

基于质量树的 GPS 电文质量评估方法

饶爱水, 李永刚, 李祥明, 汪毅, 王振平, 胡健

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 从导航电文中及时、准确地计算出电文参数, 是导航接收机的核心功能, 不同电文参数解算软件由于设计差异, 解算电文参数质量也存在差异, 电文数据质量也会影响电文参数结果; 针对此问题, 在传统数据质量模型的基础上, 引入质量树分析方法, 建立了评估导航电文质量的质量树模型; 模型从电文完整性、电文一致性、电文正确性以及电文时效性等 4 个特性出发, 每个质量特性均建立了专属于特性, 以及量子化特性的数据指标; 在此基础上, 以 GPS 电文质量评估为例, 开发了 GPS 电文质量评估软件, 采用 GPS 接收机的实测数据对模型和软件进行了验证; 结果表明, 该软件能够发现 GPS 电文的异常数据, 包括数据不完整、数据不一致、数据不正确、数据超时等, 处理结果可用于改进电文参数解算算法, 提高电文参数解算软件的可靠性。

关键词: 完整性; 一致性; 正确性; 时效性; 质量模型

Evaluation Method for Quality of GPS Message Based on Quality Tree

Rao Aishui, Li Yonggang, Li Xiangming, Wang Yi, Wang Zhengping, Hu Jian

(Satellite Maritime Tracking and Control Department of China, Jiangyin 214431, China)

Abstract: It is the core function of navigation receiver to calculating message parameters in time and accurately from navigation message. The software quality of message parameters solved isn't identical because design is different. Also, the results of parameters are under influence of message's quality. According to the problem, the analysis method of quality tree is introduced based on traditional quality model of data, the quality tree model of evaluating the quality of navigation message is established. The model is described by four characteristics: integrity, consistency, correctness and timeliness. Each characteristic has more sub-characteristics, and a sub-characteristic is quantified by data indexes. Further more, the software is developed which is evaluating the quality of navigation message with GPS as example. The model and the software are verified by measured data from receiver of GPS. The results show that this software could discover the unusual data of GPS message, including the imperfection, inconsistency, incorrect and timeout of the data. The result can be used to improve message parameters solver algorithm, and increase the reliability of message parameters solver software.

Keywords: integrity; consistency; correctness; timeliness; quality model

0 引言

导航电文是导航定位计算的基础, 电文数据质量及电文解算算法直接影响电文参数解算结果, 进而影响定位结果。测量船利用火箭下传伪距数据, 结合导航电文计算火箭的 GPS 弹道, 该弹道对于实时引导雷达设备, 实时判断火箭飞行是否正常, 事后分析设备跟踪精度均具有重要作用。历次任务中发生过多次由于电文质量引起的定位结果异常问题^[1], 为此, 研究一种客观评价导航电文质量的方法模型, 既可以分析电文原码的数据质量, 又可以评价电文参数解算软件的质量, 在工程应用中具有很高的价值。当前国内外对于导航数据质量的研究, 重点在于分析观测数据质量^[2-4]、电文纠错设计等方面^[5], 对电文数据质量的研究论文尚不多见。本文针对 GPS 电文质量的评估方法进行了研究, 并研制了电文质量评估软件对实测数据进行了分析。

1 电文质量评估模型

电文质量模型建模方法: 根据 GPS 电文对用户的实际作用, 借鉴了通用数据质量标准^[6]和空间数据质量标准模型^[7-8], 采用质量树描述电文质量模型。从电文完整性、电文一致性、电文正确性以及电文时效性等 4 个方面描述电文质量, 如图 1 所示。

