

中国沿岸主要验潮站海图深度基准面的计算与分析

暴景阳¹ 刘雁春¹ 晁定波² 肖付民¹

(1 大连舰艇学院海洋测绘系, 大连市解放路 667 号, 116018)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 对中国沿岸有代表性的 15 个验潮站的多年潮位观测资料, 以年序列进行调和分析并据调和常数计算验潮站的海图深度基准面, 分析了由年观测序列求得的调和常数和海图深度基准面的稳定性, 研究和更新了理论上可能最低潮面计算中的浅水分潮和长周期分潮订正算法。计算结果表明, 中国沿岸不同验潮站的海图深度基准面定义和算法存在差异, 新的订正算法计算的可能最低潮面和最低天文潮面具有意义一致性, 研究成果能够用来精化和重新构建中国沿岸海图深度基准面。

关键词: 海图深度基准面; 可能最低潮面; 最低天文潮面

中图分类号: P229.2

计算海图深度基准面并存着多种算法, 算法不同则意味着定义不同。不同国家或地区、甚至同一国家的不同历史时期, 海图深度基准定义都不尽相同^[1,2]。各种算法都力求得到接近但不低于实际可能出现的最低潮面, 其意义是为航海安全提供最小的静水深。最低潮面由潮汐调和常数通过选定的算法而导出, 并以相对于当地平均海面的垂直距离来度量, 因此, 海图深度基准面是一种数值表示, 且随潮汐的空间变化而呈现出区域特征。

从海道测量水位控制的角度看, 验潮站的海图深度基准面的确定精度必须高于水深测量的精度, 甚至应高出一个数量级。然而, 迄今为止, 关于海图深度基准面的精度却鲜有研究。暴景阳研究了海图深度基准面的定义、标定与维持问题以及海图深度基准面的算法^[3,4], 本文则是在以上研究的基础上, 统计分析了中国沿岸有代表性的长期验潮站处海图深度基准的精度, 研究了由不同算法获得的深度基准值的差别, 为精化和重新构建海图深度基准面体系提供理论与技术支持。

1 海图深度基准的算法

海图深度基准相对于平均海面的偏差定义为海图深度基准值, 通常以符号 L 表示, 由平均海面垂直向下量算至深度基准面, 且取值为正。

尽管海图深度基准面的确定存在多种算法, 但在中国沿岸和近海历史上采用的基准面主要有两种, 即略最低潮面(indian springs low water, 印度大潮低潮面)和理论上可能最低潮面(旧称理论深度基准面或理论最低潮面, lowest normal low water, LNLW)。除此之外, 1995 年, 国际海道测量组织推荐其会员国统一采用最低天文潮面(lowest astronomical tide)为海图深度基准面。因此, 本文的研究和讨论基于这三种基准面的算法展开。

1.1 略最低潮面

定义为 4 个最大分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 振幅的叠加, 以符号 L_1 表示:

$$L_1 = H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_1} + H_{O_1} \quad (1)$$

其涵义是: 四个最大分潮基本可以概括总体

潮汐形态, 在它们的公倍周期内可获得最低潮面。

1.2 可能最低潮面

1.2.1 基本原理

由 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 这 8 个分潮叠加计算相对于潮汐振动平均位置(长期平均海面)可能出现的最低水位, 并附加考虑浅水分潮 M_4 、 MS_4 和 M_6 及长周期分潮 S_a 和 S_{sa} 改正, 本文中以符号 L_N 记理论上可能最低潮面。

1.2.2 由 8 分潮计算的模型与算法

按上述 8 个分潮定义的理论可能最低潮面为:

$$L_{N8} = - \min \left[\sum_{i=1}^8 f_i H_i \cos(\Omega_i t + V_{0i} + u_i - g_i) \right] \quad (2)$$

式中, H_i 、 g_i 为分潮的振幅和迟角, 即分潮调和常数; σ 为分潮角速率; V_0 为参考时刻($t=0$)的平衡潮相角; f_i 、 u_i 为分潮交点因子和交点订正角。由式(2)可见, 最基本的自变量为时间 t , 但公式并未给出定义域。

