

新一代GNSS信号 处理及评估技术

XINYIDAI GNSS XINHAO CHULI JI PINGGU JISHU

📍 卢虎 廉保旺 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

新一代 GNSS 信号 处理及评估技术

卢 虎 廉保旺 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

新一代 GNSS 信号处理及评估技术/卢虎,廉保旺著.
—北京:国防工业出版社,2016.8
ISBN 978-7-118-10828-6

I. ①新… II. ①卢… ②廉… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 100673 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 插页 4 印张 5¼ 字数 150 千字

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 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

前 言

随着全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 现代化计划加速推进、北斗系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 全球化布局以及 GALILEO 系统的成功组网, 新一代全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 将更多地采用二进制偏移载波 (Binary Offset Carrier, BOC) 衍生调制及交互式 (InterPlex) 等单载波复用调制方式, 并与传统 GNSS 所采用的 B/QPSK (Binary/Quadrature Phase Shift Keying) 调制存在较大差异。因此, 现代导航信号的特性、接收与处理方法与传统信号的分析方法有着明显不同。

目前, 国内外深入探讨新型 GNSS 导航信号体制、处理方法和导航性能的专业著作很少。本书著者在国家自然科学基金 (61473308, 61174194) 和国家北斗重大科技专项 (GFZX0301040117-2) 的相关研究基础上, 结合现代导航信号特征, 深入研究了新一代 GNSS 导航信号同步处理技术和导航测距性能, 定量分析了新一代 GNSS 信号在码跟踪精度、抗干扰和抗多径性能方面的技术优势, 并基于导航信号用于测距、定位的特性, 完成了新一代 GNSS 信号处理方法与测距性能的评估软件设计, 相关研究可为设计 GNSS 兼容与互操作接收终端提供基带信号处理的关键技术参考。

卢虎副教授完成了全书的撰写工作, 廉保旺教授审阅了全书并提出修改意见, 最终定稿, 博士生闫浩、宋玉龙协助完成了书中部分工作; 与中科院国家授时中心的卢晓春研究员、王雪博士、贺成艳博士、贺卫东博士等的学术交流也使本书增色不少, 在此一并致谢! 书中还参考了大量的文献资料, 谨向文献资料的作者表示最诚挚的谢意。

限于作者水平, 书中难免有疏漏之处, 敬请读者朋友不吝批评指正。

作者

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	卫星导航系统发展现状	1
1.2	导航信号现代化	3
1.3	章节安排	8
第 2 章	新一代 GNSS 信号	10
2.1	BOC 类调制方式	10
2.1.1	BOC 调制	10
2.1.2	MBOC 调制	12
2.1.3	AltBOC 调制	16
2.1.4	TDDM - BOC 调制	21
2.1.5	TD - AltBOC 调制	22
2.2	单载波复用调制方式	24
2.2.1	Interplex 复用技术	25
2.2.2	CASM 复用技术	27
2.2.3	最优相位复用技术	29
第 3 章	新一代 GNSS 信号处理技术	33
3.1	传统导航信号同步接收技术	33
3.1.1	捕获	34
3.1.2	跟踪	38
3.2	BOC 类导航信号捕获技术	42
3.2.1	BPSK - like	42
3.2.2	SCPC(QBOC)	44
3.3	BOC 类导航信号码同步技术	48
3.3.1	非时分 BOC 类信号码同步技术	48

