第19卷 第5期 航 空 学 报 Vol. 19 No. 5
1998年 9月 ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA Sep. 1998

GPS载波相位组合观测值理论研究

常 青 柳重堪 张其善
(北京航空航天大学电子工程系, 北京, 100083)

STUDY FOR THE THEORY OF THE COMBINATIONS OF GPS CARRIER PHASE OBSERVATIONS

Chang Qing, Liu Zhongkan, Zhang Qishan
(Department of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘 要 给出了组合观测值的一般性定义, 分析了组合观测值的误差传播规律, 讨论了几种特殊的组合观测值的特性。对组合观测值的概念进行了推广, 给出了组合观测值可匹配的定义和可匹配的充要条件。

关键词 全球定位系统 载波相位 组合观测值 误差传播

中图分类号 V474.2

Abstract The general definition and error propagation law of the combinations of GPS carrier phase observations are given and the features of several special combinations of GPS carrier phase observations are discussed. Then matchable definition and matchable necessary and sufficient conditions of the combinations of GPS carrier phase observations are presented.

Key words GPS, carrier phase, combinations of GPS carrier phase observations, error propagation

以载波相位为观测量的快速高精度GPS定位可分为物理坐标空间和模糊度空间2种搜索途径。在模糊度空间进行搜索的目标是在尽可能短的时间内找到一组正确的整周模糊度。目前, 人们已经提出了很多用于计算整周模糊度的搜索算法[1,2]。当观测时间较短时, 双差模糊度的搜索空间通常是一个倾斜的扁长度很大的超椭球, 目前的搜索算法用于这样的搜索空间时效果都不十分好[3]。因此, 如何提高目前的搜索算法的计算效率是一个值得研究的问题。物理坐标空间的搜索算法主要是模糊度函数法[4], 由于该方法对周跳不敏感, 因而很多人对它在GPS中可能起到的作用感兴趣。使用该方法确定GPS基线时存在2个明显的问题: ①计算时间过长; ②在搜索范围内要对许多极值点加以区分。这2个问题都是由所采用的观测量的波长较短引起的, 如果能用波长较长的载波相位观测值, 则可大大提高模糊度函数的计算效率。除了上面提到的用于确定整周模糊度的搜索算法外, 人们还试图利用P码观测值确定模糊度, 这时的主要困难是P码伪距的精度难以与载波相位观测值的精度相匹配。如果能有波长较长的载波相位观测值, 则会使直接利用P码伪距确定整周模糊度变得很方便。另外, 对平方通道接收机, 由于L_2载波观测值波长实际只有12cm, 这使整周模糊度, 特别是整半周模糊度的确定很困难, 因而在计算整周模糊度时如何利用半波长的L_2载波相位观测值也是一个值得研究的问题。以上问题促使人们提出了载波相位组合观测值的

1997-11-11收到, 1998-04-07收到修改稿
中国工程物理研究院科学技术基金资助课题

概念。利用组合观测值不仅能得到人们所希望的波长较长的相位观测值, 而且由它引出的模糊度变换还可大大提高模糊度搜索算法的计算效率。

1　组合观测值的定义

假设接收机振荡器信号与卫星信号严格同步, 且忽略大气折射影响, 则 L_1 和 L_2 相位观测值的基本观测方程为[5]

$$L_1:\ \varphi_1(\mathrm{cy}) = \rho/\lambda_1 - N_1 \tag{1}$$

$$L_2:\ \varphi_2(\mathrm{cy}) = \rho/\lambda_2 - N_2 \tag{2}$$

式中: ρ 是测站和卫星间的距离; N_1 和 N_2 分别是 φ_1 和 φ_2 的整周模糊度; λ_1 ($\lambda_1 = 19\mathrm{cm}$) 和 λ_2 ($\lambda_2 = 24\mathrm{cm}$) 是 L_1 和 L_2 的载波波长; cy 表示 φ_1 和 φ_2 以周 (cycle) 为单位, 若用 m, 则表示 φ_1 和 φ_2 以 m 为单位。对 $\varphi_1(\mathrm{cy})$ 和 $\varphi_2(\mathrm{cy})$ 进行线性组合, 得

$$\varphi(\mathrm{cy}) = i\varphi_1(\mathrm{cy}) + j\varphi_2(\mathrm{cy}) \tag{3}$$

其中: i, j 为任意实数。式 (3) 中的 $\varphi(\mathrm{cy})$ 称为组合观测值。将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3), 得

$$\varphi(\mathrm{cy}) = (i/\lambda_1 + j/\lambda_2)\rho - (iN_1 + jN_2) \tag{4}$$

