SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

physcn.scichina.com



### CrossMark

#### 论文

#### 北斗全球卫星导航系统专题

## 北斗三号B1频点卫星导航信号的调制复用及实际 接收性能

陆明泉<sup>1,2</sup>, 姚铮<sup>1,2\*</sup>, 崔晓伟<sup>1,2</sup>, 刘刚<sup>1,2</sup>, 李文懿<sup>1,2</sup>

- 1. 清华大学电子工程系, 北京 100084;
- 2. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084
- \*联系人, E-mail: yaozheng@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020-06-21: 接受日期: 2020-08-27: 网络出版日期: 2020-12-02

国家自然科学基金(编号: 61771272)资助项目

摘要 导航信号结构是卫星导航系统的核心技术之一,也是我国北斗三号卫星导航系统独立建设、自主运行的标志.本文分析了北斗三号B1频点卫星导航信号设计的需求与挑战,详细介绍了为满足北斗三号新一代导航信号性能提升、多样化接收以及与其他导航系统兼容与互操作等方面的迫切需求,我们为北斗三号主用信号B1C提出了一种新型的正交复用二进制载波偏移(Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier, QMBOC)调制技术,以及为解决北斗三号B1频点新旧两代和军民两类导航信号并存的重大技术难题,提出了一种通用的多频多分量导航信号恒包络复用(CEMIC)技术,并通过对北斗三号组网卫星实际播发的信号接收处理与分析,验证了新一代B1频点信号的先进性能.QMBOC调制和CEMIC复用构成了北斗三号B1信号的核心结构,在很大程度上决定了信号的时频域特性、接收性能及发射效率,目前已经部署在北斗三号所有的组网卫星上并开始向全球提供服务,成为北斗三号赶超世界先进水平的重要特征.

关键词 北斗卫星导航系统, 信号设计, 调制方式, 恒包络复用

**PACS:** 84.40.Ua, 07.50.Ox, 91.10.Fc

#### 1 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是全球性的空间信息基础设施, 主要包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧盟的Galileo和我国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satel-

lite System, BDS)四大全球系统,可以为全球用户提供高性能的定位、导航与授时(PNT)服务,在军事、经济、社会和科研领域都有十分广泛的应用,已在很大的程度上改变了人类的生产和生活方式.我国高度重视卫星导航系统的建设和应用,根据"三步走"的发展战略,北斗系统已在2000年与2012年先后建成了北斗

引用格式: 陆明泉, 姚铮, 崔晓伟, 等. 北斗三号BI 频点卫星导航信号的调制复用及实际接收性能. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019505 Lu M Q, Yao Z, Cui X W, et al. BDS-3 B1 signal modulation and multiplexing techniques with receiving performance (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019505, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0224

© 2020 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

一号试验系统与北斗二号区域系统,而北斗三号全球系统目前也已经正式组网,为全球用户提供服务<sup>[1]</sup>.

卫星导航信号是卫星导航系统的一个重要组成部分,不但是卫星导航系统空间段、控制段和用户段三大组成部分的核心纽带,而且是卫星导航系统向用户播发测距信息的唯一载体,对于卫星导航系统能力的形成、性能的发挥,乃至应用推广和产业发展以及国际合作与交流的开展都具有十分重要的影响.因此,在卫星导航系统的建设和应用中具有独特的地位和作用,已经成为卫星导航系统的重要标志和象征.

在北斗二号的建设和应用过程中, 我国学术界、 工业界以及主管部门对导航信号的重要性有了全新的 认识、也在卫星导航信号的设计方面积累了宝贵的工 程实践经验. 北斗三号的建设对于新一代导航信号的 设计既是难得的机遇, 也是巨大的挑战. 一方面, 我们 有条件吸取北斗二号建设和应用中的经验和教训、同 时充分借鉴近20年来国际GNSS领域信号设计的新思 想、新理论和新技术, 但另一方面, 目前国际上几大 GNSS系统的信号都已基本部署完成、这为北斗三号 信号的设计带来了更多的挑战。在当今PNT服务需求 不断增长的背景下, 北斗三号信号面临着更高的测距 精度与服务稳健性要求. 然而, GPS和Galileo借助先发 优势, 不但抢先占用了有利的卫星导航频段资源, 而且 还申请了核心技术专利保护, 制定了双边谈判规则等, 在很大程度上制约了北斗三号的信号设计. 而且, 北斗 三号的建设正面临着一个不断变化的国际环境、包括 国际GNSS总的发展趋势和GNSS领域内的竞争格局 和方式都发生了很大的变化. 可以看到, 新一代的 GNSS正朝着多系统兼容和互操作的方向发展、合作 与交流是国际GNSS建设和应用的主流. 而由国际全 球导航卫星系统委员会(International Committee on Global Navigation Satellite, ICG)倡导并得到各大卫星 导航大国及相关国际组织推崇的GNSS兼容与互操作 的核心就是卫星导航信号. 所以, 北斗三号的信号设 计,必须实现与其他GNSS系统的兼容和互操作.在 GPS和Galileo已经达成实质性的兼容和互操作的形势 下, 北斗三号作为一个后来者, 对其信号设计的挑战无 疑是巨大的.

