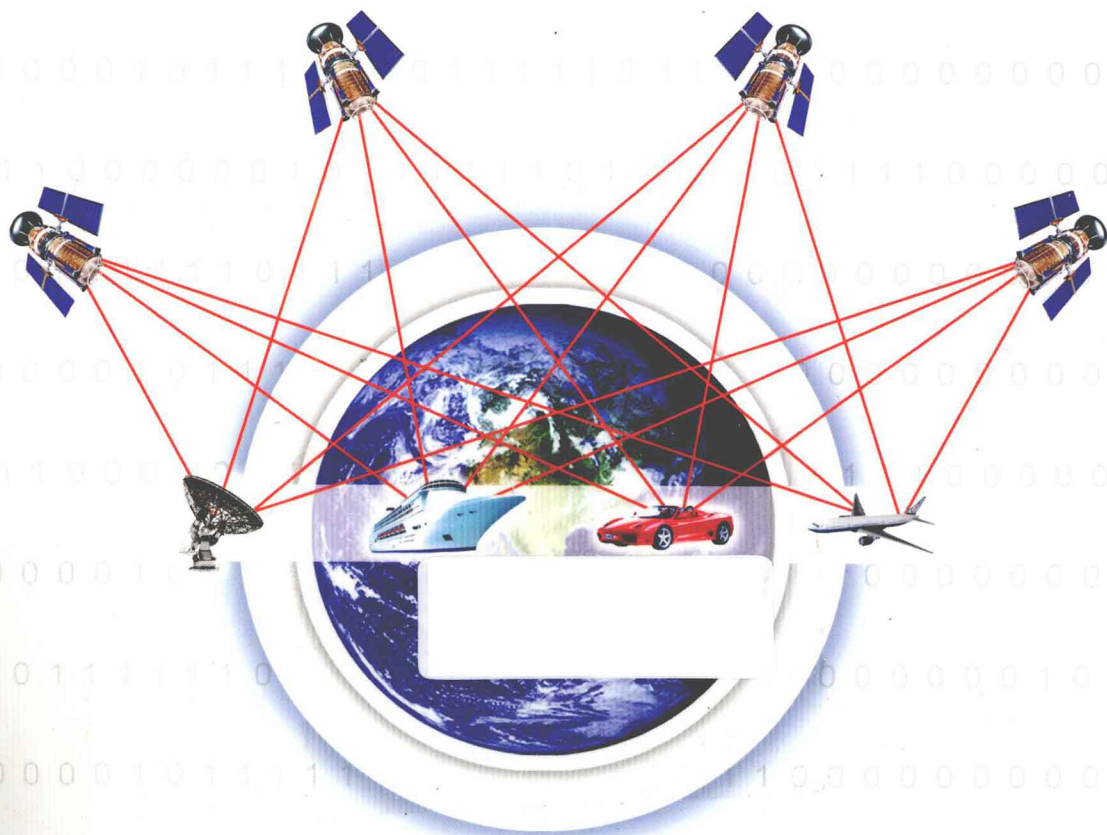


高等学校
测绘工程专业核心课程规划教材

GPS 测量

李征航 黄劲松 独知行 张勤 编著



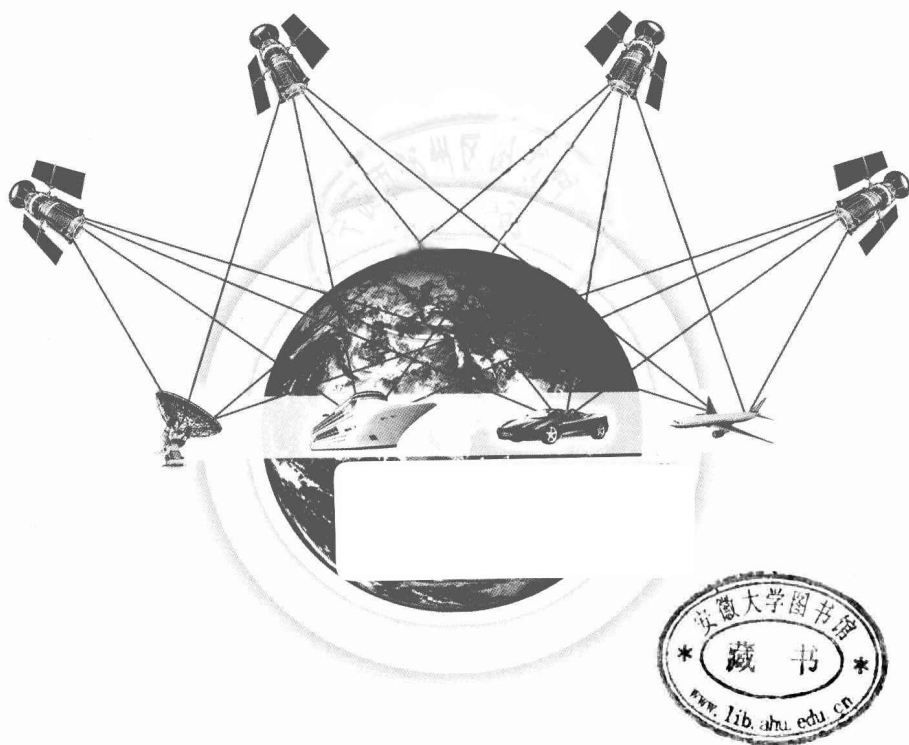
WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校
测绘工程专业核心课程规划教材

