



中华人民共和国国家标准

GB/T 39414.1—2020

北斗卫星导航系统空间信号接口规范 第 1 部分：公开服务信号 B1C

Interface specification for signal in space of BeiDou navigation satellite system—
Part 1: Open service signal B1C

2020-11-19 发布

2021-06-01 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	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、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	3
5 信号特性	3
5.1 信号结构	3
5.2 信号调制	3
5.3 电平映射	5
5.4 极化方式	5
5.5 载波相位噪声	5
5.6 杂散	5
5.7 相关损耗	5
5.8 数据/码一致性	5
5.9 信号一致性	6
5.10 地面接收功率电平	6
6 测距码特性	6
6.1 测距码结构	6
6.2 B1C 信号测距码	7
7 导航电文结构	14
7.1 导航电文概述	14
7.2 B-CNAV1 导航电文	14
8 导航电文参数和算法	24
8.1 测距码编号	24
8.2 页面类型	24
8.3 系统时间参数	25
8.4 电文数据版本标识	25
8.5 钟差参数	27
8.6 群延迟修正参数	28
8.7 星历参数	28

8.8 电离层延迟改正模型参数 30

8.9 中等精度历书 35

8.10 简约历书 37

8.11 地球定向参数 38

8.12 BDT-UTC 时间同步参数 39

8.13 BGTO 参数 40

8.14 卫星健康状态 41

8.15 卫星完好性状态标识 41

8.16 空间信号精度指数 41

8.17 空间信号监测精度指数 42

9 符合性验证方法 42

9.1 概述 42

9.2 信号特性验证方法 42

9.3 测距码特性验证方法 42

9.4 导航电文结构验证方法 43

9.5 导航电文参数算法验证方法 43

附录 A (资料性附录) 多进制 LDPC 编译码方法及示例 44



前 言

GB/T 39414《北斗卫星导航系统空间信号接口规范》分为 4 个部分：

——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。

本部分为 GB/T 39414 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分由中央军委装备发展部提出。

本部分由全国北斗卫星导航标准化技术委员会(SAC/TC 544)归口。

本部分起草单位：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、中国航天科技集团公司第五研究院、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、清华大学、中国航天电子技术研究院。

本部分主要起草人：宿晨庚、高为广、卢鋈、阮航、王维嘉、许冬彦、高扬、刘成、王梦丽、唐祖平、黄勤、姚铮、麻智超、董海青、任前义。

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已发布的公开服务信号包括 B1I、B2I、B3I、B1C 和 B2a。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, 提供公开服务; B2I 信号在北斗二号所有卫星上播发, 提供公开服务, 在北斗三号卫星上将被 B2a 信号取代; B1C、B2a 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, 提供公开服务。

GB/T 39414 的本部分主要定义了北斗系统空间星座和用户终端之间公开服务信号 B1C 的相关内容, 包括空间信号射频特性、测距码、导航电文结构、导航电文参数和用户算法等, 可作为北斗卫星导航产品设计、研制及应用的重要依据。



北斗卫星导航系统空间信号接口规范

第 1 部分:公开服务信号 B1C

1 范围

GB/T 39414 的本部分规定了北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)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。

本部分适用于使用 B1C 信号的卫星导航产品的研制、生产和检验。

2 规范性引用文件

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(包括所有修改单)适用于本文件。

GB/T 39267 北斗卫星导航术语

3 术语和定义、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。

AIF:系统告警标识(Accuracy Integrity Flag)

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)

BDS:北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System)

BGTO:北斗时与其他 GNSS 系统时的偏差(BDT-GNSS Time Offset)

BOC:二进制偏移载波(Binary Offset Carrier)

CGCS2000:2000 中国大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000)

CRC:循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check)

DIF:电文完好性标识(Data Integrity Flag)

ECI:地心惯性(坐标系)(Earth Centered Inertial)

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)

GLONASS:格洛纳斯卫星导航系统(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)

HOW:周内小时计数(Hours Of Week)

IERS:国际地球自转参考系服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service)
IGSO:倾斜地球同步轨道(Inclined GeoSynchronous Orbit)
IODC:钟差参数版本标识(Issue of Data,Clock)
IODE:星历参数版本标识(Issue of Data,Ephemeris)
IRM:IERS 参考子午面(IERS Reference Meridian)
IRP:IERS 参考极(IERS Reference Pole)
LDPC:低密度奇偶校验(Low Density Parity Check)
MEO:中圆地球轨道(Medium Earth Orbit)
MJD:约化儒略日(Modified Julian Date)
MSB:最高有效位(Most Significant Bit)
NTSC:国家授时中心(National Time Service Center)
PRN:伪随机噪声(Pseudo-Random Noise)
QMBOC:正交复用二进制偏移载波(Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier)
RHCP:右旋圆极化(Right-Hand Circular Polarization)
RMS:均方根(Root Mean Square)
SIF:信号完好性标识(Signal Integrity Flag)
SISA:空间信号精度(Signal in Space Accuracy)
SISAI:空间信号精度指数(Signal in Space Accuracy Index)
SISMA:空间信号监测精度(Signal in Space Monitoring Accuracy)
SISMAI:空间信号监测精度指数(Signal in Space Monitoring Accuracy Index)
SOH:小时内秒计数(Seconds of Hour)
TEC:总电子含量(Total Electron Content)
TECu:总电子含量单位(Total Electron Content unit)
UT:世界时(Universal Time)
WN:整周计数(Week Number)

4 北斗系统概述

4.1 空间星座

北斗全球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 IERS 规范,与 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 参考椭球定义的基本常数

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)	$\mu=3.986\,004\,418\times10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$
3	扁率	$f=1/298.257\,222\,101$
4	地球自转角速度	$\dot{\Omega}_e=7.292\,115\,0\times10^{-5}\text{ rad/s}$

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

B1C 信号的载波频率、调制方式及符号速率见表 2。

表 2 B1C 信号结构

信号	信号分量	载波频率/MHz	调制方式	符号速率/sps
B1C	数据分量 B1C_data	1 575.42	BOC(1,1)	100
	导频分量 B1C_pilot		QMBOC(6,1,4/33)	0

5.2 信号调制

信号的调制方式采用功率归一化的复包络形式来描述。假设一个调制信号的复包络基带信号 $s_X(t)$ 表示,其描述了调制信号在载波调制之前所真正包含的信号结构与信息内容,表达式见公式(1):

$$s_X(t) = s_{X1}(t) + js_{X2}(t) \dots\dots\dots (1)$$

式中:
 $s_X(t)$ ——复包络基带信号;
 $s_{X1}(t)$ ——复包络的实部,代表信号的同相分量;
 j ——虚数单位;
 $s_{X2}(t)$ ——复包络的虚部,代表信号的正交分量。

该调制信号也可以用一个经载波调制后的带通信号 $S_X(t)$ 表示,见公式(2):

$$S_X(t) = \sqrt{2P_X} [s_{X1}(t)\cos(2\pi f_Xt) - s_{X2}(t)\sin(2\pi f_Xt)] \dots\dots\dots (2)$$

式中:
 $S_X(t)$ ——带通信号;
 P_X ——信号功率;

f_x ——信号载波频率。

基带信号 $s_x(t)$ 和带通信号 $S_x(t)$ 是同一个信号的两种表达方式,二者可以相互转换。B1C 信号的复包络见公式(3):

$$s_{\text{B1C}}(t) = s_{\text{B1C_data}}(t) + \text{j} s_{\text{B1C_pilot}}(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$s_{\text{B1C}}(t)$ ——B1C 信号复包络;

$s_{\text{B1C_data}}(t)$ ——数据分量,由导航电文数据 $D_{\text{B1C_data}}(t)$ 和测距码 $C_{\text{B1C_data}}(t)$ 经子载波 $sc_{\text{B1C_data}}(t)$ 调制产生,采用正弦 BOC(1,1) 调制方式;

$s_{\text{B1C_pilot}}(t)$ ——导频分量,由测距码 $C_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 经子载波 $sc_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 调制产生,采用 QMBOC(6,1,4/33) 调制方式。

数据分量与导频分量的功率比为 1:3,两个分量的数学表达式见公式(4)和公式(5):

$$s_{\text{B1C_data}}(t) = \frac{1}{2} D_{\text{B1C_data}}(t) \cdot C_{\text{B1C_data}}(t) \cdot sc_{\text{B1C_data}}(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$s_{\text{B1C_pilot}}(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} C_{\text{B1C_pilot}}(t) \cdot sc_{\text{B1C_pilot}}(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

数据分量 $s_{\text{B1C_data}}(t)$ 中 $D_{\text{B1C_data}}(t)$ 的数学表达式见公式(6):

$$D_{\text{B1C_data}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{\text{B1C_data}}[k] p_{T_{\text{B1C_data}}}(t - kT_{\text{B1C_data}}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$d_{\text{B1C_data}}$ ——B1C 信号的导航电文数据码;

$p_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 是宽度为 T 的矩形脉冲函数;

$T_{\text{B1C_data}}$ ——相应的数据码片宽度。

$C_{\text{B1C_data}}(t)$ 和 $C_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 测距码的数学表达式见公式(7)和公式(8):

$$C_{\text{B1C_data}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N_{\text{B1C_data}}-1} c_{\text{B1C_data}}[k] p_{T_{\text{c_B1C}}}(t - (N_{\text{B1C_data}}n + k)T_{\text{c_B1C}}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$C_{\text{B1C_pilot}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N_{\text{B1C_pilot}}-1} c_{\text{B1C_pilot}}[k] p_{T_{\text{c_B1C}}}(t - (N_{\text{B1C_pilot}}n + k)T_{\text{c_B1C}}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$c_{\text{B1C_data}}$ 和 $c_{\text{B1C_pilot}}$ ——数据分量和导频分量的测距码序列(取值为 ± 1);

$N_{\text{B1C_data}}$ 和 $N_{\text{B1C_pilot}}$ ——对应分量的测距码码长,其值均为 10230;

$T_{\text{c_B1C}} = 1/R_{\text{c_B1C}}$ ——B1C 信号的测距码码片宽度;

$R_{\text{c_B1C}} = 10.23 \text{ Mbps}$ ——B1C 信号的测距码速率。

B1C 数据分量的子载波 $sc_{\text{B1C_data}}(t)$ 表达式见公式(9):

$$sc_{\text{B1C_data}}(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_a}} t)) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$f_{\text{sc_B1C_a}}$ ——子载波频率,1.023 MHz。

B1C 导频分量的子载波 $sc_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 为 QMBOC(6,1,4/33) 复合子载波,由相互正交的 BOC(1,1) 子载波和 BOC(6,1) 子载波组合构成,二者功率比为 29:4。 $sc_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 表达式见公式(10):

$$sc_{\text{B1C_pilot}}(t) = \sqrt{\frac{29}{33}} \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_a}} t)) - \text{j} \sqrt{\frac{4}{33}} \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_b}} t)) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$f_{\text{sc_B1C_b}}$ ——子载波频率,6.138 MHz。

由于 $s_{\text{B1C_pilot}}(t)$ 为复波形, 整个 B1C 信号实际包含了三个实分量, 见公式(11):

$$\begin{aligned} s_{\text{B1C}}(t) = & \underbrace{\frac{1}{2} D_{\text{B1C_data}}(t) \cdot C_{\text{B1C_data}}(t) \cdot \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_a}} t))}_{s_{\text{B1C_data}}(t)} \\ & + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{11}} C_{\text{B1C_pilot}}(t) \cdot \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_b}} t))}_{s_{\text{B1C_pilot_b}}(t)} \\ & + \underbrace{j \sqrt{\frac{29}{44}} C_{\text{B1C_pilot}}(t) \cdot \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{sc_B1C_a}} t))}_{s_{\text{B1C_pilot_a}}(t)} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