为了满足新一代北斗系统信号性能提升、多样化接收方式以及与导航系统兼容与互操作等方面的迫切需求,我们为北斗三号主用信号B1C提出了一种新型

的正交复用二进制载波偏移(Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier, QMBOC)调制技术<sup>[2]</sup>,具有上下边带频谱分离、导频与数据正交等特点.同时为了解决B1频点新旧两代和军民两类信号并存的重大技术难题,提出了基于交调构造的多频多分量导航信号恒包络复用(CEMIC)技术<sup>[3]</sup>,可实现多个不同频点导航信号的恒包络复用,确保从北斗二号到北斗三号的平稳过渡.QMBOC调制和CEMIC复用构成了北斗三号B1信号的核心结构,在很大程度上决定了信号的时频特性、接收性能及发射效率,不但具有重要的技术创新,也具有很好的工程应用价值,目前已经部署在北斗三号的所有卫星上并开始向全球提供服务,是北斗三号赶超世界先进水平的重要特征.

本文主要介绍所提出的QMBOC调制和CEMIC复用技术的原理和实现,并通过对北斗三号组网卫星实际播发的信号接收处理与分析,验证了新一代B1频点导航信号的先进性能.

#### 2 B1频点卫星导航信号设计需求与挑战

为实现系统间的兼容与互操作, 北斗三号会在 1575.42 MHz上播发新的公开信号B1C, 与GPS L1和 Galileo E1共享相同的频点,可以预见,该频点的公开信号在未来将成为各大系统的主要民用PNT承载信号. 因此,在对B1C信号进行设计时,需要在保证与同一频点其他信号射频兼容与信号互操作的同时,尽可能提高信号的测距精度与稳健性,支持多种接收策略,既可支持低端接收机低复杂度处理,又能满足高端接收机对高性能测距的要求;另外,受知识产权约束,信号设计上还应规避欧美在发射与接收基本方式等方面的专利封锁.

在B1频点信号复用设计上,出于系统平稳过渡的考虑,B1信号体制还要保证一段时间内部分北斗二号B1I信号与北斗三号B1C信号共存,并具有较强的灵活性,便于信号发射方案的调整和关停.这就要求星上使用跨频点的多路复用技术,将中心频点相隔14.322 MHz的两组导航信号合并为一个复合信号.多路信号尽可能复用载波频率,以提高卫星有效载荷的利用率,使用先进的恒包络复用技术,以降低复用损失,提高导航信号到达地面的功率.

上述来自多方面的设计约束汇集在一起、给北斗

三号B1频点信号结构的设计带来了巨大挑战.一方面,在ITU频率兼容性框架的约束下,B1C信号的频谱构型可选余地相当有限,同时,可满足该频谱构型的多数时域波形实现形式均已被欧美申请了专利,可能会对北斗未来的导航产业发展带来潜在威胁.另一方面,在传统信号设计思维定式下,为兼顾不同需求用户在定位性能和复杂度上的要求,需要同时播发多个信号,但这不仅会导致星上复用难度增大,功率效率降低,而且让系统内和系统间频谱干扰进一步恶化.此外,在B1信号设计之初,B1新旧信号跨频点复用的需求也缺乏成熟有效的技术支撑.在这种形势下,自主攻克上述技术挑战刻不容缓.

#### 3 B1频点调制与复用技术

#### 3.1 基于OMBOC调制的B1C信号结构

在ITU频率兼容性框架下, 北斗三号B1C信号应满足复用二进制偏移载波MBOC调制的频谱形状. 事实上, MBOC调制严格意义上并不指向某一种具体的调制方式, 而是作为对扩频信号频谱形状的一个约束条件, 最初在GPS L1C与Galileo E1 OS信号的兼容与互操作协调阶段被提出, 规定信号在无限带宽下的归一化功率谱密度为<sup>[4,5]</sup>

$$G_{\text{MBOC}(6,1,1/11)} = \frac{10}{11} G_{\text{BOC}(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{\text{BOC}(6,1)}(f), \tag{1}$$

其中, $G_{BOC(m,n)}(f)$ 是扩频码速率为 $f_c$ = $n\times1.023$  MHz,副载波频率为 $f_s$ = $m\times1.023$  MHz的二进制偏移载波(Binary Offset Carrier,BOC)信号分量(简记为BOC(m,n)信号)的归一化功率谱密度. 出于互操作的考虑,为了能够使用相同的接收机结构对不同系统的MBOC信号进行处理,还规定所有MBOC信号以BOC(1,1)为共同基准信号,保证每一个互操作信号都具备当作BOC(1,1)信号处理的能力.

由于MBOC调制的定义对这种调制的分量数目、各分量的时域波形形状以及各分量的组合方式没有更进一步的限制,只要保证最终合成信号的功率谱密度满足式(1)的形式即可,因此给各系统分别优化互操作信号的时域波形创造了条件。在波形设计上,不同MBOC信号最大的区别在于信号中的BOC(6,1)分量所放的位置。GPS L1C信号使用的MBOC调制方式被称为时分复用BOC(TMBOC)调制<sup>[6]</sup>,其中BOC(6,1)分量

与BOC(1,1)分量是时分复用结合的,而Galileo系统E1 OS信号使用的是复合BOC(CBOC)调制,其中BOC (6,1)分量直接叠加在BOC(1,1)分量上. 根据这两个分量叠加时的相对相位关系,CBOC信号进一步分为正相CBOC(记为CBOC<sup>+</sup>)和反相CBOC(记为CBOC<sup>-</sup>)两种.

易于验证<sup>[7]</sup>, CBOC信号本身并不能满足MBOC调制的频谱要求. 单独的CBOC信号, 无论正相还是反相, 自相关函数中均存在BOC(1,1)和BOC(6,1)分量的互相关项, 相应的功率谱密度中也有二者的互谱成分. 为确保信号的总功率谱密度满足式(1), 两种相位的CBOC信号必须在总信号中等功率成对出现, 以使互相关项相互抵消. 此外, 目前导航界主要采用的星上恒包络复用复合技术都是针对双极性信号的<sup>[8]</sup>. 由于CBOC信号具有多级幅度, 为了能够将其与同频点其他双极性信号进行复用, 要求CBOC<sup>+</sup>和CBOC<sup>-</sup>分量必须功率相等,而且二者必须在载波上同相叠加, 以使合成信号中BOC(1,1)和BOC(6,1)分量在不同时隙交替出现.

