

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.04.06

提升北斗 RDSS 完好性和可用性的 信息处理设计

陈刘成, 胡光明, 欧新颖, 刘晓萍, 苏冉冉, 毕嘉鸿

(北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要: 为更好地满足用户需求, 作为北斗特色导航服务模式的卫星无线电测定服务需要建立完好性监测和发播体系, 并优化系统资源动态调配策略, 以提升服务的完好性和可用性。面向北斗用户对定位与位置报告、授时、短报文通信三大服务的精确性、实时性、成功率、安全性需求, 分别分析了上述服务的处理流程和关键要素, 提出了建立完好性监测、发播体系和可用性提升的信息处理策略, 以保证北斗全球定位报告服务的高完好性和高可用性。

关键词: 北斗卫星导航系统; 卫星无线电测定服务; 完好性; 可用性

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A

1 引 言

导航系统的性能由多个质量参数确定, 一般包括覆盖范围、精确性、完好性、连续性、可用性和服务容量等指标, 军用导航系统一般还强调安全性和抗干扰指标, 其中, 完好性是指系统提供信息或服务正确程度的度量, 是导航系统失效时及时将警告信息发送给用户的能力。卫星导航系统完好性监测与发播越来越受到系统建设者、技术研究者和系统用户的高度重视。美国全球定位系统 (GPS) 和俄罗斯格洛纳斯系统 (GLONASS) 等全球卫星导航系统在建设初期对完好性并未充分重视, 但是在后续增强系统建设中, 为满足用户需求建立了比较科学严密的完好性监测体系。目前, 全球导航卫星系统 (GNSS) 的完好性监测体系主要包括空间段的卫星自主完好性、地面段的地面完好性通道, 以及用户段的接收机自主完好性等技术体制^[1,2], 可在信号、电文、服务三个层面展开完好性监测。可用性是指在特定条件下, 系统在服务区内正常工作的时间百分比, 是系统在特定覆盖区域内提供有效服务的能力; 从用户角度看, 可用性是用户能够获得导航系统标称服务性能的概率^[3]。

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-04-20

资助项目: 国家自然科学基金 (41274043)

通讯作者: 陈刘成, 282796575@qq.com

卫星无线电测定服务 (radio determination satellite service, RDSS) 提供定位与位置报告、短报文通信和授时服务, 其核心技术指标包括了服务成功率、精确性、实时性和安全性要求。经过十多年的发展完善, 北斗定位报告业务应用范围不断拓展, 发挥了巨大的军事、社会、经济和安全效益, 但也面临着进一步提升系统服务完好性和可用性的迫切要求。例如, 在实际运行中, 波束负载不均衡问题突出, 部分波束满载率高、超负荷运行、服务成功率低、实时性差; 另外部分波束使用率低, 资源闲置。基于信号强度优先的用户响应波束使用策略不能自动引导用户到最优服务波束; 系统出站资源整体紧张, 部分用户机设计不规范, 以及入站信息没有附带冗余波束信息, 这些都限制了系统动态优化出站波束的可能。用户抑制策略颗粒度太大, 只能全波束对某一大类用户服务进行抑制, 无法根据实际情况仅对超载波束特定用户采取精准抑制。信号及服务体制上没有考虑境内外用户使用安全差异需求及影响, 安全性考虑限制了对境外用户服务的可能。实际使用的部分用户通信对象包括不存在、已注销和永久关闭用户, 但系统无法通知发信方。集团用户服务信息加密标识不完整, 导致非密用户接收加密位置报告 1 时, 信息显示乱码, 且加密用户也不能正确显示非密信息。非密信息通过 I 支路播发, 以及加密信息通过 Q 支路播发的默认方式也限制了同一卫星的同一波束在不同支路的负载均衡优化调整。

随着系统建设完善, 北斗 RDSS 也在发展过程中不断完善。面向北斗全球系统建设, RDSS 用户对系统服务能力提出了更高的要求。本文根据用户不断增长的服务需求, 从顶层设计的角度, 围绕建立 RDSS 完好性体系, 细化分析了用户服务成功率、精确性、实时性和安全性指标对完好性的具体要求, 给出了建立完好性监测和发播体系的具体建议; 同时, 为进一步提高 RDSS 服务的可用性, 提出了系统资源动态优化调配的具体策略。