B1C 信号的分量组成, 以及各分量的调制方式、相位关系和功率比见表 3。

表 3 B1C 信号调制特性

分量	调制方式		相位关系	功率比
$s_{\text{B1C_data}}(t)$	正弦 BOC(1,1)		0	1/4
$s_{\text{B1C_pilot_a}}(t)$	QMBOC(6,1,4/33)	正弦 BOC(1,1)	90	29/44
$s_{\text{B1C_pilot_b}}(t)$		正弦 BOC(6,1)	0	1/11

5.3 电平映射

调制信号的逻辑电平与信号电平之间的映射关系见表 4。

表 4 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(RMS)。

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 0.3 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。每个子码的边沿与主码边沿对齐,主码第一码片起始时刻与子码码片起始时刻对齐。

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 5。

表 5 地面接收的最小功率电平

信号	卫星类型	最小接收功率 ^a /dBW
B1C	MEO 卫星	-159
	IGSO 卫星	-161

^a 对于包含数据分量和导频分量的信号,最小接收功率为数据和导频的合路功率,数据、导频之间的功率分配由调制方式定义,分量间的有效功率比偏差小于 0.5 dB。卫星播发的 B1C 信号具有以下特性:波束轴向相对于地球边缘滚降不超过 2 dB。

6 测距码特性

6.1 测距码结构

B1C 信号测距码采用分层码结构,由主码和子码相异或构成。子码的码片宽度与主码的周期相同,子码码片起始时刻与主码第一个码片的起始时刻严格对齐,时序关系见图 1。

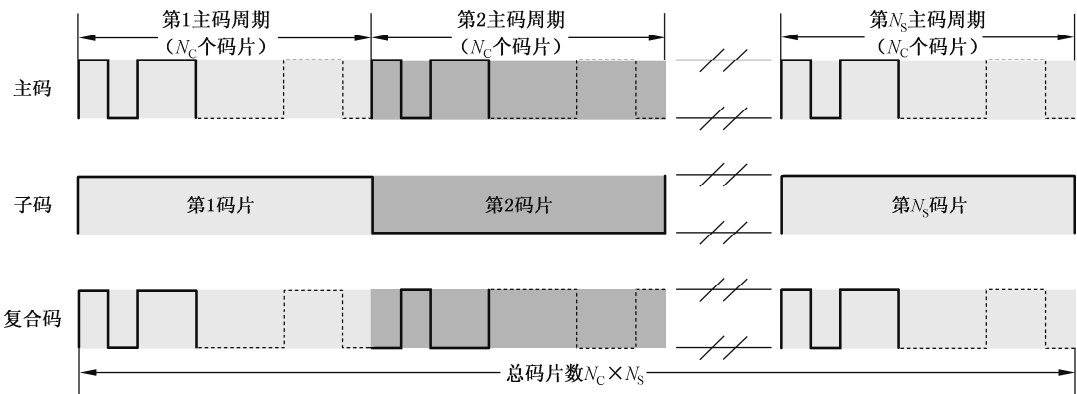


图 1 主码、子码时序关系示意图

B1C 信号测距码参数见表 6。

表 6 B1C 信号测距码参数

信号分量	主码码型	主码码长	主码周期/ms	子码码型	子码码长	子码周期/ms
B1C 数据分量	Weil 码截短	10 230	10	— ^a	— ^a	— ^a
B1C 导频分量	Weil 码截短	10 230	10	Weil 码截短	1 800	18 000
^a B1C 数据分量不含子码。						

对于 MEO 和 IGSO 卫星,每颗卫星对应唯一的 PRN 号,同一颗卫星播发的 B1C 和 B2a 信号采用相同的 PRN 号。

6.2 B1C 信号测距码

6.2.1 B1C 信号主码

B1C 信号主码由 Weil 码通过截断产生,一个码长为 N 的 Weil 码序列可定义见公式(12):

$$W(k; \omega) = L(k) \oplus L((k + \omega) \bmod N), k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$L(k)$ ——码长为 N 的 legendre 序列;

ω ——两个 legendre 序列之间的相位差。

码长为 N 的 legendre 序列 $L(k)$ 定义见公式(13):

$$L(k) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ 1, & k \neq 0, \text{且存在整数 } x, \text{使得 } k = x^2 \bmod N \dots\dots\dots (13) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中:

mod——模除运算。

通过对上述码长为 N 的 Weil 码序列进行循环截取,可得到码长为 N_0 的测距码,截断序列定义见公式(14):

$$c(n; \omega; p) = W((n + p - 1) \bmod N; \omega), n = 0, 1, 2, \dots, N_0 - 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

p ——截取点,表示从 Weil 码的第 p 位开始截取,取值范围为 $1 \sim N$ 。

B1C 信号主码的码速率为 1.023 Mcps,码长为 10 230,由长度为 10 243 的 Weil 码通过截断产生, ω 取值范围为 $1 \sim 5\,121$ 。

B1C 信号主码共有 126 个,数据码和导频码各 63 个,具体参数见表 7、表 8。表 7 和表 8 中,头 24 个码片和末尾 24 个码片用八进制表示,最高有效位(MSB)先传。例如,PRN 号为 1 的 B1C 数据分量主码的前 24 个码片为 101011111111011001001110,第一个二进制数 1 对应测距码的第一个码片。

表 7 B1C 数据分量的主码参数

PRN 号	相位差(ω)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
1	2678	699	53773116	42711657
2	4802	694	32235341	17306122
3	958	7318	17633713	01145221

表 7 (续)

PRN 号	相位差(w)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
4	859	2127	41551514	05307430
5	3843	715	17205134	46341377
6	2232	6682	04254545	60604443
7	124	7850	70663435	50500234
8	4352	5495	16701045	27476454
9	1816	1162	32132263	70555612
10	1126	7682	25432015	43004057
11	1860	6792	31711760	07100551
12	4800	9973	25604267	15703521
13	2267	6596	65705054	12615632
14	424	2092	24700370	14267226
15	4192	19	72405456	25330122
16	4333	10151	02621063	15741134
17	2656	6297	00506754	62665617
18	4148	5766	44317266	07251312
19	243	2359	14463723	26526763
20	1330	7136	70234110	33737311
21	1593	1706	62002462	34564677
22	1470	2128	52312612	30142557
23	882	6827	34500023	52015335
24	3202	693	77312776	56550366
25	5095	9729	03712305	04531416
26	2546	1620	02501573	00717773
27	1733	6805	66632544	65070030
28	4795	534	00447425	65742570
29	4577	712	50643132	47674377
30	1627	1929	75652754	45534064
31	3638	5355	40610704	03636755
32	2553	6139	60523643	52040645
33	3646	6339	30522043	36645510
34	1087	1470	06337743	54551553
35	1843	6867	41375664	26065254
36	216	7851	20200053	03373656

表 7 (续)

PRN 号	相位差(τ)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
37	2245	1162	22017103	15754234
38	726	7659	67327102	36032344
39	1966	1156	07154144	00456573
40	670	2672	45367715	20772116
41	4130	6043	46775773	04657766
42	53	2862	37123271	11652043
43	4830	180	34054132	63673657
44	182	2663	36632600	06140620
45	2181	6940	43776172	42103455
46	2006	1645	13675272	71143561
47	1080	1582	53755564	07122624
48	2288	951	60621674	32065524
49	2027	6878	22415634	47205733
50	271	7701	37363473	71732000
51	915	1823	77262176	11057010
52	497	2391	57132462	60447016
53	139	2606	13314107	77551540
54	3693	822	54474504	54256322
55	2054	6403	76023074	61777241
56	4342	239	60652454	37175533
57	3342	442	31371623	00254400
58	2592	6769	52134040	51277171
59	1007	2560	41013755	57767521
60	310	2502	20323763	60063316
61	4203	5072	52445270	12771226
62	455	7268	50735662	51142373
63	4318	341	27571255	47160627

表 8 B1C 导频分量的主码参数

PRN 号	相位差(τ)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
1	796	7575	71676756	13053205
2	156	2369	60334021	46604773

表 8 (续)

PRN 号	相位差(w)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
3	4198	5688	24562714	60007065
4	3941	539	61011650	23616424
5	1374	2270	67337730	66243127
6	1338	7306	23762642	33630334
7	1833	6457	25365366	43456307
8	2521	6254	57226722	76521063
9	3175	5644	72643175	52465264
10	168	7119	00236125	76142064
11	2715	1402	12071371	60232627
12	4408	5557	61136116	05607727
13	3160	5764	36261215	77737367
14	2796	1073	13607013	16031533
15	459	7001	31010541	55416670
16	3594	5910	73163062	33076260
17	4813	10060	30250537	73355574
18	586	2710	56226421	42437243
19	1428	1546	26205736	66470710
20	2371	6887	02450570	54366756
21	2285	1883	66511327	23666556
22	3377	5613	06323465	74622250
23	4965	5062	10633350	16402734
24	3779	1038	10544206	54230354
25	4547	10170	43714115	37167223
26	1646	6484	55641056	56136734
27	1430	1718	26572456	62211315
28	607	2535	75123401	40615033
29	2118	1158	70041254	63213062
30	4709	526	53034467	03066540
31	1149	7331	50733517	30062510
32	3283	5844	73077145	34360276
33	2473	6423	55454316	45431517
34	1006	6968	37137206	47647044
35	3670	1280	45724432	33773217

表 8 (续)

PRN 号	相位差(ω)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
36	1817	1838	55560467	77620561
37	771	1989	13467065	17327352
38	2173	6468	24245150	62223375
39	740	2091	22265044	67665257
40	1433	1581	10003471	27515010
41	2458	1453	36537736	37705710
42	3459	6252	57706617	76736116
43	2155	7122	76411007	77202566
44	1205	7711	61643153	25334277
45	413	7216	50125760	70220333
46	874	2113	66657234	22376763
47	2463	1095	01350500	31043217
48	1106	1628	43621551	20166102
49	1590	1713	42435620	16423062
50	3873	6102	74327566	31245527
51	4026	6123	44553226	37160613
52	4272	6070	52231514	03414402
53	3556	1115	46576047	04003162
54	128	8047	46312270	54703562
55	1200	6795	04717127	25225202
56	130	2575	50407031	31643432
57	4494	53	10044104	27063234
58	1871	1729	36610123	40756155
59	3073	6388	73470741	24774305
60	4386	682	24072445	51507057
61	4098	5565	07765425	12225744
62	1923	7160	32242545	62104320
63	1176	2277	03210227	56250500

