



我国全球卫星导航信号设计研究

谭述森, 周兵, 郭盛桃*, 刘志俭

北京环球信息应用开发中心, 北京 100094

* 联系人, E-mail: guoshtao@yahoo.com

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-12

摘要 我国全球卫星导航信号应具有较大的信号带宽, 其公开导航信号可与 GPS, Galileo 和 GLONASS 公开导航信号实现互操作, 授权导航信号可与 GPS 和 Galileo 授权导航信号实现射频兼容共存, 互不影响性能. 设置导频信号以利于接收机捕获、跟踪, 提高测量精度. 全球卫星导航信号还应具有抗干扰, 防欺骗能力. 提出了一种关于我国全球卫星导航信号结构的方案.

关键词 卫星导航, 信号, 设计

PACS: 07.87.+v, 95.40.+s, 07.50.Qx

1 背景

我国全球卫星导航系统(Compass)业已批准立项建设, Compass 将和 GPS, Galileo 和 GLONASS 一道成为世界主流的卫星导航系统, 能够独立或与其他卫星导航系统共同向陆地、海洋和天空用户提供连续、稳定和高精度定位、导航和授时(PNT)服务. Compass 导航信号设计除满足上述基本要求外, 还应具备较强的抗干扰和防欺骗能力, 具备与其他卫星导航信号的兼容和互操作能力, Compass 导航信号的设计还应充分考虑用户应用的平稳过渡.

我国卫星导航信号设计始于导航系统建设需要. 自 20 世纪 90 年代开始, 我国已经建成并开通运行了北斗一代卫星导航系统, 北斗一代卫星导航信号采用码分多址 RDSS 结构体制, 通常用户在需要定位时, 要发射定位申请信号, 由地面中心控制系统解算定位位置, 然后经过卫星链路告知用户^[1]. 2004 年我国开始建设北斗二代卫星导航系统, 目前北斗二代卫

星导航系统正在建设中. 北斗二代卫星导航信号采用码分多址 RNSS 结构体制, 用户可自主解算定位位置.

GPS 和 Galileo 卫星导航系统均采用码分多址 RNSS 结构体制, 其中 GPS 卫星导航信号自上世纪末提出了现代化升级计划, 其升级目的是从信号体制设计上使终端用户的性能得到提升, 并确保在未来导航战中, GPS 用户特别是授权用户的安全使用. 因此, GPS 和 Galileo 卫星导航信号均采用了新的信号设计形式^[2,3], 以满足其使用需要. GLONASS 卫星导航系统目前采用频分多址信号结构, 2008 年 2 月 GLONASS 宣布其导航信号升级计划, 除增加一个频分多址结构信号外, 另外再增加两个码分多址的导航信号.

基于上述背景, 本文提出了对 Compass 导航信号设计的要求, 并对设计中需要考虑的基本原则进行了说明, 还提出了一种关于我国全球卫星导航信号结构的设计方案.

2 设计要求

Compass 导航信号的设计应充分考虑其多种用户的特性, 满足不同类型用户对高精度定位、导航和授时(PNT)的使用要求, 其设计要求可归纳如下:

(1) 满足我国未来特殊用户和国民经济发展对卫星导航的需求, 具有至少两个公开民用导航信号和两个授权导航信号;

(2) Compass 导航信号应符合国际电联规则, 适应现有国际导航信号资源争夺激烈的国际环境, 具有国际可协调性;

(3) 授权导航信号和公开民用信号在频谱上各自具有一定的频谱带宽, 互不重叠, 其中至少一个授权信号的带宽达到(± 12) MHz;

(4) Compass 公开民用信号应分别与 GPS 和 Galileo 系统的两个公开服务信号实现互操作. Compass 公开服务信号的伪随机码独立设计, 但应尽可能与 GPS/Galileo 公开服务信号的伪随机码簇相近;

(5) Compass 导航信号设计应为用户接收机简化设计创造条件, 有利于用户接收机对导航信号的捕获、跟踪和解调, 有利于与其他导航信号互操作的实现;

(6) Compass 授权导航信号具有防欺骗、防盗用能力, 尽量提高接收机直接捕获能力;

(7) Compass 授权导航信号应具有功率增强能力. 通过导航信号设计和用户接收机抗干扰设计, 使终端用户接收机具备较强的抗干扰能力;

(8) 每颗 Compass 卫星播发的导航信号到达地面用户接收机天线口面的最小功率应大于: -160 dBW;

(9) 尽可能与北斗二代一期导航信号实现应用平稳过渡.