2 影响定位报告服务完好性和可用性的因素分析

RDSS 定位原理同其他卫星导航系统类似, 都是三球交汇位置确定原理^[4]。但 RDSS 采用有源和集中处理的工作方式, 所有信息处理都在地面中心站完成。RDSS 系统对中心站设备处理能力要求高, 但服务总容量有限, 服务有一定的滞后性, 因此系统出站和入站能力有差异, 出站能力较弱^[5]。

定位报告服务核心指标包括: (1) 成功率, 包括定位成功率、通信成功率和授时成功率; (2) 服务精确性, 包括用户定位与授时精度; (3) 服务实时性, 指用户机从发出服务申请到收到正确结果所花费的时间; (4) 安全性, 主要是用户位置报告和通信信息防破译的能力。服务完好性是服务成功率、精确性和实时性的函数; 服务的可用性与服务成功率、精确性、实时性、安全性和完好性等因素相关。

2.1 影响服务成功率的主要因素

影响成功率的主要因素包括: 中心站信号收发能否对入站信号进行解调并完成信息处理, 中心站信号收发能否将信息正确出站, 以及用户机能否响应出站信号。

短报文通信时,收信用户不在服务区(超过 10 s 无通信回执),或者收信用户没开机(服务内容被存入收信方邮箱),都会影响位置报告的成功率和通信的成功率。用户所在位置只能响应一颗卫星的出站询问信号,不能满足定位的基本条件时,定位和双向定时成功率将受到影响。无数据库高程服务区用户必须采用“自带高程”方式申请定位服务,否则会造成服务失败。

用户服务涉及多个信号链路测距值或通信信息时,在地面中心站信息处理环节需要对测距值或通信信息进行配对。如果中心站信息处理服务器节点时间同步误差过大,会提高配对不成功的概率,甚至配对失败。此种情况下,用户申请将被忽视,造成服务失败。信息处理服务器节点时间同步误差过大,还会影响勤务段(例如星历、各波束单向授时信息等)信息播发,不能有效支持某些类型服务,例如单向授时服务。

中心站信息处理系统根据用户服务优先级进行排队,当队列长度超过特定阈值时,部分用户服务将被抑制(用户类型定义见表 1),具体如下所述:

用户类别	服务频度	备注
一类	5~10 min	默认 10 min
二类	10~60 s	默认 60 s
三类	1~5 s	默认 5 s

(1) 队列长度超过阈值 30%~50% 时,抑制第一类用户;

(2) 队列长度超过阈值 50%~80% 时,抑制第一、二类用户;

(3) 队列长度超过阈值 80% 时,抑制第三类用户。

上述策略对通信服务成功率综合影响较大。RDSS 短报文通信服务已是最主要的服务模式,超过总服务量的 90%(见表 2)。对 2016 年 7 月 22—28 日使用频度排名前 20 的用户通信数据进行统计分析(见表 3),其通信成功率与报文通信总量关系如图 1 所示。对于高频度通信用户而言,其服务总量与成功率整体上成一定程度的负相关性。