如果仅从兼容与互操作约束来看, TMBOC调制可以满足B1C信号设计要求. 然而英国国防部下属公司已对TMBOC技术申请了专利保护, 且于2013年在中国获得了授权. 因此, 根据专利法的相关规定, 无论是卫星制造商还是接收机、芯片制造商都需向英方缴纳专利使用费后方可发射或使用这两种信号, 且英方有权禁止这些单位使用相关技术<sup>[9]</sup>. 这无疑会给未来北斗导航产业的发展带来了潜在的风险.

为打破上述专利壁垒,规避TMBOC与CBOC的专利问题,我们为B1C信号提出了一种新型的正交复用BOC(QMBOC)技术<sup>[2]</sup>,通过将BOC(1,1)信号与BOC(6,1)信号分量调制在载波两个彼此正交的相位上,有效避免了两分量间互相关分量的影响,实现了与GPS和Galileo系统在同一频段公开服务信号的兼容与互操作。QMBOC与TMBOC具有相同的功率谱,且同样同时支持类BOC(1,1)的低复杂度接收处理模式与高性能匹配接收处理模式。其中,理论分析及实测均表明,在采用类BOC(1,1)的低复杂度接收模式下,QMBOC信号的测距精度及抗多径性能优于TMBOC信号<sup>[10]</sup>。

QMBOC基带信号波形可以表示为

$$g_{\text{QMBOC}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^{c_n} p_{\text{QMBOC}}(t - nT_c), \tag{2}$$

其中 $c_n \in \{0,1\}$ 是伪随机噪声(Pseudo Random Noise,

PRN)扩频序列,

$$p_{\text{QMBOC}}(t) = \sqrt{1-\gamma} p_{\text{BOC}(1,1)}(t) \pm j \sqrt{\gamma} p_{\text{BOC}(6,1)}(t)$$
 (3)  
是QMBOC信号的扩频码片波形, 其中

$$p_{BOC(m,n)}(t) = \begin{cases} \sqrt{f_c} \operatorname{sgn}[\sin(2\pi f_s t)], & t \in [0, 1/f_c), \\ 0, & 其他, \end{cases}$$
(4)

而y是信号中BOC(6,1)分量的功率占比. 根据式(3)所取正负号的不同,我们称所对应的QMBOC信号分别为正相和反相QMBOC,用QMBOC $^{+}$ 和QMBOC $^{-}$ 加以区分。

虽然在形式上QMBOC调制的扩频码片波形与CBOC看似接近,但二者特性却有着有很大的差异. 易证明,由于BOC(1,1)信号分量和BOC(6,1)信号分量被分别调制在载波两个相互正交的相位上,因此类似CBOC信号中的互相关项并未出现在QMBOC信号的自相关函数中. 可见,QMBOC调制不但可以满足MBOC的功率谱密度约束式(1),而且还不受正反相两信号功率比1:1的限制,在实现时比CBOC更加灵活.因此,若我们使用QMBOC对信号进行调制,且信号中同时存在数据和导频两个信道,那么不但可以根据需要为这两个信道分配不同的功率,而且还可为各信道QMBOC调制中的BOC(1,1)分量和BOC(6,1)分量设置不同的功率比.

在卫星导航系统中,测距精度和跟踪的稳健性是 发挥系统性能的关键,因此应当尽量为导频信道分配 更多的功率.虽然这意味着数据信道分配功率的降低, 从而导致数据解调性能的下降,但更低的电文速率以 及编码增益更高的信道编码可以降低数据的解调门 限,从而使数据解调性能的下降维持在一个可接受的 量级.

计算表明,当使用低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)编码,导频信号与数据信号功率配比为3:1时,解调门限可以比C/A码信号降低1.8 dB. 如果进一步增加导频信道的功率,数据信道的解调性能会受一定的影响.因此在B1C的设计中,使用了导频75%数据25%的功率分配方式.

在B1C信号中,导频信道和数据信道功率比是3:1,为了最大程度地提升B1C信号导频分量的测距性能,BOC(6,1)分量全都被放在了导频信道上,而数据信道上只放BOC(1,1)分量.为使总信号中的BOC(6,1)分量

比例仍能满足1/11的约束,BOC(6,1)分量的功率在导频信道中的比重被设为了v=4/33.

在上述考虑下,我们设计出B1C信号的调制方案, 其基带复包络可以表示为<sup>[11]</sup>

$$s_{\text{BIC}}(t) = \underbrace{\frac{1}{2}D_{\text{BIC}}(t)C_{\text{BIC-d}}(t)\text{sgn}\left[\sin\left(2\pi f_{\text{sc-a}}t\right)\right]}_{s_{\text{BIC-p}}(t)} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{11}}C_{\text{BIC-p}}(t)\text{sgn}\left[\sin\left(2\pi f_{\text{sc-b}}t\right)\right]}_{s_{\text{BIC-p-b}}(t)} + j\underbrace{\sqrt{\frac{29}{44}}C_{\text{BIC-p}}(t)\text{sgn}\left[\sin\left(2\pi f_{\text{sc-a}}t\right)\right]}_{s_{\text{BIC-p-a}}(t)},$$
 (5)

其中 $D_{\rm BIC}(t)$ 为B1C信号的电文, $C_{\rm BIC-p}(t)$ 和 $C_{\rm BIC-d}(t)$ 分别是导频信道和数据信道的PRN码, $f_{\rm sc-a}$ =1.023 MHz,  $f_{\rm sc-b}$ =6.138 MHz. 表1给出了B1C信号所包含的3个实分量的扩频调制方式、载波相位关系以及功率配比.