3 基本原则

3.1 频率及服务类型

理想的卫星导航信号应满足以下要求: 具有至少两个独立的授权信号和两个独立的公开民用信号, 对应两个授权、民用导航信号均应相差间隔 300 MHz 至 400 MHz 的工作频率, 以期较好实现对电离层的修正. 每个导航信号具有尽可能大的带宽, 以实现高

精度伪距测量. 授权导航信号、民用导航信号在频谱上分开, 以降低自身间的干扰. 在目前非常紧缺的导航频率资源下, 可采用频谱复用的方式, 满足不同需求的服务性能.

卫星导航系统的用户通常分为两大类: 民用用户和授权用户, 民用用户又可分为普通民用用户和商业用户. 普通民用用户主要用于车辆导航、野外导航等, 用户数量庞大; 商业用户主要是指一些有特殊要求的用户, 他们对定位精度的要求较高, 对服务的安全性、有效性和可靠性都有较高的要求; 授权用户主要是指有特殊使用要求的用户, 他们对定位的精度、安全性、可靠性、有效性和连续性都有非常高的要求.

普通民用用户应该能够接收一个频率的导航信号或最多两个不同频率的导航信号, 实现定位、导航和定时功能, 双频接收可获取高精度的电离层校正服务.

商业用户可接收最多 3 个不同频率的信号, 其中包含 1 个或 2 个公开服务信号. 接收处理 3 个不同频率导航信号可进一步提高电离层校正的精度, 有利于载波整周模糊度的求解. 商业信号通过搭载加密的差分及完好性信息, 可进一步提高服务精度.

授权用户应能够接收一个频率或最多两个不同频率的授权信号, 实现定位、导航和定时功能, 接收双频导航信号能够获得高精度的电离层校正服务.

3.2 兼容性与互操作性

兼容性是指两个或多个卫星导航系统共同工作时, 不会对单个系统服务产生不可接受的干扰; 互操作性是指同时使用多个卫星导航系统时, 比使用单一系统能够得到更好的性能, 互操作性可使用户接收机同时接收处理不同系统的导航信号, 并且使接收机的成本和复杂度最低.

目前随着国际卫星导航系统的增加, 卫星导航频率资源已经十分短缺, 而且由于商业、救灾等各种原因, 对导航信号的设计和使用越来越精细、复杂, 在同一个基本带宽内, 可能存在着多个导航信号.

在目前国际电联所分配的卫星导航信号频段中, Compass 授权导航信号与 GPS/Galileo 授权导航信号频谱重叠是不可避免的. 因此, 需保证设计的 Compass 导航信号的能量主要集中在 Galileo 和 GPS 授权信号带宽的边缘, 而频谱重叠部分的信号能量

尽量小,同时确保足够的频谱隔离来实现兼容,通过使用不同的调制方法(QPSK+BOC),可将 Compass 授权和民用导航信号实现分离,并确保与 Galileo 和 GPS 授权信号干扰最小。

Compass 公开民用信号应能够与现代化后的 GPS 和 Galileo 公开导航信号实现互操作^[4,5],因此,Compass 导航信号载波中心频率的选择应与 GPS 或 Galileo 载波中心频率相同,即 Compass 导航信号中心频率分别为 1575.42 MHz,与 GPS_L1/Galileo_E1 信号频谱重合;1191.795 MHz 采用 AltBOC 调制,与 GPS_L5/Galileo_E5 信号频谱重合;而 B3 频点(1268.52 MHz)主要为特殊应用,没有互操作任务,应保留不变。

要实现与 GPS/Galileo 公开服务导航信号的互操作,还应当尽可能使 Compass 公开服务导航信号带宽与 GPS/Galileo 公开服务信号带宽一致。