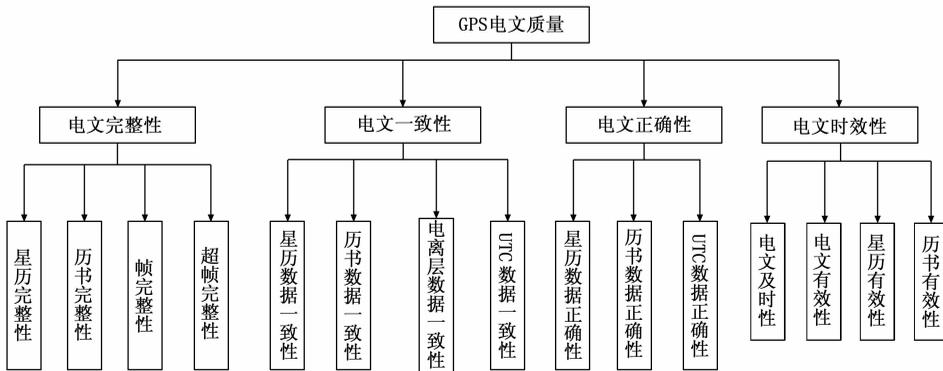


图 1 GPS 电文质量模型

1) 电文完整性: 指接收的电文数据完整、无遗漏。描述电文完整性的指标包括星历完整性、历书完整性、帧完整性以及超帧完整性。

2) 电文一致性: 指解算后的同类电文参数, 在同一历元时刻数据的一致性。描述电文一致性的指标包括星历数据一致

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-05-10。

作者简介: 饶爱水(1979-), 男, 江西临川人, 双学士, 工程师, 主要从事卫星导航定位技术方向的研究。

性、历书数据一致性、电离层数据一致性、UTC 数据一致性。

3) 电文正确性: 指解算后的各类电文参数, 物理量正确, 满足一定的物理要求。描述电文正确性的指标包括星历数据正确性、历书数据正确性以及 UTC 数据正确性。

4) 电文时效性: 指接收或解算后的电文数据, 满足一定的时间效率要求。描述电文时效性的指标包括电文及时性、电文有效性、星历有效性以及历书有效性。

2 GPS 电文质量计算方法

2.1 GPS 电文完整性计算方法

1) 星历完整性: GPS 电文星历数据位于电文的第 1~3 子帧, 当完全收齐 1~3 子帧数据后, 可解算出一组星历数据。特性指标为星历接收数、星历遗漏数, 计算方法为:

$$\text{星历遗漏数} = \text{理论星历数} - \text{星历接收数}$$

2) 历书完整性: GPS 电文历书数据位于电文的第 4 子帧的 25~32 页以及第 5 子帧的 1~24 页。理论上, 每个超帧均可解算出 32 组历书数据。特性指标为历书收齐星数、历书遗漏星数, 计算方法为:

$$\text{历书遗漏星数} = 32 - \text{历书收齐星数}$$

3) 帧完整性: GPS 电文帧由 5 个子帧组成, 子帧编号从 1~5。理论上, 每 30 秒传送一帧电文。特性指标为帧识别数、帧遗漏数, 计算方法为:

$$\text{帧遗漏数} = \text{理论帧数} - \text{帧识别数}$$

4) 超帧完整性: GPS 超帧由 25 个帧组成, 帧的页面编号从 1~25。理论上, 每 750 秒传送一个超帧。特性指标为超帧识别数、超帧遗漏数, 计算方法为:

$$\text{超帧识别率} = \text{超帧识别数} / \text{理论超帧数}$$

2.2 GPS 电文一致性计算方法

1) 星历数据一致性: 指从电文数据中解算的星历数据, 在同一个历元时刻的一致性。特性指标为星历数据个数、星历是否一致。

2) 历书数据一致性: 指从电文数据中解算的历书数据, 在同一个历元时刻的一致性。特性指标为历书数据个数、历书是否一致。

3) 电离层数据一致性: 指从电文数据中解算的电离层数据, 在同一个历元时刻的一致性。特性指标包括电离层数据个数、电离层是否一致。

4) UTC 数据一致性: 指从电文数据中解算的 UTC 数据, 在同一个历元时刻的一致性。表达 UTC 数据一致性的指标包括 UTC 数据个数、UTC 是否一致。

