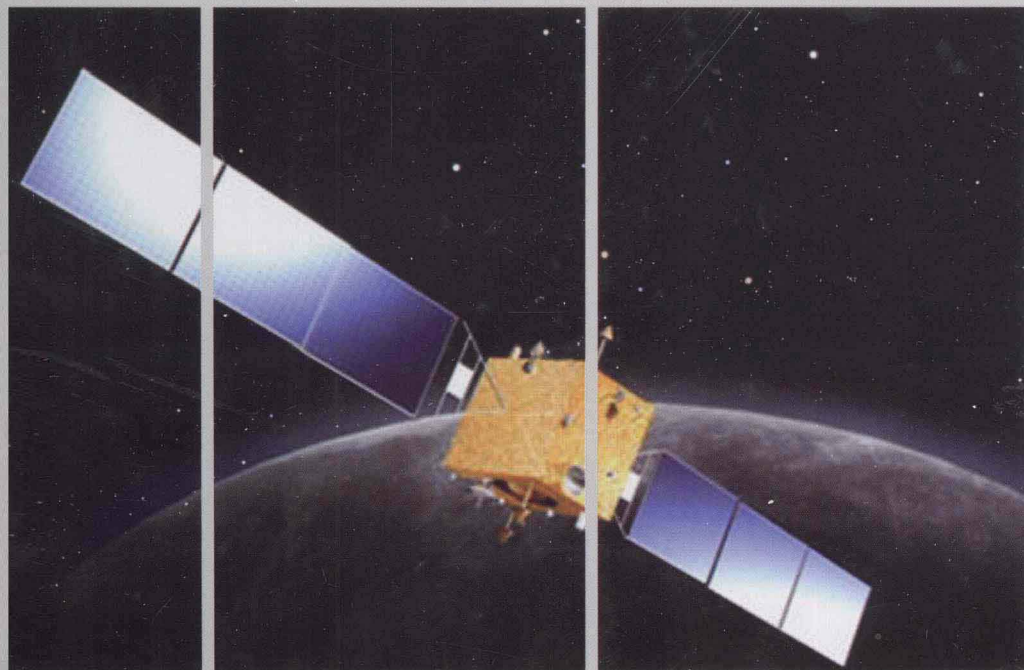




Satellite Timing Principle and Application

卫星授时 原理与应用

杨俊 单庆晓 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

卫星授时原理与应用

Satellite Timing Principle and Application

杨 俊 单庆晓 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

卫星授时原理与应用/杨俊,单庆晓著. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08714-7

I. ①卫... II. ①杨... ②单... III. ①卫星
导航—时间服务 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 152191 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12½ 字数 223 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 鄢江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

卫星导航系统越来越深入我们的生活。在卫星导航的应用中,人们广泛关注导航定位功能。实际上卫星导航系统为授时提供了极好的手段。由于卫星覆盖范围广,非常适于广域分布网络的时间同步,如 3G 移动数字通信系统、智能电网、广播电视网、交通网络等。随着信息化的发展,广域分布网络对时间同步的精度要求越来越高。由于覆盖范围大、精度高、成本低的特点,卫星授时成为广域分布网络时间同步的首选。

由于 GPS 技术成熟,目前卫星授时主要以 GPS 为主。我国每一个 CDMA 基站、每一个 TD-CDMA 基站、每一个中大型变电站都安装有 GPS 授时模块,时间同步严重依赖 GPS。实际上,我国目前拥有北斗一号和 CAPS 卫星导航系统,这两种系统为固定位置用户提供的单向授时功能完全可以满足绝大多数用户的时间同步需求。然而,由于 GPS 技术的高度市场化,垄断了卫星授时的市场。可喜的是,国家正在大力发展北斗导航系统,2012 年北斗区域导航系统开通运行,覆盖我国本土及周边地区,实现本土范围内的无源定位授时。可以预见,在未来几年,关系到我国国计民生的重大基础网络,如电信、电力网络,必然采用北斗授时。北斗授时具有巨大的发展空间。

通常应用到卫星授时的场合,都是利用卫星授时模块产生的秒来控制本地时钟,实现同步。本书针对这种场合的应用,提出了时钟驯服系统的概念,并予以系统的阐述。本书阐述了时钟驯服系统的模型、频率差测量、秒抖动处理,以及基于 FPGA 的实现方法。本书还系统阐述了授时接收机的技术,包括卫星导航信号处理、时延计算与补偿、接收机终端设计等内容。本书是我们近 5 年来科研项目的积累,覆盖了卫星导航系统、接收机技术、授时与定时、时钟驯服、时间接口与应用等各方面的内容,既有理论的深度,也可供相关领域技术人员参考。目前,市面上尚未看到一本专门阐述卫星授时的书籍,本书将弥补这一不足。