QMBOC采用宽带分量和窄带分量复合的形式,可以兼顾高低端用户的使用体验,对功耗敏感的接收机可以以窄带接收和低复杂度非匹配相关形式,只处理其中的BOC(1,1)成分,而对性能要求高的用户可以通过宽带接收将BOC(1,1)和BOC(6,1)成分同时处理,获得更高的测距精度和抗多径能力.因此,QMBOC调制方式实现了卫星播发一个信号但接收机可以有多种接收处理方式的能力.理论分析表明<sup>[10,12]</sup>,基于QMBOC调制的B1C信号在宽带匹配接收<sup>[12]</sup>情况下,测距精度与TMBOC和CBOC信号相当,而在窄带低复杂度接收模式下,相比TMBOC,QMBOC调制的性能提升最多可达到1.75 dB.

#### 3.2 基于CEMIC技术的B1频点多路复用

信号复用是北斗三号B1信号设计面临的另一挑战. 为了充分利用卫星链路的功率资源, 提高卫星链路

表 1 B1C信号调制特性

 Table 1
 B1C signal modulation characteristics

分量	扩频调制		相位 关系	功率 比例
$s_{\text{B1C-d}}(t)$	BOC(1,1)		0	1/4
$s_{\mathrm{B1C-p-a}}(t)$	QMBOC	BOC(1,1)	90	29/44
$s_{\text{B1C-p-b}}(t)$	(6,1,4/33)	BOC(6,1)	0	1/11

的发射效率,要求复用之后的信号具有恒包络特性<sup>[13]</sup>. 传统的GPS和GLONASS系统仅发送军民两路信号,两路信号通过QPSK正交合并本身就具有恒包络特性,但随着导航应用领域的不断扩展、服务需求的不断细化,新一代GNSS导航信号数量显著增多. 信号分量数增多以及信号间功率分配和相位关系越来越灵活,也给高效率的信号复用设计带来挑战.

绝大多数现有的恒包络复用技术都是为满足同一频点上多个信号分量的合并发射需求所提出的. 但B1信号体制要求使用跨频点的多路复用技术,将中心频点相隔14.322 MHz的两组导航信号合并为一个复合信号,以满足北斗二号B1I信号与北斗三号B1C信号共存,并能支持发射方案的在线调整和关停. 传统的多频点联合复用方法,如交替BOC (AltBOC)<sup>[14]</sup>,对复用信号的类型以及复用信号的中心频点选取有很苛刻的约束. 为了满足北斗B1频点特殊且复杂的恒包络复用需求,我们提出了一种基于交调构造的多频多分量导航信号恒包络复用(CEMIC)技术<sup>[3]</sup>.

CEMIC技术首先将一个频段内最终合成的总基带信号 $\tilde{s}(t)$ 建模为各信号分量与交调分量的线性叠加,即

$$\widetilde{s}(t) = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{P_i} e^{j\phi_i} s_i(t) + I_{\text{IM}}(t), \tag{6}$$

其中 $P_i$ 和 $\phi_i$ 分别表示第i路信号 $s_i(t)$ 的发射功率和发射相位, $I_{IM}(t)$ 是交调分量,其在每一时刻的取值由路有用信号的取值所确定,也即 $I_{IM}(t)$ 是 $\mathbf{s}(t) \triangleq [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ 的函数.若每一基带信号分量可取的值总数有限,则 $\mathbf{s}(t)$ 的取值组合也有限,记为F种,每一种具体的取值组合用 $\mathbf{s}_{j}$ ,  $j=1,2,\dots,F$ 表示.CEMIC技术的核心是构造一个既能保证复用效率最优,又在统计域上与原始信号正交,同时还要满足与直接叠加信号相加构成一个恒包络信号的交调分量.

为了保证交调分量的加入不会对*N*个有用信号的接收产生影响,要有

$$\frac{1}{T} \int_{T} I_{\text{IM}}(t) s_{i}^{*}(t) dt = 0, i = 1, 2, \dots N,$$
(7)

其中T是相干积分时间. 认为T足够长以遍历了 $\mathbf{s}(t)$ 与  $I_{\text{IM}}(\mathbf{s}(t))$ 的每一对取值组合,则式(7)中的时间平均可以由统计平均代替,即

$$\frac{1}{T} \int_{T} I_{\text{IM}}(t) s_{i}^{*}(t) dt \approx \mathbb{E} \{ I_{\text{IM}}(t) \widehat{s}_{i}(t) \}$$

$$= m_{i}^{T} \lambda = 0, i = 1, 2, \dots, N, \tag{8}$$

其中, $m_i = [s_i[1], s_i[2], \cdots, s_i[F]]^{\mathrm{T}}$ 和 $\lambda = [I_{\mathrm{IM}}[1], I_{\mathrm{IM}}[2], \cdots, I_{\mathrm{IM}}[F]]^{\mathrm{T}}$ 分别是 $s_i(t)$ 和 $I_{\mathrm{IM}}(t)$ 在F种取值组合中自己对应的取值所构成的向量,分别称为有用信号取值向量和交调信号取值向量。由式(8)易于证明,交调信号的取值向量子空间位于有用信号取值空间的正交补空间中,即有 $\lambda \in \mathcal{W}^{\perp}$ ,其中 $\mathcal{W} = \mathrm{span}\{m_1, m_2, \cdots, m_N\}$ . 所以交调分量的构造等同于寻找一个权向量 $\mathbf{\omega}_m$ ,使 $\lambda = \mathbf{C}\mathbf{\omega}_m$ ,其中 $\mathbf{C}$ 是 $\mathcal{W}^{\perp}$ 的正交基构成的矩阵.