导航信号间的射频兼容性是实现导航系统共同存在的前提。国际电联 1831 号建议书(ITU-R M.1831)对 RNSS 信号结构体制下导航系统间的干扰分析和计算进行了明确规定,是解决导航信号频谱重叠而进行国际协调的通用文件,适用于公开民用导航信号和授权导航信号间的射频干扰计算。Compass 导航系统必须以国际电联 1831 号建议书为基本依据与其他卫星导航系统进行频率和功率协调。这将意味着 Compass 导航信号必须完成以下协调:在 1164~1215 MHz 频段需要与 GPS/Galileo/GLONASS 系统和航空无线电导航系统进行频率协调,在 1250 ~1300 MHz 频段内需要与 Galileo/GLONASS 系统和雷达系统进行频率协调,在 1559~1610 MHz 频段内需要与 GPS/Galileo 系统进行频率协调。

3.3 卫星载荷

在满足系统使用要求的前提下,导航信号的数量,特别是载波个数应尽可能少,以增强卫星有效载荷的利用率。

空间导航卫星由平台和有效载荷两部分组成。有效载荷包括导航分系统、天线分系统。导航载荷产生并向用户播发导航信号,载荷主要包括:伪随机噪声测距码发生器,高稳定度频标,频率综合器,调制器,导航数据处理器,功率放大器和天线等部分。对卫星而言,有效载荷决定了导航信号的质量,包括导航信号到达地面的信号强度,而卫星有效载荷所能

够提供的能量是有限的。因此一个设计良好的导航系统应在满足系统性能的条件下,尽可能的减少卫星有效载荷的负担。对于 Compass 导航信号而言,应在满足系统性能的条件下尽可能使空间载波个数少,提高导航信号到达地面的功率,并使整个卫星导航系统性能更可靠。

为了增强卫星有效载荷的利用率,空间载波信号应采用射频恒包络调制,可采用 AltBOC 和 Interplex 等调制技术,通过调整信号功率控制因子得到具有良好线性特性的恒包络信号,这将有利于简化卫星功放设计,提高有效发射功率,减少能量消耗,增强卫星有效载荷的利用率。

3.4 信号特征

3.4.1 伪随机扩频码

Compass 导航信号伪随机码由基码和二次编码构成。二次编码的目的是:可以使地面接收机迅速实现载波同步;降低频谱谱线间隔,进一步抑制窄带干扰;改善卫星信号之间的互相关特性。导频通道与数据通道的二次编码作用略有差异,它们的二次编码的周期不应相同,导频通道的周期可以略长,以达到一定的抗干扰能力。但二次编码周期不宜设计过长,同时二次编码也必须考虑相关性。伪随机测距码结构的选择对导航系统的性能有很大影响,对 Compass 导航信号伪随机码的一般要求是:

- (1) 为了避免测距模糊,测距码的周期长度必须大于传播时延;
- (2) 测距码的速率足够高,以保证测距精度;
- (3) 从同步检测能力方面考虑,测距码的自相关函数最好是二值的:当序列与本身匹配时具有最大值,而与其移位序列相关时副峰值应尽可能小且应是均匀的;
- (4) 确定相关函数峰值所需时间,即测距码的捕获时间应尽量短;
- (5) 测距码的互相关值应尽量小,以满足系统中多用户在同一频谱上同时进行测距的要求;
- (6) 测距码序列中所含序列数目较多,以提供较多的卫星使用;
- (7) 测距码结构简单,便于实现,易于更改。

3.4.2 调制方式

导航信号调制方式不同,功率谱分布也不同。导

航系统可采用的调制方式有 BPSK(10), BPSK(1), BOC(1,1), BOC(2,2), BOC(10,5), BOC(14,2), AltBOC(15,10)和 MBOC(6,1,1/11)等. 从不同调制方式对应的功率谱密度可知: (1) BOC(10,5)包络远离中心频率的频谱分量最丰富, 其抗干扰性能最优越; (2) MBOC(6,1,1/11)包络远离中心频率的频谱分量较 BOC(1,1)多, 其抗干扰性能比 BOC(1,1)好.