由于所采用的 8 个分潮相角之间满足一定的内在关系, 并且通过适当的假定, 可将式(2)表达的极值问题变换为依赖于 K_1 分潮相角的函数, 于是, 8 分潮的综合潮高改写为^[1,4]:

$$h(\varphi_{K_1}) = K_1 \cos \varphi_{K_1} + K_2 \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) - R_1(\varphi_{K_1}) - R_2(\varphi_{K_1}) - R_3(\varphi_{K_1}) \quad (3)$$

在此, 按通常表示方法以分潮符号代替对应的分潮振幅与最大交点因子的乘积; $a_4 = 2g_{K_1} - g_{K_2} - 180^\circ$ 表示 K_2 分潮相角与 K_1 分潮相角的相依关系; 而 R_1 、 R_2 和 R_3 分别为 M_2 和 O_1 分潮、 S_2 和 P_1 分潮、 N_2 和 Q_1 分潮的各自合成复合振幅, 仍为 φ_{K_1} 的函数, 而且, 与式(2)严格的等价潮高表达应包括上述三对分潮组合的复相角。为简化求极值计算, 略去了这些复相角部分, 实际上相当于对三对分潮的综合潮高取局部极小值(规定 3 对分潮的复合相角均为 180°)。于是, 在这种简化表达下, 式(3)可视为对式(2)的改进, 并将多极值函数化为单极值函数, 并赋以明确的定义域, 以方便极值问题的求解。依据式(3), 以 φ_{K_1} 的较小步长(手工计算时通常取 15° , 计算机处理时通常取 1° 或更小)数值计算一个周期(360°)内的最低潮高(值为负), 并取绝对值, 实现式(2)所要求的极值表达, 取极值时的 φ_{K_1} 为 $\varphi_{K_1}^0$ 。

1.2.3 浅水分潮订正

在某些海域, 特别是沿岸海域, 由于海底摩擦作用增强, 浅水分潮对可能最低潮面的影响是不可忽略的, 最大的三个浅水分潮分别是 M_2 分潮

的倍潮 M_4 、 M_6 以及 M_2 分潮和 S_2 分潮的复合潮 MS_4 。我国现行《海道测量规范》(GB12327-1998)将原规范中规定的当三个分潮的振幅之和超过 20 cm 时作浅水分潮订正更改为对任何验潮地点的深度基准面计算施加浅水分潮订正。订正的公式为:

$$L_{N11} = L_{N8} + \Delta L_S \quad (4)$$

式中, ΔL_S 为浅水分潮订正值, 计算公式为:

$$\Delta L_S = M_4 \cos \varphi_{M_4} + MS_4 \cos \varphi_{MS_4} + M_6 \cos \varphi_{M_6} \quad (5)$$

式中, 三个浅水分潮的相角与其源分潮的相角具有确定的相依关系。顾及浅水分潮的源分潮 M_2 和 S_2 相角与 φ_{K_1} 的联系, 由 $\varphi_{K_1}^0$ 计算浅水分潮的订正值。

略作分析可以发现, 在 φ_{K_1} 的极值点处得到的浅水分潮订正值具有明显的随机性, 计算的可能最低潮位不一定是 11 个分潮组合可能出现的最低值。因此, 合理的订正方法不应是 φ_{K_1} 的极值点的点改正, 而应是该点一定区间内可能出现最低潮的区间改正。由于三个浅水分潮的周期约为 K_1 分潮周期的 $1/4$ (四分之一日分潮)或更小(六分之一日分潮), 故宜在 φ_{K_1} 的极值点的 60° 范围内寻找 11 个分潮组合可能出现的最低潮高值。所以, 由 11 个分潮计算 L_{N11} 的公式改为:

$$L'_{N11} = - \min [K_1 \cos \varphi_{K_1} + K_2 \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) - R_1(\varphi_{K_1}) - R_2(\varphi_{K_1}) - R_3(\varphi_{K_1}) + M_4 \cos \varphi_{M_4} + MS_4 \cos \varphi_{MS_4} + M_6 \cos \varphi_{M_6}], \varphi_{K_1} \in [\varphi_{K_1}^0 - 30^\circ, \varphi_{K_1}^0 + 30^\circ] \quad (6)$$