GPS 测量

李征航 黄劲松 独知行 张勤 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量/李征航,黄劲松,独知行,张勤编著. —武汉:武汉大学出版社, 2013. 1

高等学校测绘工程专业核心课程规划教材

ISBN 978-7-307-10279-8

I. G… II. ①李… ②黄… ③独… ④张… III. 全球定位系统—
测量—高等职业教育—教材 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 270628 号

责任编辑:王金龙 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:329千字 插页:1

版次:2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10279-8/P·208 定价:28.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

序

根据《教育部财政部关于实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》中“专业结构调整与专业认证”项目的安排，教育部高教司委托有关科类教学指导委员会开展各专业参考规范的研制工作。我们测绘学科教学指导委员会受委托研制测绘工程专业参考规范。

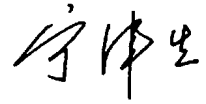
专业规范是国家教学质量标准的一种表现形式，并是国家对本科教学质量的最低要求，它规定了本科学生应该学习的基本理论、基本知识、基本技能。为此，测绘学科教学指导委员会从2007年开始，组织12所测绘工程专业的高校建立了专门的课题组开展“测绘工程专业规范及基础课程教学基本要求”的研制工作。课题组根据教育部开展专业规范研制工作的基本要求和当代测绘学科正向信息化测绘与地理空间信息学跨越发展的趋势以及经济社会的需求，综合各高校测绘工程专业的办学特点，确定专业规范的基本内容，并落实由武汉大学测绘学院组织教师对专业规范进行细化，形成初稿。然后多次提交给教指委全体委员会、各高校测绘学院院长论坛以及相关行业代表广泛征求意见，最后定稿。测绘工程专业规范对专业的培养目标和规格、专业教育内容和课程体系设置、专业的教学条件进行了详尽的论述，提出了基本要求。与此同时，测绘学科教学指导委员会以专业规范研制工作作为推动教学内容和课程体系改革的切入点，在测绘工程专业规范定稿的基础上，对测绘工程专业9门核心专业基础课程和8门专业课程的教材进行规划，并确定为“教育部高等学校测绘学科教学指导委员会规划教材”。目的是科学统一规划，整合优秀教学资源，避免重复建设。

2009年，教指委成立“测绘学科专业规范核心课程规划教材编审委员会”，制订“测绘学科专业规范核心课程规划教材建设实施办法”，组织遴选“高等学校测绘工程专业核心课程规划教材”主编单位和人员，审定规划教材的编写大纲和编写计划。教材的编写过程实行主编负责制。对主编要求至少讲授该课程5年以上，并具备一定的科研能力和教材编写经验，原则上要具有教授职称。教材的内容除要求符合“测绘工程专业规范”对人才培养的基本要求外，还要充分体现测绘学科的新发展、新技术、新要求，要考虑学科之间的交叉与融合，减少陈旧的内容。根据课程的教学需要，适当增加实践教学内容。经过一年的认真研讨和交流，最终确定了这17门教材的基本教学内容和编写大纲。

为保证教材的顺利出版和出版质量，测绘学科教学指导委员会委托武汉大学出版社全权负责本次规划教材的出版和发行，使用统一的丛书名、封面和版式设计。武汉大学出版社对教材编写与评审工作提供必要的经费资助，对本次规划教材实行选题优先的原则，并根据教学需要在出版周期及出版质量上予以保证。广州中海达卫星导航技术股份有限公司对教材的出版给予了一定的支持。

目前，“高等学校测绘工程专业核心课程规划教材”编写工作已经陆续完成，经审查

合格将由武汉大学出版社相继出版。相信这批教材的出版应用必将提升我国测绘工程专业的整体教学质量，极大地满足测绘本科专业人才培养的实际要求，为各高校培养测绘领域创新性基础理论研究和专业化工程技术人才奠定坚实的基础。



二〇一二年五月十八日

前 言

全球定位系统的出现使导航定位技术产生了一场深刻的革命，并在国民经济建设和国防建设的诸多领域得到了广泛应用，促进了相关行业的技术进步。目前，GPS 定位技术已成为全国高等学校测绘工程专业中的重要课程。

按照教育部高等学校测绘学科教学指导委员会的统一计划和部署，准备编写两本相关教材：一本是《卫星导航定位原理》，另一本是《GPS 测量及数据处理》。前者着重介绍全球定位系统的组成及信号，GPS 导航定位原理及其在各个领域的应用，后者（即本书）则主要介绍 GPS 测量的方法，GPS 网的设计，数据采集（外业观测）及数据处理等内容。考虑到本教材的名称与我们先前已编写出版的教材同名同出版社，为避免读者混淆，故将本教材改名为《GPS 测量》，因为该书名也能涵盖数据处理的内容。

本书共分 9 章，由武汉大学李征航、黄劲松老师，山东科技大学独知行老师和长安大学张勤老师共同编写。其中第 1 章、第 2 章由李征航编写，第 3 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章由黄劲松编写，第 5 章由独知行编写，第 6 章由独知行和黄劲松共同编写，第 9 章由张勤编写。全书由李征航进行统稿。

由于本课程是一门实践性很强的课程，除课堂教学以外还应安排教学（生产）实习，像 RTK、RTD、单点定位、基线测量中的仪器安置与使用、数据下载及相应软件的使用等内容需通过实践性环节方能掌握的内容已编入相应的实习教材并出版发行，本书中不再重复介绍。