在码速率相同的情况下: (1) MBOC(6,1,1/11)抗干扰能力优于 BOC(1,1)和 BPSK(1); (2) 抗干扰性能从优到劣的顺序依次为 BOC(10,5), BPSK(10), MBOC(6,1,1/11), BOC(1,1)和 BPSK(1). 尽管 BOC(10,5)码速率是 BPSK(10)一半, 但其抗干扰能力优于 BPSK(10).

3.4.3 合理的系统处理增益

扩频信号的处理增益定义为伪随机码速率与信息速率之比, 因此, 降低信息速率是提高导航信号抗干扰能力的途径之一, 在满足系统性能的前提下, 应尽可能采用低速率的导航电文. Compass 新设计的导航电文速率不应超过 50 bps.

导航系统采用伪随机码直接序列扩频体制, 这种直接序列扩频方式具备固有的抗干扰特性. 导航信号经伪随机码扩频后, 淹没于噪声下, 不易被截获、干扰. 导航接收机在对导航信号进行解扩处理时, 能够获取一定的解扩增益(系统处理增益), 并可对干扰信号进行抑制.

3.4.4 导航电文

导航电文的校验与纠错能力也是 Compass 卫星导航信号设计的关键之一, 设计导航信息电文时, 需要充分考虑以下几个方面: (1) 保持电文结构的同一性和完整性: 由于系统各参数的实时性要求和数据长度不一样, 需要考虑子帧、帧和超帧等结构. 对有些超长数据内容, 需要考虑分页. 由于导航电文是连续广播的, 在连续广播过程中, 应该是统一的和完整的; (2) 保障电文内容的完整性: 在满足结构完整性的情形下, 还必须考虑内容的完整性, 以使用户获得必要和足够的信息内容; (3) 有较强的纠错能力: 进行导航电文设计时, 抗干扰编码, 采用前向纠错编码可以提高导航电文纠错能力.

3.4.5 合理加密

在 Compass 导航信号中, 授权伪随机码的设计

应能够有效抵御欺骗性干扰, 也应能够阻止非授权用户对导航系统非法使用. 对授权伪随机码进行加密处理, 应满足:

- (1) 密码的叠加必须保证伪随机码特性的完整性;
- (2) 密码算法强度高, 能抗敌方实施的各种破译分析;
- (3) 密码同步与授权伪随机码直捕实时并行推移, 不额外引入对授权导航信号直捕效率的时间开销;
- (4) 密码算法在解扩过程中, 不产生误码扩散, 不降低系统误码率指标要求;
- (5) 密钥分层多级使用, 密钥管理机制简单. 灵活安全可靠, 便于授权用户使用.

3.4.6 接收机设计

Compass 导航信号的设计应有利于接收机的捕获、跟踪和解调, 特别应考虑在复杂电磁环境下接收机的使用, 并尽可能使接收机的设计简单化, 并在互操作条件下, 不过于增加接收机的复杂度.

Compass 导航信号应采用新的设计方式, 设置无数据导频通道和数据通道. 导频通道的载波, 不需要处理由数据调制引起的载波相位翻转. 载波跟踪可由 PLL 完成, 比数据通道载波跟踪用 Costas 环的门限优越 6 dB, 使地面接收机能够快速捕获卫星导航信号.

Compass 导航信号在频谱设计上, 可采用 BOC 调制技术, 能充分有效利用有限带宽内的能量分布以达到传送多个导航信号的目的, 给用户提供更完善的服务和提高系统性能.

3.5 抗干扰和防欺骗

由于导航卫星在离地面较高的轨道上运行, 且发射的信号功率不可能很大, 其信号传播到地面时, 信号强度约为在 -160 dB W. 用户接收机在处理这种弱导航信号时, 很容易受到复杂电磁环境下非人为的射频干扰和人为故意射频干扰. 这种射频干扰可以导致用户接收机的定位精度下降, 甚至不能工作. 尤其是授权用户接收机, 可能面临恶意干扰. 对导航信号的干扰方式可以分为压制式干扰和欺骗式干扰, 欺骗式干扰即人为产生虚假导航信号诱使接收机产生错误的定位结果; 压制式干扰可以分为

