

北斗卫星信号结构及其特性研究

王哨军, 薄明亮, 王 磊

(北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要: 文章从信道结构、频率结构、调制机制以及扩频码结构四个角度入手, 分析了北斗卫星信号的主要结构, 围绕多频信号模式、信号测距功能、信号干扰抗性以及信号接受质量四个方面, 研究了北斗卫星信号在运行过程中的影响特性。

关键词: 北斗卫星导航系统; 信道结构; 扩频码

中图分类号: TN967.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-1131(2020)10-0001-02

0 引言

北斗卫星是我国自主研制的卫星导航系统, 对我国的社会保障与安全保障具有重要意义。发展至今, 北斗卫星已经历了一号、二号、三号三代系统的工程建设, 并于2020年6月23日完成了北斗三号系统最后一颗组网卫星的发射, 即标志着我国第三代导航星座部署计划的全面落实, 也彰显出了我国作为空间设施建设强国的综合实力。基于此, 我们有必要对北斗卫星的信号结构及其运行特性展开探究讨论。

1 北斗卫星信号的主要结构

1.1 北斗卫星信号的信道结构

与前代导航卫星的信道设计思路不同, 第三代北斗卫星在数据信道这一传统模式的基础上, 融合了非导航电文的导频机制, 进而形成了“数据+导频”的混合型信道结构。究其原因, 主要是相关人员在既往设计中发现, 若存在导航电文的调制需求, 一旦信号解调时发生电文翻转, 将很容易导致比特跳变的现象, 进而造成信号载波频率的异常偏差, 削弱信号捕捉的可靠性与高效性。而在采用导频信道后, 这一负面问题可得到有效改善。在此基础上, 为了进一步强化导频信道的应用效力, 第三代北斗卫星将 Costas 锁相环更换为纯锁相环, 以此实现信号捕捉范围的扩大, 强化信道对弱信号的跟踪能力^[1]。

在第三代北斗卫星的实际运行过程中, 其“数据+导频”信道模式的工作机制为: 首先, 依托纯锁相环高水平的闭环跟踪功能, 对导频信道内无线信号的码相位、载波相位进行锁定。其后, 基于导频信道与数据信道的信号关系, 运算获得数据信道内无线信号的码相位与载波相位, 以实现数据信道跟踪能力的同步强化。最后, 对数据信道内的无线信号进行相干积分处理, 从而获取到相应的电文符号, 以实现导航电文的解调完成。在此过程中, 不需要对导航电文的翻转与否作出考量。这样一来, 可在保障和强化北斗卫星系统信号跟踪精准性的基础上, 降低电文解调的运算复杂程度, 从而实现硬件机构的简化与通信效率的提升。

1.2 北斗卫星信号的频率结构

频率结构是评价信号结构质量的重要指标, 其对卫星系统的导航通信能力具有直接影响性。在频率结构的设计中, 又以频点数、载波频率两项要素最为关键。在第三代北斗卫星信号的结构设计中, 相关人员采取了三种频点相结合的体系方案, 其载波频率分别是 1176.45MHz、1268.520MHz 以及 1575.42MHz。在北斗卫星系统的运行通信过程中, 其新播发的 B1C 信号与美国 GPS 卫星导航系统的 L1C 信号、欧盟 Galileo 卫星导航系统的 E1OS 信号处于同一频点, B2a、B3I 等其

他信号也与美国 GPS 卫星导航系统、俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统的部分信号在频段上有所重叠。这样的频率设计方式利弊皆有。一方面, 可有效提高我国北斗卫星系统与其他国家卫星系统的互操作性。但从另一方面来看, 信号的重叠也会对我国的信息安全构成一定威胁。

除此之外, 如何选择合适的信号带宽, 也是相关人员在频率结构设计中必须要考虑到的问题。从本质上讲, 带宽即信号频谱的宽度, 其对信号自相关函数主峰的尺寸存在直接关联, 进而间接影响信号在通信传输中的多径抗性与跟踪质量。基于此, 第三代北斗卫星 B1C 信号、B2a 信号的带宽分别设计为 32.736MHz、10.23MHz, 均优于前代卫星导航系统的设计参数。信号带宽的数值越大, 其为信号提供出的跟踪质量、多径抗性也就越高, 卫星导航系统的通信效率、测距能力也就越强。但需要注意的是, 带宽的增大并非无限制的。一般情况下, 信号带宽越大, 其对接收终端滤波降噪能力的要求也就越高, 形成的投入成本与技术难度也就越大。所以, 从经济性、高质、可靠性等多方面考量来看, 我国第三代北斗卫星 B1C、B2a 等信号的带宽设计是比较合理的^[2]。