由于作者水平有限，谬误和不当之处在所难免，此外 GPS 测量技术仍处于飞速发展阶段，虽然我们力求教材能反映学科的最新发展动态，但未必如愿，恳请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 9 月

目 录

第 1 章 伪距测量与载波相位测量	1
1.1 测距码与伪距测量	1
1.2 载波相位测量	13
1.3 观测值的线性组合	18
1.4 周跳的探测与修复	25
1.5 整周模糊度的确定	30
参考文献	37
第 2 章 GPS 定位	38
2.1 单点定位	38
2.2 相对定位	46
2.3 RTK, 网络 RTK 和 CORS	50
2.4 差分 GPS	56
参考文献	62
第 3 章 GPS 网	63
3.1 概述	63
3.2 GPS 测量常用术语	66
3.3 GPS 网及其建立过程	69
3.4 GPS 网的质量控制	72
参考文献	73
第 4 章 GPS 网的技术设计	74
4.1 概述	74
4.2 GPS 网的精度和密度设计	75
4.3 GPS 网的基准设计	77
4.4 GPS 网的布网形式	79
4.5 GPS 网的图形设计	82
4.6 GPS 网的设计准则	84
4.7 GPS 网的设计指标	87
4.8 技术设计书的编写	89
参考文献	90

第 5 章 GPS 测量的外业工作	91
5.1 选点与埋石	91
5.2 GPS 接收机的维护和保养	96
5.3 GPS 接收机的选用与检验	97
5.4 作业调度	101
5.5 数据采集	108
5.6 技术总结、成果验收和上交资料	116
参考文献	117
第 6 章 GPS 测量中的数据格式	118
6.1 RINEX 格式	118
6.2 SP3 精密星历数据格式	140
参考文献	152
第 7 章 GPS 基线解算	154
7.1 概述	154
7.2 基线的解算模式	155
7.3 基线解算的过程及结果	157
7.4 基线解算的质量控制	159
参考文献	166
第 8 章 GPS 网平差	167
8.1 GPS 网平差的目的	167
8.2 GPS 网平差的类型	168
8.3 GPS 网平差流程	169
8.4 GPS 网平差的数学模型	173
8.5 GPS 基线向量网的三维平差	182
8.6 GPS 基线向量网的二维平差	194
参考文献	198
第 9 章 GPS 高程测量	200
9.1 概述	200
9.2 大地水准面模型法	204
9.3 高程异常的拟合方法	205
9.4 重力测量法	208
9.5 GPS 高程测量的精度	209
参考文献	210

第1章 伪距测量与载波相位测量

在全球定位系统中,我们可采用两种不同的手段来测定卫星到接收机间的距离(这一距离也称为卫地距)。一种手段是利用测距码来测定卫地距,其优点是方便简单,接收机可直接给出完整的卫地距,其缺点是精度较差,一般只能给出分米级到米级的测距精度。另一种手段是利用载波相位测量来间接地测定卫地距。这种方法的优点是精度高,能提供厘米级到毫米级的测距精度,缺点是接收机无法给出卫星至接收机间的完整的相位差,存在整周模糊的问题,此外给出的观测值中也有整周跳变的问题,因而进行数据处理时较为复杂。我们通常把利用测距码来测定卫地距的过程称为伪距测量,把测得的结果称为测码伪距或简称为伪距,而把利用载波作为测距信号,通过相位测量来间接地测定卫地距的过程称为载波相位测距,所给出的测量结果则称为载波相位观测值。伪距测量和载波相位测量可以看成是为了区分两种不同的测距手段而专门给出的两个术语。

1.1 测距码与伪距测量

1.1.1 测距码

本小节主要介绍测距码的性质、种类及生成方法。

1. 伪随机噪声码

测距码是用以测定从卫星至接收机间的距离的一种二进制编码序列,是一种伪随机噪声码。一个二进制码序列,如果每一位都是随机生成的(如在两个大小、形状、重量、光滑度等物理特性完全相同的圆球上分别标注上“0”和“1”,然后放入布袋中,从中任意抽取一个),则该二进制码序列称为随机噪声码。随机噪声码具有很好的自相关特性和互相关特性,这些特性是测距码所需要的。但因为该序列的每一位数都是随机生成的,所以在卫星和接收机中无法独立地生成两组结构完全相同的随机噪声码,而这正是利用二进制码序列进行测距的先决条件。伪随机噪声码具有与随机噪声码十分相似的自相关特性和互相关特性,而这组二进制码序列是由某一码发生器产生的按某种规律编排起来的二进制码序列。在卫星和接收机中可以用同一方法生成两组结构完全相同的测距码。

2. 用线性反馈移位寄存器产生的 m 序列

图 1-1 是一个简单的 4 级移位寄存器,每个寄存器只能处于 0 和 1 中的一种状态。首先用置 1 脉冲将各级寄存器都设置为 1,然后在钟脉冲的驱动下各寄存器都将自己的状态传递给下一级寄存器,而第 3、4 两级寄存器的状态还要经过模二相加后反馈给第 1 级寄存器,所产生的 m 序列则从第 4 级寄存器中输出。表 1-1 中给出了各级移位寄存器在钟脉冲的驱动下所经历的变化过程以及经模二相加后反馈给第 1 级寄存器的值。