3.3.2	时分 BOC 类信号码同步技术	59
3.3.3	GALILEOE1/E5 频点信号同步技术	60
3.4	高动态环境下的载波同步技术	62
3.4.1	传统载波同步方法及其局限	63
3.4.2	高动态 GNSS 信号载波跟踪技术	74
3.4.3	基于 Fuzzy 控制的环路带宽自适应设计	82
第 4 章	新一代 GNSS 信号导航性能分析	92
4.1	码跟踪精度	92
4.1.1	相干 EML 码跟踪精度	92
4.1.2	非相干 EMLP 环路跟踪精度	93
4.1.3	BOC 类信号的码跟踪精度分析	95
4.2	抗干扰性能	98
4.2.1	相干 EML 跟踪环路抗干扰性能分析	98
4.2.2	抗干扰品质因数	100
4.2.3	BOC 类信号抗干扰性能分析	101
4.3	抗多径性能	103
4.3.1	相干 EML 环路多径误差分析	104
4.3.2	非相干 EMLP 环路多径误差分析	106
4.3.3	平均多径误差与多径误差包络下界	108
4.3.4	BOC 类信号抗多径性能分析	108
第 5 章	新一代 GNSS 信号畸变对测距性能影响评估	114
5.1	频谱畸变影响评估	114
5.2	时域畸变影响评估	120
5.2.1	数字畸变	122
5.2.2	模拟畸变	123
5.3	调制域畸变影响评估	129
5.4	多径干扰影响评估	133
第 6 章	GNSS 信号性能分析软件	138
6.1	GNSS 信号模拟软件	138
6.2	GNSS 信号性能分析软件	140
6.3	GALILEO 信号分析结果	142

6.3.1	捕获跟踪结果	142
6.3.2	频域分析结果	146
6.3.3	时域分析结果	146
6.3.4	调制域分析结果	147
6.3.5	相关域分析结果	149
6.3.6	一致域分析结果	152
参考文献		157

第 1 章 绪 论

1.1 卫星导航系统发展现状

定位、导航、授时 (Positioning, Navigation & Timing, PNT) 系统是国家信息基础设施的重要组成部分,能为海、陆、空、天的军、民、商和科研用户提供精确的位置、速度和授时服务,具有巨大的军事、经济和社会影响力。全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 作为 PNT 技术的核心,过去几十年里,在军用和民用领域均发挥了重要的作用,在精确制导、海上航运、车辆监控和物流调度、自动空中加油、地质灾害监测、大型建筑物形变监测及精细农林业、远洋渔业、消费类电子产品等方面,已成为不可或缺的重要组成部分,给人们的生活带来了极大便利。

目前,世界上的卫星导航系统主要有美国的 GPS、欧盟的 GALILEO、俄罗斯的 GLONASS,以及中国的北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)。卫星导航系统的起源要追溯到 1957 年苏联发射第一个人造地球卫星 Sputnik,美国学者通过跟踪监测该卫星所发射的信号描绘出卫星信号的多普勒频移,从而提出了多普勒定位设想,推动产生了美国的子午仪 (Transit) 导航卫星系统,为后来出现的 GPS 和 GLONASS 系统提供了宝贵的经验和方案构想。

(1) 美国国防部于 1973 年 4 月提出 GPS 计划,1978 年 2 月 22 日发射了第一颗实验卫星,1995 年进入全面运行状态。标称的 GPS 卫星星座由 6 个轨道面上的 24 颗卫星组成,每个平面上 4 颗。GPS 是全球卫星导航系统的成功范例,在海湾战争、伊拉克战争中经受了一系列实战考验,在商业市场和大众消费领域也显示出巨大的发展潜力。与此同时,以 GPS 现代化为代表的 GNSS 技术革新与升级计划也在如火如荼地进行。美国以提高 GPS 民用和军用导航定位精度及抗干扰与自



主工作能力为目的,启动了 GPS 现代化改造计划,旨在通过提高 GPS 民用信号的定位精度推动 GPS 在全球民用领域的应用,试图继续引领全球卫星导航技术的发展,并确保 GPS 系统在全球卫星导航市场的霸主地位和军事战略需要。

(2) 苏联军方同样于 20 世纪 70 年代中期提出 GLONASS 计划,并于 1982 年 10 月 12 日发射了第一颗卫星。GLONASS 星座由 21 颗处于工作状态的卫星加 3 颗处于工作状态的在轨备份卫星组成。1995 年 12 月俄罗斯成功布满了 24 颗卫星星座,1996 年宣布这些卫星具备全运行能力,但是在那以后许多老卫星很快失效,整个星座迅速退化。随着俄罗斯经济的复苏,GLONASS 系统也在逐步完善。除了尽快完成星座部署实现满星座运行之外,系统也在紧锣密鼓地进行技术革新与升级:一方面,新发卫星将采用码分多址的技术体制,逐步向全球通用的卫星导航信号体制过渡;另一方面,提高卫星寿命已经成为 GLONASS 目前必须解决的关键问题之一,以避免长期以来星座由于卫星寿命到期而降阶运行的严重问题;另外,星间链路亦成为 GLONASS 解决海外建站难题的不二选择;最后,正在建设的地面监测与差分网络也是提升系统性能的重要举措。