上述星历数据个数、历书数据个数等指标, 统计方法为: 当两组数据的所有字段均相同时统计为 1 个数据, 否则统计为 2 个数据。

2.3 GPS 电文正确性计算方法

1) 星历数据正确性: 指从电文数据中解算的星历数据, 每组星历数据各元素是否符合物理特性要求。表达星历数据正确性的指标包括星历数据正确总数、星历数据错误总数。星历正确性判断方法包括: 卫星高度理论值为 20 200 km, 偏心率在 0 到 0.1 之间, 轨道倾角理论值为 55°等。

2) 历书数据正确性: 指从电文数据中解算的历书数据, 每组历书数据各元素是否符合物理特性要求。表达历书数据正确性的指标包括历书数据正确总数、历书数据错误总数。历书正确性判断方法与星历正确性判断方法相同。

3) UTC 数据正确性: 指从电文数据中解算的 UTC 数据, 每

组 UTC 数据各元素是否符合物理特性要求。表达 UTC 数据正确性的指标包括 UTC 数据正确总数、UTC 数据错误总数。

2.4 GPS 电文时效性计算方法

通过电文及时性、电文有效性、星历有效性以及历书有效性描述电文时效性, 具体如下:

1) 电文及时性: 指统计时间内, 接收机解调电文的及时程度。表达电文及时性指标包括电文识别数、电文识别率, 计算方法为:

$$\text{电文识别率} = \text{电文识别数} / \text{理论电文数}$$

2) 电文有效性: 指接收到的电文串, 数据合法的程度。表达电文及时性指标包括电文校验数、电文有效率, 计算方法为:

$$\text{电文有效率} = \text{电文校验数} / \text{电文识别数}$$

3) 星历有效性: 指通过正确性检查的星历数据, 其历元时刻是否满足要求, GPS 星历数据在当前时的 2 小时前后有效。特性指标为星历超时数。

4) 历书有效性: 指通过正确性检查的历书数据, 其历元时刻是否满足要求, GPS 历书数据在当前时的 6 天前有效。特性指标为历书超时数。

3 GPS 电文质量算例分析

3.1 GPS 电文完整性算例

采用某次实测数据, 得到 GPS 电文的完整性如表 1 所示。其中, 3 号、6 号、16 号、27 号、31 号卫星等 5 颗卫星数据完整, 因为其星历遗漏数、帧遗漏数、超帧遗漏数均为 0, 跟踪过程中解算出了全部的星历数据; 其余 5 颗卫星按照帧遗漏数从小到大排序依次为 23 号、21 号、14 号、19 号以及 22 号卫星, 因此 22 号卫星的完整性最差。图 2、图 3 分别绘制了 22 号卫星、3 号卫星的子帧接收情况, 图中可以看出 22 号卫星子帧不连续, 而 3 号卫星子帧连续。

表 1 GPS 电文完整性评估算例

星号	开始时间	结束时间	星历接收数	星历遗漏数	历书收齐星数	历书遗漏星数	帧识别数	帧遗漏数	超帧识别数	超帧遗漏数
3	-327.019	1562.971	63	0	31	1	62	0	2	0
6	-327.05	1562.956	63	0	31	1	62	0	2	0
14	-327.019	1563.002	48	15	31	1	48	14	0	2
16	-327.019	1562.987	63	0	31	1	62	0	2	0
19	-327.003	1550.986	40	22	31	1	38	24	1	1
21	-327.003	1562.987	54	9	31	1	53	9	2	0
22	-326.987	1545.001	7	55	17	15	8	54	0	2
23	-326.988	1562.987	62	1	31	1	61	1	2	0
27	-327.034	1562.971	63	0	31	1	62	0	2	0
29	-266.984	-266.984	0	1	0	32	0	0	0	0
31	-327.034	1562.971	63	0	31	1	62	0	2	0