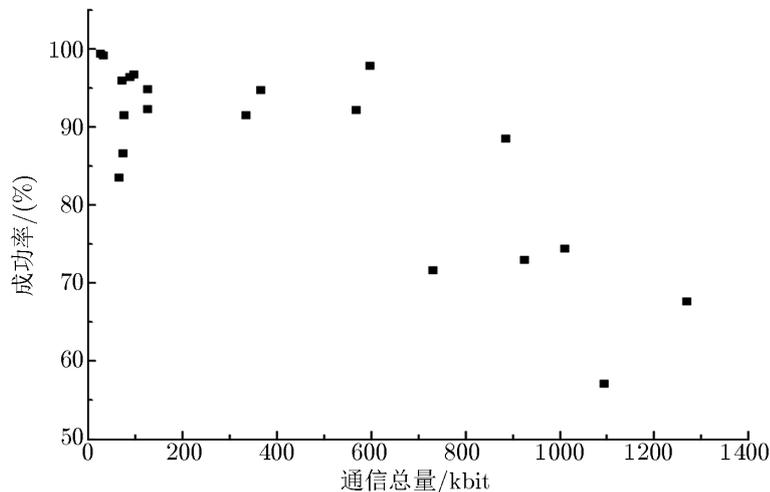


图 1 高频度 RDSS 短报文用户通信总量与成功率的关系

表 3 高频通信用户服务情况统计

ID 号	通信总量/bit	时延/s		平均长度/bit	成功率/(%)
		最大	平均		
190282	1 298 844	55.00	1.20	514.40	67.65
184388	1 120 493	56.00	1.14	485.15	57.08
307113	1 033 845	53.00	1.10	487.18	74.40
160921	946 408	56.00	1.16	481.59	72.95
524063	907 337	47.00	1.15	237.97	88.47
184389	748 884	53.00	1.11	478.76	71.66
455911	611 320	66.00	1.69	601.21	97.86
202338	581 792	21.00	1.73	587.58	92.20
524240	374 585	21.00	1.63	200.22	94.79
456040	342 004	58.00	1.80	586.84	91.47
160055	129 722	21.00	1.54	598.55	94.81
524087	127 897	58.00	1.72	490.47	92.26
2095002	99 058	59.00	1.55	228.33	96.72
524242	90 485	59.00	1.78	356.21	96.41
455712	77 805	50.00	2.31	461.46	91.54
456130	75 745	61.00	1.52	453.31	86.65
455999	72 349	54.00	0.98	292.83	95.93
456047	66 273	53.00	1.66	595.02	83.46
438285	32 244	50.00	3.27	123.84	99.12
2094634	26 963	19.00	6.43	758.37	99.44

表 2 RDSS 不同服务类型占比情况统计

服务类型	服务数量/次	占总数比例/(%)
定位	加密	3 589 397 5.2
	非密	1 941 002 2.8
通信	密文	3 722 278 5.4
	明文	59 227 056 85.8
定时	180 544	0.3
位置报告 1	密文	143 724 0.2
	明文	588 小于 0.1
位置报告 2	179 956	0.3
定位查询	28	小于 0.1
通信查询	8 694	小于 0.1
总数	68 993 267	100

注：统计时间为 2016 年 7 月 22—28 日。

2.2 影响服务精确性的主要因素

2.2.1 定位与位置报告误差源分析

中心站通过静止地球轨道 (GEO) 卫星持续播发出站询问信号。用户机对出站信号的响应信号经 2 颗以上卫星返回中心站。中心站利用测得的 2 条以上四程距离信息，结合服务区地面高程数据库或用户自带高程信息，采用三球交汇原理完成定位解算，并将结果通过出站信号播发给用户。RDSS 系统定位计算的基本方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{ij}(\varphi_u, \theta_u, t_u) = |\mathbf{S}_i - \mathbf{C}| + |\mathbf{S}_i - \mathbf{U}_0| + |\mathbf{S}_j - \mathbf{U}_0| + |\mathbf{S}_j - \mathbf{C}| + \\ \frac{\partial |\mathbf{S}_i - \mathbf{U}_0|}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial |\mathbf{S}_i - \mathbf{U}_0|}{\partial y} \cdot \Delta y + \frac{\partial |\mathbf{S}_i - \mathbf{U}_0|}{\partial z} \cdot \Delta z + \\ \frac{\partial |\mathbf{S}_j - \mathbf{U}_0|}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial |\mathbf{S}_j - \mathbf{U}_0|}{\partial y} \cdot \Delta y + \frac{\partial |\mathbf{S}_j - \mathbf{U}_0|}{\partial z} \cdot \Delta z + \\ \Delta \tau_{ij}(\varphi_u, \theta_u, t_u) + \delta_{ij}(t_u) \\ z = z_0 + \Delta z + \delta_H(t_u) \end{array} \right. , \quad (1)$$

其中， ρ_{ij} 为伪距观测量，下标 i 表示用户响应出站信号的转发卫星，下标 j 表示入站信号的转发卫星， $j = 1, \dots, 5$ 表示有可能从 5 颗 GEO 卫星获得伪距观测数据。 \mathbf{C} 代表地面中心站位置矢量， $\mathbf{U}_0(x_0, y_0, z_0)$ 代表用户初始位置矢量， \mathbf{S}_i 为用户响应出站信号的转发卫星位