表 1-1 4 级反馈移位寄存器经历的状态

状态号	寄存器 1	寄存器 2	寄存器 3	寄存器 4	③⊕④	末级输出
1	1	1	1	1	0	1
2	0	1	1	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1
4	0	0	0	1	1	1
5	1	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	1	0
8	1	0	0	1	1	1
9	1	1	0	0	0	0
10	0	1	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	1
12	0	1	0	1	1	1
13	1	0	1	0	1	0
14	1	1	0	1	1	1
15	1	1	1	0	1	0
16	1	1	1	1	0	1

需要说明的是：

①选择合适的反馈方式后,4 级寄存器可经历除全“0”状态外的 15 种不同状态,然后再回归至 4 个寄存器全部为“1”的起始状态,重新开始第二个循环。该组寄存器输出的是一组周期性的二进制码序列。一个周期中含 $2^4-1=15$ 个二进制码,其中 1 的个数比 0 的个数多一个。该序列也称为最大长度线性移位寄存器序列,简称 m 序列(maximal length linear shift register sequences)。这组二进制码序列中任意 4 个相邻的二进制码均不相同。这一特点对于测距是非常重要的。

②初始状态可任意选择,并非一定要像图 1-1 中那样全部置“1”。例如若选择表 1-1 中的第 5 种状态作为初始状态,把 1,0,0,0 分别注入 4 级寄存器中,此时在钟脉冲的驱动下,这 4 级寄存器就能分别经历表 1-1 中的第 6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,1,2,3,4 等状态后重新返回至第 5 种状态开始第二个循环。由此生成的二进制码序列的结构保持不变,但向后平移了四位。用这种方法可以方便地实现码的平移。初始状态可任意选择,但不能选用全“0”状态。因为一旦 4 个寄存器全部变为“0”,这组反馈移位寄存器将进入“死循环”,输出毫无意义的全部由“0”组成的二进制码序列。

③在一个完整的周期结束前,可以通过重新设置初始状态来截断该二进制码序列。例如若在表 1-1 的第 11 个状态对 4 级移位寄存器进行重新全部置“1”,就能把二进制码序列

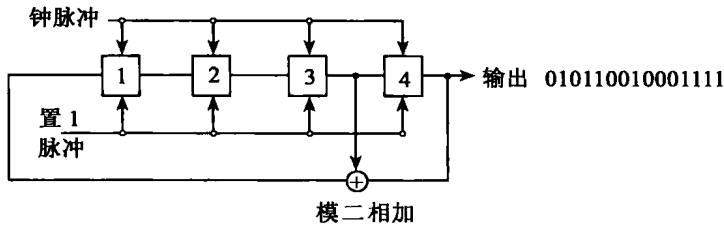


图 1-1 4 级反馈移位寄存器及其产生的 m 序列

截断成为一组由 10 个码组成的二进制短序列。利用这种方法,通过对钟脉冲计数和重新设置初始状态就能将码序列截断成为所需的短二进制序列。

④由于输出的二进制码序列是在钟信号的驱动下产生的,因而该组二进制码的码速率也与钟信号的频率相同。例如在钟频为 10.23MHz 的钟信号的驱动下产生的二进制的码速率也为 10.23Mbps。每个码元(或称码片)所持续的时间为 $\Delta T = 1/10.23 \times 10^6 = 0.0977517 \dots \mu s$ 。当这组信号在真空中传播时,每个码元所对应的距离为 $\Delta T \cdot c = 29.3052m$ 。该距离称为 1 个码元的宽度。

⑤信号不一定要从末级寄存器中输出,原则上讲可从任意一级输出,也可将两级寄存器中所存储的数经模二相加后输出。这样也能实现二进制码序列的平移。

⑥由反馈移位寄存器所产生的码序列除了用一组二进制数字表示外,还经常用一组幅度为 1 的正负矩形波来表示,取值为 +1 的矩形波与二进制数“0”对应,取值为 -1 的矩形波则与二进制数“1”对应。这样图 1-1 中所输出的一组二进制序列也可表示成如图 1-2 所示的情况。

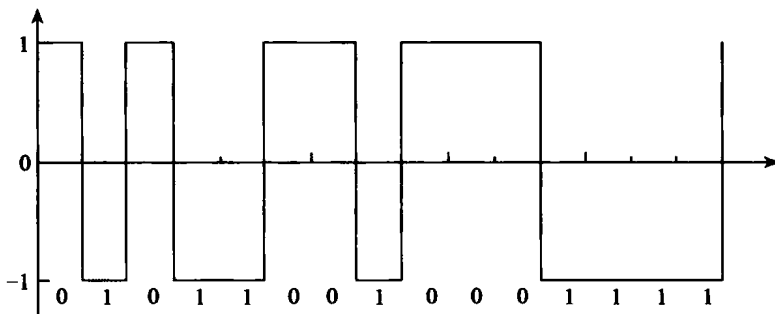


图 1-2 输出码的信号波形表示法

二进制码模二相加的法则如下,不进位:

$$0 \oplus 0 = 0; 0 \oplus 1 = 1; 1 \oplus 0 = 1; 1 \oplus 1 = 0;$$

用矩形波表示时,相应的算法如下:

$$1 \times 1 = 1; 1 \times (-1) = -1; (-1) \times 1 = -1, (-1) \times (-1) = 1;$$