于是组合观测值的波长、频率、模糊度为

$$\lambda = 1/(i/\lambda_1 + j/\lambda_2),\ f = if_1 + jf_2,\ N = iN_1 + jN_2 \tag{5}$$

为了保证模糊度 N 为整数, 以下仅讨论 i, j 取整数的线性组合。

对于平方通道接收机, L_2 载波相位观测值的波长是 λ_2 的 1/2, 用 λ_{2c} 表示, 则有

$$\varphi_{2c}(\mathrm{cy}) = \rho/\lambda_{2c} - N_{2c} \tag{6}$$

式中: N_{2c} 为整半周模糊度。将上式两边同除以 2, 得

$$\varphi_2(\mathrm{cy}) = \rho/\lambda_2 - N_{2c}/2 \tag{7}$$

于是 $N = iN_1 + jN_{2c}/2$, 因此 j 必须是偶整数。

2　组合观测值的误差传播规律

2.1　随机误差的传播规律

假定 φ_1 和 φ_2 观测值的均方误差相等, 都等于 $\sigma_0(\mathrm{cy})$, 则由式 (3) 得到组合观测值的均方误差为

$$\sigma_\varphi(\mathrm{cy}) = \sqrt{i^2 + j^2}\,\sigma_0(\mathrm{cy}) \tag{8}$$

可见当以波长为单位时组合观测值的随机误差总比 φ_1 和 φ_2 的随机误差大。由式 (4) 得组合观测值的模糊度的误差方差为

$$\sigma_N^2(\mathrm{cy}) = \sigma_0^2(\mathrm{cy})(i^2 + j^2) + \sigma_\rho^2(\mathrm{m})/\lambda^2 \tag{9}$$

其中: σ_ρ 为 ρ 的均方误差。若假定 ρ 具有某些先验特性, 则均方差 σ_ρ 与 λ 无关, 这时从统计观点看, 选用一个大的波长是有利的。

2.2　系统误差的传播规律

(1) 对流层延迟的传播　假定组合观测值的对流层延迟为 $T(\mathrm{m})$, L_1 和 L_2 载波相位观测值的对流层延迟相等, 都为 $T_0(\mathrm{m})$, 则由式 (3) 可得

$$T(\mathrm{m}) = [iT_0(\mathrm{m})/\lambda_1 + jT_0(\mathrm{m})/\lambda_2]\lambda = T_0(\mathrm{m}) \tag{10}$$

可见组合观测值与 L_1 和 L_2 载波相位观测值受相同的对流层延迟影响。

(2) 电离层延迟的传播　φ_1 和 φ_2 上的电离层延迟可表示为

$$I_1(\mathrm{m}) = -E/f_1^2,\qquad I_2(\mathrm{m}) = -E/f_2^2$$

其中：E 为与电离层电子密度有关的常数。于是 $I_2(\mathrm{m}) = q^2 I_1(\mathrm{m})$，其中 $q = \lambda_2/\lambda_1$。从而组合观测值的电离层延迟为

$$I(\mathrm{m}) = [iI_1(\mathrm{m})/\lambda_1 + jI_2(\mathrm{m})/\lambda_2]\lambda = (\lambda/\lambda_1)(i + qj)I_1(\mathrm{m}) \tag{11}$$

3 组合观测值的特性指标及一些特殊的组合观测值

3.1 组合观测值的特性指标

为了衡量每种组合观测值的好坏，选择下面 3 种特性指标。

(1) 波长参数 β_λ 定义为组合观测值的波长与 L_1 载波波长之比，即

$$\beta_\lambda = \lambda/\lambda_1 = 77/(77i + 60j) \tag{12}$$

(2) 电离层参数 β_i 定义为组合观测值的电离层延迟与 L_1 载波观测值电离层延迟之比，即

$$\beta_i = I(\mathrm{m})/I_1(\mathrm{m}) = (4620i + 5929j)/(4620i + 3600j) \tag{13}$$

(3) 随机误差参数 β_p 定义为组合观测值的随机误差与 L_1 载波观测值随机误差之比，即

$$\beta_p(\mathrm{cy}) = \sigma_\Phi(\mathrm{cy})/\sigma_1(\mathrm{cy}) = \sqrt{i^2 + j^2} \tag{14}$$