为了保证复用效率最高,也即 $I_{IM}(t)$ 在最终合成的恒包络复用信号中功率占比最小,同时保证总合成信号包络恒定,CEMIC可转化为如下求解优化问题:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_{m,\text{opt}} = \operatorname{argmin} \|\boldsymbol{\omega}_{m}\|^{2}, \\ \text{s.t.} |s_{CE}[1]| = |s_{CE}[2]| = \dots = |s_{CE}[F]|, \end{cases}$$
(9)

其中 $s_{CE}[j]$ 是最终合成的总基带信号 $\bar{s}(t)$ 在第j个取值组合中自己对应的取值.

使用CEMIC技术将以上6路信号进行恒包络复用. 不同于以相位最优恒包络发射(POCET)技术<sup>[15]</sup>为代表的相位域恒包络复用设计方法,CEMIC技术直接在信号波形域进行恒包络信号合成,而且对参与复用的信号功率、相位、取值没有严苛限制,使设计者有很大的自由度去优化各信号分量参数,为B1频点上多个信号分量的跨频复用提供了强有力的工具.

具体到B1频点复用设计上,考虑到北斗三号的B1 频点调整到  $f_{\rm BI}$ =1575.42 MHz处,因此将合成信号的中心频点也设在1575.42 MHz,并使用一个频率为  $f_{\rm sc-BII}$ =14.322 MHz的方波形式单边副载波:

$$\beta_{sc}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{sgn} \left[ \cos \left( 2\pi f_{\text{sc-BII}} t \right) \right]$$

$$+ j \frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( 2\pi f_{\text{sc-BII}} t \right) \right].$$
(10)

将B1I信号搬移到1561.098 MHz附近. 则B1频点射频信号可以表示为

$$S_{\rm BI}(t) = \text{Re}\left\{ \left( \sqrt{P_{\rm BII}} e^{j\phi_{\rm BII}} s_{\rm BII}(t) + \sqrt{P_{\rm BIC}} e^{j\phi_{\rm BIC}} s_{\rm BIC}(t) + \sqrt{P_{\rm BIA}} e^{j\phi_{\rm BIA}} s_{\rm BIA}(t) + I_{\rm IM}(t) \right) e^{j2\pi f_{\rm BI}t} \right\}, \tag{11}$$

其中 $P_i$ 和 $\phi_i$ 分别是信号 $s_i(t)$ 的功率和初始相位,i=B1I,B1C、B1A、

$$\begin{split} s_{\rm BII}(t) &= D_{\rm BII}(t) C_{\rm BII}(t) \beta_{sc}(t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} D_{\rm BII}(t) C_{\rm BII}(t) \text{sgn} \big[ \cos \big( 2\pi f_{\rm sc\text{-BII}} t \big) \big] \\ &+ j \frac{\sqrt{2}}{2} D_{\rm BII}(t) C_{\rm BII}(t) \text{sgn} \big[ \sin \big( 2\pi f_{\rm sc\text{-BII}} t \big) \big] \end{split} \tag{12}$$

包含两路双极性实信号分量, $D_{BII}(t)$ 和 $C_{BII}(t)$ 分别为BII信号的电文和PRN码, $s_{BIC}(t)$ 如式(5)所示,包含三路双极性实信号,授权信号 $s_{BIA}(t)$ 包括一路双极性实信号.

传统的相位域恒包络复用技术均假设各信号分量的PRN码相互正交. 但由式(12)即可看到, 为了实现B1I信号的单边带调制所引入的复副载波的实部和虚部分量扩频码相同,不再满足正交性假设,从而导致有用信号分量的相关值不对称, 给接收机的伪距测量带来一定的影响. 但相位域设计法的输出仅为信号的相位映射表,从中无法发现这一问题,更难从相位域直接入手解决. 作为波形域恒包络复用技术的代表, CE-MIC方法可以直接得到交调分量的具体构成,并将干扰有用信号的那些交调成分抑制掉<sup>[16]</sup>.

基于CEMIC技术,设计出北斗三号B1频点的复用方案,成功实现了不同频点的新旧两代信号、军民两类信号恒包络复用. 经星地对接测试及在轨试验验证,所有指标均符合信号质量要求.

#### 4 B1频点信号实测性能

为评估北斗三号B1频点新信号性能,我们进行了实际的接收测试,测试内容涵盖载噪比、伪距多径、载波相位(双差)等性能. 虽然信号接收情况与观测量质量会受到环境与接收机本身性能的影响,但测试结果仍可在一定程度上反映信号的性能.

测试设备如图1所示,包含1个高精度天线、两台接收机以及一台用于采集数据的电脑,其中两台接收机通过功分器接收来自同一天线的信号,可形成零基线用于高精度定位性能的评估。考虑到测试的客观性,测试用的基准站接收机为Septentrio AsteRx-m2接收机,移动站接收机为Septentrio的mosaic-X5,这两台接收机支持BDS B1I/B2I/B1C/B2a, GPS L1/L2/L5, GLO-NASS G1/G2, Galileo E1/E5a/E5b等信号接收,但目前

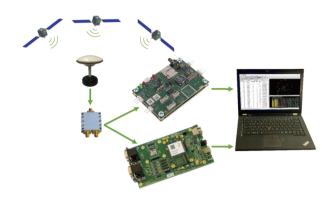


图 1 (网络版彩图)测试设备

Figure 1 (Color online) Testing equipment.