(3) 20 世纪 90 年代初期,欧盟和欧洲空间局提出 GALILEO 计划。GALILEO 空间段由位于中高度轨道的 30 颗卫星构成,分别置于 3 个轨道面。由于 GALILEO 系统与 GPS 的某些信号具有相同的中心频率,如 GALILEO 系统的 E5a 和 E2 - L1 - E1 与 GPS 的 L5 和 L1,因此该系统能够与 GPS 系统实现高度兼容。作为卫星导航系统的新生力量,以 GALILEO 为代表的新一代卫星导航系统已经成为全球卫星导航领域中的重要成员。虽然新生系统整体上面临着夹缝中生存的先天不足,但新型调制技术的创新理念为其增添了许多生命力。

(4) 北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统。20 世纪 90 年代,我国开始建设北斗一代卫星导航系统,采用码分多址的卫星无线电测定业务(Radio Determination Satellite Service, RDSS)体制,用户在需要定位时发射定位申请信号,由地面中心控制系统解算位置,然后经过卫星链路告知用户。2004 年开始建设北斗第二代全球卫星导

航系统,采用码分多址卫星无线电导航业务(Radio Navigation Satellite Service, RNSS)体制,用户可以自主解算位置。目前 BDS 已经具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力,2020 年前将建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。

开展国际合作已经成为进入 21 世纪以后卫星导航系统发展最重要的特点之一,并在客观上极大促进了卫星导航技术的整体进步,为 GNSS 系统间兼容与互操作的多系统融合应用提供了重要的技术基础。

兼容与互操作的信号体制正在成为新一代全球卫星导航系统区别以往的最大特征。

1.2 导航信号现代化

由于卫星导航频率资源十分有限,各主要卫星导航系统共用频段不可避免,由此带来的干扰会影响系统的性能,兼容问题非常突出。兼容性作为卫星导航系统共存和系统间互操作的前提一直是国际频率协调的重点。兼容性的定义目前已获得各个国家的广泛认可,即卫星导航系统的服务或信号能够独自或一起使用,而不会对各项单独的服务或信号造成不可接受的性能下降。在 L1、L2 这些特别适用于导航的频带上,新增信号不应该对原有信号性能产生较大影响;对军用和民用导航信号而言,更应该尽可能地实现频谱分离以减少相互干扰。

需要特别指出的是,信号在载波相位上的正交分离只能帮助接收机将同一个卫星发送的信号分离出来,而来自其他卫星的信号由于信道时延、多普勒频移、相位旋转等原因到达接收机时的状态是随机的,会导致接收机无法分离这些干扰。因此,实现新一代 GNSS 信号频谱在频率上的分离才是最有效的解决方法。

在新一代 GNSS 导航信号体制包含的众多因素中,调制方式是十分关键的一项,它决定了扩频码的码片脉冲形状,影响信号的时域波形和功率谱密度特性,其设计也贯穿了 GPS 信号体制现代化和 GALILEO 信号体制设计过程的始终。

下面重点介绍现代卫星导航系统的频谱规划和所采用的信号调制



方式,为之后的研究工作打下基础。

1. GPS 系统

GPS 现代化的一个主体思想即频率共用,通过引入新的调制方法解决以上问题。为此,1997 年 Srin H. Raghavan 和 Jack K. Holmes 等首先提出了一种 Tricode Hexaphase 调制技术,通过对每个伪随机码码片进行曼彻斯特编码,从而将信号从频带中间分离到两边。随后 John W. Betz 研究了正弦形式、方波形式的副载波,并在文献[6,7,9]中完整地提出了 BOC(Binary Offset Carrier)调制技术。BOC 调制可以看作对曼彻斯特编码技术的推广,提高了设计灵活性,成为 GPS 新型军用 M 码以及新型民用信号的设计方案。其中,M 码的调制方式为 BOC(10,5)码。