6.2.2 B1C 信号子码

B1C 导频分量的子码码长为 1 800,由长度为 3 607 的 Weil 码通过截断得到,生成方式与主码相同, ω 取值范围是 1~1 803。

B1C 导频分量子码的具体参数见表 9。表 9 中,头 24 个码片和末尾 24 个码片用八进制表示,最高有效位(MSB)先传。

表 9 B1C 导频分量码具体参数

PRN 号	相位差(w)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
1	269	1889	27516364	67377026
2	1448	1268	56523173	22276405
3	1028	1593	13575116	64256064
4	1324	1186	46450720	22541050
5	822	1239	12131561	65326055
6	5	1930	17464233	72132153
7	155	176	65053061	04514276
8	458	1696	71707375	63530655
9	310	26	34213032	35460510
10	959	1344	46160454	71144703
11	1238	1271	42153002	45741561
12	1180	1182	23004216	34642255
13	1288	1381	75723150	24051066
14	334	1604	31622150	02232734
15	885	1333	77044051	16722614
16	1362	1185	57236013	04521371
17	181	31	63564466	62033045
18	1648	704	70454263	21634063
19	838	1190	14276724	64030307
20	313	1646	34631517	36355573
21	750	1385	66647441	22662277
22	225	113	56655305	07135537
23	1477	860	44120321	13737416
24	309	1656	01401156	77676406
25	108	1921	71446113	33352240
26	1457	1173	65511011	24006552
27	149	1928	23206551	20557017
28	322	57	77770161	14726030
29	271	150	74540673	17203546
30	576	1214	71611373	23731232
31	1103	1148	37057206	37773355
32	450	1458	23025164	41547173
33	399	1519	41327640	70714166

表 9 (续)

PRN 号	相位差(τ)	截取点(p)	头 24 个码片 (八进制)	末尾 24 个码片 (八进制)
34	241	1635	61120023	46232706
35	1045	1257	06234040	37305130
36	164	1687	74425523	00744320
37	513	1382	30506176	07273204
38	687	1514	42154245	43674256
39	422	1	11240471	71100451
40	303	1583	32430440	02111760
41	324	1806	45423343	17414124
42	495	1664	04254573	55250612
43	725	1338	00100444	43330066
44	780	1111	10223615	50630424
45	367	1706	47340430	06777411
46	882	1543	65721741	51654600
47	631	1813	56006024	65061571
48	37	228	42262216	27652771
49	647	2871	02226642	74310663
50	1043	2884	30472126	75564321
51	24	1823	44032145	72312644
52	120	75	54551571	06432203
53	134	11	40710042	74277066
54	136	63	01560736	51754340
55	158	1937	11725354	54647123
56	214	22	47676432	11456125
57	335	1768	25530310	66634346
58	340	1526	34717545	61553336
59	661	1402	51512234	40357216
60	889	1445	01645770	63375367
61	929	1680	05363453	73263151
62	1002	1290	76720135	37304627
63	1149	1245	24724407	27051216

6.2.3 非标准码

卫星可通过切换至非标准码,防止用户接收和使用异常信号。用户不使用非标准码,这里不对其进行具体说明。

7 导航电文结构

7.1 导航电文概述

7.1.1 导航电文类型

B1C 信号采用 B-CNAV1 电文格式。

7.1.2 校验码

B-CNAV1 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(15):

$$g(x) = \sum_{i=0}^{24} g_i x^i \quad \dots\dots\dots (15)$$

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(16)。

$$g(x) = (1+x)p(x) \quad \dots\dots\dots (16)$$

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 $m_i (i=1 \sim k)$ 多项式见公式(17):

$$m(x) = m_k + m_{k-1}x + m_{k-2}x^2 + \dots + m_1x^{k-1} \quad \dots\dots\dots (17)$$

多项式 $m(x)x^{24}$ 除以生成多项式 $g(x)$,得到余式见公式(18):

$$R(x) = p_{24} + p_{23}x + p_{22}x^2 + \dots + p_1x^{23} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

p_1, p_2, \dots, 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-CNAV1 导航电文

7.2.1 基本描述

B-CNAV1 导航电文在 B1C 信号中播发,电文数据调制在 B1C 数据分量上。每帧电文长度为 1 800 符号位,符号速率为 100 sps,播发周期为 18 s。基本的帧结构定义见图 2。

纠错编码后:

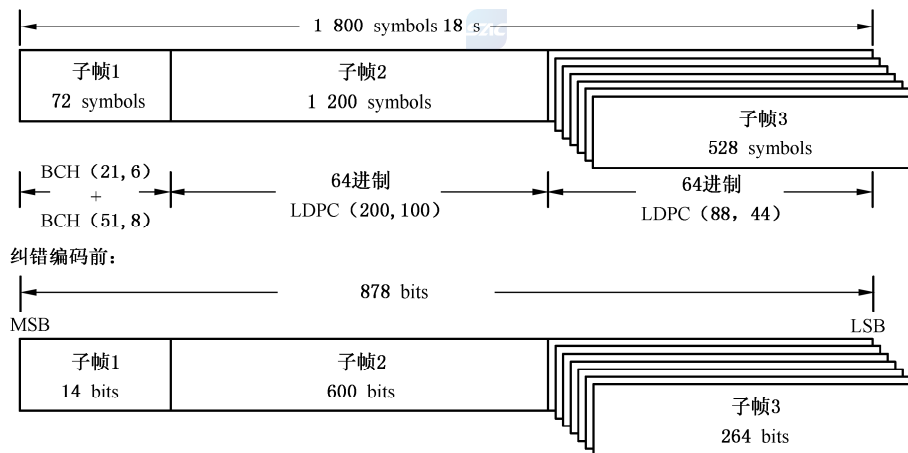


图 2 B-CNAV1 帧结构

每帧电文由 3 个子帧组成,各子帧描述如下:

- a) 子帧 1 在纠错编码前的长度为 14 比特,包括 PRN 号和小时内秒计数(SOH)。采用 BCH(21,6)+BCH(51,8)编码后,长度为 72 符号位。具体编码方案和编码参数见 7.2.2。
- b) 子帧 2 在纠错编码前的长度为 600 比特,包括系统时间参数、电文数据版本标识、星历参数、钟差参数、群延迟修正参数等信息。采用 64 进制 LDPC(200,100)编码后,长度为 1 200 符号位。具体编码方案和编码参数见 7.2.2。
- c) 子帧 3 在纠错编码前的长度为 264 比特,分为多个页面,包括电离层延迟改正模型参数、地球定向参数(EOP)、BDT-UTC 时间同步参数、BGTO 参数、中等精度历书、简约历书、卫星健康状况、卫星完好性状态标识、空间信号精度指数、空间信号监测精度指数等信息。采用 64 进制 LDPC(88,44)编码后,长度为 528 符号位。具体编码方案和编码参数见 7.2.2。
- d) 子帧 2 与子帧 3 经 LDPC 编码后,再进行交织,交织方式见 7.2.2.4。

7.2.2 编码方案和编码参数

7.2.2.1 BCH(21,6)+BCH(51,8)

子帧 1 采用 BCH(21,6)+BCH(51,8)进行编码,其中高 6 位进行 BCH(21,6)编码,低 8 位进行 BCH(51,8)编码。编码后,子帧 1 长度为 72 符号位。BCH 编码生成多项式见表 10。

表 10 BCH 编码生成多项式

BCH 编码	编码特性			可选生成多项式 $g(x)$
	n	k	t	
(21,6)	21	6	3	$x^6+x^4+x^2+x+1$
(51,8)	51	8	11	$x^8+x^7+x^4+x^3+x^2+x+1$

以 k 级寄存器实现上述 BCH 编码器电路如图 3 所示。其中,门 1 在前 k 个时钟周期闭合,之后断开;门 2 在前 k 个周期内断开,之后闭合。

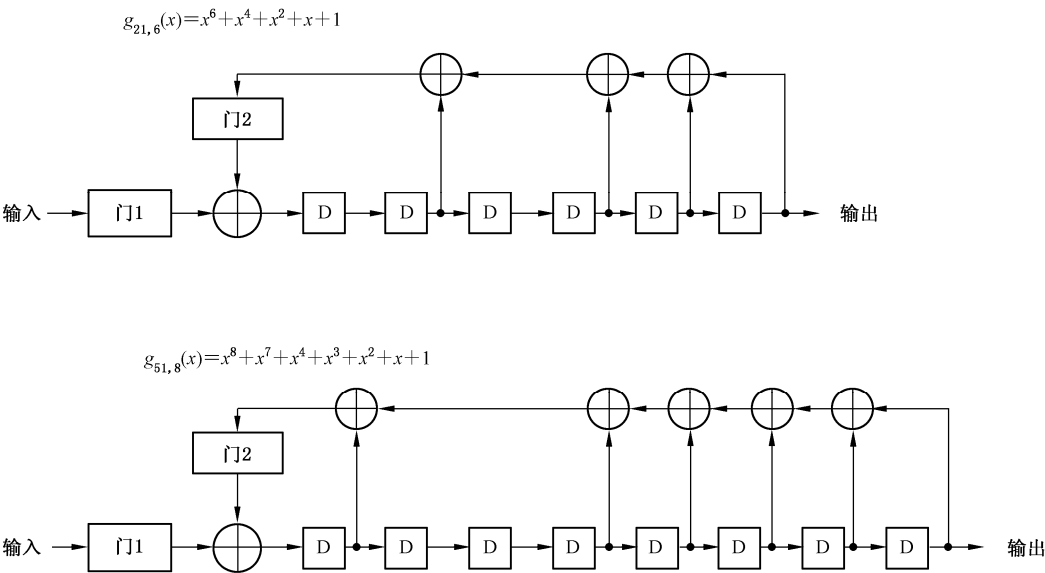


图 3 BCH 编码器电路示意图

7.2.2.2 64 进制 LDPC(200,100)

子帧 2 采用 64 进制 LDPC(200,100)编码,其每个码字符号由 6 比特构成,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(例如,符号“0”对应二进制向量[000000],符号“1”对应二进制向量[000001])。信息长度 $k=100$ 码字符号,即 600 比特。其校验矩阵是一个 100×200 稀疏矩阵 $\mathbf{H}_{100,200}$,定义于本原多项式为 $p(x)=1+x+x^6$ 的有限域 $GF(2^6)$,前 100×100 部分对应信息符号,后 100×100 部分对应校验符号,其非零元素的位置定义如下:

$$\mathbf{H}_{100,200, \text{index}} =$$

[11	62	102	150	9	60	100	148	0	51	142	197	22	80	116	154
4	90	131	177	47	95	138	191	51	79	146	195	44	75	142	190
13	57	135	198	24	65	120	173	6	88	129	179	7	89	130	176
6	58	106	158	8	60	108	160	44	92	139	188	4	56	104	156
10	61	101	149	39	87	123	168	15	67	105	167	50	78	145	194
17	98	151	187	46	94	137	190	14	66	104	166	7	59	107	159
21	83	119	153	31	87	114	167	2	49	140	199	12	64	106	164
40	53	132	159	19	96	149	185	16	68	112	168	14	58	132	199
34	69	125	162	23	75	119	175	42	96	144	192	8	63	103	151
23	81	117	155	24	93	111	182	20	72	116	172	17	69	113	169
34	82	130	182	1	53	101	153	46	73	140	188	13	65	107	165
2	54	102	154	18	70	114	170	26	67	122	175	29	77	125	177
36	84	120	169	25	94	108	183	39	89	137	185	21	73	117	173
28	76	124	176	36	90	138	186	33	68	124	161	12	56	134	197
29	85	112	165	45	93	136	189	27	64	123	172	28	84	115	164
25	66	121	174	37	85	121	170	3	50	141	196	48	76	147	192
35	70	126	163	32	80	128	180	0	52	100	152	43	52	135	158
35	83	131	183	10	62	110	162	19	71	115	171	15	59	133	196
33	81	129	181	41	54	133	156	20	82	118	152	38	86	122	171
30	78	126	178	9	61	109	161	26	95	109	180	45	72	143	191
1	48	143	198	40	98	146	194	18	99	148	184	5	57	105	157
41	99	147	195	31	79	127	179	3	55	103	155	22	74	118	174
37	91	139	187	5	91	128	178	30	86	113	166	43	97	145	193
16	97	150	186	11	63	111	163	32	71	127	160	42	55	134	157
38	88	136	184	47	74	141	189	49	77	144	193	27	92	110	181]