3.2 一些特殊的组合观测值

(1) 波长比 λ_2 大和波长比 λ_1 小的组合观测值 计算表明，波长比 λ_2 大的组合观测值只有有限个，表 1 列出了其中线性独立的组合观测值。表 1 中 $i = 1, j = -1$ 的组合观测值在求解模糊度时最经常使用，其波长约为 86cm，相应的 $\beta_\lambda = 4.5294$，$\beta_i = -1.2833$，$\beta_p(\mathrm{cy}) = 1.4124$，可见该组合观测值具有良好的特性。但由于 $j = -1$，故对 L_2 载波观测值为半波长的接收机不适用。$i = -7, j = 9$ 的组合观测值为波长最长的组合观测值，其波长约为 1465cm，但该组合观测值其它的特性指标很差(见表 2)。为了得到具有较好特性的长波长的组合观测值，令 $\lambda > \lambda_2$，$\beta_i < 20$，$\beta_p(\mathrm{cy}) < 5$，满足以上要求的线性组合的 i, j 值为 $(-3, 4)$，$(-2, 3)$，$(-1, 2)$，$(1, -1)$，$(2, -2)$，$(3, -3)$。表 2 列出了其中部分组合观测值的特性指标。由于 $(-2, 3)$，$(3, -3)$ 的特性指标不如其它的好，且 j 为奇数，对 L_2 载波观测值为半波长的接收机不适用，故未将它们列入表 2。波长比 λ_1 小的组合观测值见表 2 中的 $\Phi_1 + \Phi_2$ 和 $5\Phi_1 - 4\Phi_2$。其中 $\Phi_1 + \Phi_2$ 较常用，但由于 $j = 1$，故对 L_2 载波观测值为半波长的接收机不适用。

(2) 无电离层延迟影响的组合观测值 令 $\beta_i = 0$，$\beta_\lambda > 0$，满足以上 2 个条件的使 $\beta_p(\mathrm{cy})$ 尽量小的线性组合的 i, j 值为 $(77, -60)$，即组合观测值 $77\Phi_1 - 60\Phi_2$ 能够消除电离层延迟的影响。但该观测值的波长太短，仅为 0.63cm。表 2 中列出了该观测值的其它特性指标。

(3) 随机误差最小的组合观测值 令 $\beta_\lambda > 0$，$\beta_p(\mathrm{cy}) = \min$，满足以上 2 个条件的线性组合的 i, j 值为 $(1, 0)$，$(0, 1)$，即当以波长为单位时原始的两个载波相位观测值的随机误差比任何组合观测值的随机误差都小。

4 组合观测值的可匹配性

前面的研究是从 2 个原始的载波相位观测值开始，然后以一个组合观测值结束。尽管这个单个的组合观测值可能具有所希望的性质，但就包含的信息量来说，它比原始的两个观测值所包含的信息量要少。为了保存原始观测值的信息量，必须成对地使用组合观测值。当成对地使用组合观测值 $\Phi_{i_1j_1} = i_1\Phi_1 + j_1\Phi_2$，$\Phi_{i_2j_2} = i_2\Phi_1 + j_2\Phi_2$ 时，组合观测值和原始观测值之间具有如下的二维线性转换关系

$$\begin{bmatrix} \phi_{i_1 j_1} \\ \phi_{i_2 j_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 \\ i_2 & j_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

表 1　波长比 λ_2 大的线性独立的组合观测值

i	j	λ/m	i	j	λ/m	i	j	λ/m
-29	38	0.3118	-8	11	0.3330	13	-16	0.3574
-27	35	0.6977	-7	9	14.6526	14	-17	0.2526
-25	33	0.2664	-5	7	0.4186	15	-19	0.9768
-24	31	1.2211	-3	4	1.6281	17	-21	0.2990
-23	30	0.5053	-2	3	0.5636	18	-23	2.4421
-22	29	0.3185	-1	2	0.3408	19	-24	0.6371
-19	25	0.3960	1	-1	0.8619	21	-26	0.2571
-17	22	1.3321	5	-6	0.5861	23	-29	0.4727
-16	21	0.5233	6	-7	0.3489	25	-32	2.9305
-13	17	0.7712	7	-8	0.2483	26	-33	0.6660
-11	15	0.2765	9	-11	0.4440	27	-34	0.3757
-10	13	1.4653	11	-14	2.0932	29	-37	1.1271

表 2　一些特殊的组合观测值及其特性指标

i	j	λ/m	β_λ	β_i	β_p (cy)
1	0	0.1903	1.0000	1.0000	1.0000
0	1	0.2442	1.2833	1.6469	1.0000
1	-1	0.8619	4.5294	-1.2833	1.4142
1	1	0.1048	0.5789	1.2833	1.4142
-1	2	0.3408	1.7907	2.8054	2.2361
2	-2	0.4310	2.2647	-1.2833	2.8284
-3	4	1.6281	8.5556	18.2518	5.0000
5	-4	0.1036	0.5453	0.1207	6.4113
-7	9	14.6526	77.0000	350.3500	11.4018
77	-60	0.0063	0.0331	0.0000	97.6166