只支持卫星号小于38的北斗卫星信号.

测试天线架设在北京市清华大学伟清楼楼顶,如图2所示(坐标: N 40°00′05.31″, E 116°19′48.80″),观测时间为2020年4月11日8:31:02-2020年4月12日23:56:29(UTC时间),总长约39 h. 本次测试接收的信号包括GPS的L1 C/A信号、Galileo的E1信号以及北斗的B1I和B1C信号.

#### 4.1 载噪比测试结果

图3对接收信号的载噪比在不同仰角区间内的均值进行了统计. 从图中可以看出, B1I信号的载噪比略高于B1C信号的载噪比. B1C载噪比高于L1C/A, Galileo的E1信号最低. 所有信号均播发稳定且功率较强,足以用于信号数据评估. 值得注意的是,对于导频和数据正交的新一代导航信号,目前商用接收机的载噪



图 2 (网络版彩图)测试环境. http://www.google.cn/intl/zh-CN/earth/

Figure 2 (Color online) Testing environment. http://www.google.cn/intl/zh-CN/earth/.

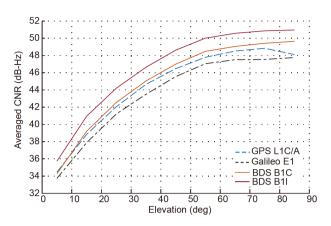


图 3 (网络版彩图)所有接收信号载波比在不同仰角区间内均值的统计结果图

Figure 3 (Color online) Statistical results of the carrier noise ratio mean values of all received signals in different elevations.

比均只反映了导频分量的功率.

#### 4.2 伪距多径测试结果

本节对伪距多径进行分析,多径计算采用的是双 频无电离层多径计算公式,计算公式如下:

$$M_i = P_i - \lambda_i + 2\lambda_i^2 \frac{\lambda_j \Phi_j - \lambda_i \Phi_i}{\lambda_i^2 - \lambda_i^2},$$
(13)

其中,  $M_i$ ,  $P_i$ ,  $\Phi_i$ 和 $\lambda_i$ 分别表示信号i的多径、伪距、载波相位以及波长.

我们对所有接收信号进行了伪距多径分析,统计结果如图4所示.从图中可以看出,北斗三号B1C的多径特性与Galileo的E1信号基本相当.在低仰角时,E1与B1C多径最小,其次为L1C/A,B1I的多径最大.对于中高仰角,多径从小到大依次为E1≈B1C<L1C/A<B1I,其中部分信号中高仰角多径要大于中低仰角,是因为测试环境并非理想开阔环境.

#### 4.3 高精度载波相位性能测试结果

此外,我们还对北斗三号新信号载波相位的性能做了分析,由于载波相位主要用于高精度定位,例如双站差分(RTK),因此可用如下双差残差(单位:周)对载波相位性能进行评估:

$$\nabla \Delta \varepsilon_{rb}^{jk} = \operatorname{frac} \left( \nabla \Delta \Phi_{rb}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{rb}^{jk} / \lambda \right), \tag{14}$$

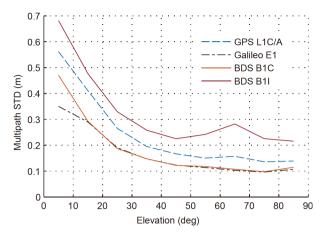


图 4 (网络版彩图)所有接收信号伪距多径在不同仰角区间内标准差的统计结果图

**Figure 4** (Color online) Statistical results of the pseudorange multipath standard deviation of all received signals in different elevations.

其中,  $\nabla \Delta(\cdot)_{rb}^{k} = ((\cdot)_{r}^{j} - (\cdot)_{b}^{j}) - ((\cdot)_{r}^{k} - (\cdot)_{b}^{k})$ , frac(·)为仅保留小数部分函数(范围-0.5-0.5),  $\nabla \Delta \rho_{rb}^{k}$ 为已知基线向量推算得到的双差距离理论值.

部分北斗三号卫星B1I和B1C信号的零基线载波相位双差残差随时间变化图与不同仰角区间内标准差如图5和6所示. 从图中可以看出, 新信号载波相位精度高, 当仰角大于20°时, 双差的标准差基本小于0.025周, 满足高精度定位的需求.

#### 5 B1频点信号全球定位性能评估

为了更进一步评估北斗三号B1频点新信号在全球的定位服务性能,我们利用全球范围内的国际全球连续监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)、亚太空间合作组织(Asia-Pacific Space Cooperation Organization, APS-CO)、多系统实验站(Multi-GNSS Experiment, MGEX)的共27个GNSS监测站的数据<sup>1)</sup>进行了平均定位精度统计. 其中中国国内4个、亚洲其他国家5个、大洋洲3个、欧洲4个、非洲3个、北美洲2个、南美洲3个、南极洲1个,监测站接收机包含BDS/GPS/GLONASS/Galileo四个系统观测数据. 本节利用2020年4月1日—2020年4月9日的iGMAS测站的星历数据和轨道数据,对

<sup>1)</sup> 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心. GNSS服务监测评估月报. 2020年第04期 (总第91期).