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,如下所示:

$$\mathbf{H}_{100,200,\text{element}} =$$

[35	13	51	60	1	44	53	24	1	45	15	6	45	15	6	1
1	44	53	24	1	45	15	6	35	46	56	15	6	1	45	15
15	6	1	45	44	53	24	1	24	1	44	30	1	45	15	6
30	24	1	44	24	1	44	30	45	15	6	1	17	38	49	11
24	1	44	30	24	1	44	53	24	1	44	53	30	24	1	44
33	42	14	24	33	42	14	24	45	15	6	1	1	45	15	6
30	24	1	44	24	1	44	53	1	44	30	24	57	25	9	41
1	45	15	6	1	45	15	6	42	36	12	57	6	1	45	15
24	1	44	53	24	1	44	30	1	45	15	6	1	45	15	6
44	53	24	1	30	24	1	44	1	44	30	24	53	24	1	44
1	44	53	24	27	28	30	31	53	24	1	44	24	1	44	30
45	15	6	1	30	24	1	44	1	45	15	6	26	22	14	2
35	13	18	60	45	15	6	1	30	1	44	7	6	1	45	15
6	1	45	15	53	24	1	44	24	1	44	53	30	24	1	44
1	44	30	24	44	53	24	1	53	24	1	44	44	30	24	1
30	24	1	44	1	44	30	24	1	44	30	24	41	16	29	51
1	44	30	24	38	23	22	7	44	53	24	1	1	45	15	6
30	24	1	44	53	24	1	44	6	1	45	15	24	1	44	53
35	46	56	15	5	33	42	14	54	7	38	23	1	45	15	6
44	30	24	1	6	1	45	15	53	24	1	44	44	53	24	1
1	44	53	24	1	44	30	24	44	30	24	1	1	44	53	24
45	15	6	1	6	1	45	15	1	44	53	24	42	47	37	32
51	60	35	13	29	28	30	31	6	1	45	15	24	1	44	53
44	53	24	1	44	30	24	1	38	49	11	17	44	30	24	1
24	1	44	30	24	1	44	30	1	44	53	24	53	24	1	44]

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。 $\mathbf{H}_{100,200}$ 的读取流程如图4所示。

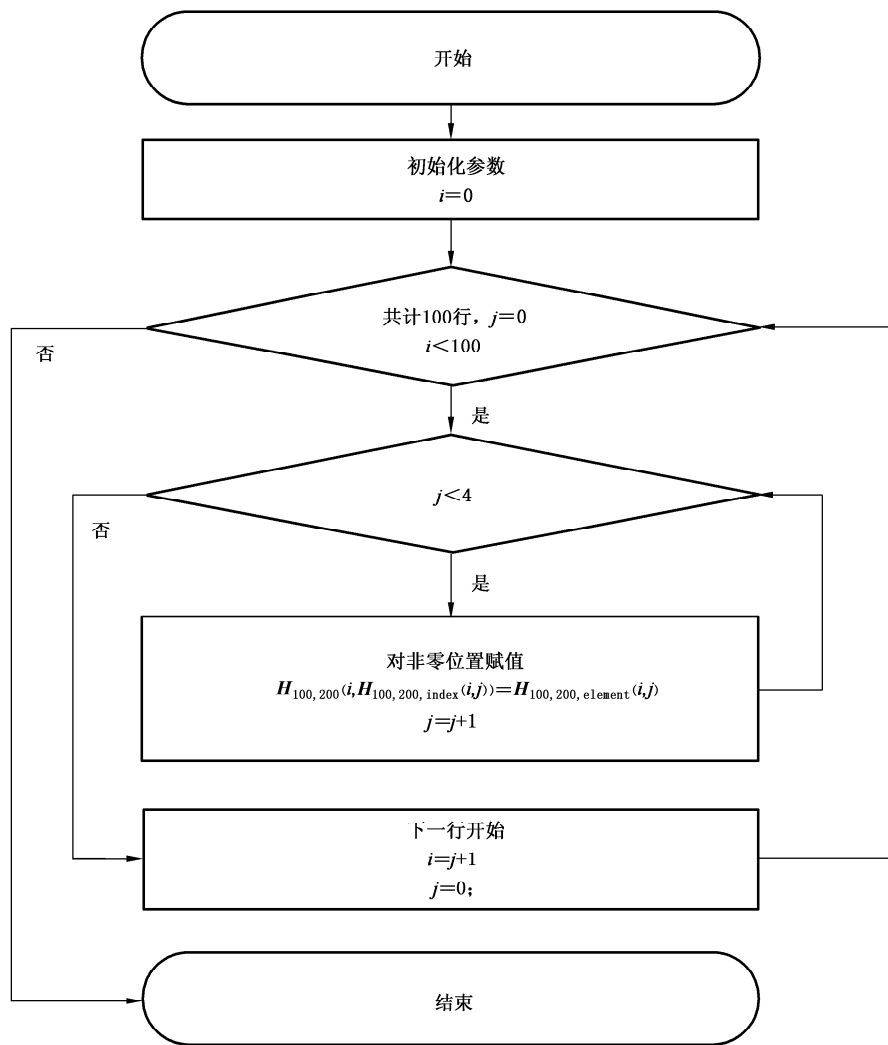


图 4 $H_{100,200}$ 读取流程图

编译码方法及示例参见附录 A。

7.2.2.3 64 进制 LDPC(88,44)

子帧 3 采用 64 进制 LDPC(88,44) 编码,其每个码字符号同样由 6 比特构成,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 $k=44$ 码字符号,即 264 比特。其校验矩阵是一个 44×88 稀疏矩阵 $H_{44,88}$,定义于本原多项式为 $p(x)=1+x+x^6$ 的有限域 $GF(2^6)$,前 44×44 部分对应信息符号,后 44×44 部分对应校验符号,其非零元素的位置定义如下:

$H_{44,88,index} =$

[14	35	56	70	11	29	55	73	13	39	53	69	15	34	57	71
1	27	45	54	23	41	63	87	2	20	46	68	6	24	50	61
2	26	61	79	9	33	59	77	4	30	48	74	22	42	59	76
12	38	52	68	23	43	58	77	19	21	63	64	11	25	65	82

17	39	44	75	9	35	49	72	19	29	66	84	13	36	56	82
17	43	67	81	22	40	62	86	3	21	47	69	10	24	64	83
0	37	70	86	5	31	49	75	4	40	53	84	5	41	52	85
18	28	67	85	0	26	44	55	10	28	54	72	7	30	50	81
1	36	71	87	16	38	45	74	8	34	48	73	8	32	58	76
12	37	57	83	6	31	51	80	15	33	47	79	16	42	66	80
7	25	51	60	3	27	60	78	14	32	46	78	18	20	62	65]

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,如下所示:

$H_{44,88, \text{element}} =$

[30	24	1	44	24	1	44	30	40	32	61	18	53	24	1	44
51	60	35	13	18	15	32	61	15	6	1	45	30	24	1	44
6	1	45	15	45	15	6	1	1	45	15	6	1	44	53	24
24	1	44	53	44	30	24	1	34	33	45	36	55	9	34	3
1	44	53	24	61	47	20	8	53	24	1	44	15	6	1	45
13	18	60	35	45	15	6	1	24	1	44	53	37	32	52	47
44	53	24	1	39	36	34	33	44	35	31	50	12	25	36	14
15	35	46	56	53	24	1	44	1	44	53	24	24	1	44	30
44	30	24	1	15	6	1	45	30	24	1	44	2	50	22	14
33	42	14	5	34	3	55	9	44	35	61	50	15	6	1	45
45	15	6	1	1	44	30	24	6	1	45	15	1	44	53	24]

$H_{44,88}$ 的读取规则类似于 $H_{100,200}$ 。编译码方法及示例参见附录 A。

7.2.2.4 交织

子帧 2 和子帧 3 各自经过 LDPC 编码后,分别包含 1 200 符号位和 528 符号位,再采用块交织方式进行交织。具体的块交织方式可通过一个 $M=36$ 行和 $N=48$ 列的二维数组来实现。块交织过程如图 5 所示。

编码后的子帧 2 和子帧 3 采用交错方式按行依次写入上述二维数组,高位先写。每写入两行子帧 2 数据后,再写入一行子帧 3 数据,重复该过程,直到第 33 行写入子帧 3 数据(子帧 3 数据写入完毕),最后三行写入余下的子帧 2 数据(子帧 2 数据写入完毕)。

全部 1 728 符号位(子帧 2 和子帧 3)被写入二维数组后,再按列依次读出。从第一列开始,从上往下读出,再读出第二列数据,重复该过程,直到最后一列数据被读出。至此,交织过程完成。

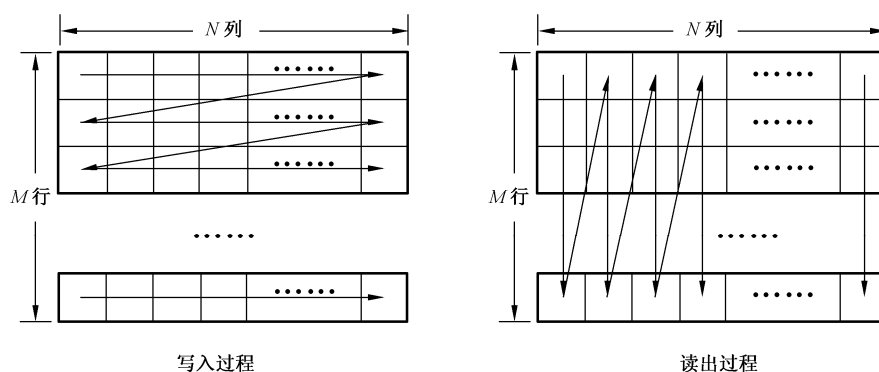


图5 块交织过程示意图

7.2.3 编排格式

7.2.3.1 子帧 1

子帧 1 包含 6 比特的 PRN 号和 8 比特的小时内秒计数(SOH),共 14 比特。子帧 1 的编排格式如图 6 所示。

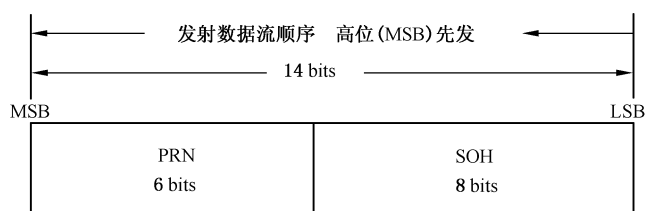


图6 B-CNAV1 子帧 1 信息编排格式

PRN 参数定义见 8.1,SOH 参数定义见 8.3。

7.2.3.2 子帧 2

子帧 2 包含系统时间参数、电文数据版本标识、星历参数、钟差参数、群延迟修正参数等信息,共 600 比特。子帧 2 的完整编排格式如图 7 所示。其中,“星历 I”“星历 II”“钟差参数”均为一组参数构成的数据块,“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 6.2.2。