1.2.4 长周期分潮订正

计算深度基准面时所需考虑的长周期分潮为 S_a 和 S_{sa} 。在目前的各种文献和《海道测量规范》(GB12327-1998)中, 长周期分潮对深度基准值计算结果的订正采用的算法与浅水分潮订正类似, 即根据两个长周期分潮的相角与 φ_{K_1} 的关系获得 φ_{K_1} 对应的长周期分潮的潮高贡献。

两个长周期分潮本质上不属于天文潮, 其相角与 φ_{K_1} 的关系也不存在明确的物理意义。因此, 在 K_1 分潮的一个周期内进行年周期和半年周期的改正显然缺乏合理性。顾及 K_1 分潮和两个长周期分潮周期的巨大差异, 采用季节改正数法作长周期分潮订正更能表达顾及了长周期分潮的最低潮涵义。而季节改正数决定于 H_{Sa} , 所以, 长周期分潮订正值宜取为:

$$\Delta L_L = H_{Sa} \quad (7)$$

在浅水分潮改正的基础上再作季节改正, 实

实际上采用的是由 12 个主要分潮求海图深度基准面的模型, 记 S_a 分潮振幅订正后的理论上可能最低潮面数值为 $L_{N_{12}}$ 。

1.3 最低天文潮面

英国为统一全国的海图深度基准面, 采用了最低天文潮面, 即取潮汐预报中出现的最低水位与平均海面的差值作为基准值。20 世纪 90 年代中期, 国际海道测量组织推荐其会员国采用该算法。本文中记最低天文潮面的数值为 L_a 。

在潮汐预报中, 采用的分潮有多种取法, 在基准值计算时往往采用量值较大的数个分潮, 可以只包括纯天文分潮, 也可附加部分浅水分潮和长周期分潮, 但在附加这些分潮时, 已不是严格意义的最低天文潮面了。

若采用了 n 个分潮的潮高表示模型, 则 LAT 的数值可表达为:

$$L_a = - \min \left[\sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\Omega t + V_{0i} + u_i - g_i) \right] \quad (8)$$

在此, 时间 t 的取值范围可定为适当的潮汐周期, 比如 1 a 或 19 a。

2 计算与分析

2.1 数据与调和分析

本文计算采用的数据来自 Hawaii 大学海平面数据中心, 在中国沿岸, 该数据中心共有 15 站的长期观测资料, 而且, 这些长期验潮站在中国沿岸有很好的代表性。在这些验潮站逐时水位观测的时间长度最短为 5 a, 最长 44 a, 验潮站的分布如图 1 所示。

将每个验潮站的数据以年序列作潮汐调和分

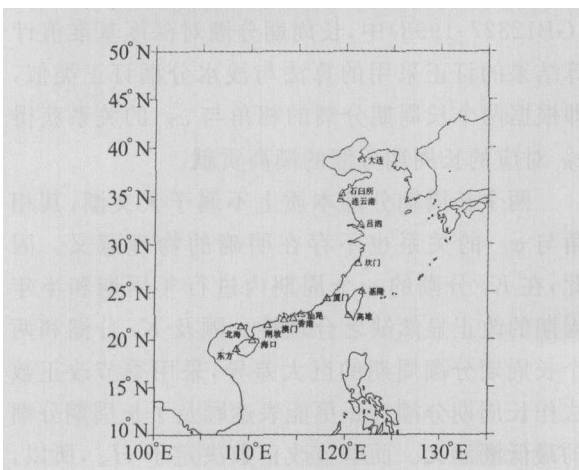


图 1 验潮站分布图

Fig. 1 Distribution of Tidal Gauges for the Study

析, 获得计算深度基准面所需的主要分潮的调和常数序列。分析结果表明, 位于黄海的验潮站以及广西北海验潮站的主要分潮调和常数较不稳定, 且有明显的逐年变化趋势, 其原因有待于通过海洋动力学观点分析研究。