组合观测值的模糊度和原始观测量的模糊度之间也具有类似于式(15)的二维线性转换关系

$$\begin{bmatrix} N_{i_1 j_1} \\ N_{i_2 j_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 \\ i_2 & j_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} \tag{16}$$

从保存原始观测值的信息量和模糊度具有整数特性 2 个方面来考虑, 必须要求式(15)中的转换矩阵是可逆的, 且逆矩阵具有整数元素。称转换矩阵满足以上条件的 2 个组合观测值是可以匹配的。为了能够容易地判别两个组合观测值是否可以匹配, 下面给出 2 个充分必要条件。

(1) L_2 载波观测值为整波长时的充分必要条件: 当 L_2 载波观测值为整波长时, 组合观测值可匹配的充分必要条件是式(15)中的转换矩阵的行列式为 $\det A = \pm 1$。

(2) L_2 载波观测值为半波长时的充分必要条件: 当 L_2 载波观测值为半波长时, 组合观测值可匹配的充分必要条件是式(15)中的转换矩阵的行列式为 $\det A = \pm 2$。

限于篇幅, 以上 2 个充要条件的证明从略。

由以上 2 个充要条件可知: 组合观测值 $\phi_1 - \phi_2$, $-\phi_1 + 2\phi_2$, 当 L_2 载波观测值为整波长时可以匹配; 组合观测值 $2\phi_1 - 2\phi_2$, $-3\phi_1 + 4\phi_2$, 当 L_2 载波观测值为半波长时可以匹配。

前面仅仅讨论了单通道双频观测值的情况, 实际上组合观测值的概念还可进一步推广

到 n 个通道的双频观测值。由于此时的组合观测值的概念、可匹配的定义及可匹配的充要条件均与单通道时类似, 在此不再赘述。

5 结束语

目前组合观测值在以下 3 个方面获得了应用: ①提高模糊度函数的计算效率[6]; ②利用可匹配的组合观测值的变换矩阵, 提高模糊度搜索算法的计算效率[3]; ③用于扩频法(即 P 码双频法)及 L_2 载波观测值为半波长的接收机[6]。因此, 组合观测值理论具有良好的应用前景。

参 考 文 献

1 Landau H, Euler H J. On-the-fly ambiguity resolution for precise differential positioning. Proceedings of GPS-92. Alexandria, Virginia: The Institute of Navigation, 1992. 607～613.

2 Chen D. Fast ambiguity search filter (FASF): a novel concept for GPS ambiguity resolution. Proceedings of GPS-93. Alexandria, Virginia: The Institute of Navigation, 1993781～787.

3 一种确定载波整周模糊度的新方法. 高希余, 边洪淑译. 武测译文, 1996, (4): 9～13.

4 Mader G L. Rapid static and kinematic global positioning system slutions using the ambiguity function technique. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(3): 3271～3283.

5 周忠谟, 易杰军. GPS 卫星测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1992. 82～86.

6 韩绍伟. GPS 组合观测值理论及应用. 测绘学报, 1995, 24(2): 8～13.

(上接 574 页)

关键词 特征设计, 约束, 特征模型, 尺寸驱动
航空科学基金资助课题

多指手的位置/力混合操作= Hybrid position/force manipulation of multifingered hand/管贻生(北京航空航天大学), 张启先, 李泽湘(香港科技大学). -1998, 11(2). - 143～151

探讨物体与外部环境接触时的多指手操作问题, 提出了在力约束和位置约束条件下的位置和力操作两个概念, 以及相应的算法。然后对它们进行组合从而发展出位置/力混合操作的算法, 用以操作与外部环境相接触的物体。最后用实验证实了所提方法的可行性和有效性。多指手应用研究的一个初步探索。参 13

关键词 多指手, 操作, 混合控制, 运动学

纤维金属层板疲劳裂纹扩展速率的影响因素分析= Factors affecting fatigue crack growth rates of fiber reinforced metal/郭亚军(北京航空材料研究院), 吴学仁. - 1998, 11(2). - 152～156

用纤维金属层板疲劳裂纹扩展速率与寿命的预测模型, 对层板疲劳性能的几种典型影响因素进行了分析, 即铺层结构、增强纤维的弹性模量、残余应力状况对层板的疲劳性能均有很大影响, 而层板的层间性能的影响相对较小, 胶粘剂剪切模量对层板的疲劳性能影响不大。参 3

关键词 纤维金属层板, 疲劳裂纹扩展速率