子帧 2 的前 576 比特参与循环冗余校验计算,最后 24 比特为校验结果。

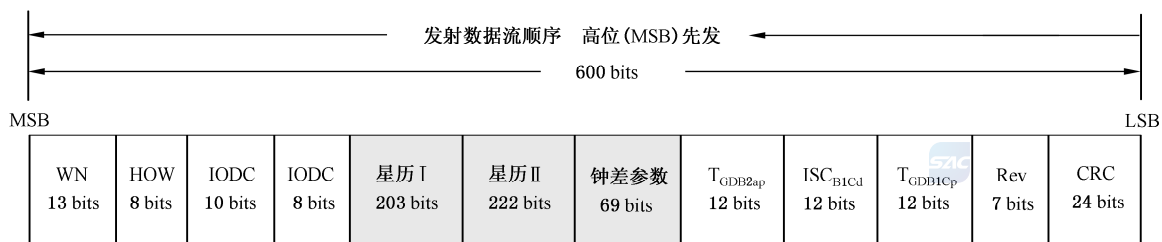


图7 B-CNAV1 子帧 2 信息编排格式

子帧 2 中各参数说明见表 11。

表 11 子帧 2 各参数说明

序号	电文参数	参数定义及描述
1	整周计数(WN)	见 8.3
2	周内小时计数(HOW)	见 8.3
3	星历参数版本标识(IODE)	见 8.4.1
4	钟差参数版本标识(IODC)	见 8.4.2
5	钟差参数	见 8.5
6	T_{GDB2ap}	见 8.6
7	ISC_{B1Cd}	见 8.6
8	T_{GDB1Cp}	见 8.6
9	星历参数(星历 I、星历 II)	见 8.7
10	循环冗余校验(CRC)	见 7.1.2

7.2.3.3 子帧 3

子帧 3 的帧结构如图 8 所示。子帧 3 信息长度为 264 比特,最高 6 比特为页面类型(PageID),最后 24 比特为循环冗余校验位,其余 234 比特为电文数据。页面类型和电文数据参与循环冗余校验计算。

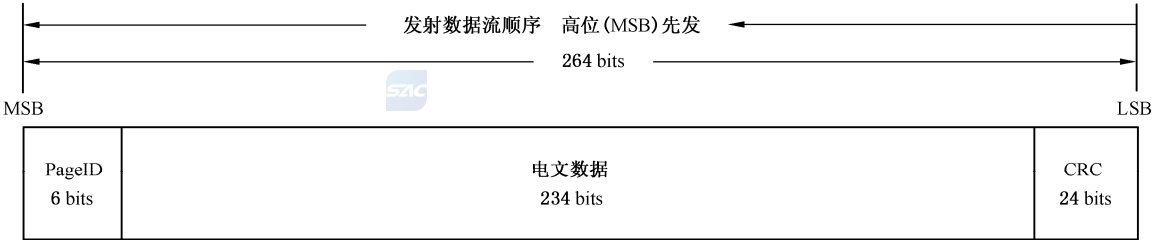


图 8 B-CNAV1 子帧 3 的帧结构

子帧 3 最多可定义 63 种页面类型,当前定义了 4 个有效页面类型,分别为页面类型 1、2、3、4,其编排格式如图 9~图 12 所示。其中,“ SISAI_{oc} ”“电离层延迟改正模型参数”“BDT-UTC 时间同步参数”“简约历书”“中等精度历书”“EOP 参数”“BGTO 参数”均为一组参数构成的数据块。各数据块的详细编排格式见 6.2.2。

子帧 3 页面类型的播发顺序可动态调整。用户接收机每次接收到子帧 3 时,均应识别其页面类型(PageID)。

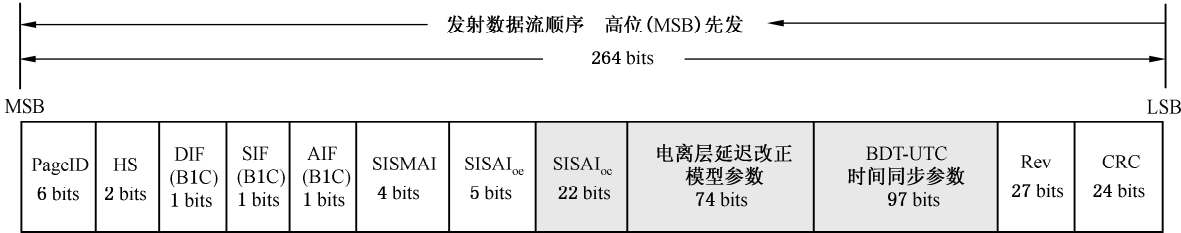


图 9 B-CNAV1 子帧 3 页面类型 1 信息编排格式

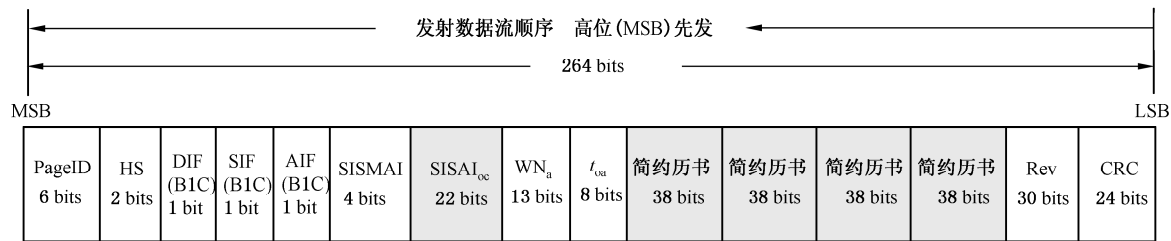


图 10 B-CNAV1 子帧 3 页面类型 2 信息编排格式

注：每个页面播发 4 颗卫星的简约历书，WN_a 和 t_{os} 为简约历书对应的参考时间。

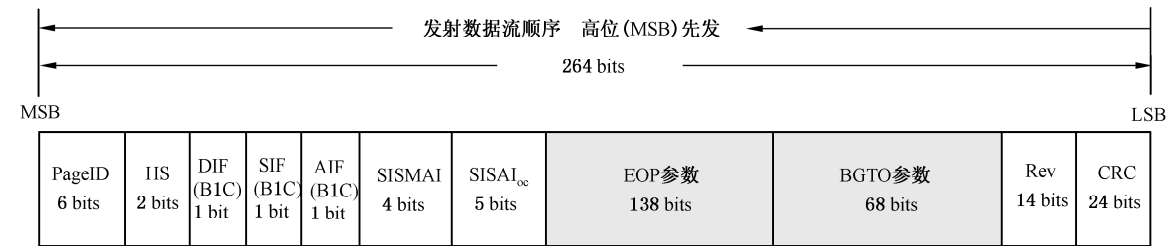


图 11 B-CNAV1 子帧 3 页面类型 3 信息编排格式

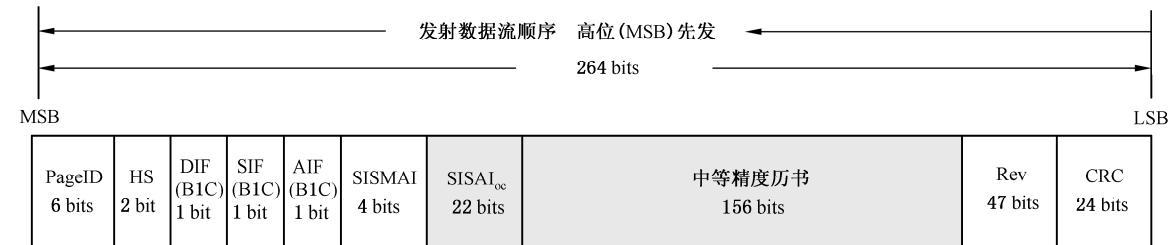


图 12 B-CNAV1 子帧 3 页面类型 4 信息编排格式

子帧 3 中各参数说明见表 12。

表 12 子帧 3 各参数说明

序号	电文参数	参数定义及描述
1	页面类型 (PageID)	见 8.2
2	电离层延迟改正模型参数	见 8.8
3	中等精度历书	见 8.9
4	历书参考时刻周计数 (WN _a)	见 8.10
5	历书参考时刻 (t _{os})	见 8.10
6	简约历书	见 8.10
7	EOP 参数	见 8.11
8	BDT-UTC 时间同步参数	见 8.12
9	BGTO 参数	见 8.13

表 12（续）

序号	电文参数	参数定义及描述
10	卫星健康状态(HS)	见 8.14
11	电文完好性标识(DIF)	见 8.15
12	信号完好性标识(SIF)	见 8.15
13	系统告警标识(AIF)	见 8.15
14	卫星轨道的切向和法向精度指数(SISAI _{oc})	见 8.16
15	卫星轨道径向和卫星钟差精度指数(SISAI _{oc})	见 8.16
16	空间信号监测精度指数(SISMAI)	见 8.17
17	循环冗余检验(CRC)	见 7.1.2

7.2.3.4 数据块

“星历 I”“星历 II”“钟差参数”“SISAI_{oc}”“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”等 10 类数据块的详细编排格式如图 13～图 22 所示。

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 13 星历 I（共 203 比特）

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 14 星历 II（共 222 比特）

MSB

LSB

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

图 15 钟差参数（共 69 比特）

MSB

LSB

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

图 16 SISAI_{oc}（共 22 比特）

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 17 电离层延迟改正模型参数(共 74 比特)

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 18 BDT-UTC 时间同步参数(共 97 比特)

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 19 简约历书(共 38 比特)

MSB						LSB
t_{EOP}	PM_X	\dot{PM}_X	PM_Y	\dot{PM}_Y	$\Delta U/T1$	$\dot{\Delta U/T1}$
16 bits	21 bits	15 bits	21 bits	15 bits	31 bits	19 bits

图 20 EOP 参数(共 138 比特)

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 21 BGTO 参数(共 68 比特)

MSB													LSB
PRN _a	SatType	WN _a	t_{ea}	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 22 中等精度历书(共 156 比特)

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 PRN 号为 6 比特,无符号整型,有效范围为 1~63。

8.2 页面类型

页面类型(PageID)用于标识 B-CNAV1 子帧 3 的页面,共 6 比特,无符号整型。其定义见表 13。

表 13 页面类型定义

PageID(二进制)	页面类型
000000	无效
000001	页面类型 1
000010	页面类型 2
000011	页面类型 3
000100	页面类型 4
其他	预留

8.3 系统时间参数

B-CNAV1 导航电文播发的系统时间参数包括小时内秒计数(SOH)、周内小时计数(HOW)、整周计数(WN),各参数定义及特性说明见表 14。



表 14 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
SOH	小时内秒计数	8	18	0~3 582	s
HOW	周内小时计数	8	1	0~167	h
WN	整周计数	13	1	0~8 191	周

小时内秒计数(SOH)在 B-CNAV1 子帧 1 中播发。SOH 对应的秒时刻表示本子帧 1 起始处第一个脉冲上升沿所对应的秒时刻。SOH 在北斗时每个整点时刻从零开始计数,在每个小时结束(即下一小时开始)时刻被重置为零。

周内小时计数(HOW)在 B-CNAV1 子帧 2 中播发。HOW 表示在当前周内的小时计数,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-CNAV1 子帧 2 中播发,共 13 比特。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 电文数据版本标识

8.4.1 星历参数版本标识(IODE)

星历参数版本标识(IODE)共 8 比特,其含义包括如下两方面:

- a) IODE 是一组星历参数的版本标识。当星历参数中任意一个参数更新时,IODE 也将更新。用户可通过 IODE 的变化来判断星历参数是否发生变化。
- b) IODE 数值反映本组星历数据龄期的范围。星历数据龄期是星历参数的外推时间间隔,定义为本组星历参数参考时刻(t_{oc})与计算星历参数所作测量的最后观测时刻之差。IODC 数值与星历数据龄期的对应关系见表 15。