1.3 北斗卫星信号的调制机制

通常情况下, 发送端处原始信号的频谱分量通常处于较低水平, 不适合直接作为发出信号在信道中进行传播。此时, 就需要对信号进行变换处理, 使其转化为更能更高频率的信号, 这一转化过程即为信号的调制。在传统时期, 卫星导航信号主要采取 BPSK 调制方式。但从目前来看, 随着各国太空设施建设项目的持续推进, 卫星导航视域下的频段资源形成了日趋严重的挤压局面, 使得 BPSK 调制方式逐渐落后于时代发展, 无法满足高精度、高效率的信号传输与导航测距需求。在此背景下, 第三代北斗卫星在信号调制机制的设计上充分借鉴了美、俄两个国家卫星导航系统的调制设计方案, 并在此基础上进行了自主化的创新改良。

现阶段, B2a、B3I 两个信号的调制机制采用了 BPSK(10), 功率比为 1/2, 相位关系为 0°(数据信道) 90°(导频信道)。而新播发的 B1C 信号则采取了更新的调制方法, 其数据信道的调制方式为正弦 BOC(1,1), 相位关系为 0°, 功率比为 1/4, 导频信道的调制方式为“正弦 BOC(1,1)+正弦 BOC(6,1)”, 相位关系为 90°、0°, 功率比为 29/44、1/11。其中, BPSK(10) 与传统的 BPSK 调制方法相比, 具有更高的扩码速率, 具体值为 10.23MHz, 可实现信号跟踪精度的显著提升, BOC 则是 BPSK 调制方式与二进制载波调制的结合产物, 其可在 BPSK 调制信号的基础上, 对信号进行二次扩频, 以此进一步提高信号的频谱密度与频率高度。“正弦 BOC(1,1)+正弦 BOC(6,1)”可简称

收稿日期: 2020-07-24

作者简介: 王哨军(1981-) 男, 山西古交人, 工程师, 研究方向: 卫星导航。

为QMBOS调制机制,此机制是我国在北斗卫星信号设计改良中自主开发的新型调制机制,其可将二次载波信号分别调至在相互正交的两个相位上,从而避免信号分量间的相互影响,以解决卫星导航系统运行过程中信号兼容冲突的问题。

1.4 北斗卫星信号的扩频码结构

做好扩频码结构的设计,也是北斗卫星信号结构设计的重要环节。在卫星导航系统的实际运行过程中,扩频码承担着强化信号抗干扰能力、保障信号长距离传播质量的任务。同时,通过测量扩频码的相位移动情况,相关人员也能对伪距、伪距率等关键参数进行运算。在这一方面,第三代北斗卫星信号设计也充分分析了前代系统存在的主要问题,并实施出了有效的优化策略,如设置分层化的扩频码结构、引入新的扩频码码型、调整扩频码的码长与码率等。具体来讲,第三代北斗卫星中B1C、B2a、B3I三个信号的扩频码参数分别为:(1)B1C信号:数据信道主码为Weil码,主码码长为10230,主码周期为10,无子码。导频信道主码、子码均为Weil码,码长分别为10230、180,码周期分别为10、1800;(2)B2a信号:数据信道主码为Gold码,子码为固定码,码长分别为10230、5,码周期分别为1、5。导频信道主码为Gold码,子码为Weil码,码长分别为10230、100,码周期分别为1、100;(3)B3I信号:数据信道主码为Gold码,主码码长为10230,主码周期为1,无子码。

首先,采取分层化的结构设计方式,可在保留高水平信号捕获性能的基础上,实现扩频码特性的改良,并使信号的功率谱更加接近连续谱,从而强化信号在窄带宽条件下的干扰抗性;其次,将部分码型由传统的Gold码改为Weil码,可显著提高扩频码码长设计的灵活性。同时,相比Gold码,Weil码具备更优秀的奇偶相关性;最后,将前代扩频码的码长1023位改为10230位,可显著提高扩频码的自相关性。在此背景下,第三代北斗卫星信号扩频码的码率为1.023Mcps与10.23Mcps,与前代相比,此设计可进一步提高星上设备、终端设备的简化程度。但需要注意的是,码长的整数倍改变,同时也意味着信号运算复杂性的增加,因此也会在一定程度上提高扩频码被捕获的困难性。