3.2 GPS 电文一致性算例

采用某次实测数据, 得到 GPS 电文的一致性, 如表 2 所示, 表中仅包含正常跟踪到的卫星。表中“是否一致”的值共 3 种, 1 表示一致, 0 表示不一致, -1 表示未获取到有效数据。正常接收的 10 颗卫星中:

1) 星历数据一致性方面, 除 21 号卫星星历不一致外, 其余卫星星历均一致;

2) 历书数据一致性方面, 除 6 号、14 号、23 号卫星历书一致外, 其余卫星历书均不一致;

3) 电离层数据一致性方面, 21 号卫星获取的电离层不一致, 其余卫星电离层均一致;

表 2 GPS 电文一致性及正确性评估算例

星号	开始时间	结束时间	星历接收个数	星历是否一致	星历错误个数	历书接收个数	历书是否一致	历书错误个数	电离层接收个数	电离层是否一致	UTC 接收个数	UTC 是否一致	UTC 错误个数
3	-327.019	1562.971	63	1	0	75	0	0	3	1	3	1	0
6	-327.05	1562.956	63	1	0	75	1	0	3	1	3	1	0
14	-327.019	1563.002	48	1	0	65	1	0	3	1	3	1	0
16	-327.019	1562.987	63	1	0	75	0	0	3	1	3	1	0
19	-327.003	1550.986	40	1	0	50	0	0	2	1	2	1	0
21	-327.003	1562.987	54	0	1	63	0	0	3	0	3	0	0
22	-326.987	1545.001	7	1	0	22	0	0	0	-1	0	-1	0
23	-326.988	1562.987	62	1	0	74	1	0	3	1	3	1	0
27	-327.034	1562.971	63	1	0	75	0	0	3	1	3	1	0
31	-327.034	1562.971	63	1	0	75	0	0	3	1	3	1	0

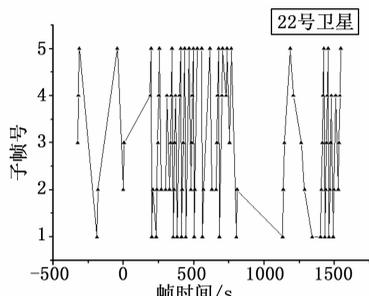


图 2 22 号卫星子帧接收情况

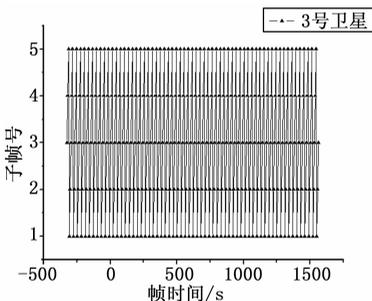


图 3 3 号卫星子帧接收情况

表 4 算例中 GPS 电文历书一致性的原码差值为 1

卫星号	升交点赤经变化率		半长轴平方根	
	原码 1	原码 2	原码 1	原码 2
1	FD43	FD42	A10CF5	A10CF6
3	FD52	FD51	/	/
5	/	/	A10D8A	A10D8B
8	FD43	FD42	A10CF4	A10CF5
11	FD0D	FD0C	A10CEB	A10CEC
13	/	/	A10D11	A10D12
16	FD55	FD54	A10DBF	A10DC0
17	FD6A	FD69	/	/
18	FD33	FD32	A10CB3	A10CB4
19	/	/	A10DC5	A10DC6
21	FD2B	FD2A	/	/
22	/	/	A10C9C	A10C9D
25	FD46	FD45	/	/
27	/	/	A10D02	A10D03
29	/	/	A10E00	A10E01
31	/	/	A10D67	A10D68
32	FD4E	FD4D	A10BE3	A10BE4