本书共分 10 章,第 1 章绪论;第 2 章卫星导航系统时间频率体系;第 3 章卫星授时原理;第 4 章卫星导航信号处理;第 5 章时延计算与补偿;第 6 章接收机终端设计;第 7 章卫星驯服时钟系统;第 8 章时间同步接口;第 9 章卫星授时应用。本书特点是系统性强,内容全面,紧密联系工程实际,实用性强。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星授时简介	1
1.2 卫星导航系统概况	3
1.2.1 北斗卫星导航系统	5
1.2.2 GPS 卫星导航系统	6
1.2.3 GLONASS 卫星导航系统	8
1.2.4 Galileo 卫星导航系统	10
1.2.5 中国区域定位系统	12
1.2.6 欧洲静地导航重叠系统	12
1.2.7 准天顶卫星系统	13
1.3 卫星授时的应用与发展	15
参考文献	16
第 2 章 卫星导航系统时间频率体系	18
2.1 概述	18
2.2 时间参考系	19
2.2.1 世界时	19
2.2.2 历书时	20
2.2.3 国际原子时	20
2.2.4 协调世界时	21
2.2.5 格林尼治标准时间	22
2.3 卫星导航系统的时间统一体制	23
2.3.1 双向卫星时间频率传递	24
2.3.2 导航卫星共视时间传递方法	25
2.4 北斗导航系统的时间体系	26
2.4.1 时间频率子系统	27
2.4.2 发播时间	28
2.4.3 钟差预测	31
2.5 全球定位系统	32
2.5.1 GPS 的时频子系统	33

2.5.2 卫星时钟调整	35
2.6 中国区域定位系统	35
2.7 Galileo 系统	36
2.8 GLONASS 系统	37
参考文献	37
第3章 卫星授时原理	39
3.1 卫星导航信号的时频特性	40
3.1.1 导航信号产生过程及同步控制	40
3.1.2 导航电文中的时间信息	40
3.2 RDSS 与 RNSS	42
3.3 RNSS 授时	43
3.3.1 时延计算及修正流程	44
3.3.2 定位解算	45
3.4 RDSS 授时	45
3.4.1 单向授时	45
3.4.2 双向授时	47
3.4.3 利用高程作为虚拟星座的单向授时	48
3.4.4 GPS 辅助 RDSS 单向授时	49
3.4.5 坐标转换	50
3.5 卫星授时的误差分析	53
3.5.1 与卫星有关的误差	53
3.5.2 与卫星信号传播有关的误差	54
3.5.3 接收设备有关的误差	55
3.6 高程误差对授时精度的影响分析	56
参考文献	60
第4章 卫星导航信号处理	62
4.1 信号的发射与接收	62
4.2 卫星导航信号特征	63
4.2.1 北斗导航试验卫星信号特征	63
4.2.2 北斗导航卫星信号特征	64
4.2.3 GPS 导航卫星信号特征	64
4.2.4 GLONASS 信号特征	66
4.2.5 Galileo 信号特征	66
4.3 BOC 调制与解调	67
4.3.1 BPSK 调制	67
4.3.2 BOC 调制	67

4.3.3	BOC 解调	69
4.4	带通采样与数字下变频	70
4.4.1	带通采样定理	70
4.4.2	正交数字下变频	71
4.5	捕获与跟踪	73
4.5.1	捕获方法分析	74
4.5.2	PN 码的生成	77
4.5.3	滑动相关捕获	77
4.5.4	载波环与码环跟踪	80
4.5.5	环路滤波器	84
4.6	Viterbi 译码	86
4.6.1	Viterbi 译码原理	86
4.6.2	基于 DSP 的译码实现	89
4.7	CRC 校验	90
4.8	解帧和解电文	91
	参考文献	92
第 5 章	时延计算与补偿	94
5.1	与卫星有关的时延计算	94
5.1.1	卫星钟差	94
5.1.2	相对论效应	95
5.1.3	Sagnac 效应	95
5.2	信号传播时延计算	96
5.2.1	电离层延时计算	96
5.2.2	对流层延时计算	98
5.3	接收机延时计算	99
5.4	GEO 卫星星历预测	100
5.4.1	直线模型	101
5.4.2	曲线拟合模型	101
5.4.3	直线模型与曲线模型的比较	104
5.5	RDSS 信号时延计算	106
5.5.1	上行时延误差	107
5.5.2	下行时延的计算	108
5.5.3	总时延的测试	109
5.6	时延补偿与秒脉冲生成	110
5.6.1	时标获取	110
5.6.2	秒脉冲合成	111