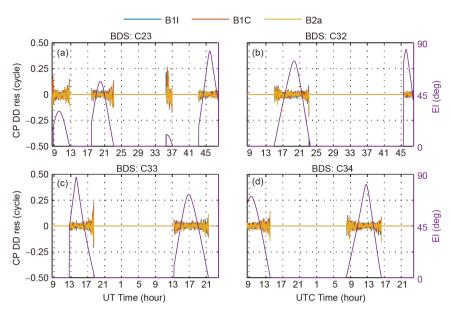


图 5 (网络版彩图) (a) C23 B1C和B1I载波, (b) C32 B1C和B1I载波, (c) C33 B1C和B1I载波, (d) C34 B1C和B1I载波相位双差残差随时间变化图

Figure 5 (Color online) Carrier phase double difference residuals of (a) C23 B1C and B1I signals, (b) C32 B1C and B1I signals, (c) C33 B1C and B1I signals, (d) C34 B1C and B1I signals with respect of time.

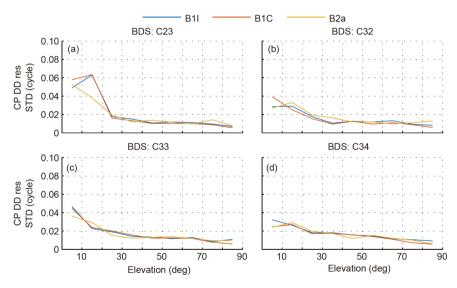


图 6 (网络版彩图) (a) C23 B1C和B11载波, (b) C32 B1C和B11载波, (c) C33 B1C和B11载波, (d) C34 B1C和B11载波相位双差 残差在不同仰角区间内标准差统计结果

Figure 6 (Color online) Carrier phase double difference residual STD of (a) C23 B1C and B11 signals, (b) C32 B1C and B11 signals, (c) C33 B1C and B1I signals, (d) C34 B1C and B1I signals with respect of time.

BDS/GPS/Galileo三系统在B1/L1/E1频点的定位性能进行了评估.

在全球范围内, 北斗B1C, B1I, GPS L1C/A, GLO-NASS G1, Galileo E1信号在各测站的水平定位精度如

图7所示. 图中还给出了全球的水平定位精度平均值. 北斗B1I和B1C平均水平定位精度分别为3.07和1.49 m; GPS L1平均水平定位精度为2.09 m; GLO-NASS G1平均水平定位精度为7.26 m; Galileo E1平均

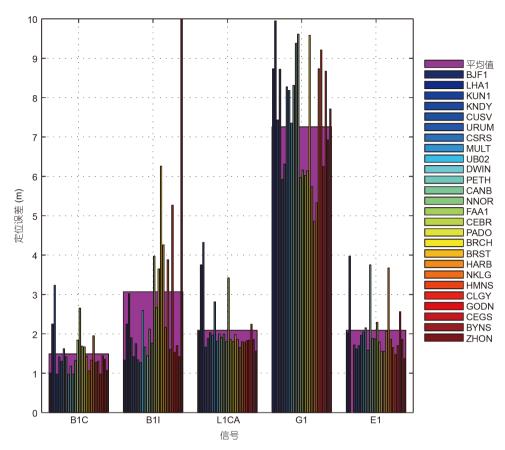


图 7 (网络版彩图)各信号水平定位精度性能对比情况

Figure 7 (Color online) Horizontal positioning error comparison of different signals.

水平定位精度为2.09 m. 对比结果为B1C的水平定位精度最优, 定位误差对比顺序为B1C<E1≈L1<B1I<G1.

北斗B1C, B1I, GPS L1C/A, Galileo E1信号在各测站的垂直定位精度如图8所示. 图中还给出了全球的垂直定位精度平均值. 全球范围内北斗B1I和B1C垂直定位精度为5.19和3.11 m; GPS L1频点垂直定位精度为4.75 m; GLONASS G1平均水平定位精度为13.45 m; Galileo E1垂直定位精度为4.68 m. 对比结果得到B1C的垂直定位精度最优,定位误差对比顺序为B1C<E1<B1I<L1<G1.

#### 6 结论

卫星导航信号是整个卫星导航系统建设和应用的核心技术之一. 卫星导航信号内在的性能极限在很大

程度上决定了整个系统的先天性能、也在很大程度上 决定了服务性能水平, 并且对接收机的复杂度具有决 定性的影响. 随着PNT应用领域的不断扩展、服务需求 的不断细化, 北斗三号播发的导航信号数量显著增多, 对信号的性能要求也越来越高. 我们提出的一种新型 的QMBOC调制技术在频谱资源的紧缺与卫星载荷发 射功率和复杂度严重受限的条件下实现了新一代北斗 导航信号性能提升、多样化接收以及与其他导航系统 兼容与互操作. 同时所提出的基于交调构造的多频多分 量导航信号恒包络复用(CEMIC)技术很好地解决了B1 频点新旧两代和军民两类信号并存的重大技术难题. QMBOC调制和CEMIC复用构成了北斗三号B1信号的 核心结构, 不但具有重要的技术创新, 也具有很好的工 程应用价值,目前已部署在北斗三号的所有卫星上并开 始向全球提供服务. 通过对北斗三号组网卫星实际播发 的信号接收处理及分析表明, 北斗三号新一代B1频点

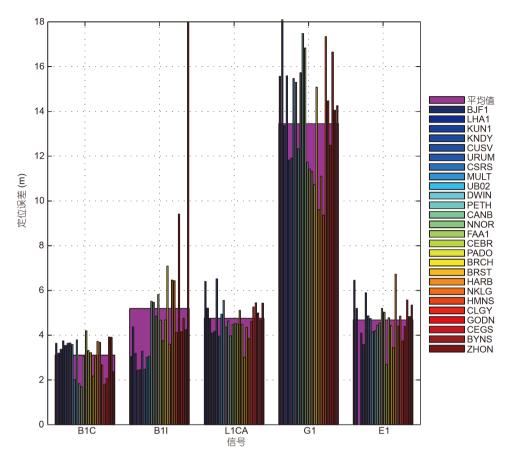


图 8 (网络版彩图)各信号高程定位精度性能对比情况

Figure 8 (Color online) Vertical positioning error comparison of different signals.