⑦为方便起见,码发生器不一定要采用如图 1-1 那样的线路图的形式来表示,而可以用

更为简便的特征多项式的形式来表示。图 1-1 中的码发生器可表示为：

$$f(x) = 1 + x^3 + x^4$$

上式表示将第 3 级寄存器和第 4 级寄存器中的数模二相加后反馈给第 1 级寄存器。

从简单的 4 级移位寄存器中导得的上述结论同样适用于级数更多的更为复杂的移位寄存器。

3. GPS 卫星所发射的测距码

原有的各种类型的 GPS 卫星 (Block I, Block II, Block IIA 等) 均发射两种不同性质的测距码: 民用码 C/A 码及军用码 P(Y) 码。实施 GPS 现代化后, 在 Block IIR-M 卫星及随后各类 GPS 卫星的 L_2 载波上又新置了民用码 L_2C 码, 在 Block IIF 卫星及随后各类 GPS 卫星中将新增第三民用频率 L_5 载波并在其上调制上民用测距码 L_5 码。同时又在 L_1 和 L_2 载波上增设了新的军用测距码 M 码。按计划在新一代的 Block III 卫星上还将增设民用码 L_1C 码 (IS-GPS-200E, 2010; IS-GPS-705A, 2010; IS-GPS-800A, 2010)。下面分别加以介绍。

(1) C/A 码

C/A 码是一种结构简单的民用测距码, 也称 Gold 码^[4]。C/A 码可用于进行粗略测距及快速捕获卫星信号, 故也称粗码或捕获码。

① C/A 码的产生。

C/A 码是由两个周期性的二进制码序列 G1 和 G2 进行模二相加后形成的。G1 和 G2 每个周期中均含有 1023 个码元。它们各由一个 10 级移位寄存器产生, 初始状态均置为全 1, 然后在频率为 1.023Mbps 的信号驱动下产生码序列。该信号是由原子钟频进行 10 分频后形成的。其中产生 G1 的码信号发生器的特征多项式为 $1 + X^3 + X^{10}$, 即将第 3 级和第 10 级寄存器中的内容进行模二相加后反馈给第 1 级寄存器。G1 信号最后是由第 10 级寄存器输出的。产生 G2 的码信号发生器的特征多项式为 $1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10}$, 即将第 2、3、6、8、9、10 级寄存器中的内容求模二和, 然后再将结果反馈给第 1 级寄存器。G2 信号不是从第 10 级寄存器中输出的, 而是从中选择两个不同的寄存器 (抽头) 进行模二相加后输出。选择不同的抽头方式就能输出不同的 G2 序列 (平移位数不同)。原 GPS 系统中共有 37 种不同的 G2 序列, 与 G1 信号模二相加后能生成 37 种不同的 C/A 码。其中前 32 种 C/A 码供 32 个 GPS 卫星使用, 后 5 种 C/A 码留做它用 (如给地面发射机用)。其中第 34 种 C/A 码与第 37 种 C/A 码的结构相同。表 1-2 中给出了这 36 种独立的 C/A 码 (G2 序列) 的抽头方式。

表 1-2

C/A (G2) 码的抽头方式

C/A 码 PRN	G2 的抽头方式	码延迟数	C/A 码 PRN	G2 的抽头方式	码延迟数
1	2⊕6	5	6	2⊕10	18
2	3⊕7	6	7	1⊕8	139
3	4⊕8	7	8	2⊕9	140
4	5⊕9	8	9	3⊕10	141
5	1⊕9	17	10	2⊕3	251

续表

C/A 码 PRN	G2 的抽头方式	码延迟数	C/A 码 PRN	G2 的抽头方式	码延迟数
11	3⊕4	252	24	4⊕6	512
12	5⊕6	254	25	5⊕7	513
13	6⊕7	255	26	6⊕8	514
14	7⊕8	256	27	7⊕9	515
15	8⊕9	257	28	8⊕10	516
16	9⊕10	258	29	1⊕6	859
17	1⊕4	469	30	2⊕7	860
18	2⊕5	470	31	3⊕8	861
19	3⊕6	471	32	4⊕9	862
20	4⊕7	472	33	5⊕10	863
21	5⊕8	473	34	4⊕10	950
22	6⊕9	474	35	1⊕7	947
23	1⊕3	509	36	2⊕8	948

* 码延迟数是表示按上述规定的抽头方式所输出的二进制码序列与从第 10 级寄存器输出的码序列相比平移(延迟)的位数。

近来美国已决定把 C/A 码从 37 种扩充至 210 种,其中 PRN 1-63 供卫星使用;PRN 64-119 供地面增强系统使用;PRN 120-158 供星基增强系统使用;PRN 159-210 供其他 GNSS 系统使用。详见参考文献[1,2,3,5]。图 1-3 为 PRN 31 C/A 码发生器的框图。

②C/A 码的特点及用途。

C/A 码是一种由 1023 个码元组成的短周期码。当搜索速率为 50bps 时,即便只用一个相关器进行搜索,也能在 20.5s 内捕获 C/A 码。而一旦 C/A 码被捕获后,接收机就能解调出导航电文,获取 Z 计数,进而捕获 P(Y)码。所以 C/A 码也被称为捕获码。

由于 C/A 码的码速率较低,只有 1.023Mbps,一个码元持续的时间达 $1/1.023 \times 10^6 = 0.977517 \dots \mu\text{s}$,相应的码元宽度达 293 m。用码相关法测距时,测量噪声为一个码元宽度的 1/1000 左右,即 $\pm 0.3\text{m}$ 。考虑到观测值中还包含一些未被消除干净的残余的偏差项(如残余的电离层延迟、对流层延迟和多路径效应等),实际精度约为一个码元宽度的 1/100 ~ 1/200,即 1.5 ~ 3m,因而 C/A 码也被称为粗码。

此外 C/A 码还存在抗干扰能力差,多路径效应较为严重,在树林等隐蔽地区捕获卫星信号的能力较弱等缺点。

需要说明的是,随着接收机技术的进步,C/A 码的测距精度也在不断改善,目前采用窄相关等技术的接收机的 C/A 码测距精度已可达 $\pm 15\text{cm}$ 。当采样率很高时(例如 50 ~ 100Hz),接收机可将原始观测值进行平滑和压缩,此时每秒钟输出一次的虚拟观测值的精度有可能达到 $\pm 5\text{cm}$ 。

(2)P(Y)码

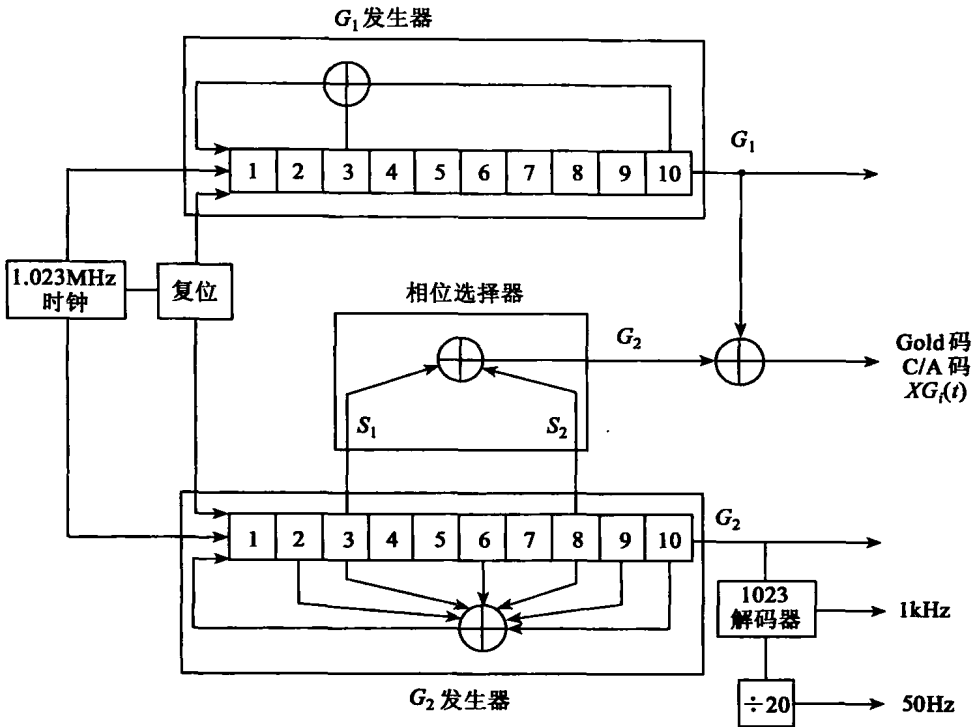


图 1-3 PRN31C/A 码发生器的框图(取自参考文献[6])

P 码是由两个二进制码序列 X_1 和 X_2 模二相加后形成的。而 X_1 是由 X_{1A} 和 X_{1B} 两个子序列模二相加后形成的。 X_1 是由 X_{2A} 和 X_{2B} 两个子序列模二相加后形成的。 X_{1A} , X_{1B} , X_{2A} , X_{2B} 则分别由一个 12 级的反馈移位寄存器生成的。P 码的生成过程较为复杂,不再详细介绍,感兴趣的同学可参阅参考文献[1,7]。

P 码的码速率是 C/A 码的 10 倍,达 10.23Mbps,其码元宽度也为 C/A 码的 1/10,约为 29.3m,用码相关法测距时,其测量噪声也要比 C/A 码小一个数量级左右。当然由于其观测值中也会含有残余的对流层延迟等偏差,故其实际精度可能比 C/A 码高不了一个数量级,但也会显著高于 C/A 码,故 P 码也被称为精码。

由于 P 码同时调制在 L_1 和 L_2 载波上,因而用 P 码测距时可通过双频观测值来消除电离层延迟。而 C/A 码则只调制在 L_1 频率上,无法采用双频观测的方法来消除电离层延迟。此外 P 码的抗干扰能力也优于 C/A 码,所受到的多路径误差也将小于 C/A 码。但 P 码是一种周期达 1 星期的长码,一个周期中含大约 6.2×10^{12} 个码元,码速率又高达 10.23Mbps,因而要通过搜索直接捕获 P 码是非常困难的,通常要通过 C/A 码来加以捕获。

P 码原本是一种保密的军用码,但在实施 SA 技术后,其结构已公开。这就使美国及其盟国的军方用户在战时有遭敌对方进行电子欺骗的危险。电子欺骗不同于电子干扰,干扰只是阻碍授权用户正常地接收信号,例如有意播发一种同频率的射频干扰信号。而电子欺骗则可以在授权用户不知情的情况下获得错误的信号,例如用相同的载波,相同的 P 码,但在其上调制错误的导航电文,其危险性更大。为了解决这个问题,美国政府于 1994 年起实