置矢量, \mathbf{S}_j 为入站信号转发卫星的位置矢量, $\Delta\tau_{ij}$ 为信号经过的大气折射时延以及中心站、卫星、用户设备零值等改正量, $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为用户真实位置至用户初始位置间的位置改正矢量, z 为用户真实高程, z_0 为通过查高程数据库或用户自测高方式得到的用户高程值, $\delta_{ij}(t_u)$ 和 $\delta_H(t_u)$ 分别为伪距和高程观测量误差, 其中 $\delta_{ij}(t_u)$ 包含误差改正量修正残差和用户伪距随机误差两部分。

通过上述分析可知, 用户定位解算和位置报告精度与卫星星历、大气延迟改正 (包括电离层和对流层延迟改正)、高程库数据、设备零值标定、伪距观测精度都紧密相关。经定位解算可知, 北斗二号 RDSS 定位精度水平优于 20 m, 高程优于 10 m。

2.2.2 单向授时服务误差源分析

单向授时用户不要求具备向中心站发送信息的功能。用户接收中心站出站询问信号, 同时接收系统广播的时标信号。从中心站经卫星到用户的时延为 $\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U} = \tau'_{C \rightarrow S_i} + |\mathbf{S}_i - \mathbf{U}|/c + \Delta\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U}$, 其中, \mathbf{S}_i 为卫星星历计算的卫星位置; $\tau'_{C \rightarrow S_i}$ 为中心站到卫星的电波时延; $|\mathbf{S}_i - \mathbf{U}|/c$ 为根据星历和用户位置计算得出的卫星到用户的电波时延; c 为真空中的光速; $\Delta\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U}$ 为误差改正量。

$\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U}$ 参数在北斗一代系统中通过标校机实际测量获得, 但是在现役北斗二代系统中, 其大小依赖于卫星星历、电波大气传播延时修正、相应设备零值标定等。设备零值的标定是影响系统服务精度的关键因素之一, 但由于变化特性各异, 如卫星转发器零值变化就是一个均值缓慢漂移的正态非平稳随机过程^[6], 因此单独标定难度较大。各颗卫星及地面收发设备零值漂移情况规律不一, 在时间上也并非同步同频, 因此 RDSS 单向授时结果通常存在缓慢漂移现象, 并且各波束授时结果之间也存在一定的系统偏差。解决上述问题可采用地面标校站或 RDSS 监测接收机, 将中心站收发设备和卫星转发器进行组合标定, 从而分离出组合出站零值, 作为电波参数播发给用户。北斗二号 RDSS 单向定时精度优于 50 ns。

2.2.3 双向定时服务误差源分析

双向定时用户机 (位置已知) 响应某一颗卫星的询问信号, 并向该颗卫星发送入站信号。地面中心接收并解调用户发出的信号, 计算出中心→卫星→用户路径上的信号传输时延信息, 并在出站信号中转发给用户。用户接收后计算本地钟差。假设从同一 GEO 卫星出入站的双向定时用户伪距是 ρ_{ii} , 那么, 中心→卫星→用户路径上的信号传输时延 $\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U}$ 用下式计算:

$$\tau_{C \rightarrow S_i \rightarrow U} = \frac{\rho_{ii}}{2c} + \Delta\tau_d, \quad (2)$$

其中, $\Delta\tau_d$ 为误差改正量, 在物理意义上主要包括电离层折射误差和零值标定误差, 即 $\Delta\tau_d = \Delta\tau_{d-ion} + \Delta\tau_{d-drift}$ 。保证双向授时精度的关键就在于高精度地计算 $\Delta\tau_d$ 。零值标定误差是系统出入站波束的特征, 由系统中心站计算。与单向授时相似, 在没有地面标校设备的情况下, 双向定时零值标定误差 $\Delta\tau_d$ 同样存在缓变漂移现象, 也可以通过地面标校站或 RDSS 监测接收机解决。北斗二号 RDSS 双向授时精度优于 10 ns。

2.3 影响服务实时性的主要因素

RDSS 用户不同, 其服务的实时性指标也不一样, 主要由系统定义的服务优先级确定: 等级数值越小, 优先级越高, 服务的实时性越高, 如表 4 所示。

优先等级	服务类型	定位响应时间/s
一等	所有紧急定位, 三类用户机定位	小于 1
二等	二类用户机 (含指挥型用户机) 定位	小于 2
三等	定时、特快通信、一类用户机定位	小于 5
四等	普通通信、通信回执、定位查询	
五等	通信查询	