GPS 占用 3 个频段,分别是 L1、L2 和 L5。GPS 在这三个频段发播民用信号,同时在 L1 和 L2 频段发播军用信号。表 1-1 给出了 GPS 系统的频率分布和调制方式。从表中可以看到,GPS 系统较多地使用了 BPSK 和 QPSK 等传统的调制方式,仅仅使用了 BOC(10,5)和 TMBOC(6,1,4/33)等较为简单的新型调方式。

表 1-1 GPS 频率规划

频段/信号	载波频率/MHz	带宽/MHz	调制方式	码速率 (兆码片/s)
L1 C/A	1575.42	30.69	BPSK(1)	1.023
L1 C			BOC(1,1) + TMBOC(6,1,4/33)	1.023
L1 P			BPSK(10)	10.23
L1 M			BOC(10,5)	5.115
L2 C	1227.6	30.69	BPSK(1)	1.023
L2 P			BPSK(10)	10.23
L2 M			BOC(10,5)	5.115
L5	1176.45	24	QPSK(10)	10.23

2. GALILEO 系统

2001 年欧盟 GALILEO Signal Task Force 工作组的成员 Guenter W. Hein 等提出了 GALILEO 系统的频率规划和信号设计方案,这也是欧

洲卫星导航系统的发展路线。方案中规划了 E5a、E5b、E6 和 E2 - L1 - E1 四个频段,并广泛采用 BOC 调制技术,其中 E6 和 E2 - L1 - E1 频带上均复用 3 路信号,E5a 和 E5b 上采用相同的调制方式,使得接收机对二者既可以同时处理,也可以单独处理。2002 年,Guenter W. Hein 等提出在 E5a 和 E5b 频带上采用两个 QPSK(10)调制信号或 Alt-BOC(15,10)调制信号,在 E6 和 E2 - L1 - E1 频带上采用改进的 Hexaphase 调制,即所谓的 Interplex 技术。2004 年 6 月 26 日,美国和欧盟签订“Agreement on the Promotion, Provision and Use of GALILEO and GPS Satellite - Based Navigation Systems and Related Applications”,其中一项就是 GPS 和 GALILEO 系统在以 1575.42MHz 为中心频率的 L1 / E2 - L1 - E1 频段上采取相同的调制方式,以达到兼容互操作的目的。来自美国和欧盟的专家们于 2006 年共同提出了 MBOC 调制技术,通过在信号高频部分额外添加功率来提高信号跟踪精度,其中包括 TMBOC (Time Multiplexed Binary Offset Carrier,时分多路二进制偏移载波)和 CBOC(Composite Binary Offset Carrier,混合二进制偏移载波)两种具体实现形式。

GALILEO 系统未来将提供多种右旋圆极化方式的导航信号,分别分布在 3 个频段,不同频段的调制方式也不尽相同。由于 GALILEO 系统与 GPS 系统在 L1 和 L5 频段共用,为了实现两个系统兼容性和互操作,在 1575.42MHz 频点处两系统分别使用 CBOC 和 TMBOC 调制方式。GALILEO 系统和 GPS 系统的频谱占用情况如图 1-1 所示。从表 1-2 中可以看到,GALILEO 系统较多地采用了新型调制方式。

3. 北斗卫星导航系统

谭述森院士在文献[5]中指出,北斗第二代全球卫星导航系统初步设计为 3 个载波 10 个导航信号。其中 B2a 和 B2b 频带提供公开导航服务信号,拟采用 AltBOC(15,10)调制;B3 频带提供授权导航服务信号,该频带复用了 3 个信号,包括 1 个 BPSK(10)信号和 2 个 BOC(15,2.5)信号;B1c 频带提供 1 个采用 MBOC(6,1,1/11)调制的公开导航服务信号和 2 个采用 BOC(14,2)调制的授权导航服务信号。