施了 AS 技术,即在 P 码上加上严格保密的 W 码经模二相加后重新生成完全保密的 Y 码。也就是说从此时开始 GPS 卫星已不播发 P 码而改为播发 Y 码了。需要说明的是,实施 AS 技术的主要目的并不在于限制未经授权的非军方用户使用精码,而是为了防止敌对方对其进行电子欺骗。因而美国政府对于接收机厂商采用 Z 跟踪技术将 P 码重新从 Y 码中分离出来加以使用的做法不持反对态度。

(3) L_2 C 码

按 GPS 现代化计划,美国在 BlockIIR-M 型卫星及随后的各类 GPS 卫星的 L_2 载波上增设了新的民用测距码 L_2 C 码。 L_2 C 码是由中等长度的 L_2 CM 码和长码 L_2 CL 码通过时分复用技术(依次从这两种码中各取一个码)组合而成。 L_2 CM 码和 L_2 CL 码的码速率均为 0.5115Mbps,组合后的 L_2 C 码的码速率为 1.023Mbps,与 C/A 码的码速率相同。 L_2 CM 码和 L_2 CL 码都是用一个 27 级反馈移位寄存器生成的。其线路图及具体生成过程不再介绍,感兴趣的同学可参阅参考文献[1,5,7]。

L_2 C 码的出现为未授权的普通用户采用双频改正技术来消除电离层延迟提供了可能,同时也便于用户能利用码相关法来重建高质量的 L_2 载波,因而具有重要意义。

中等长度的 L_2 CM 码可用于捕获卫星信号。 L_2 CL 码的长度是 C/A 码的 750 倍,而且不调制导航电文,在树林等隐蔽地区的积分时间允许超过 20ms,这些都将是有助于卫星信号的捕获。此外长码也具有更强的抗射频干扰的能力。但是 L_2 C 码的码速率仍与 C/A 码相同,因此测量噪声以及所受到的多路径误差仍与 C/A 码相同。在这些方面的性能并未得以改善。此外 L_2 C 码所用的载波频率并不位于航空无线电导航服务 ARNS 的频段范围内,不受到制度性保护,因而也不宜用于生命安全服务。

(4) L_5 码

按照 GPS 现代化计划,在 BlockIIF 卫星及随后各类 GPS 卫星上将增设第三民用载波 L_5 ,并在其上调制民用测距 L_5 码。但实际上在 2009 年 3 月 24 日发射的 BlockIIR-20M (SVN49,PRN01) 卫星已提前播发该信号,开展相关的试验工作。

L_5 载波的频率为 1176.45MHz,是由卫星上的原子钟频 10.23MHz 倍频 115 倍后形成的。 L_5 载波由两个互相正交的分量组成:一个称为同相分量,另一个相位滞后 90° ,称正交分量。两个互相同步,几乎正交(互相关系数很小)但结构不同的测距码被分别调制在这两个载波分量上,调制在同相分量(In-phase)上的测距码称 I_5 码,调制在正交分量(Quadrature-phase)上的测距码称为 Q_5 码。 L_5 码则是这两种测距码的统称。

L_5 码是由 XA 码和 XBI_1 码模二相加后形成的, Q_5 码则是由 XA 码和 XBQ_1 码模二相加后形成的。具体生成方法不再详细介绍,感兴趣的同学可参阅参考文献[2,5,7]。

L_5 码的码速率是 C/A 和 L_2 C 码的 10 倍,与 P(Y) 码的码速率相同。其测量噪声也远小于 C/A 码和 L_2 C 码的测量噪声,与 P(Y) 码相同。按传统的说法,是一种精码。

L_5 码的码长是 C/A 码的 10 倍,而且在 Q_5 码上未调制导航电文,积分时间长,在树林等隐蔽地区信号更容易被捕获和量测。 L_5 码具有比 C/A 码更好的抗射频干扰的能力。

L_5 载波位于受制度保护的 ARNS 频段内,射频干扰少,无线电环境好。加之信号的发射功率大,测距精度好等原因,可用于生命安全服务领域。

位于 1559 ~ 1610MHz 和 930 ~ 1215MHz 的两个频段是分配给航空无线电导航服务使用的,称 ARNS 频段,其他用户一般不得使用,因而受到的信号干扰较少。相比之下,用于工

业、医学、科研使用的 ISM 频段内,非故意的各种自然干扰就要严重得多,其强度为 ARNS 中的 100 ~ 1000 倍。

和 C/A 码一样,P(Y)码, L_2 C 码和 L_5 码的种类也会大幅增加。其中 P(Y)码和 L_5 码均为 210 种, L_2 C 码为 115 种。

(5) M 码

M 码是一种供美国军方使用的保密码。其生成方法及码结构并不公开,因而外界知之不多。M 码具有更大的发射功率,因而信号捕获更加快捷,稳定,而且具有比 Y 码更好的抗干扰能力。

M 码是一种双向偏置载频码 BOC (10、5)。其码速率为 5.115Mbps,副码率为 10.23Mbps。每个码元可分为 4 个子码元。M 码的信号功率集中在 ± 10.23 MHz 附近。战时在某一特定地区,美国军方可以从地面发射一个与 C/A 码的频谱相似的强干扰信号来阻止敌对方使用 C/A 码,但这种干扰信号并不会影响美国军方使用 M 码。因为 C/A 码信号的能量集中在 1575.42 ± 1 MHz 处,而 M 码信号的能量集中在 1565.42MHz 及 1585.42MHz 附近(见图 1-4)。