用户通信及通信查询服务的实时性受波束负载等多种情况的混合影响。通过表 3 数据可以看出, 用户通信服务实时性没有强相关的单一因素, 与通信报文平均长度关系也不明显 (如图 2 所示)。

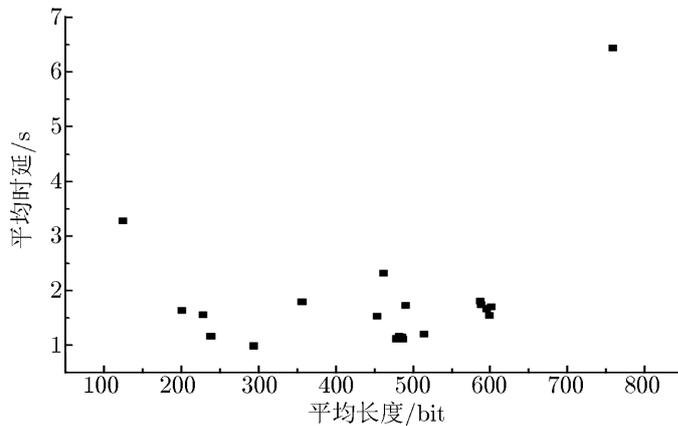


图 2 高频用户短报文平均长度与服务平均时延的关系

2.4 影响服务安全性的主要因素

I 支路出站信息透明, 不具备安全性。北斗用户机根据 ID 号接收 I 支路出站的定位和通信等信息, 所有北斗用户机均可收到。

Q 支路初相和 ID 的对应关系对安全性构成威胁。北斗用户机根据初相接收 Q 支路出站的定位、通信等信息, 即 Q 支路出站信息的安全性依赖于收信方初相。在已知收信方初相的前提下, 可监测收信方的通信、定位等信息。北斗 RDSS 用户的 ID 和初相均为 24 bit, ID 号与初相之间函数转换关系的复杂度低, 因此非法用户破译难度低。北斗终端设备设计要求用户机与 IC 卡 / 芯片进行数据交互后, 用户的授权信息存放在用户机的内存中。由于用户机的安全防范性能较低, 非法用户在一台经过特殊处理的北斗用户机上加载用户卡, 即可窃取用户卡中的 ID 和初相等授权信息。

IC 芯片信息抗破解能力有限。北斗二代 IC 芯片属于 CPU 卡，它是带有加解密功能的微型计算机。一般芯片硬件处理器仅有 8 位，随机存储器空间很小。硬件基础薄弱造成密钥空间不够大，安全防护能力不够高，存在用户信息被破译的可能性。目前，民用 IC 芯片明文存储数据。如果民用 IC 芯片被破译，卡内存储的用户身份认证信息将被直接读取，可能出现伪造的民用用户。

3 提升定位报告服务完好性和可用性的设计

3.1 通信信息出站策略优化

北斗二代 RDSS 对于 I, Q 支路出站资源的分配策略是：加密通信和加密位置报告从 Q 支路出站，控制指令从 I 支路出站，其余服务类型均可从 I, Q 支路出站。目前系统服务量最大的服务类型为非密通信，占总服务量的 85% 左右 (见表 2)。按照出站支路分配策略，非密通信从 I, Q 支路均可出站。RDSS 系统出站资源使用率较高，北斗二代部分波束出站使用率和满载率已达 90% 以上。Q 支路出站容量使用率高于 I 支路，出站容量使用率越低的波束，其 I, Q 支路使用率差异越大 (见表 5)。造成上述情况的原因是，由于 I, Q 支路数据段长度不同，在系统繁忙的情况下，出站队列较长，I, Q 支路分配均衡；在出站空闲情况下，长帧通信会优先被安排从 Q 支路出站。

表 5 2016 年 7 月北斗二代 RDSS 不同波束出站容量使用率和满载率 (%)