宽带干扰和窄带干扰。Compass 导航信号设计应能够具有防欺骗干扰的功能, 同时能够抗较强的压制式干扰。

卫星导航信号抗射频压制式干扰能力可从以下几个方面考虑: 卫星具有下行点波束功率增强能力, 信号功率增强大于 20 dB, 设计的导航信号具有大于 50 dB 的扩频处理增益和较强的电文纠错能力, 授权用户接收机采用波束形成智能天线和抗干扰信号处理技术, 提供大于 40 dB 的抗干扰能力。

与公开民用导航信号的伪随机码相比, Compass 授权导航信号的伪随机码具有极长的周期和极大的复杂度, 因此更加不易被敌对方通过监测来破译和复制, 从而提高了抗破译和抗欺骗性能。在战时及非正常条件下, 可增强授权信号功率以提高其抗干扰能力, 但在对授权信号进行功率增强的同时, 应尽可能不影响公开民用信号的接收, 同样干扰公开民用服务信号时也不应影响授权用户的正常接收。

对 Compass 授权导航信号而言, 其长周期的伪随机测距码和导航电文适当的加密措施是防欺骗的最佳选择。

3.6 平稳过渡

Compass 导航系统是我国北斗一代卫星导航和北斗二代卫星导航系统的发展和完善, Compass 导航信号与目前在建的北斗二代卫星导航信号有较大区别, Compass 导航信号的设计必须考虑与已有我国卫星导航信号的平稳过渡和继承使用:

(1) 确保北斗二代一期信号的稳定与连续, 继续发挥北斗二代一期的效能;

(2) 简化卫星实现的复杂度、确保卫星系统的稳

定可靠;

(3) 确保过渡期用户接收机不过于增加复杂度。

解决从北斗二代一期导航信号向 Compass 导航信号应用的平稳过渡主要方式有: 卫星过渡和接收机过渡。卫星过渡主要指在一定时期内的卫星同时播发 Compass 导航信号和北斗二代一期导航信号或者播发部分北斗二代一期导航信号和部分 Compass 导航信号。由于 Compass 导航信号与一期导航信号的差异, 该方案对卫星设计和卫星可靠性提出了很高的要求, 存在较大风险。接收机过渡指 Compass 卫星只播发新的导航信号, 地面接收机在一定时期内既能够接收处理一期导航信号同时也能够接收处理 Compass 导航信号。在这一阶段中, 可借鉴 GPS 和 Galileo 提前 5 至 10 年公布导航信号控制接口文件(ICD)的经验, 于 2012 年左右公布 Compass 卫星导航系统的相关参数和组网计划, 并公布 Compass 全球导航信号接口控制文件(ICD), 接收机就可以设计将 Compass 导航信号和北斗二代一期导航信号同时接收处理。当全球导航卫星部署达到一定数量后, 用户接收机可只接收处理新的 Compass 全球卫星导航信号, 以达到平稳过渡。

4 信号初步结构

基于上述论述, Compass 导航信号初步设计如下: 3 个载波, 10 个导航信号, 信号定义及特征如表 1。

B2a/B2b 信号: 公开导航服务信号, 中心频率为 1191.795 MHz, 采用 AltBOC(15,10)圆包络调制方式, 包括 B2a 和 B2b 导航信号, 其中导航信号 B2a 的中心频率为 1176.45 MHz, B2b 中心频率为 1207.14

表 1 Compass 导航信号基本结构及参数

导航信号	载波中心频率(MHz)	码速率(MHz)	电文符号速率(sps)	二次编码码长(bits)	调制方式	服务类型
B2ax 数据(I)	1191.795	10.23	50	10	AltBOC(15,10)	公开
B2ay 导频(Q)		10.23	No	200		
B2bx 数据(I)		10.23	100	10		
B2by 导频(Q)		10.23	No	200		
B3x 数据(I)	1268.52	2.5575	100	—	BOC(15,2.5)	授权
B3y 导频(Q)		2.5575	No	200		
B3z		10.23	500 bps	—	BPSK(10)	
B1cx 数据(I)	1575.42	1.023	50	10	MBOC(6,1,1/11)	公开
B1cy 导频(Q)		1.023	No	200		
B1cz		2.046	100	—	BOC(14,2)	