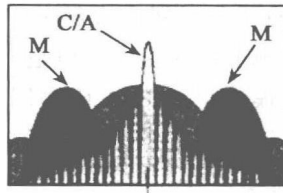


图 1-4 C/A 码和 M 码的信号功率谱

1.1.2 伪距测量

1. 基本原理

首先假设卫星钟与接收机钟均无误差,皆与标准的 GPS 时严格同步。卫星在卫星钟的控制下生成并播发某一结构的测距码,而接收机则在接收机钟的控制下产生同一结构的测距码,为方便起见我们将其称为复制码。由卫星产生的测距码经 Δt 时间的传播后到达接收机并被接收机所接收,伪距测量的目的就是为了精确测定信号传播时间 Δt 。如果我们将复制码延迟一段时间 τ 后再与接收到的卫星信号进行比对,如果这两组信号尚未对齐就调整时延 τ ,直至这两组结构相同的信号完全对齐为止。此时复制码所延迟的时间 τ 就等于卫星信号的传播时间 Δt ,利用这种方法就能精确测定信号传播时间 Δt 。将时延值 τ 与真空中的光速 c 相乘后即可求得伪距 ρ :

$$\rho = c \cdot \tau = c \cdot \Delta t \quad (1-1)$$

由于卫星钟与接收钟实际上都不可避免地会存在误差,此外卫星信号通过电离层和对流层时其传播速度也都会发生变化,并不是以真空中的光速 c 在传播,所以利用(1-1)式求得距离 ρ 并不是从卫星至接收机之间的真正的几何距离,故称为伪距,需对其进行各种必要的改正后才能将伪距化算成卫星至接收机间的几何距离。

2. 相关系数

在伪距测量中我们通常是用相关系数 R 来反映在积分间隔 T 内两组信号(测距码)的相似程度。相关系数有自相关系数与互相关系数之分。两组结构相同的信号间的相关系数称为自相关系数。它可以反映这两组信号是否已“对齐”。两组结构不同的信号间的相关系数称为互相关系数。如果 A 、 B 两组信号间的互相关系数为零,我们就说这两组信号是相互正交的。某组信号在求自相关系数时,即使有与其正交的信号进入,也不会对求得的自相关系数产生任何影响。我们希望不同卫星的测距码之间的互相关系数尽可能地小。而实际上它们间也都是近乎正交的。

(1) 自相关系数

如果在时刻 t_i ,由卫星 j 所发出的测距码用 $u_j(t_i)$ 来表示的话,则任一时刻 t 接收机所接收到的来自卫星 j 的测距码可表示为 $u_j(t_i - \Delta t)$,其中 Δt 为信号传播时间。同样,该时刻由接收机产生的经时延 τ 后的相同结构的复制码可写为 $u_j(t_i - \tau)$ 。分别采用波形表示法来表示这两组信号,即用取值为+1的矩形波来表示二进制数0,用取值为-1的矩形波来表示二进制数1(见图1-2)。我们把这两组信号的乘积在积分间隔 T 中的积分平均值 R 称为自相关系数,即:

$$R = \frac{1}{T} \int_{\tau} u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau) dt \quad (1-2)$$

(1-2)式的计算可通过下列步骤来加以实现:

首先将积分间隔 T 分为 n 等份, n 取值应足够大,以便使每等份 $dt = T/n$ 可视为无穷小;将每等份内的波形值 $u_j(t_i - \Delta t)$ 和 $u_j(t_i - \tau)$ 相乘,然后再乘以 dt 求得 $dR = u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau) dt$;

将每个等份求得的 dR 值相加求得积分值 $\int_{\tau} u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau) dt$,然后再除以积分间隔 T 求得自相关系数 R 。

显然当这两组结构相同的信号已相互对齐时,自相关系数 R 取极大值1。因为此时任一等份内 $u_j(t_i - \Delta t)$ 的波形值都与 $u_j(t_i - \tau)$ 相同,要么均为+1,要么均为-1(见图1-5)。故乘积 $u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau) \equiv 1$ 。故 $dR = dt = \frac{T}{n}$, $\int_{\tau} u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau) dt = T$ 。

反之,当这两组信号未对齐时,有的等份内 $u_j(t_i - \Delta t)$ 与 $u_j(t_i - \tau)$ 的波形值相同,乘积 $u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau)$ 的值为+1;但有的等份内其波形值的符号就可能相反,乘积 $u_j(t_i - \Delta t) \cdot u_j(t_i - \tau)$ 的值为-1,此时 R 必小于1(见图1-6)。

图1-7为 m 序列的自相关系数图。若用 δ 来表示两组比对信号相互错开的值,则 m 序列的自相关系数具有下列特性:

- 当 $\delta = 0$,即两组信号已相互对齐时,自相关系数 R 取极大值1;
- 当 $|\delta| \geq 1$ 个码元的宽度 t_0 时, $R = 1/N$, N 为一个周期中的码元数。例如对 C/A 码来讲, $N = 1023$;

- 当 $|\delta| < t_0$ 时, R 将随着 $|\delta|$ 的增大而成比例地减小,即 $R = 1 - \frac{1}{N} \frac{|\delta|}{t_0}$;

- 由于 m 序列是一个周期性的序列,因而在前后移动若干个整周期后, R 也会周期性