\dots\dots (\text{A.19})$$

否则 w 的取值范围见公式 (A.20):

$$\{w | T[w] = 1\} \cap \{\{0 \leq w \leq 7\} \cup \{10 \leq w < 11 + n_m\}\} \cap \{\{w \neq l+1\} \cap \{w \neq 4+l\} \cap \{w \neq 10+l\}\} \dots\dots\dots (\text{A.20})$$

$Us_{i,l}[z]$ ($0 \leq z < n_m$) 对应于 w 的前 n_m 个最小值计算得到的 $Rs_i[w] \oplus Rs_{i,i}[0]$, 且不需要排除 $Us_{i,l}[z]$ 中相同的元素, $U_{i,l}[z]$ 是 $Us_{i,l}[z]$ 对应的 LLR 值。

计算得到的 4 个向量 ($Us_{i,l}, U_{i,l}$) 的排列顺序与 4 个排序后的输入向量 ($Rs_{i,l}, R_{i,l}$) 一一对应。因为每一个输入向量 ($Rs_{i,l}, R_{i,l}$) 对应一个 $V2C_{j \rightarrow i}$ 向量, 根据置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i}$ 与 ($Rs_{i,l}, R_{i,l}$) 的之间的排列顺序, 更新输出置信度向量 $C2V_{i \rightarrow j} = (Us_{i,l}, U_{i,l}), (j \in N_i)$ 。