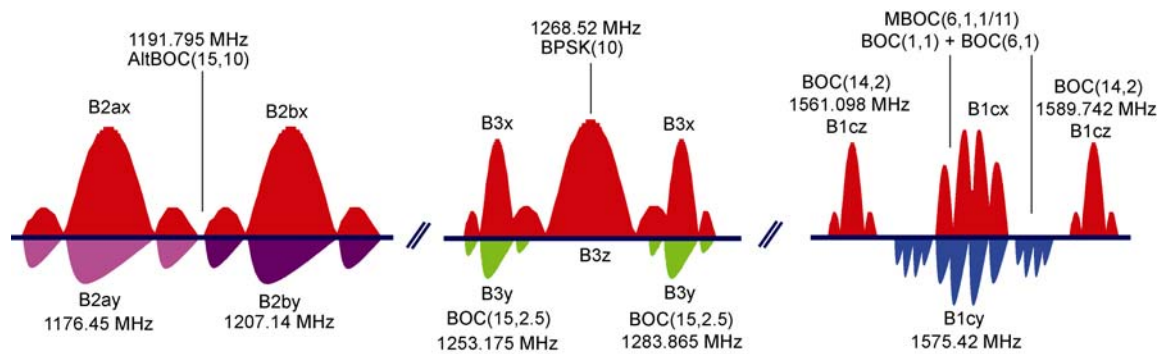


图 1 Compass 导航信号频谱结构

MHz. B2a 和 B2b 分别调制不同导航电文. 导航信号 B2a 和 B2b 分别设置导频通道(Pilot_Channel)和数据电文通道(Data_Channel). 数据通道分别为 B2ax 和 B2bx, 导频通道分别为 B2ay 和 B2by.

B3 信号: 授权导航服务, 中心频率为 1268.52 MHz. B3 导航信号全部规划为授权服务信号, 其中授权导航信号 B3x 和 B3y 分别为数据电文通道和导频信号通道, 采用 BOC(15,2.5)正交调制, 授权导航信号 B3z 采用 BPSK(10)调制.

B1c 信号: 公开导航服务和授权服务信号, 中心频率为 1575.42 MHz, 其中公开导航服务信号设置数据电文通道(B1cx)和导频信号通道(B1cy), 采用 MBOC(6,1,1/11)调制方式; 授权服务信号为导航信号(B1cz), 采用 BOC(14,2)调制.

各导航信号的导频通道不调制电文, 仅调制固定符号数据(200 bits), 公开民用导航信号设置固定长度(10 bits)的二次编码, 导频通道和数据电文通道载波正交.

参考文献

- 1 谭述森. 卫星导航定位工程. 北京: 国防工业出版社, 2007
- 2 Misra P, Enge P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. 2nd ed. Lincoln: Ganga-Jamuna, 2006
- 3 Betz J W. The offset carrier modulation for GPS Modernization. In: Proceedings of ION NTM. San Diego: Institute of Navigation, 1999. 639—648
- 4 Betz J W, Blanco M A, Cahn C R, et al. Description of the L1C signal. In: Proceedings of ION GNSS. Fort Worth: Institute of Navigation, 2006. 2080—2091
- 5 Spilker J J, Van Dierendonck A J. Proposed new civil GPS at 1176.45 MHz. In: Proceedings of ION GPS-99. Nash ville: Institute of Navigation, 1999. 1717—1725

Studies of Compass navigation signals design

TAN ShuSen, ZHOU Bing, GUO ShengTao* & LIU ZhiJian

Beijing Global Information Center, Beijing 100094, China

This paper outlines the principal requirements for the design of navigation signals of China global navigation satellite system (Compass). Compass open signals should be able to interoperate with the open signals of GPS, Galileo and GLONASS, the radiofrequency compatibility for authorized signals among the Compass, GPS and Galileo is essential and necessary. The pilot signals can help the receivers acquire and track the navigation signals. Anti-jamming and anti-spoof are the basic requirements and features for Compass navigation signals design. A candidate structure of the Compass navigation signals is proposed.

satellite navigation, signal, design

PACS: 07.87.+v, 95.40.+s, 07.50.Qx