2.2 不同算法所得深度基准面的稳定性分析

分别以各年份调和结果数据计算各站的略最低潮面、不同分潮数目的可能最低潮面 and 不同分潮数目的最低天文潮面, 对各年分析结果算得的基准面序列作统计分析, 得中误差 (RMS), 列于表 1。

表 1 各种算法计算的深度基准面的中误差/cm
Tab. 1 Root Mean Squares of the Chart Datum Values Computed Through Annual Harmonic Constants with Different Algorithms

验潮站	数据 年数	RMS						
		L_i	L_{N_8}	$L_{N_{11}}$	$L_{N_{13}}$	L_{a_8}	$L_{a_{11}}$	$L_{a_{13}}$
大连	7	1.02	1.20	1.32	3.99	1.11	1.22	2.52
石臼所	23	3.15	3.30	2.97	3.59	3.45	2.97	3.53
连云港	23	5.79	5.97	5.68	7.02	6.46	6.95	6.48
吕泗	21	4.89	2.67	3.29	8.06	2.34	2.71	2.94
坎门	23	2.05	2.35	2.23	4.20	2.32	2.28	3.38
基隆	18	0.63	0.93	0.98	2.40	0.91	0.96	1.98
厦门	44	3.58	4.06	4.12	5.28	4.30	4.51	6.27
汕尾	22	0.57	0.66	1.40	3.36	0.68	0.98	3.23
高雄	19	0.64	0.74	0.77	5.16	0.76	0.79	2.70
香港	17	2.09	1.95	2.09	4.53	1.93	2.14	4.58
澳门	5	0.43	0.65	0.86	2.30	0.61	0.84	5.61
闸坡	23	0.75	0.86	0.87	3.82	0.91	0.89	4.08
北海	23	6.88	6.75	6.68	6.68	6.58	6.58	7.04
海口	22	2.78	2.14	2.17	2.94	1.96	1.63	3.30
东方	23	3.54	3.43	3.52	4.45	3.35	2.94	4.04

表 1 数据表明, 调和常数较为稳定的验潮站, 由年分析结果采用不同算法获得的深度基准面的中误差基本在 5 cm 之内。调和常数较不稳定(有变化趋势)的验潮站, 其深度基准面的中误差均在 10 cm 之内。说明中国沿岸验潮站若采用 1 a 以上观测数据, 计算的深度基准面具有 cm 级的稳定性。

2.3 不同算法所得深度与现用基准面的偏差

在所研究的验潮站, 均具有实际采用的海图深度基准面, 这些基准值也是由理论上可能最低潮面的某种算法计算的, 但所采用的基础数据未知。本文利用不同算法求得的各站深度基准面的各年平均值与这些采用基准值差异的绝对值列于表 2。

表 2 表明, 由不同算法求定的深度基准面存在明显偏差, 与目前采用的基准值也存在明显差异。表中加粗表示的数字基本(顾及到深度基准确定的实际背景)表示了算法对应的计算结果与实