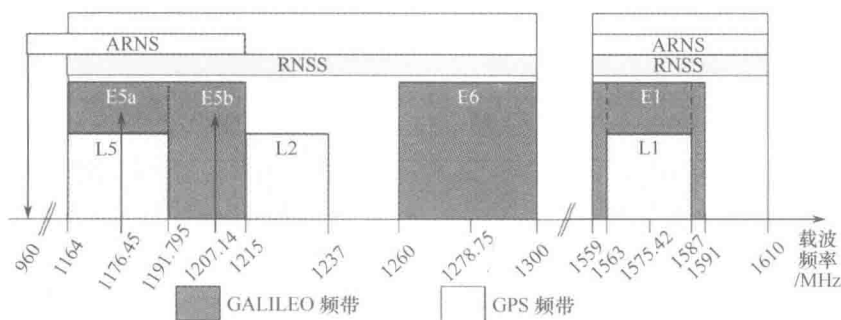


图 1-1 GPS 和 GALILEO 频谱占用

表 1-2 GALILEO 频率规划

信号		载波频率/MHz	带宽/MHz	调制方式	码速率/ (兆码片/s)
E1	B	1575.42	24.552	CBOC (6,1,1/11)	1.023
	C				
E6	B	1278.75	40.92	BPSK(5)	5.115
	C				
E5		1191.795	51.15	—	—
E5a	I	1176.45	20.46	AltBoc (15,10)	10.23
	Q				
E5b	I	1207.14			
	Q				

目前,已建成的北斗区域导航系统主要采用 QPSK 调制方式,根据官方公布的 ICD 文件,表 1-3 给出了其频率占用情况。北斗、GPS 和 GALILEO 经过多次频率协调,并就 BDS 的 L 频段卫星导航信号中心频率、调制方式、公开信号的伪码等参数进行了交流和研究。表 1-4 给出了未来北斗全球卫星导航系统可能采用的信号体制,从表中可以看到,北斗全球卫星导航系统未来也将采用较多的新型信号调制方式。

表 1-3 北斗区域导航系统频率规划

信号	载波频率/MHz	带宽/MHz	调制方式	码速率/(兆码片/s)
B1(I)	1561.098	4.096	QPSK	2.046
B1(Q)	1561.098	4.096	QPSK	2.046
B2(I)	1207.14	24	QPSK	2.046
B2(Q)	1207.14	24	QPSK	10.23
B3	1268.52	24	QPSK	10.23

表 1-4 北斗全球卫星导航系统预期频率规划

信号	载波频率/MHz	调制方式	码速率/(兆码片/s)
B1 - Cd	1575.42	BOC(1, 1)	1.023
B1 - Cp	1575.42	TMBOC(6, 1, 4/33)	1.023
B1 - A	1575.42	TDDM - BOC(14, 2)	2.046
B2Ad	1191.795	TD - A1tBOC(15, 10)	10.23
B2aP	1191.795		10.23
B2bD	1191.795		10.23
B2bP	1191.795		10.23
B3	1268.52	QPSK(10)	10.23
B3 - AD	1268.52	BOC(15, 2.5)	2.5575
B3 - AP	1268.52	BOC(15, 2.5)	2.5575

北斗卫星 RNSS 基本信号频谱示意图如图 1-2 所示。

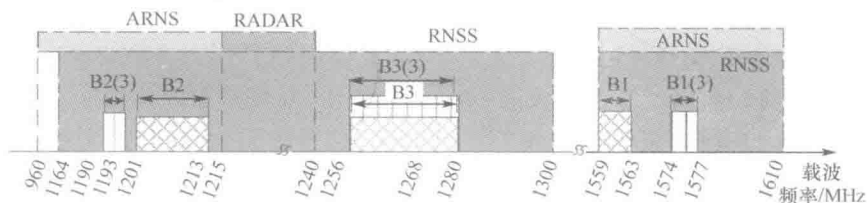


图 1-2 北斗卫星 RNSS 基本信号频谱示意图

从前面的讨论可以看到,现代导航系统将更多地采用 BOC 及 BOC 衍生的调制方式以及 InterPlex 等单载波复用调制,这与传统 BPSK 信号在相关性能、频谱结构、星座图等方面都存在较大差异,因此新一代



GNSS 信号的接收与处理将采用有别于传统信号的分析方法。结合新一代导航信号的特征,深入研究新型导航信号同步技术,是实现 GNSS 兼容与互操作接收系统必不可少的关键环节,具有很好的理论与工程实践意义。