表 15 IODE 数值与星历数据龄期的对应关系

IODC 数值	星历数据龄期
0~59	小于 12 h
60~119	12 h~24 h
120~179	1 d~7 d
180~239	预留
240~255	超过 7 d

8.4.2 钟差参数版本标识 (IODC)

钟差参数版本标识(IODC)共 10 比特。其含义包括如下两方面：

- IODC 是一组钟差参数的版本标识。当钟差参数中任意一个参数更新时,IODC 也将更新。用户可通过 IODC 的变化来判断钟差参数是否发生变化。
- IODC 数值反映本组钟差数据龄期的范围。钟差数据龄期是钟差参数的外推时间间隔,定义为本组钟差参数参考时刻(t_{oc})与计算钟差参数所作测量的最后观测时刻之差。钟差数据龄期的范围由 IODC 的高 2 比特和低 8 比特共同标识。其对应关系见表 16。

表 16 IODC 数值与钟差数据龄期的对应关系

IODC 高 2 比特	IODC 低 8 比特	钟差数据龄期
0	0~59	小于 12 h
	60~119	12 h~24 h
	120~179	1 d~7 d
	180~239	预留
	240~255	超过 7 d
1	0~59	小于 12 h
	60~119	小于 12 h
	120~179	小于 1 d
	180~239	预留
	240~255	不超过 7 d
2	0~59	超过 12 h
	60~119	超过 24 h
	120~179	超过 7 d
	180~239	预留
	240~255	超过 7 d
3	预留	预留

8.4.3 IODE 与 IODC 使用约束

对于一组匹配的星历参数和钟差参数而言,IODC 与 IODE 低 8 比特保持一致,二者的更新将同步

进行。当用户接收到的 IODE 与 IODC 低 8 比特相同时,表示本组星历、钟差参数匹配,用户可正常使用该组星历、钟差参数,IODE 可视为该组星历、钟差参数的版本标识。

在星历、钟差参数更新过程中,由于电文播发时延,用户收到的 IODE 与 IODC 低 8 比特可能不一致。此时用户应使用原有版本标识一致的星历、钟差参数,直到 IODE 与 IODC 低 8 比特更新一致后,使用新的星历、钟差参数。IODE、IODC 的值在 1 d 内不重复(数据龄期大于 7 d 的情况除外)。

8.5 钟差参数

8.5.1 参数说明

一组钟差参数包括 t_{oc} 、 a_0 、 a_1 、 a_2 ,由 IODC 标识,钟差参数定义及特性说明见表 17。

表 17 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	a_0	卫星钟偏差系数	25 ^a	2^{-34}	—	s
3	a_1	卫星钟漂移系数	22 ^a	2^{-50}	—	s/s
4	a_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

接收机用户可通过公式(19)计算出信号发射时刻的 BDT 时间:

$$t = t_{sv} - \Delta t_{sv} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

t ——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_{sv} ——卫星测距码相位时间偏移,单位为秒(s)。由公式(20)给出:

$$\Delta t_{sv} = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

t ——可用 t_{sv} 替代;

Δt_r ——相对论校正项,单位为秒(s),其值计算方式见公式(21):

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin E_k \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$F = -2\mu^{1/2}/C^2$;

$\mu = 3.986\ 004\ 418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ——地心引力常数;

$C = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$ ——光速;

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。

8.6 群延迟修正参数

8.6.1 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 a_0 和群延迟修正参数共同补偿。导航电文播发的 a_0 包含了 B3I 信号的星上设备群延迟。参数的定义及特性说明见表 18。

注：星上设备群延迟 T_{GDB1Cp} 和 T_{GDB2ap} 在 B-CNAV1 电文中播发，以 B3I 信号为基准，分别用于补偿 B1C 导频分量、B2a 导频分量的时延差。此外，频内时延修正项 ISC_{B1Cd} 在 B-CNAV1 电文中播发，用于补偿 B1C 数据分量与 B1C 导频分量间的时延差。

表 18 群延迟参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	T_{GDB1Cp}	B1C 导频分量时延差	12 ^a	2^{-34}	—	s
2	T_{GDB2ap}	B2a 导频分量时延差	12 ^a	2^{-34}	—	s
3	ISC_{B1Cd}	B1C 数据分量相对于 B1C 导频分量的时延修正项	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。						

8.6.2 用户算法

用户算法包括如下内容：

a) B1C 导频分量延迟修正

对于使用 B1C 导频分量进行测距的单频接收机用户，码相位需进一步修正见公式(22)：

$$(\Delta t_{\text{SV}})_{\text{B1Cp}} = \Delta t_{\text{SV}} - T_{\text{GDB1Cp}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

b) B1C 数据分量延迟修正

对于使用 B1C 数据分量进行测距的单频接收机用户，码相位需进一步修正见公式(23)：

$$(\Delta t_{\text{SV}})_{\text{B1Cd}} = \Delta t_{\text{SV}} - T_{\text{GDB1Cp}} - \text{ISC}_{\text{B1Cd}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中：

Δt_{SV} ——通过钟差参数计算得到的卫星测距码相位时间偏移，具体计算方法见 8.5。

8.7 星历参数

8.7.1 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，由 IODE 进行标识。星历参数定义及特性说明见表 19。

表 19 星历参数定义及说明

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
1	t_{oe}	星历参考时刻	11	300	0~604 500	s
2	SatType ^d	卫星轨道类型	2	—	—	—

表 19 (续)

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
3	ΔA^c	参考时刻长半轴相对于参考值的偏差	26 ^a	2^{-9}	—	m
4	\dot{A}	长半轴变化率	25 ^a	2^{-21}	—	m/s
5	Δn_0	参考时刻卫星平均角速度与计算值之差	17 ^a	2^{-44}	—	π/s
6	$\dot{\Delta n}_0$	参考时刻卫星平均角速度与计算值之差的变化率	23 ^a	2^{-57}	—	π/s^2
7	M_0	参考时刻的平近点角	33 ^a	2^{-32}	—	π
8	e	偏心率	33	2^{-34}	—	无量纲
9	ω	近地点幅角	33 ^a	2^{-32}	—	π
10	Ω_0	周历元零时刻计算的升交点经度	33 ^a	2^{-32}	—	π
11	i_0	参考时刻的轨道倾角	33 ^a	2^{-32}	—	π
12	$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率	19 ^a	2^{-44}	—	π/s
13	\dot{i}_0	轨道倾角变化率	15 ^a	2^{-44}	—	π/s
14	C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项的振幅	16 ^a	2^{-30}	—	rad
15	C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项的振幅	16 ^a	2^{-30}	—	rad
16	C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项的振幅	24 ^a	2^{-8}	—	m
17	C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项的振幅	24 ^a	2^{-8}	—	m
18	C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项的振幅	21 ^a	2^{-30}	—	rad
19	C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项的振幅	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 $A_{\text{ref}}=279\,061\,00\text{m(MEO)}$, $A_{\text{ref}}=42\,162\,200\text{ m(IGSO/GEO)}$ 。 ^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。						

8.7.2 用户算法

用户接收机根据接收到的星历参数,可以计算相应卫星(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 20。

表 20 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
$t_k = t - t_{\text{oe}}^a$	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

表 20 (续)

公 式	说 明
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A_0^3}}$	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
$\varphi_k = \nu_k + \omega$	计算纬度幅角
$\begin{cases} \delta u_k = C_{us} \sin(2\varphi_k) + C_{uc} \cos(2\varphi_k) \\ \delta r_k = C_{rs} \sin(2\varphi_k) + C_{rc} \cos(2\varphi_k) \\ \delta i_k = C_{is} \sin(2\varphi_k) + C_{ic} \cos(2\varphi_k) \end{cases}$	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
$u_k = \varphi_k + \delta u_k$	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
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe}$	计算改正后的升交点经度
$\begin{cases} X_k = x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ Y_k = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ Z_k = y_k \sin i_k \end{cases}$	计算 MEO/IGSO 卫星在 BDCS 坐标系中的坐标
^a 表达式中, t 是信号发射时刻的 BDT 时间, 即修正信号传播时延后的系统时间。 t_k 是 t 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 $A_{\text{ref}} = 27\,906\,100 \text{ m (MEO)}$, $A_{\text{ref}} = 42\,162\,200 \text{ m (IGSO/GEO)}$ 。	

8.8 电离层延迟改正模型参数

8.8.1 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 21。对于使用 B1C 和 B2a 信号的双频用户, 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 21 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。

8.8.2 单频用户算法

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的具体计算方法见公式(24):

$$T_{ion} = M_F \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot \left[A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right] \quad \dots\dots\dots (24)$$

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(35);
- f ——当前信号对应的载波频率,单位为赫兹(Hz);
- $\alpha_i (i=1 \sim 9)$ ——电离层延迟改正模型参数(见表 21),单位为 TECu;
- $A_i (i=1 \sim 9)$ ——根据公式(29)计算得到的数值;
- A_0 ——根据公式(32)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(rad),其计算见公式(25):

$$\phi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{Re}{Re + H_{ion}} \cdot \cos E\right) \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- E ——卫星高度角,单位为弧度(rad);
- H_{ion} ——电离层薄层高度;
- Re ——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(26):

$$\begin{cases} \phi_g = \arcsin(\sin\phi_u \cdot \cos\psi + \cos\phi_u \cdot \sin\psi \cdot \cos A) \\ \lambda_g = \lambda_u + \arctan\left(\frac{\sin\psi \cdot \sin A \cdot \cos\phi_u}{\cos\psi - \sin\phi_u \cdot \sin\phi_g}\right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (26)$$

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,单位为弧度(rad)。

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(27):

$$\begin{cases} \varphi_m = \arcsin(\sin\varphi_M \cdot \sin\varphi_g + \cos\varphi_M \cdot \cos\varphi_g \cdot \cos(\lambda_g - \lambda_M)) \\ \lambda_m = \arctan\left(\frac{\cos\varphi_g \cdot \sin(\lambda_g - \lambda_M) \cdot \cos\varphi_M}{\sin\varphi_M \cdot \sin\varphi_m - \sin\varphi_g}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (27)$$

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(28):

$$\begin{cases} \varphi' = \varphi_m \\ \lambda' = \lambda_m - \arctan\left(\frac{\sin(S_{lon} - \lambda_M)}{\sin\varphi_M \cdot \cos(S_{lon} - \lambda_M)}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

式中:

S_{lon} ——平太阳地理经度,单位为弧度(rad);

计算公式为 $S_{lon} = \pi \cdot (1 - 2 \cdot (t - \text{int}(t)))$ 。其中, t 表示计算时刻,以约化儒略日(MJD)表示,单位为天(d); $\text{int}(\cdot)$ 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(29):

$$A_i = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_i|, |m_i|}(\sin\varphi') \cdot \cos(m_i \cdot \lambda') & m_i \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_i|, |m_i|}(\sin\varphi') \cdot \sin(-m_i \cdot \lambda') & m_i < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (29)$$

式中, n_i 和 m_i 对应的取值见表 22。

表 22 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' 根据公式(28)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(30):

$$\begin{cases} N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)! \cdot (2n+1) \cdot (2-\delta_{0,m})}{(n+m)!}} \\ \delta_{0,m} = \begin{cases} 1, m=0 \\ 0, m>0 \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (30)$$

$P_{n,m}$ 为标准的勒让德函数,其递推计算见公式(31):

$$\begin{cases} P_{n,m}(\sin\varphi') = (2n-1)!! \cdot (1 - (\sin\varphi')^2)^{n/2}, n=m \\ P_{n,m}(\sin\varphi') = \sin\varphi' \cdot (2m+1) \cdot P_{m,m}(\sin\varphi'), n=m+1 \\ P_{n,m}(\sin\varphi') = \frac{(2n-1) \cdot \sin\varphi' \cdot P_{n-1,m}(\sin\varphi') - (n+m-1) \cdot P_{n-2,m}(\sin\varphi')}{n-m}, \text{其他} \end{cases} \dots\dots (31)$$

式中, $(2n-1)!! = (2n-1) \cdot (2n-3) \cdots 1$, 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(32):

$$\begin{cases} A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j \cdot B_j, \\ B_j = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_j \cdot \lambda') & m_j \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_j \cdot \lambda') & m_j < 0 \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (32)$$

式中, n_j 及 m_j 的具体取值参见表 23, $\tilde{P}_{|n_j|, |m_j|}(\sin \varphi')$ 的计算参照公式(30)和公式(31); β_j ($j=1 \sim 17$) 由公式(33)计算得到:

$$\begin{cases} \beta_j = a_{0,j} + \sum_{k=1}^{12} (a_{k,j} \cdot \cos(\omega_k \cdot t_p) + b_{k,j} \cdot \sin(\omega_k \cdot t_p)) \\ \omega_k = \frac{2\pi}{T_k} \end{cases} \dots\dots\dots (33)$$

式中:

$a_{k,j}$ 与 $b_{k,j}$ ——表 23 中 BDGIM 模型的非发播系数, 单位为 TECu;

T_k ——表 23 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(34):

$$VTEC = A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \dots\dots\dots (34)$$

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(35):

$$M_F = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{Re}{Re + H_{ion}} \cdot \cos(E) \right]^2}} \dots\dots\dots (35)$$

式中, Re 、 H_{ion} 及 E 参数含义同式(25)。

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, 按照公式(24)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, 相关参数宜取值如下:

电离层薄层高度: $H_{ion} = 400$ km;

地球平均半径: $Re = 6\,378$ km;

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

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

表 23 BDGIM 模型的非发播系数及预报周期

编号	编号 j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	周期
k	n_j/m_j	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	T_k/d
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	—
1	$a_{k,j}$	-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	1
	$b_{k,j}$	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	
2	$a_{k,j}$	-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	
3	$a_{k,j}$	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	
4	$a_{k,j}$	-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	
5	$a_{k,j}$	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	
6	$a_{k,j}$	-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	
7	$a_{k,j}$	-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	
8	$a_{k,j}$	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	
9	$a_{k,j}$	-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	
10	$a_{k,j}$	-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	
11	$a_{k,j}$	-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	
12	$a_{k,j}$	-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	

8.8.3 双频用户算法

对于使用 B1C 和 B2a 信号的双频用户,采用双频无电离层组合伪距算法来修正电离层延迟的影响,计算方法如下:

a) 对于使用 B1C 导频分量和 B2a 导频分量的双频用户,计算方法见公式(36):

$$PR_{B1Cp-B2ap} = \frac{PR_{B2ap} - k_{12} \cdot PR_{B1Cp}}{1 - k_{12}} - \frac{C \cdot (T_{GDB2ap} - k_{12} \cdot T_{GDB1Cp})}{1 - k_{12}} \quad \dots\dots\dots (36)$$

b) 对于使用 B1C 导频分量和 B2a 数据分量的双频用户,计算方法见公式(37):

$$PR_{B1Cp-B2ad} = \frac{PR_{B2ad} - k_{12} \cdot PR_{B1Cp}}{1 - k_{12}} - \frac{C \cdot (T_{GDB2ap} + ISC_{B2ad} - k_{12} \cdot T_{GDB1Cp})}{1 - k_{12}} \dots\dots(37)$$

c) 对于使用 B1C 数据分量和 B2a 导频分量的双频用户,计算方法见公式(38):

$$PR_{B1Cd-B2ap} = \frac{PR_{B2ap} - k_{12} \cdot PR_{B1Cd}}{1 - k_{12}} - \frac{C \cdot (T_{GDB2ap} - k_{12} \cdot T_{GDB1Cp} - k_{12} \cdot ISC_{B1Cd})}{1 - k_{12}} \dots\dots(38)$$

d) 对于使用 B1C 数据分量和 B2a 数据分量的双频用户,计算方法见公式(39):

$$PR_{B1Cd-B2ad} = \frac{PR_{B2ad} - k_{12} \cdot PR_{B1Cd}}{1 - k_{12}} - \frac{C \cdot (T_{GDB2ap} + ISC_{B2ad} - k_{12} \cdot T_{GDB1Cp} - k_{12} \cdot ISC_{B1Cd})}{1 - k_{12}} \dots(39)$$

式中:

$$k_{12} = \left(\frac{1\ 575.42}{1\ 176.45} \right)^2 \quad \text{——与频率有关的因子;}$$

$PR_{B1Cp-B2ap}$ ——B1C 导频分量和 B2a 导频分量的双频无电离层组合伪距;

$PR_{B1Cp-B2ad}$ ——B1C 导频分量和 B2a 数据分量的双频无电离层组合伪距;

$PR_{B1Cd-B2ap}$ ——B1C 数据分量和 B2a 导频分量的双频无电离层组合伪距;

$PR_{B1Cd-B2ad}$ ——B1C 数据分量和 B2a 数据分量的双频无电离层组合伪距;

PR_{B1Cp} ——B1C 导频分量的观测伪距(经钟差修正但不经 T_{GDB1Cp} 修正);

PR_{B1Cd} ——B1C 数据分量的观测伪距(经钟差修正但不经 T_{GDB1Cp} 、 ISC_{B1Cd} 修正);

PR_{B2ap} ——B2a 导频分量的观测伪距(经钟差修正但不经 T_{GDB2ap} 修正);

PR_{B2ad} ——B2a 数据分量的观测伪距(经钟差修正但不经 T_{GDB2ap} 、 ISC_{B2ad} 修正);

T_{GDB1Cp} ——B1C 导频分量时延差;

T_{GDB2ap} ——B2a 导频分量时延差;

ISC_{B1Cd} ——B1C 数据分量相对于 B1C 导频分量的时延修正项;

ISC_{B2ad} ——B2a 数据分量相对于 B2a 导频分量的时延修正项;

$C = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s——光速。

8.9 中等精度历书

8.9.1 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 24。

表 24 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_{0a}	历书参考时刻	8	2^{12}	0~602112	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

表 24 (续)

序号	参数	定义	比特数	比例因子	有效范围 ^b	单位
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 比特,具体定义见表 25。

表 25 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
第 5~1 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。

8.9.2 用户算法

接收机用户可通过公式(40)计算出信号发射时刻的 BDT 时间:

$$t = t_{sv} - \Delta t_{sv} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

t ——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_{sv} ——卫星测距码相位时间偏移,单位为秒(s)。

卫星测距码相位时间偏移由公式(41)给出:

$$\Delta t_{sv} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oa}) \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中,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 26。

表 26 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
$t_k = t - t_{\text{on}}^{\text{a}}$	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
$\varphi_k = \nu_k + \omega$	计算纬度幅角
$r_k = A(1 - e \cos E_k)$	计算径向距离
$\begin{cases} x_k = r_k \cos \varphi_k \\ y_k = r_k \sin \varphi_k \end{cases}$	计算卫星在轨道平面内的坐标
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{\text{on}}$	计算改正后的升交点经度
$i = i_0 + \delta_i^{\text{b}}$	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 表达式中, t 是信号发射时刻的 BDT 时间, 即修正信号传播时延后的系统时间。t_k 是 t 和历书参考时刻 t_{on} 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 $604\ 800$; 而如果 $t_k < -302\ 400$, 就对 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>	

8.10 简约历书

8.10.1 参数说明

简约历书的参数定义及特性说明见表 27。

表 27 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	—	—	—

^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 δ_A 对应的参考值为 $A_{\text{ref}}=27\,906\,100\text{ m(MEO)}$, $A_{\text{ref}}=42\,162\,200\text{ m(IGSO/GEO)}$ 。

^d $\varphi_0=M_0+\omega$;相关参考值: $e=0$; $\delta_i=0$, $i=55^\circ$ (MEO/IGSO), $i=0^\circ$ (GEO)。

^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。

8.10.2 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_{oa})的定义及特性说明见表 28。

表 28 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_{oa}	历书参考时刻	8	2 ¹²	0~602 112	s

8.11 地球定向参数

8.11.1 参数说明

地球定向参数(EOP)的定义及特性说明见表 29。

表 29 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
$\dot{P}M_X$	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
$\dot{P}M_Y$	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。

8.11.2 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 30 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 30 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
注: t 是信号发射时刻的 BDT 时间。	

8.12 BDT-UTC 时间同步参数

8.12.1 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 31。

表 31 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。						

8.12.2 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(42)和公式(43):

$$t_{UTC} = (t_E - \Delta t_{UTC}) \bmod 86\,400 \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$\Delta t_{\text{UTC}} = \Delta t_{\text{LS}} + A_{0\text{UTC}} + A_{1\text{UTC}} [t_{\text{E}} - t_{\text{ot}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{\text{ot}})] + A_{2\text{UTC}} [t_{\text{E}} - t_{\text{ot}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{\text{ot}})]^2 \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中：

t_{E} ——用户估计的 BDT 时间。

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(44)和公式(45)：

$$t_{\text{UTC}} = W \bmod (86\,400 + \Delta t_{\text{LSF}} - \Delta t_{\text{LS}}) \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$W = [(t_{\text{E}} - \Delta t_{\text{UTC}} - 43\,200) \bmod 86\,400] + 43\,200 \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中：

Δt_{UTC} ——计算方法见公式(43)。

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(46)和公式(47)：

$$t_{\text{UTC}} = (t_{\text{E}} - \Delta t_{\text{UTC}}) \bmod 86\,400 \quad \dots\dots\dots (46)$$

$$\Delta t_{\text{UTC}} = \Delta t_{\text{LSF}} + A_{0\text{UTC}} + A_{1\text{UTC}} [t_{\text{E}} - t_{\text{ot}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{\text{ot}})] + A_{2\text{UTC}} [t_{\text{E}} - t_{\text{ot}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{\text{ot}})]^2 \quad \dots\dots\dots (47)$$

8.13 BGTO 参数

8.13.1 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 32。

表 32 BGTO 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	$\text{WN}_{0\text{BGTO}}$	参考时间周计数	13	1	—	周
3	$t_{0\text{BGTO}}$	参考时刻对应的周内时间	16	2^4	0~604 784	s
4	$A_{0\text{BGTO}}$	BDT 时标相对 GNSS 时标的偏差系数	16^a	2^{-35}	—	s
5	$A_{1\text{BGTO}}$	BDT 时标相对 GNSS 时标的漂移系数	13^a	2^{-51}	—	s/s
6	$A_{2\text{BGTO}}$	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,其含义如下：

- 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 $\text{WN}_{0\text{BGTO}}$ 、 $t_{0\text{BGTO}}$ 、 $A_{0\text{BGTO}}$ 、 $A_{1\text{BGTO}}$ 、 $A_{2\text{BGTO}}$ 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。

8.13.2 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(48)实现：

$$\Delta t_{\text{Systems}} = t_{\text{BD}} - t_{\text{GNSS}} = A_{0\text{BGTO}} + A_{1\text{BGTO}} [t_{\text{BD}} - t_{0\text{BGTO}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{0\text{BGTO}})] + A_{2\text{BGTO}} [t_{\text{BD}} - t_{0\text{BGTO}} + 604\,800(\text{WN} - \text{WN}_{0\text{BGTO}})]^2 \dots\dots\dots(48)$$

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；
 t_{GNSS} ——其他 GNSS 系统时间。

8.14 卫星健康状态

卫星健康状态(HS)，共 2 比特，无符号整型，用于描述本卫星当前健康状态。其定义见表 33。

表 33 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

8.15 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 比特，其定义见表 34。

表 34 卫星完好性状态标识定义

标识	数值	定义
DIF	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	0	本信号正常
	1	本信号不正常
AIF	0	本信号 SISMAI ^a 值有效
	1	本信号 SISMAI 值无效
^a SISMAI 定义见 8.17。		

B1C 信号的完好性状态标识[DIF_(B1C)、SIF_(B1C)、AIF_(B1C)]除了在 B1C 信号导航电文 B-CNAV1 子帧 3 中播发，同时也在 B2a 信号中播发。由于 B2a 信号导航电文的更新频度更高，对于使用 B1C 和 B2a 信号的双频用户，宜优先使用 B2a 信号播发的完好性状态标识。

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

8.17 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: 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比特的同步,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

(资料性附录)

多进制 LDPC 编译码方法及示例

A.1 多进制 LDPC 编码

A.1.1 编码方法

由多进制 LDPC(n, k)编码的校验矩阵 $\mathbf{H}=[\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2]$ 可以计算得到生成矩阵 \mathbf{G} 。再利用生成矩阵 \mathbf{G} , 对长度为 k 的输入信息序列 m 进行编码, 可得到长度为 n 的码字 $c=(c_0, c_1, \dots, c_{n-1})=m \cdot \mathbf{G}=[m, p]$ 。其中, $c_j(0 \leq j < n)$ 为码字 c 中的第 j 个码字符号, $p=m \cdot (\mathbf{H}_2^{-1} \cdot \mathbf{H}_1)^T$ 为校验序列。

生成矩阵 \mathbf{G} 的产生方法如下:

- 第 1 步: 将大小为 $(n-k) \times n$ 的矩阵 \mathbf{H} 表示为 $\mathbf{H}=[\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2]$, 其中 \mathbf{H}_1 大小为 $(n-k) \times k$, \mathbf{H}_2 大小为 $(n-k) \times (n-k)$ 。
- 第 2 步: 将矩阵 \mathbf{H} 转化为系统形式, 用 \mathbf{H}_2^{-1} 左乘 \mathbf{H} , 得到右边为单位阵的校验矩阵 $\hat{\mathbf{H}}=[\mathbf{H}_2^{-1} \cdot \mathbf{H}_1, \mathbf{I}_{n-k}]$, 其中 \mathbf{I}_{n-k} 为 $(n-k) \times (n-k)$ 单位阵。
- 第 3 步: 得到矩阵 $\mathbf{G}=[\mathbf{I}_k, \cdot (\mathbf{H}_2^{-1} \cdot \mathbf{H}_1)^T]$, 其中 \mathbf{I}_k 为 $k \times k$ 单位阵。

A.1.2 编码示例

以 B-CNAV1 子帧 2 采用 64 进制 LDPC(200,100)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	010010	101111	001100	101011	001011	010111	101000	110001	000101
111011	110001	011111	011011	011100	010011	100000	100000	110100	110010]

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	010010	101111	001100	101011	001011	010111	101000	110001	000101
111011	110001	011111	011011	011100	010011	100000	100000	110100	110010
100110	000000	110110	011100	111101	101001	101010	100111	000001	111101
011100	100101	111110	101100	100000	000000	111001	010100	101101	110010
101000	000100	111100	110000	101011	000101	100011	110111	000111	101000
010100	110011	011011	000000	110110	001110	001001	111111	001000	010100
011100	010111	011010	001111	011001	100011	100100	001111	010001	100101
100000	011011	101101	110010	101000	001100	010101	111000	001110	101101
111011	011010	110111	110111	011011	101010	011001	011011	100011	101011
110001	101001	011111	100010	010000	010111	101011	111101	000011	010110
100111	111000	000111	100101	001100	111011	111011	110111	011111	010010
011110	100000	011101	011011	110110	111100	111100	001101	001000	101111]

以 B-CNAV1 子帧 3 采用 64 进制 LDPC(88,44)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]						

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	101001	101000	101011	011101	111000	100000
000001	001111	110111	010101	100111	001100	000010	101001	001000	100110
000011	101000	110101	110110	010101	001000	010100	011110	111110	101001
000001	000001	101110	100000	101001	110101	110001	011111	001001	000011
010010	011011	101100	010111	100001	000001	000110	000101]		

A.1.3 映射关系

64 进制 LDPC 编码后,每个码字符号由 6 比特构成,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可以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：

$[\infty$	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 概述

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, $c_j \in \text{GF}(q)$, $q = 2^r$, $0 \leq j < n$ 。

利用多进制 LDPC 码的校验矩阵 \mathbf{H} 可以对接收序列 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 $s = \hat{c}\mathbf{H}^T$ 。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 \mathbf{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 \mathbf{H} ,记 $h_{i,j} \in \text{GF}(q)$ 为 \mathbf{H} 矩阵中第 i 行第 j 列的元素, \mathbf{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):

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

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

若 $h_{i,j} \neq 0$,则校验节点 CN_i 与变量节点 VN_j 之间相连并可以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 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$,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 $\text{C2V}_{i \rightarrow j}$,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 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$ 和 $\text{C2V}_{i \rightarrow j}$,能够纠正接收序列 y ,从而实现传输码字 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 $x \in \text{GF}(q)$ 及其对应的对数似然比(LLR)值 $\text{LLR}(x)$ 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):

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

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 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$ 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 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$ 。
- 第 2 步: 利用多进制 LDPC 码的校验矩阵 \mathbf{H} , 计算校验和 $s = \hat{\mathbf{c}} \mathbf{H}^T$ 。若 $s = 0$, 则将判决值序列 $\hat{\mathbf{c}}$ 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 $\text{C2V}_{i \rightarrow j}$ 。
- 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 $L_{j, n_m} = (x_{n_m}, \text{LLR}(x_{n_m}))$ 。将 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$ 初始化为 L'_{j, n_m} , 见公式 (A.4):

$$\text{V2C}_{j \rightarrow i} = L'_{j, n_m} = L_{j, n_m} \cdot h_{i, j} = (x_{n_m} \cdot h_{i, j}, \text{LLR}(x_{n_m})) \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

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 $\text{C2V}_{f \rightarrow j}$ 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 $\text{C2V}_{f \rightarrow j}$ ($f \in M_j, f \neq i$), 计算 VN_j 传递给相连校验节点 CN_i 的置信度向量 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$, 计算见公式 (A.5):

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

其中, 有限域元素 $h_{f, j}^{-1}$ 是 $h_{f, j}$ 的逆元, 即 $h_{f, j}^{-1} \cdot h_{f, j} = 1$ 。式 (A.5) 中的加和运算将各置信度向量 $\text{C2V}_{f \rightarrow j} \cdot h_{f, j}^{-1}$ 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。 $\text{Rs}_{j \rightarrow i}$ 是前 n_m 个有限域元素组成的向量, $\text{R}_{j \rightarrow i}$ 是对应的 LLR 值向量。被置信度向量 $\text{C2V}_{f \rightarrow j}$ 舍弃的 $q - n_m$ 个有限域元素的 LLR 值取为 $\text{C2V}_{f \rightarrow j}$ 中最大的 LLR 值与一个固定偏移量之和。在每个置信度向量 $\text{V2C}_{j \rightarrow i}$ 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 $\left\{ \sum_{f \in M_j} \text{C2V}_{f \rightarrow j} \cdot h_{f, j}^{-1} + L_j \right\}$ 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):

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

判决符号 \hat{c}_j 与置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i}$ 一起传递给对应的校验节点。检查当前迭代译码结果 $\hat{c} = (\hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{n-1})$ 是否能通过校验矩阵校验, 即 $s = \hat{c} H^T$ 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 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 $V2C_{j \rightarrow i}$, 计算置信度向量 $C2V_{i \rightarrow j}$, 见公式(A.7):

$$C2V_{i \rightarrow j} = \sum_{\gamma \in N_i, \gamma \neq j} V2C_{\gamma \rightarrow i} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

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 (U_s, U) 和 (Q_s, Q) , 输出置信度向量为 (V_s, V) , 其中 U, Q, V 为升序排列的 n_m 长 LLR 向量, U_s, Q_s, 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 M 和有限域元素矩阵 M_s 。 M_s 和 M 的计算见公式(A.8)和公式(A.9):

$$M_s[d, \rho] = U_s[d] \oplus Q_s[\rho] \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

$$M[d, \rho] = U[d] + Q[\rho] \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

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):

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

上式的具体实现可以通过对大小为 n_m 的寄存器 S 进行如下操作完成:

- 初始化: 将 M 的第 1 列存入 S , 使 $S[\zeta] = M[\zeta, 0]$, $\zeta \in \{0, 1, \dots, n_m - 1\}$ 。令 $\epsilon = 0$ 。
- 第 1 步: 找到 S 中的最小值。(假设 $M[d, \rho]$ 对应 S 中的最小值)。
- 第 2 步: 若 S 中最小值对应的有限域元素不存在于向量 V_s 中, 则将 S 中的最小值给 $V[\epsilon]$, 将对应的有限域元素给 $V_s[\epsilon]$, $\epsilon = \epsilon + 1$; 否则, 不执行操作。
- 第 3 步: 将 S 中的最小值替换为其在 M 中对应元素的右边元素, (即假设当前 S 中的最小值为 $M[d, \rho]$, 则将其替换为 $M[d, \rho + 1]$)。
- 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 $dc=4$ 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 $(R_{s_{l,i}}, R_{l,i})$, $0 \leq l < 4$, 即 $R_{0,i}[1] \leq R_{1,i}[1] \leq R_{2,i}[1] \leq R_{3,i}[1]$ 。其中, $R_{s_{l,i}}$ 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 $(R_{s_{l,i}}, R_{l,i})$ 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):

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

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

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

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

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

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 ($\mathbf{Us}_{i,l}, \mathbf{U}_{i,l}$), 计算见公式(A.15)和公式(A.16):

$$\mathbf{Us}_{i,l} = (Rs_i[w] \oplus Rs_{l,i}[0])_{n_m} \dots\dots\dots (A.15)$$

$$\mathbf{U}_{i,l} = (R_i[w])_{n_m} \dots\dots\dots (A.16)$$

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):

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

否则, w 的取值范围见公式(A.18):

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

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):

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

否则 w 的取值范围见公式(A.20):

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

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

计算得到的 4 个向量 ($\mathbf{U}_{s_{i,1}}, \mathbf{U}_{i,1}$) 的排列顺序与 4 个排序后的输入向量 ($\mathbf{R}_{s_{i,1}}, \mathbf{R}_{i,1}$) 一一对应。因为每一个输入向量 ($\mathbf{R}_{s_{i,1}}, \mathbf{R}_{i,1}$) 对应一个 $V2C_{j \rightarrow i}$ 向量, 根据置信度向量 $V2C_{j \rightarrow i}$ 与 ($\mathbf{R}_{s_{i,1}}, \mathbf{R}_{i,1}$) 的之间的排列顺序, 更新输出置信度向量 $C2V_{i \rightarrow j} = (\mathbf{U}_{s_{i,1}}, \mathbf{U}_{i,1})$, ($j \in N_i$)。