3.3 GPS 电文正确性算例

算例中的 GPS 电文正确性如表 2 所示，仅 21 号卫星星历数据有一个数据错误，其余数据均正确（包括历书数据、UTC 数据）。数据错误原因在于按照星历数据处理算法，积累到 1、2、3 子帧数据时，认为可以获取到一组星历数据，当 GPS 系统在更新卫星星历时，第 1、2、3 子帧的数据可能不能完全匹配，此时应当判断数据龄期是否一致，当数据龄期一致时，该星历数据才合法，如表 5 所示。

表 5 21 号卫星错误星历来源

帧时间	龄期 1	龄期 2	龄期 3	星历参考时间	星历正确性
392.998	95	95	95	64800	正确
423	95	1	1	64784	错误
452.982	1	1	1	64784	正确

3.4 GPS 电文时效性算例

在以下算例中，采用某次长弧段数据（近 7 个小时），得到 GPS 电文时效性如表 6 所示，表中数据按照电文识别率由小到大排序。跟踪过程中共发现 19 颗卫星其中 5 颗卫星（11 号、1 号、4 号、16 号、32 号）电文识别率小于 50%，所有卫星未发现过期星历，但发现过期历书。

以 17 号卫星为例，其过期历书均来源于 2 号、5 号、9 号

4) UTC 数据一致性方面，21 号卫星获取的 UTC 不一致，其余卫星 UTC 均一致；

5) 所有卫星获得的卫星健康数据、卫星配置码信息均一致。

下面分析历书数据不一致的原因，为此把获取到的所有卫星的历书一致性情况列在表 3 中，共 17 颗卫星历书不一致，14 颗卫星历书一致（30 号卫星故障，其历书未广播）。表 4 列出了不一致卫星历书的原码，这些历书原码分层值相差为 1。可认为是地面不同测站在注入卫星参数时的计算误差导致。

表 3 算例中 GPS 电文历书一致性表

卫星号	历书是否一致	卫星号	历书是否一致	卫星号	历书是否一致	卫星号	历书是否一致
1	0	9	1	17	0	25	0
2	1	10	1	18	0	26	1
3	0	11	0	19	0	27	0
4	1	12	1	20	1	28	1
5	0	13	0	21	0	29	0
6	1	14	1	22	0	30	-1
7	1	15	1	23	1	31	0
8	0	16	0	24	1	32	0

表 6 GPS 电文时效性评估算例

星号	开始时间	结束时间	理论电文个数	电文识别个数	电文识别率	电文校验个数	电文有效率	星历接收个数	星历超时个数	历书接收个数	历书超时个数
17	4323.9496	24627.9466	3385	3384	100	3384	100	677	0	253	15
23	-284.0344	10113.9256	1734	1725	99.5	1725	100	344	0	261	14
6	5781.9586	24627.9156	3142	2987	95.1	2987	100	569	0	257	15
15	20127.9716	24627.9326	751	662	88.1	662	100	127	0	261	16
19	-140.0414	9933.9616	1680	1476	87.9	1476	100	283	0	257	17
7	-284.0494	21045.9646	3556	3100	87.2	3100	100	582	0	261	16
9	1287.9676	19209.9776	2988	2597	86.9	2597	100	504	0	262	16
28	-284.0494	24627.9626	4153	3575	86.1	3575	100	671	0	259	14
5	10047.9836	24627.9466	2431	1863	76.6	1863	100	325	0	265	15
3	-284.0654	10359.9406	1775	1350	76.1	1350	100	254	0	261	14
30	-284.0494	24627.9326	4153	3155	76	3155	100	596	0	263	12
13	13965.9766	24627.9326	1778	1293	72.7	1293	100	250	0	264	13
27	-284.0344	4551.9506	807	561	69.5	561	100	89	0	256	13
2	12435.9726	24627.9156	2033	1336	65.7	1336	100	243	0	258	12
11	-284.0494	16521.9556	2802	1367	48.8	1367	100	248	0	257	15
1	-284.0494	17289.9746	2930	1396	47.6	1396	100	250	0	260	14
4	-284.0344	10527.9506	1803	740	41	740	100	121	0	265	14
16	-284.0184	1215.9786	251	74	29.5	74	100	6	0	261	17
32	-272.0654	2985.9456	544	154	28.3	154	100	28	0	258	16

卫星。2 号卫星一直下传 61440s 的历书数据; 5 号卫星数据分两部分, 在 14649.94 s 到 17649.96 s 一直下传 61440 s 的历书数据, 在 18399.96 s 到 24399.95 s 一直下传 147456 s 的数据; 9 号卫星数据从 2649.956 s 到 19149.98 s 一直下传 61440 s 的历书数据, 如表 7 所示。

表 7 17 号卫星过期历书来源

星号	开始时间	结束时间	历书时间(GPS 秒)	数量	过期
2	17649.96	24399.93	61440	10	是
5	14649.94	16149.93	61440	3	否
5	16899.95	17649.96	61440	2	是
5	18399.96	24399.95	147456	9	否
9	2649.956	14649.92	61440	17	否
9	17649.95	19149.98	61440	3	是

4 结束语

本文从导航电文的特性出发, 采用质量树的方法, 从电文完整性、电文一致性、电文正确性以及电文时效性等 4 个方面, 建立了 GPS 电文质量模型, 每个质量特性均建立了专属子特性, 以及量子特性的数据指标; 研制了 GPS 电文质量评估软件, 采用实测数据对模型和软件进行了验证, 结果表明, 该模型能够发现 GPS 电文的异常数据, 如数据不完整、

数据不一致、数据不正确、数据超时等, 其结果可用于改进电文参数解算算法, 提高电文参数解算软件的可靠性。

参考文献:

[1] Hu J, Rao A S, Zhang L, et al. A GLONASS Navigation Data Verification Algorithm Under High Bit-error Rates [A]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I [C]. 2015: 553-562.

[2] 白 锋, 徐卡. GNSS QC 用于 GNSS 数据质量分析的研究 [J]. 测绘通报, 2010, (6): 72-46.

[3] 余文坤, 戴吾蛟, 杨 哲. 基于 TEQC 的 GNSS 数据质量分析及预处理软件的设计与实现 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30 (5): 81-85.

[4] 刘荟萃, 唐歌实, 崔红正, 等. 多模 GNSS 数据质量检测方法与软件研发 [J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37 (1): 5-8.

[5] 连 帅, 闫利军, 孙 科. 北斗 2 代卫星导航电文纠错校验设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (10): 2344-2347.

[6] 李天阳, 侯跃鹏, 汪文琳, 等. 一种通用的数据质量评估控制元数据模型 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (9): 146-150.

[7] 杨青云, 赵培英, 杨冬青, 等. 数据质量评估方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 9 (4): 3-4.

[8] 杨艳梅, 王泽根. 空间信息服务质量评价 [J]. 测绘科学, 2011, 36 (4): 139-141.

[9] 叶 飞, 马明星. 基于 HALL 元件的电子油门踏板电路的设计开发 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22 (11): 4-7.

[8] 卢东方, 王毓华, 何平波, 等. 基于 ANSYS 的履带式永磁磁选机磁场模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2014 (8): 2188-2194.

[9] ANSYS 12.0 电磁学有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[10] 柴姗姗, 林 敏, 罗 哉, 等. 电子油门踏板综合测试系统的设计 [J]. 汽车技术, 2013 (1): 48-53.

(上接第 280 页)

[4] Takayama T, Kamitani A, Tanaka A. Numerical simulation of permanent magnet method; Influence of experimental conditions on accuracy of j C-distribution [J]. Physica C: Superconductivity, 2010, 470 (20): 1354-1357.

[5] Haniotis A, Kladas A. Permanent magnet machine operation with static converter: modeling and experimental verification of space harmonics effects [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 106 (1): 286-291.

[6] liupeieffort. 《实用电路设计》第二版出版 [J]. 高保真音响, 2009