导航信号具有十分优异的性能,为我国卫星导航产业 的发展奠定了坚实的基础.

**致谢** 感谢中国卫星导航工程中心焦文海研究员、西安测绘研究所贾小林研究员为本文提供北斗三号全球定位服务性能的相关测试结果.

#### 参考文献

- 1 Yang Y X. The progress, contribution and challenges of Beidou satellite navigation system (in Chinese). J Surv Mapping, 2010, 39: 1–6 [杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. 测绘学报, 2010, 39: 1–6]
- 2 Yao Z, Lu M, Feng Z M. Quadrature multiplexed BOC modulation for interoperable GNSS signals. Electron Lett, 2010, 46: 1234-1236
- 3 Yao Z, Guo F, Ma J, et al. Orthogonality-based generalized multicarrier constant envelope multiplexing for DSSS signals. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2017, 53: 1685–1698
- 4 Avila-Rodriguez J A, Hein G W, Wallner S, et al. The MBOC modulation: The final touch to the galileo frequency and signal plan. In: Proceeding of ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, 2007. 1515–1529
- 5 Hein G W, Avila-Rodriguez J A, Wallner S, et al. MBOC: The new optimized spreading modulation recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C. In: Proceeding of the PIEEE/ION Position, Location & Navigation Symposium. New York: IEEE, 2006. 883–892

- 6 Betz J W, Blanco M A, Cahn C R, et al. Description of the L1C signal. In: Proceeding of ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, 2006. 2080–2091
- 7 Avila-Rodriguez J A. On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation. Munich: University FAF Munich, 2008
- 8 Pratt A R, Owen J. Signal multiplex techniques in satellite channel availability possible applications to galileo. In: Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005). Long Beach, 2005. 2448–2460
- 9 Shi L. The patent dispute of British and American satellite navigation signals and its impact on the distribution of Chinese Beidou patent (in Chinese). Digital Commun World, 2013, 2013: 16–19 [施蕾. 英美卫星导航信号专利纠纷及其对中国北斗专利布局的影响. 数字通信世界, 2013, 2013: 16–19]
- 10 Yao Z, Lu M. Optimized modulation for compass B1-C signal with multiple processing modes. In: Proceeding of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, 2011
- 11 China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0). China Satellite Navigation Office, 2017
- 12 Yao Z, Lu M. Lower bound on spreading code tracking error under unmatched de-spreading mode. Electron Lett, 2011, 47: 878
- 13 Yao Z, Lu M. Signal multiplexing techniques for GNSS: The principle, progress, and challenges within a uniform framework. IEEE Signal Process Mag, 2017, 34: 16–26
- 14 Lestarquit L, Artaud G, Issler J L. AltBOC for dummies or everything you always wanted to know about AltBOC. In: Proceeding of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Savannah, 2008. 961–970
- 15 Dafesh P A, Cahn C R. Phase-optimized constant-envelope transmission (POCET) modulation method for GNSS signals. In: Proceeding of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Savannah, 2009. 2860–2866
- 27 Zhang J, Yao Z, Lu M. On the inherent tracking error caused by CEM and imperfect spreading code of GNSS signal. In: Proceeding of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2016). Portland, 2016. 2808–2815

# BDS-3 B1 signal modulation and multiplexing techniques with receiving performance

LU MingQuan<sup>1,2</sup>, YAO Zheng<sup>1,2\*</sup>, CUI XiaoWei<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup> & LI WenYi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
<sup>2</sup> Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China

The navigation signal structure is one of the primary technologies of the satellite navigation system and also a symbol of the BeiDou global navigation satellite system (BDS-3). In this study, the design requirement and challenges of the BDS-3 B1 band signals are first analyzed. After that, the principle and development of an innovative modulation technique. namely Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier (QMBOC) modulation technique, and a generalized multifrequency multi-component navigation signal constant envelope multiplexing technique, i.e., Constant Envelope Multiplexing via Intermodulation Construction (CEMIC), are introduced in detail. Also, the advanced performance of the new-generation B1 signal is verified through the reception and analysis of the signal transmitted by the BDS-3 satellites. The results from the performance analysis of the signal show that the QMBOC modulation can satisfy the requirements needed for the performance improvement of the next-generation navigation signal, diversified reception modes, as well as the compatibility and interoperability with other navigation systems. Also, the results reveal that the CEMIC multiplexing technique can solve the B1 multiplexing issue caused by the coexistence of new and legacy signals, as well as open and authorized signals. The QMBOC modulation and CEMIC multiplexing technique form the core of the BDS B1 signal scheme and, to a great extent, determine the time-frequency domain characteristics, reception performance, and the transmission efficiency of the signals, which embodies both the innovation of these techniques and their value in engineering application. Presently, these techniques have been applied to all BDS-3 satellites and provide services to the world, which becomes a major hallmark of BDS-3 surpassing the advanced level of the world.

BeiDou Navigation Satellite System (BDS), signal design, modulation, constant envelope multiplexing

PACS: 84.40.Ua, 07.50.Qx, 91.10.Fc

doi: 10.1360/SSPMA-2020-0224