表 2 各种算法的计算基准面与实际采用值的差值/cm

Tab. 2 Differences of the Computed Datum Values to Those of in Use

验潮站	不同算法所得深度基准值与采用值的差值绝对值						
	L_i	L_{N_8}	$L_{N_{11}}$	L_{a_8}	$L_{a_{11}}$	$L_{a_{13}}$	
大连	14.73	2.74	3.23	11.10	4.1	4.7	26.2
石臼所	35.14	5.45	3.05	18.86	5.1	1.5	18.5
连云港	23.71	7.90	6.40	14.49	7.6	8.9	30.0
吕泗	33.35	3.80	12.56	0.02	2.3	12.1	28.3
坎门	35.48	1.92	6.40	14.19	4.7	10.1	21.5
基隆	3.32	19.60	19.95	44.86	18.6	19.1	34.4
厦门	29.45	2.53	7.32	16.72	4.8	5.1	7.2
汕尾	2.40	2.38	11.34	19.23	3.7	3.0	7.5
高雄	2.57	7.05	6.49	0.43	7.7	7.1	4.9
香港	15.76	13.22	12.85	19.92	14.4	13.0	3.0
澳门	69.48	65.72	59.36	62.7	67.7	60.5	50.6
闸坡	1.66	1.14	0.66	7.60	2.5	0.8	10.1
北海	9.24	5.82	4.36	3.79	10.7	9.1	2.5
海口	22.41	6.51	5.78	1.52	4.2	3.1	9.5
东方	4.16	2.20	1.97	4.74	1.2	2.2	7.2

表 3 可能最低潮面与最低天文潮面的差/cm

Tab. 3 Differences Between the LNLW and LAT

验潮站	$ L_{N_8} - L_{a_8} $	$ L_{N_{11}} - L_{a_{11}} $	$ L_{N_{11}} - L_{a_{11}} $	$ L_{N_{13}} - L_{a_{13}} $	$ L_{N_{12}} - L_{a_{13}} $	Hsa
大连	1.32	1.44	1.44	36.29	0.48	23.44
石臼所	0.38	1.53	0.52	0.31	1.35	21.93
连云港	0.29	2.48	0.31	44.49	1.22	22.04
吕泗	1.53	0.51	0.50	28.32	2.43	18.22
坎门	2.79	3.73	3.69	7.34	2.59	12.50
基隆	1.00	0.88	0.96	0.48	1.96	16.32
厦门	2.32	2.32	2.29	23.87	1.31	13.19
汕尾	1.30	8.36	1.62	26.78	1.61	10.54
高雄	0.70	0.64	0.64	4.49	0.38	11.04
香港	1.14	0.17	1.18	16.96	2.69	11.57
澳门	1.93	1.09	1.49	12.12	1.79	10.20
闸坡	1.34	1.50	1.64	17.69	1.57	10.86
北海	4.89	4.77	4.79	6.30	7.80	9.65
海口	2.35	2.66	2.70	7.98	5.53	9.22
东方	3.45	4.14	4.17	11.95	3.83	9.01

际采用值的最小偏差, 由此, 可大体判定各站目前采用的基准值在确定时采用的算法。如台湾省采用略最低潮面确定基准值, 而用其他算法获得的基准值往往存在较大偏差; 香港明显地采用了英国基准值确定方法; 澳门验潮站目前采用的基准面与各算法的计算值均有较大差异。我国海道测量部门所确定的深度基准值虽然都采用理论上可能最低潮面算法, 但明显可见取用的分潮个数不尽相同, 在一些验潮站并没有顾及浅水分潮改正或长周期分潮订正。所有这些表明, 在中国沿岸, 各验潮站采用的深度基准面的算法带有明显的不一致现象, 因此, 深度基准面的最低潮面意义也存在明显差别。换言之, 中国沿岸的深度基准面处于不同的基准系统中。在测深精度提高及陆海地形图拼接的要求下, 统一、更新和精化海图深度基准面有着显著的必要性。

2.4 可能最低潮面与最低天文潮面的比较

取相同的分潮个数, 分别计算各验潮站的理论上可能最低潮面和最低天文潮面, 在理论上可能最低潮面的算法中, 对浅水分潮和长周期分潮订正采用了不同的处理方法。两种定义的基准值的比较结果列于表 3, 表的最后一列为年周期分潮的振幅, 用作长周期分潮订正。

表 3 数据表明, 采用 8 个分潮和 11 个分潮计算深度基准面, 理论上可能最低潮面与最低天文潮面的数值相差均在 5 cm 之内, 说明两种算法可给出基本相符的最低潮面。按通常的长周期分潮订正算法获得的理论上可能最低天文潮面却与 13 个分潮计算的最低天文潮面有明显的偏差。在所研究的验潮站中, 最大差值达到 44 cm, 反映

了最低潮面意义的不同; 而在直接以年周期分潮振幅作为订正值时, 与 13 个分潮计算的最低天文潮面基本吻合。这说明只要采用合适的算法, 可能最低潮面与最低天文潮面具有良好的意义一致性, 均可表明是由主要分潮决定的最低潮面, 满足海图深度基准面定义的准则。而且, 在以 cm 级精度统一、更新和精化深度基准面系统的需求下, 两种基准面系统可视为无差别。

3 结 语

- 1) 由 1 a 或更长时间尺度的潮位观测序列, 经调和求得潮汐调和常数, 计算海图深度基准面的稳定性在中国沿岸在 cm 级。
- 2) 中国沿岸长期验潮站的深度基准面不处于同一基准系统, 表现出采用的算法不同。即使在采用理论上可能最低天文潮面的各验潮站, 顾及的分潮数目也不尽相同。
- 3) 在依理论上可能最低潮面模型计算深度基准面时, 宜采用合适的浅水分潮与长周期分潮订正算法, 以保证得到由所顾及的分潮表达的最低潮面。建议浅水分潮订正采用区间订正法, 长周期分潮订正直接按年周期分潮振幅修正。
- 4) 采用本文提出的浅水分潮和长周期分潮订正算法后, 理论上可能最低潮面与最低天文潮面的差别在 cm 级, 因此, 精化中国沿岸海图深度基准面的任务不在于计算模型的改变, 只需在算法上作部分改进。

致谢: 感谢 Hawaii 大学海平面数据中心提供潮位观测数据。

参 考 文 献

- [1] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986
- [2] 刘雁春. 海道测量基准传递的数学模型[J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 310-316
- [3] 暴景阳. 海图深度基准面的定义、标定与维持[J]. 海洋测绘, 2000, 20(4): 4-8
- [4] 暴景阳, 黄辰虎, 刘雁春, 等. 海图深度基准面算法研究[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 8-12

第一作者简介: 暴景阳, 副教授, 博士。现主要从事海洋大地测量学研究。

E-mail: jingyangb@sina.com

Computations and Analyses of Chart Datum to Coastal Tide Gauges of China

BAO Jingyang¹ LIU Yanchun¹ CHAO Dingbo² XIAO Fumin¹

(1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: 15 typical tidal gauges along the coast of China are selected for the research of their chart datum. The harmonic constants are analyzed through the least squares with multi-year water level observations. The stability for the datum values computed through different algorithms are studied according to statistics. The algorithms of the correction of shallow water tides and long period tides to the lowest normal low water (LNLW) are renewed.

Key words: chart datum; LNLW; LAT

About the first author: BAO Jingyang, associate professor, Ph. D. He is engaged in the research on marine geodesy.

E-mail: jingyangb@sina.com

(上接第 220 页)

Accurately Determining DOA and TOA in Multi-beam Sonar Sounding

YANG Fanlin^{1,2} ZHAO Jianhu³ ZHOU Fengnian⁴ DU Zhixing²

(1 Laboratory of Submarine Geosciences of State Oceanic Administration, 36 North Baoshu Road, Hangzhou 310012, China)

(2 Geoinformation Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao Economic and Technical Development Area, Qingdao 266510, China)

(3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4 The Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Changjiang Estuary, Changjiang Water Resources Commission, Taicang 215431, China)

Abstract: This paper introduces the detecting echo methods for multi-beam sonar. It describes the disadvantage of BDI and WMT detecting methods. So Maximal Amplitude Determining Echo method is presented. It adopts median filter and local variance estimation and wavelet analysis to remove outliers and noises, then one ping data are considered as planar signals and are processed through image processing methods. After high amplitude data have been segmented, accurate and robust DOA and TOA are obtained. The simulated data are analyzed in this paper, and good results are verified.

Key words: multi-beam sonar; direction of arrivals; time of arrivals

About the first author: YANG Fanlin, Ph. D, associate professor, majors in marine survey, GPS and their data processing.

E-mail: flvgps@sina.com