2 北斗卫星信号的影响特性

2.1 多频信号模式的影响

在传统的GNSS导航系统时期,人们通常会采用双频信号的设计模式。但从目前来看,世界范围内的全球卫星导航系统,更倾向于开发和运用三频甚至三频以上的复杂信号模式。在第三代北斗卫星系统当中,也采取了三频信号的设计模式,其频率分别为B1、B2、B3。在这一信号设计的背景下,第三代北斗卫星系统表现出了更强的线性组合特点,可生成更有助于卫星导航精准定位的多频信号。例如,在同颗卫星的条件下,三频信号的频率表达式为 $f=i \cdot f_1+j \cdot f_2+k \cdot f_3=f_0(i \cdot n_1+j \cdot n_2+k \cdot n_3)-n \cdot f_0$ 。其中, i, j, k 为三频组合系数, f_0 为基准频率, n 为卷数,可在标准情况下表示三频组合的载波波长。通过这一运算思路,相关人员可获得低误差、低噪声、长波长的优质三频组合测值,从而达到提高导航定位精度、降低模糊系数解算难度的理想效果。现阶段,相关学界围绕三频信号获得了“三频无电离层两两组合模型”、“三频非组合模型”、“三频消电离层组合模型”等多种研究成果,为北斗卫星导航系统的信号结构设计与未来优化发展提供了极大助力^[5]。

2.2 信号测距功能的影响

在现阶段的技术背景下,卫星导航系统的测距功能主要通过载波测距、扩频码测距两种信号方式实现。在此基础上,载波相位、扩频码的跟踪精准性,会对卫星导航系统的测距质量具有直接影响。扩频码跟踪精确性的运算分析主要与两个

要素有关,一为均方根带宽、一为载噪比。均方根带宽的函数

公式为 $\Delta f_g = 2\pi \sqrt{\int_{B_r/2}^{B_r/2} f^2 S(f) df}$ 。其中, B_r 为闭环路的接收带宽, f 为导航信号的传输频率, $S(f)$ 为导航信号的功率谱密度。

由此可知,在北斗卫星导航系统的运行过程中,均方根带宽的数值越大,接收端对导航信号扩频码的跟踪精确性也就越高。

在第三代北斗卫星的信号结构设计中,以B1C为代表的信号实现了调制机制的优化改良,其与前代信号相比,具备更高水平的功率谱密度,所以其均方根带宽也就更大。此时,结合上述公式原理来看,第三代北斗卫星可表现出优于前代的扩频码跟踪能力,其导航测距性能也就随之增强。

2.3 信号干扰抗性的影响

无线信号在传播过程中,势必会受到外部环境的干扰影响,如电磁干扰、噪声干扰等。随着GPS、GLONASS、Galileo、北斗等全球卫星导航系统的建设发展,人们对信号抗干扰性能的重视程度也日益加深。结合相关研究来看,信号干扰抗性的高低与否,主要取决于扩频码速率、子载波频率、信号调制机制等多种因素。一般情况下,信号的干扰抗用品质因数 Q 表示, Q 值越高,即说明信号的干扰抗性越好,其公式为 $Q=(R_c/S(f_j))-1$,其中, R_c 为扩频码速率, f_j 为信号的干扰频率, $S(f_j)$ 为干扰信号的归一化功率谱密度。再次基础上,由于功率谱和有用信号存在较高的相似性,所以还可得到公式 $Q \approx (R_c \int_{-\infty}^{\infty} [S(f)^2] df)^{-1}$,其中, f 为有用信号频率, $S(f)$ 为有用信号的功率谱密度。

与BPSK这一传统的调制机制相比,第三代北斗卫星系统所使用的MBOC调制机制干扰抗性更强。同时,第三代北斗卫星系统在信号扩频码的码长、码率设计上也优于前代,也在一定程度上提升了导航信号的干扰抗性^[4]。

2.4 信号接收质量的影响

从整体来看,第三代北斗卫星的信号结构设计是比较新的。新的设计体制在带来测距精度、干扰抗性、通信速率等方面优化的同时,也会形成一定的新挑战、新问题。例如,第三代北斗卫星信号的扩频码采用了分层化设计方式,即将多个子码排列覆盖在主码的周期上。在此背景下,子码可能会使导频信道中的信号在接收时发生翻转问题,进而降低接收端获取导航信号的质量。此外,由于第三代北斗卫星信号结构设计所使用的扩频码码长更长,所以其信号捕捉难度也会有所提高。从目前来看,接收端所使用的硬件资源以FPGA为主,很难高度满足其计算量需求,进而也会造成接受质量的削弱。

3 结语

总而言之,北斗卫星导航系统在信号结构设计的迭代发展中表现出了明显的趋优性与先进性,但仍存在一定的阻碍问题。在未来,随着我国通信、航天、计算机等技术领域的不断发展,此类问题势必能得到有效解决,推动我国太空设施建设水平的进一步提升。

参考文献:

- [1] 何旭蕾,刘成,陈颖.北斗三号卫星B2b信号解析[J].电子技术应用,2020,46(03):1-4+13.
- [2] 聂光皓,申亮亮,王新龙.北斗卫星信号结构及其特性分析[J/OL].航空兵器:1-10[2020-07-23].
- [3] 保宁鑫.北斗卫星导航系统的RTK定位性能研究[D].中国民航大学,2019.
- [4] 李燕.基于北斗卫星系统精确定位的关键技术研究[D].合肥工业大学,2019.