波束 ID	I 支路使用率	I 支路满载率	Q 支路使用率	Q 支路满载率
1	69.1	17.2	90.5	39.7
2	58.9	15.7	89.7	27.6
3	41.1	9.8	77.9	18.1
4	88.7	86.2	92.8	86.4
5	62.9	24.3	88.7	39.9
6	40.1	7.4	77.9	17.6
7	小于 0.1	小于 0.1	2.2	小于 0.1
8	1.9	小于 0.1	12.7	小于 0.1
9	9.1	1.5	30.3	1.7
10	小于 0.1	小于 0.1	7.1	小于 0.1

在出站信息处理中，各波束满载率或负载率信息将在勤务段中发送给用户，支持用户根据完好性信息自动设置响应负载率低的可用波束信号；用户机设计中，应严格按照规范，将可用冗余波束信息进站，以支撑系统优化出站波束选择策略；在出站路径选择上，应计算 I, Q 支路当前出站与本次服务的帧长度之和，选择其和较小的支路出站；支持分星分波束进行特定用户的抑制功能，确保关键用户服务的可用性；尽可能增加集团用户地面专线出站途径，以减轻无线方式的波束出站压力。上述措施均可在系统中心站实现，无需用户进行额外改造。

3.2 建立完整的 RDSS 完好性监测与发播体系

北斗二代 RDSS 使用非差定位模式取代北斗一代的差分定位模式, 理论上能够满足精度指标要求, 但是无法实时标识定位服务精度和参数精度等级。

北斗全球 RDSS 业务应该建立独立完整的完好性监测体系。在主要站点部署 RDSS 监测接收机, 将接收的 RDSS 广播信息和授时信息等回传至主控站。主控站处理回传的信息, 形成电文正确性、服务精确性的完好性标识信息并发播。同时, 主控站电离层延迟模型和设备零值标定等标示精度的完好性信息, 也应发播给 RDSS 用户。

从表 6 数据可以看出, 同一时间内同一波束在不同地区, 同一时间内同一地区的不同波束以及同一地区同一波束在不同时间的服务性能都存在幅度为 200%~500% 的剧烈变化。例如汕头地区响应波束 3 在不同时间段的定位精度最高为 5.8 m, 最低为 25.2 m; 在相同时间段, 波束 2 在哈尔滨和汕头地区的周统计精度分别为 6.7 m 和 14.4 m; 不同时间段内不同波束在北京地区周统计精度在 3.5~15.4 m 内变化。将相应的完好性信息发送给用户, 能够让对精度敏感的用户自主选择最优的响应卫星波束。

表 6 不同地区定位报告响应波束与精度 (1σ) 周统计

北京		成都		哈尔滨		喀什		三亚		汕头		乌鲁木齐	
波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m
8	9.0	6	7.9	2	7.1	—	—	5	15.1	2	14.0	10	13.2
8	9.7	2	5.9	2	7.5	—	—	3	10.1	3	14.7	4	12.3
8	9.0	2	10.0	2	8.3	—	—	3	9.6	3	14.6	4	5.1
8	9.7	6	9.4	2	7.0	—	—	3	8.5	5	15.2	4	4.7
8	10.7	6	8.9	2	7.0	—	—	3	9.3	5	17.4	4	6.6
8	9.3	6	7.8	2	6.7	—	—	3	8.5	2	14.4	4	5.7
8	6.7	6	6.5	2	6.7	—	—	3	9.1	2	13.0	4	4.8
8	11.3	6	8.5	2	6.8	—	—	3	11.2	2	15.5	4	5.7
8	7.1	6	8.0	2	5.7	—	—	3	7.4	2	13.0	4	7.5
8	7.5	6	9.1	2	8.7	—	—	3	5.3	2	16.0	4	5.8
8	7.1	6	7.8	2	8.7	—	—	3	5.3	2	15.7	4	5.9
8	10.2	6	10.6	2	6.9	—	—	3	7.2	3	17.8	4	6.1
8	15.4	6	7.5	2	9.5	—	—	3	7.9	3	22.7	4	9.1
8	11.6	6	7.6	2	9.5	—	—	3	9.3	3	25.2	4	9.8
8	9.3	6	9.9	2	6.6	—	—	3	7.1	3	17.8	4	10.6
8	12.8	6	9.7	2	6.9	—	—	3	8.7	—	—	4	6.9
8	10.9	6	10.2	8	5.1	4	6.3	3	8.7	2	10.9	4	7.4
8	5.9	6	11.4	8	10.3	10	10.1	3	8.4	2	9.4	4	8.9
8	7.8	自 6	14.3	自 5	11.9	自 4	6.4	自 6	9.3	自 5	9.5	自 4	6.1
8	8.2	6	10.5	8	11.2	4	11.5	3	6.2	3	6.2	10	8.2
8	4.1	6	10.0	2	10.5	4	11.5	5	6.5	3	8.3	10	7.4
8	3.7	6	11.4	2	8.8	4	10.4	5	6.8	3	5.8	10	6.2
8	5.5	6	9.5	2	10.3	4	6.3	5	6.7	3	8.3	10	6.1

续表

北京		成都		哈尔滨		喀什		三亚		汕头		乌鲁木齐	
波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m	波束	精度/m
8	4.1	6	9.3	2	8.3	4	11.2	5	6.0	3	7.2	10	6.3
8	4.3	6	7.8	2	9.3	4	5.9	5	6.1	3	7.1	10	5.7
1	5.1	6	7.2	2	11.3	4	11.1	5	7.3	3	8.7	10	5.7
1	3.5	6	5.9	2	11.4	4	10.6	5	6.1	3	7.3	10	5.7
1	3.6	自6	7.6	2	11.3	4	9.4	5	7.0	3	7.8	10	6.7
1	3.8	自6	8.2	2	11.5	4	10.4	5	7.6	3	8.3	10	6.6
1	3.9	自6	8.2	2	11.2	4	11.7	5	7.8	3	9.2	10	5.6
1	7.4	6	8.5	2	12.5	4	11.4	5	8.3	3	9.7	10	5.3
1	4.6	6	7.5	2	13.3	4	8.7	5	8.1	3	8.9	10	5.5
1	6.0	6	8.2	2	13.1	4	12.5	5	11.0	3	10.5	10	5.7
1	5.7	6	7.9	2	13.3	4	13.4	5	11.5	3	11.8	10	6.9
1	4.7	6	8.1	2	14.0	4	13.3	5	12.9	3	12.0	10	6.3

注: 1. “自 N ” ($N = 4, 5, 6$) 为用户自动在可响应的 N 个冗余波束中选择信号强度最大的波束作为响应波束;
 2. “通信成功率”为北京地区监测的结果;
 3. 数据源自 2016 年 1—8 月各周统计结果。

3.3 形成 RDSS 业务独立定轨能力

北斗二代 RDSS 业务轨道数据来自无线电导航 (简称 RNSS) 业务。正常情况下 RNSS 业务长弧段动力学定轨方法的轨道精度较高。但是在 GEO 卫星轨道机动期间, RNSS 提供给 RDSS 的轨道是通过几何方法确定的。一旦此期间 GEO 卫星导航任务处理单元和卫星钟发生故障, 就会导致几何法定轨误差增大, 甚至定轨失败, 这必然对 RDSS 业务造成较大影响。目前, 出现上述问题时, 系统采取强制关闭卫星出站波束并停止服务的方式进行处理。但是北斗全球系统仅有 3 颗 GEO 卫星提供定位报告服务, 如果出现上述情况而关闭出站波束, 将会造成系统整体服务性能的急剧下降。

北斗全球 RDSS 业务应具备如北斗一代的独立定轨体制, 即依赖 RDSS 监测机观测数据独立完成轨道确定, 作为 GEO 卫星轨道机动期间备份托底定轨手段。同时, RDSS 出站的勤务段信息也应该包括标示轨道精度的完好性信息。从表 6 可以看出, 在目前北斗二代 GEO 卫星定轨精度优于 10 m 的条件下^[7], 不同地点实现的定位报告精度 (1σ) 平均为 9.01 m; 面向北斗全球实现水平 20 m (95%) 的精度, 基于 RDSS 监测机观测数据独立定轨的精度要求也应是 10 m。

3.4 完善中心信息处理时间同步可靠性设计

RDSS 业务信息处理系统产生出站信息。信号收发系统根据信息组帧, 都需要每秒 32 个脉冲 (pulse per second) 或每秒 1 个脉冲的信号驱动。从处理流程看, 两个处理系统都必须与北斗系统时间基准保持严格的同步, 否则会引起出站信息丢包 (帧) 的问题。

信号收发产生的出站信号由分频器产生的每秒 32 个脉冲驱动, 其帧头和分帧头与系统时间形成严格的对应关系。但出站信号搭载的出站信息则通过信息处理和信号收发系统组帧

等服务器处理。信息处理系统必须在每个分帧持续时间内完成数据配对和数据处理, 并按规定协议将出站信息打包发送至信号收发系统。理论上, 信息处理节点的时间同步精度在任何时间都应高于: 分帧长度 + 信息处理节拍信号 (每秒 32 个脉冲) 提前量 - 信息处理耗时 - 出站打包至信号收发时间提前量 - 网络传输时延。目前, 信息处理系统服务器时间同步采用 CPU 轮询机制, 即通过 NTP 协议响应模块, 把每秒 32 个脉冲信号转换成 B 码信号, 实现网络处理节点的时间同步, 其精度指标要求高于 10 ms。但其响应能力和处理时延会受到 CPU 负载及硬件配置状态的影响, 具有一定的不确定性, 因此需要完善实时监测信息处理系统处理, 每秒 32 个脉冲信号的时延, 建立异常报警和双机热备份工作机制。

4 结 论

北斗定位报告业务在国防和国民经济建设中发挥了巨大的作用, 同时, 用户对其服务空间和服务性能的拓展需求也在不断增加。为了更好地为用户服务, 北斗系统需要内外兼修, 一方面要争取外在的更多更好的卫星、轨位和链路资源, 另一方面要不断完善系统的技术体制和运行管理机制, 深挖系统内部潜力。本文针对定位报告业务核心服务的精确性、实时性和安全性等需求, 详细分析了定位报告业务、授时/定时业务以及短报文通信业务的处理流程和影响其服务质量的关键设计要素, 并针对当前系统存在的弱点或不足, 提出了提升 RDSS 服务完好性和可用性的若干设计考虑。通信信息出站策略优化可以提高系统服务的实时性和成功率; 建立完整的 RDSS 完好性监测与发播体系可以让用户自主判断不同卫星各个波束的服务能力, 通过自主选择最优服务波束提高定位或授时服务的精确性; 针对 RDSS 系统实际运行可靠性的薄弱环节, 提出形成 RDSS 独立定轨能力, 以及完善中心信息处理系统时间同步可靠性设计, 以提升系统运行可靠性, 从而进一步提升 RDSS 服务的精确性和可用性。上述设计, 对于北斗全球 RDSS 业务的高可用性和完好性设计具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] Oehler V, Luongo F, Boyero JP, et al. Proceedings of ION GNSS 2004. Long Beach: The Institute of Navigation, 2004: 604
- [2] Mozo A, Hernandez C, Romay M M. Proceedings of ION GNSS 2005. Long Beach: The Institute of Navigation, 2005: 1315
- [3] 陈金平, 周建华, 赵薇薇. 无线电工程, 2005, 35(1): 30
- [4] 谭述森. 测绘学报, 2009, 38(1): 1
- [5] 张蓓, 王顺宏, 王永刚. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 337
- [6] 占建伟, 庞晶, 张国柱, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, 41: 620
- [7] 郝金明, 刘伟平, 杨力, 等. 测绘科学技术学报, 2015, 32(3): 221

A Design on Information Processing System to Improve the Integrity and Usability of RDSS

CHEN Liu-cheng, HU Guang-ming, OU Xin-ying, LIU Xiao-ping, SU Ran-ran, BI Jia-hong

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: As the characteristic of COMPASS, the RDSS can supply three kinds of service: positioning and location reporting, timing, short message communication as well. Along with the improvements and evolutions of COMPASS, the applications of RDSS have been more popular and more effective. To satisfy more requirements, the integrity monitoring and broadcasting system should be established. And more, the kinetic adjustment strategies should be optimized so as to improve the integrity and usability of RDSS in COMPASS-III in the future, in stead of those in COMPASS-II. For the accuracy, real-time, success rate and security of the above-mentioned services, the processing procedures and the key factors are analyzed. To realize the high integrity and usability of RDSS, some advises are proposed to establish the integrity monitoring and broadcasting system and to improve the usability of COMPASS global system.

Key words: COMPASS; radio determination satellite service; integrity; usability