5.6.3 秒脉冲精度定义与测试	112
参考文献	112
第6章 接收机终端设计	114
6.1 接收机组成	114
6.2 天线	115
6.3 射频单元	116
6.4 信号及数字处理单元	116
6.4.1 FPGA 简介	118
6.4.2 DSP 简介	118
6.4.3 DSP 的程序加载	119
6.5 EMIF 数据交换	120
6.5.1 EMIF 的介绍	120
6.5.2 EMIF 的配置与连接	120
6.5.3 EMIF 的握手协议	124
6.5.4 EMIF 的数据交换	125
6.6 其他	126
6.6.1 温补晶振	126
6.6.2 RTC 单元	126
6.6.3 电源	127
参考文献	127
第7章 卫星驯服时钟系统	129
7.1 概述	129
7.2 频率基准	130
7.2.1 原子钟	130
7.2.2 石英晶体振荡器	133
7.2.3 MEMS 振荡器	134
7.3 频率基准的技术指标	134
7.3.1 频率准确度	134
7.3.2 频率稳定度	134
7.3.3 频率漂移率	135
7.4 频率差测量	135
7.5 秒抖动的处理	137
7.6 频率校准	138
7.7 时钟驯服模型	139
7.8 自适应 PI 调节	140
7.9 基于 FPGA 的时钟驯服系统	143

7.10 应用与展望	144
参考文献	144
第8章 时间同步接口	146
8.1 概述	146
8.2 时间编码同步	146
8.2.1 IRIG - B 码	146
8.2.2 IRIG - B 码解码的实现	150
8.3 NTP 网络同步接口	153
8.3.1 NTP 协议	154
8.3.2 NTP 的三种工作模式	154
8.3.3 NTP 的网络结构	155
8.3.4 基于 ARM 的 NTP 网络同步实现	156
8.4 IEEE1588 时间同步	159
8.4.1 PTP 协议	159
8.4.2 PTP 子域系统模型	160
8.4.3 PTP 子域的时钟端口模型	161
8.4.4 PTP 反应时间	162
8.4.5 PTP 同步过程	163
8.4.6 时间戳生成与提取	164
8.5 其他常用同步接口	165
8.5.1 时间报文同步	165
8.5.2 空接点同步	166
8.5.3 光纤同步	166
参考文献	168
第9章 卫星授时应用	169
9.1 卫星授时在电力行业应用	169
9.1.1 电力系统是与时间密切相关的系统	169
9.1.2 电力系统对时间同步的需求	170
9.1.3 电厂及变电站的时间同步系统	170
9.2 卫星授时在 CDMA 移动通信网的应用	172
9.2.1 CDMA 移动通信网对时间同步的需求	172
9.2.2 北斗/GPS 双模同步原理	172
9.2.3 方案设计与工程实施	174
9.2.4 现网测试	176
9.2.5 结论	179
9.3 卫星授时在铁路系统中的应用	180
参考文献	181

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction of satellite timing	1
1.2 Overview of satellite navigation system	3
1.2.1 BeiDou system	5
1.2.2 GPS system	6
1.2.3 GLONASS system	8
1.2.4 GALILEO system	10
1.2.5 CAPS system	12
1.2.6 EGNOS system	12
1.2.7 QZSS system	13
1.3 Application and development	15
References	16
Chapter 2 Time and frequency system of satellite navigation system	18
2.1 Overview	18
2.2 Time frame of reference	19
2.2.1 Universal Time	19
2.2.2 Ephemeris Time	20
2.2.3 International Atomic Time	20
2.2.4 Coordinated Universal Time	21
2.2.5 Greenwich Mean Time	22
2.3 Time unified Architecture	23
2.3.1 Two Way Satellite Time and Frequency Transfer	24
2.3.2 Satellite Common View	25
2.4 Time system of Beidou	26
2.4.1 Time and Frequency Subsystem	27
2.4.2 Time transmission	28
2.4.3 Clock error prediction	31
2.5 Time system of GPS	32
2.5.1 Time and Frequency subsystem	33

2.5.2	Satellite time adjustment	35
2.6	Time system of CAPS	35
2.7	Time system of GALILEO	36
2.8	Time system of GLONASS	37
	References	37
Chapter 3	Satellite timing principle	39
3.1	Time and Frequency specification of navigation signal	40
3.1.1	Signal generation and synchronization control	40
3.1.2	Time information contained in NAV data	40
3.2	RDSS and RNSS	42
3.3	RNSS Timing	43
3.3.1	Delay calculate and correction	44
3.3.2	Position resolution	45
3.4	RDSS timing	45
3.4.1	One way timing	45
3.4.2	Two way timing	47
3.4.3	One way timing by using high as virtual satellite	48
3.4.4	One way timing aided by GPS	49
3.4.5	Coordinate conversion	50
3.5	Error analysis of satellite timing	53
3.5.1	Error related to satellite	53
3.5.2	Error related to signal transmission	54
3.5.3	Error related to receiver	55
3.6	Timing accuracy analysis caused by elevation error	56
	References	60
Chapter 4	Satellite signal process	62
4.1	Signal transmit and receive	62
4.2	Signal specification	63
4.2.1	Signal specification of BeiDou demonstration system	63
4.2.2	Signal specification of BeiDou system	64
4.2.3	Signal specification of GPS system	64
4.2.4	Signal specification of GLONASS system	66
4.2.5	Signal specification of GALILEO system	66
4.3	BOC modulation and demodulation	67
4.3.1	BPSK modulation	67
4.3.2	BOC modulation	67

4.3.3	BOC demodulation	69
4.4	Band-pass sample and digital down-conversion	70
4.4.1	Band-pass theorem	70
4.4.2	Quadrature digital down-conversion	71
4.5	Signal capture and track	73
4.5.1	Signal capture	74
4.5.2	PN code generation	77
4.5.3	Slide correlation capture	77
4.5.4	Track loop of carrier and code	80
4.5.5	Loop filter	84
4.6	Viterbi decode	86
4.6.1	Viterbi decode theory	86
4.6.2	Realization by DSP	89
4.7	CRC check	90
4.8	NAV data reading	91
	References	92
Chapter 5	Time delay compensation	94
5.1	Time delay related to satellite	94
5.1.1	Satellite clock error	94
5.1.2	Relativistic effect	95
5.1.3	Sagnac effect	95
5.2	Signal transmission delay	96
5.2.1	Ionosphere delay	96
5.2.2	Troposphere delay	98
5.3	Receiver delay	99
5.4	GEO satellite ephemeris prediction	100
5.4.1	Straight line model	101
5.4.2	Curve-fitting model	101
5.4.3	Comparison of two model	104
5.5	Delay in RDSS timing	106
5.5.1	Uplink delay	107
5.5.2	Downlink delay	108
5.5.3	Total delay	109
5.6	Delay compensation and PPS generation	110
5.6.1	Time mark in correlation	110
5.6.2	PPS synthetization	111

5.6.3	PPS testment	112
	References	112
Chapter 6	Timing receiver design	114
6.1	Receiver composition	114
6.2	Antenna	115
6.3	Radio unit	116
6.4	Signal and data unit	116
6.4.1	FPGA system	118
6.4.2	DSP system	118
6.4.3	DSP program upload	119
6.5	EMIF interface	120
6.5.1	EMIF introduction	120
6.5.2	EMIF configuration	120
6.5.3	EMIF protocol	124
6.5.4	EMIF data exchange	125
6.6	Other unit	126
6.6.1	Temperature compensation crystal oscillator	126
6.6.2	RTC unit	126
6.6.3	power unit	127
	References	127
Chapter 7	Satellite disciplined clock	129
7.1	Oveview	129
7.2	Frequency standard	130
7.2.1	Atom clock	130
7.2.2	Quartz crystal oscillator	133
7.2.3	MEMS resonator	134
7.3	Specification of frequency standard	134
7.3.1	Frequency accuracy	134
7.3.2	Frequency stanbility	134
7.3.3	Frequency drift	135
7.4	Frequency error measurement	135
7.5	Pulse jitter process	137
7.6	Frequency calibration	138
7.7	Clock disciplined model	139
7.8	Self-adaption PI regulation	140
7.9	Satellite disciplined Prototype	143

7.10 Application and prospect	144
References	144
Chapter 8 Time synchronization interface	146
8.1 Overview	146
8.2 Time code synchronization	146
8.2.1 IRIG-B coding	146
8.2.2 IRIG-B decoding	150
8.3 NTP synchronization	153
8.3.1 NTP protocol	154
8.3.2 NTP operating mode	154
8.3.3 NTP network	155
8.3.4 NTP synchronization prototype	156
8.4 IEEE1588 synchronization	159
8.4.1 PTP protocol	159
8.4.2 PTP subdomain	160
8.4.3 Interface of subdomain	161
8.4.4 PTP delay	162
8.4.5 PTP process	163
8.4.6 Time stamp generation	164
8.5 Other synchronization interface	165
8.5.1 Time message synchronization	165
8.5.2 Open contact synchronization	166
8.5.3 Optical synchronization	166
References	168
Chapter 9 Satellite timing application	169
9.1 Application at electrical power system	169
9.1.1 Time-sensitive character of power system	169
9.1.2 Synchronization requirement of power system	170
9.1.3 Synchronization subsystem	170
9.2 Satellite timing applied at CDMA network	172
9.2.1 Synchronization requirement of CDMA network	172
9.2.2 Dual mode timing principle	172
9.2.3 Scheme design and implement	1746
9.2.4 Test at CDMA active duty network	176
9.2.5 Conclusion	179
9.3 Satellite timing applied at railway system	180
References	181