1.3 章节安排

本书主要针对新一代 GNSS 导航信号的同步机理和导航性能展开研究:首先,在理论上定性分析新型 GNSS 信号的码和载波跟踪机理、抗干扰和抗多径性能,并给出数值仿真的定量评估结果;接着具体分析新一代 GNSS 导航信号的测距性能,定量描述典型场景下信号质量与导航性能间非正常耦合关系;最后,介绍 GNSS 信号模拟软件和 GNSS 信号导航性能分析软件的逻辑架构、功能模块和核心功能的实现方法,并对实测 GALILEO 系统的 E1 和 E5 信号进行分析和评估。

本书共分 6 章,每章内容安排如下:

第 1 章,阐述卫星导航系统的发展现状和信号体制,给出四大主流 GNSS 系统新一代信号体制的主要特征。

第 2 章,讨论新一代卫星导航信号的调制方式,研究 BOC 信号、MBOC 信号、AltBOC 信号、TDDM - BOC 信号和 TD - AltBOC 信号等 BOC 类信号的产生方法、自相关特性和功率谱特性,给出 3 种新一代卫星导航系统中特有的单载波复用调制方式。

第 3 章,针对新一代 GNSS 普遍采用的 BOC 类信号,进一步研究现有的 BOC 类信号的同步(捕获和码/载波跟踪)方法,介绍 BPSK - like 算法、ASPeCT 算法、Bump - Jumping 算法、双环路跟踪算法以及时分信号 TDDM - BOC 信号和 TD - AltBOC 信号的码跟踪策略,定性和定量分析每种算法的利弊和适用范围;最后深入剖析现有载波同步方法的不足,给出一种高动态应用场景下导航信号的载波跟踪机制,实现高动态环境下 GNSS 信号载波环路带宽自适应控制,很好地平衡了环路动态性能和噪声性能之间的矛盾。

第 4 章,从理论上,对新一代 GNSS 信号的码跟踪精度、抗干扰性能和抗多径性能等方面的导航性能,进行定量分析和评估。

第5章,主要以北斗信号可能采用的 BPSK(10)、TDDM-BOC(14,2)、TMBOC(6,1,1/11)以及 TD-AlhBOC(15,10)为例,分析信号功率谱畸变、码片波形数字畸变和模拟畸变、载波相位偏差以及多径干扰对导航信号测距性能的影响。

第6章,介绍作者设计的“GNSS 信号模拟软件”和“GNSS 信号导航性能分析软件”,并利用软件对真实的 GALILEO 信号进行分析与评估。

第2章 新一代 GNSS 信号

本章首先介绍常见的 BOC 类信号调制方式,分析其调制机理、自相关函数、功率谱等特性。然后介绍新一代导航系统中特有的单载波复用调制方法,为后续的研究打下基础。

2.1 BOC 类调制方式

2.1.1 BOC 调制

2001 年,John. W. Betz 首次提出了应用于导航信号领域的 BOC (Binary Offset Carrier) 调制方式。与传统的 BPSK 信号相比,BOC 信号在调制过程中额外增加了一个子载波项,利用子载波实现了功率谱的上下搬移,把位于中心频点处的主峰搬移到远离中心的频段处。同时,子载波使得 BOC 调制的自相关函数出现“多峰”,主峰变得更窄。

BOC 信号的子载波是与导航数据比特及伪随机序列同步的方波(取值为 ± 1),有正弦相位和余弦相位两种形式。假定 BOC 信号子载波的频率 $f_s = m \times 1.023 \text{ MHz}$,伪随机码速率 $f_c = n \times 1.023 \text{ 兆码片/s}$,则采用正弦相位子载波的 BOC 信号通常记为 $\text{BOC}(m, n)$,而采用余弦相位子载波的 BOC 信号则记为 $\text{BOCc}(m, n)$ 。BOC 调制机理如图 2-1 所示。导航数据比特依次和本地产生的伪随机码、子载波相乘,形成基带信号,然后调制到高频载波上发射。BOC 信号的数学表达式为

$$s(t) = \sqrt{2P}d(t)c(t)sc(t)\cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (2-1)$$

式中: P 为信号功率; $d(t)$ 为导航数据比特; $c(t)$ 为伪随机码; $sc(t)$ 为子载波。

BOC(m, n)信号的自相关函数和功率谱具有如下规律: