

北斗全球系统导航信号恒包络调制和复用技术*

朱祥维¹, 黄新明¹, 宿晨庚², 周鸿伟², 欧 钢¹

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:出于以导频通道为代表的北斗全球导航卫星系统现代化信号结构升级以及后向兼容的需求,北斗系统近几年提出了多种新型恒包络调制和复用技术,包括适用于北斗系统 B1 频点的正交复用二进制偏移载波(QMBOC)调制和非对称双正交相移键控(ADualQPSK)调制,适用于 B2 频点的时分复用 AltBOC(TD-AltBOC)调制与非对称恒包络二进制偏移载波(ACE-BOC)调制,适用于 B3 频点的双正交相移键控(DualQPSK)调制,适用于双边带任意信号路数、任意功率配比的广义恒包络二进制偏移载波(GCE-BOC)调制。本文系统性地论述了北斗全球系统中提出的多种新型恒包络调制和复用技术,在此基础上基于 GCE-BOC 调制总结出了一种恒包络调制的统一解析表示形式,对全面理解北斗全球系统信号设计思路及在此基础上发展设计新型的恒包络调制和复用技术均能提供重要的借鉴。

关键词:北斗卫星导航系统;全球导航卫星系统;恒包络调制;二进制偏移载波;时分复用 AltBOC;非对称恒包络二进制偏移载波;广义恒包络二进制偏移载波

中图分类号:TN967.1 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2017)05-006-08

Constant envelope modulation and multiplexing technologies for BDS global navigation signals

ZHU Xiangwei¹, HUANG Xinming¹, SU Chengeng², ZHOU Hongwei², OU Gang¹

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: For the demand of structural enhancement and backwards compatibility of modern BDS navigation signal which is represented by the pilot channel, BDS has proposed several new constant envelope modulations recently, including QMBOC and ADualQPSK modulations applied to B1 band, TD-AltBOC and ACE-BOC modulations applied to B2 band, DualQPSK modulation applied to B3 band, GCE-BOC modulation that multiplexes arbitrary signals at two different carrier frequencies. All the new modulations were systematically analyzed and a unified analytical expression of constant envelope modulation and multiplexing was summarized on the basis of the GCE-BOC modulation, which can provide an important reference for the comprehensive understanding of the signal design of the BDS global navigation satellite system and the development of new type of constant envelope modulation and multiplexing technology on this basis.

Key words: BeiDou navigation satellite system; global navigation satellite system; constant envelope modulation; binary offset carrier; TD-AltBOC; ACE-BOC; GCE-BOC

出于以导频通道为代表的现代化信号结构升级以及后向兼容的需求,现代卫星导航系统需要在同一载频上播发多个信号分量^[1]。为了最大化利用星上功放,恒包络调制和复用技术得到了广泛研究和应用。早期的 GPS 在一个频点最多播发军用信号与民用信号两个分量,采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制技术即可实现恒包络发射。由于现代化的需求,GPS 需要在同一频点上播发多个信号分量,如

GPS 系统 L1 频点,除了原有的 C/A 码以及 P(Y)码,还将播发 L1C 码和 M 码信号^[2-3]。

为了解决该问题, GPS 提出了互复用(Interplex)^[4]、相干自适应子载波调制^[5](Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation, CASM)、大数逻辑判决(Majority Vote, MV)等多路调制和复用技术^[4-7],取得了较好的恒包络复用效果^[8-11]。Dafesh 和 Cahn 等提出了最优相位恒包络发射(Phase Optimized Constant Envelope Transmission,

* 收稿日期:2016-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介:朱祥维(1980—),男,山东日照人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:zhuxiangwei@nudt.edu.cn

POCET)技术^[12-14],该方法基于数值优化,通过相位搜索得到一组调制发射角,能够使发射信号的功率效率最大化。

由于现代卫星导航信号普遍采用了导频和数据双通道的信号结构, Galileo 系统各个频点上的信号分量个数为3个或以上, QPSK 调制已经无法满足恒包络调制需求。 Galileo 系统在 E6 及 E1 频点上均采用了 Interplex 技术,其中由于 E1 频点上采用的复合二进制偏移载波(Composite Binary Offset Carrier, CBOC)调制为四电平信号,因此采用了修正的 Interplex 技术。同时 Galileo 系统在 E5 频点上为了实现位于两个边带的两个等功率 QPSK 的恒包络发射,提出了交替二进制偏移载波(Alternate Binary Offset Carrier, AltBOC)调制。 AltBOC 调制实现了位于两个边带的两个等功率 QPSK 的最优恒包络发射^[15-16]。

以 AltBOC、Interplex、CASM(经证明与 Interplex 等价)以及基于数值搜索的 POCET 技术为代表的典型导航信号调制技术可以很好地解决 GPS 及 Galileo 一个频点上多个信号的恒包络复用问题,并已被初步采用^[17-20]。但是,实际系统中可能希望将两个频点上的多个信号分量进行恒包络复用。虽然 AltBOC 调制实现了位于两个边带的两个等功率 QPSK 的最优恒包络发射,但更广义的问题是如何实现两个边带任意信号路数任意功率配比的恒包络调制,而 AltBOC 等调制方式无法给出解决方案。再如 GPS 系统现代化过程中,曾经考虑过将两个频点信号同时播发以减少星上功放的个数^[14]。另外,俄罗斯格洛纳斯系统(GLONASS)未来可能播发新的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)信号,也会遇到将已有的频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)信号与不同频点的 CDMA 信号恒包络复用的问题^[21]。

北斗全球导航系统三个频点导航信号的恒包络调制和复用问题更加突出。本文将针对北斗全球系统信号体制设计中面临的恒包络调制和复用问题,全面阐述近年来提出的各种新型的恒包络调制和复用技术,在所提出的广义恒包络二进制偏移载波(Generalized Constant Envelope BOC, GCE-BOC)调制的基础上,总结出恒包络调制和复用的统一解析形式。

1 研究背景及进展概述

中国卫星导航定位应用管理中心在全球卫星导航系统国际委员会(ICG)会议上公开了北斗全

球系统导航信号体制的最新状态,如表1所示^[22]。北斗全球导航信号占用三个频带,中心频点分别位于 1575.42 MHz(B1)、1191.795 MHz(B2)、1268.52 MHz(B3)。全球系统在 B1 频带上同时提供开放服务(Open Service, OS)和授权服务(Authorized Service, AS), B2 频带上仅提供开放服务, B3 频带上仅提供授权服务。

表1 北斗全球系统信号体制参数

Tab.1 Signal parameters of BDS global navigation system

信号分量	载波 频率/ MHz	码速率/ Mcps	数据速率/ 符号速率 (bps/sps)	调制方式
B1 - C _D	1575.42	1.023	50/100	MBOC (6,1,1/11)
B1 - C _P		1.023	No	
B1 _D		2.046	50/100	BOC(14,2)
B1 _P		2.046	No	
B2a _D	1191.795	10.23	25/50	AltBOC(15,10)
B2a _P		10.23	No	
B2b _D		10.23	50/100	
B2b _P		10.23	No	
B3	1268.52	10.23	500/500	QPSK(10)
B3 - A _D		2.5575	50/100	BOC(15,2.5)
B3 - A _P		2.5575	No	

虽然北斗全球系统导航信号体制的基本参数已对外公开,但由于全球系统在同一频段需要同时发射的信号分量较多,具体的多分量恒包络调制和复用技术并未确定。从2010年起,在北京跟踪与通信技术研究所主持下,清华大学、华中科技大学和国防科技大学等多家单位作为北斗全球系统信号体制设计的主要单位开展了历时五年多的导航信号体制设计工作,提出了一系列的新型恒包络调制和复用技术:

1) 北斗系统的 B1 频点的复用问题较为复杂,首先既需要实现 MBOC(6,1,1/11)调制,又要规避国外专利;其次需要解决 MBOC(6,1,1/11)调制与 BOC(14,2)调制两个信号的恒包络复用问题。虽然采用 POCET 技术可以实现任意路的最优相位恒包络调制,但是求解难度大,且无法求解双边带信号的复用问题^[23-24]。针对上述问题,清华大学的 Yao 等创新性地提出了适用于北斗系统 B1 频段的正交复用二进制偏移载波(Quadrature Multiplexed BOC, QMBOC)调制^[23],实现了自主知识产权的 MBOC 调制;国防科技大学的 Zhang 和

Huang 等提出了非对称双正交相移键控 (Asymmetric Dual Quadrature Phase Shift Keying, ADualQPSK) 调制^[24-25], 解决了 MBOC(6,1,1/11) 与 BOC(14,2) 两个信号的恒包络复用问题。

2) B2 频段上主要考虑与 AltBOC 调制兼容并同时规避其专利。为此, 华中科技大学信号设计团队进行了一系列创新性工作^[26-29], 主要代表成果是时分交替二进制偏移载波 (Time Division AltBOC, TD-AltBOC) 调制技术, 其实质是 AltBOC 的时分实现形式^[26]。该技术不需要加入交调分量, 可以实现星上功率的充分利用, 但是也存在着不足之处, 即数据导频支路功率比不可调, 存在着一定的多址干扰等^[30]。清华大学信号设计团队也取得了一系列创新成果^[31-44], 代表性成果为非对称恒包络二进制偏移载波 (Asymmetric Constant Envelope BOC, ACE-BOC) 调制技术, 可以认为是一种广义的 AltBOC 调制技术, 实现了两个 QPSK 信号支路不等功率的恒包络调制, 从而可以为导频支路提供更多的功率, 提升捕获与跟踪能力^[21,31-32]。AltBOC 调制及 ACE-BOC 调制解决的问题均是如何恒包络发射分别位于上下两个边带上的两个 QPSK 信号。但是更广义的问题是如何实现两个边带任意信号路数、任意功率配比的恒包络调制, 对此国防科技大学的 Huang 等提出了非对称 AltBOC 调制及其广义形式^[45]。

3) 北斗系统的 B3 频段上需要分别播发一个 QPSK 信号和一个 BOC 信号的导频及数据信号分量, 涉及的问题是如何恒包络播发 4 个信号分量。典型的导航信号恒包络调制技术复用效率过低, 难以满足系统需求^[46-47]。在 B3 频段上, 为了解决同一中心频点两个 QPSK 调制信号的最优恒包络调制^[46], 国防科技大学的张锴提出了 DualQPSK 调制及广义 DualQPSK 调制, 能够有效解决不同中心频点两个非等功率 QPSK 调制信号的最优恒包络调制^[47-48]。在此基础上, Huang 等又进一步提出了适用于双边带任意信号路数任意功率配比的恒包络调制的 GCE-BOC 调制^[49-50]。

为了方便理解北斗导航信号新型调制技术的应用场景及提出背景, 下面将按照 B1/B2/B3 频段的顺序分别论述具有代表性的 QMBOC 调制与 ADualQPSK 调制、TD-AltBOC 调制与 ACE-BOC 调制

及 DualQPSK 调制。在全面论述这些新型恒包络调制技术基础上, 将其统一到广义恒包络调制技术 GCE-BOC 上, 给出恒包络调制的统一解析表示形式。

2 B1 频点与 QMBOC/ADualQPSK 调制

在全球系统阶段, B1 频段计划在 1575.42 MHz 处增加一个现代化的 MBOC(6,1,1/11) 信号和一个 BOC(14,2) 调制的授权服务信号。MBOC(6,1,1/11) 是 GPS 和 Galileo 系统在 L1 频段实现兼容互操作的设计基线, 存在三种可能的实现方式: CBOC、时分多元二进制偏移载波 (Time Multiplex BOC, TMBOC) 及 QMBOC 调制。QMBOC 是我国自主提出的调制方式, 作为 MBOC 调制的一种新的时域实现形式, 在确保与国外其他卫星导航系统实现兼容与互操作能力的前提下, 其信号具有与 GPS 和 Galileo 所使用的 TMBOC 和 CBOC 信号相同的频谱。

在 QMBOC 中, BOC(n,n) 与 BOC(m,n) 分量的合成方式既不同于 GPS 所使用的时分复用, 也非 Galileo 采用的空域叠加, 而是将两分量分别调制在载波的两个正交相位上。QMBOC(m,n,γ) 信号的基带信号可以表示为:

$$s_{\text{QMBOC}}(t) = \sqrt{1-\gamma} s_{\text{BOC}(n,n)}(t) \pm j \sqrt{\gamma} s_{\text{BOC}(m,n)}(t) \quad (1)$$

上式对应取正负号, 分别称为正相 QMBOC 和反相 QMBOC, 记作 QMBOC⁺ 和 QMBOC⁻。

记 BOC(14,2) 信号的导频与数据分量表示为 $s_1(t)$ 及 $s_2(t)$, 导频与数据分量的功率相等; MBOC 信号的导频和数据信道均采用 QMBOC 调制, 导频通道采用 QMBOC⁺, 记为 $s_3(t) [sc_{11}(t) + \gamma jsc_{61}(t)]$, 数据通道采用 QMBOC⁻, 记为 $s_4(t) [sc_{11}(t) - \gamma jsc_{61}(t)]$ 。可以得到要复用信号的基本形式为:

$$s(t) = [s_1(t) + js_2(t)] + \frac{P}{\sqrt{1+\gamma^2}} \{s_3(t) [sc_{11}(t) + \gamma jsc_{61}(t)] + s_4(t) [sc_{11}(t) - \gamma jsc_{61}(t)]\} \quad (2)$$

其中, BOC(14,2) 信号与 MBOC(6,1,1/11) 信号的功率比为 $1:p^2$ 。

采用 ADualQPSK 调制实现恒包络调制, 得到相应的恒包络基带信号表示如式(3)所示:

$$s(t) = [s_1(t) + js_2(t)] + \frac{P}{\sqrt{1+\gamma^2}} \{s_3(t) [sc_{11}(t) + \gamma jsc_{61}(t)] + s_4(t) [sc_{11}(t) - \gamma jsc_{61}(t)]\} + \frac{s_3(t)s_4(t) [as_1(t) + bs_2(t)] + s_1(t)s_2(t) \{cs_3(t) [sc_{11}(t) + \gamma jsc_{61}(t)] + ds_4(t) [sc_{11}(t) - \gamma jsc_{61}(t)]\}}{\sqrt{1+\gamma^2}} \quad (3)$$

式(3)中后两项分别是 BOC(14,2)授权信号与 QMBOC 的交调分量。其中, a 、 b 、 c 、 d 为 ADualQPSK 调制交调分量的参数,可由式(4)所示约束条件确定(式中 η 表示复用效率):

$$\begin{cases} c = d = -\frac{1-b}{1-a}\gamma \\ (1-b^2)\gamma^2 = 1-a^2 \\ \frac{1-\gamma^2+c^2(\gamma^2-1)}{1+\gamma^2} + a + b = 0 \\ \max_{a,b,c,d} \eta = \frac{4}{4+a^2+b^2+c^2+d^2} \end{cases} \quad (4)$$

根据上面的恒包络 ADualQPSK 调制信号的基带表达式,可以得到 BOC(14,2)信号与 MBOC(6,1,1/11)信号的功率比为 1:1.44 时的星座图如图 1 所示,此时的复用效率为 82.34%。

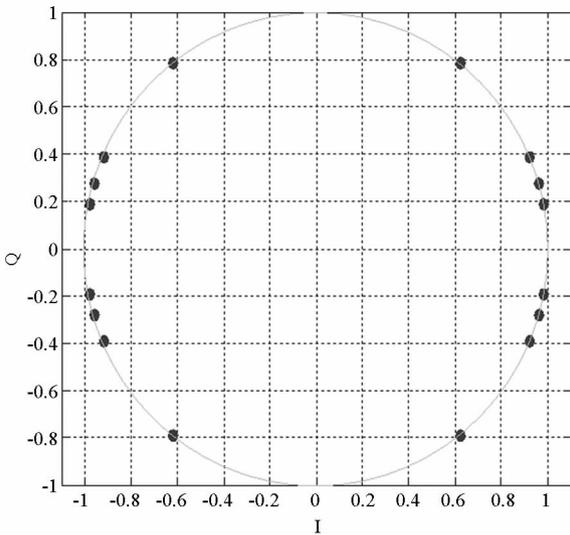


图1 ADualQPSK 调制信号星座图

Fig.1 Constellations of ADualQPSK signal

3 B2 频点与 TD-AltBOC/ACE-BOC 调制

北斗全球系统 B2 频带包含中心频率位于 1176.45 MHz 及 1207.14 MHz 的 B2a 和 B2b 两个边带,每个频带均包含数据通道和导频通道两个分量。由于 AltBOC 调制方式具备在上下边带承载不同服务的能力,既可独立接收处理单边带信号使之达到传统信号性能,也可联合处理以实现更高精度的定位,它被北斗全球系统采纳为 B2 频点下行信号的基线调制方式。采用中心频率为 1191.795 MHz 的 AltBOC(15,10)调制方式,下边带中心频率为 1176.45 MHz,上边带中心频率为 1207.14 MHz,可实现与 GalileoE5、GPSL5C 信号的互操作。鉴于 Galileo 系统已对 AltBOC 调制申请了专利,中国在 B2 频点自主研发了两种新的

恒包络调制方式:TD-AltBOC 调制及 ACE-BOC 调制。

3.1 TD-AltBOC 调制

TD-AltBOC 调制采用逐码片时分复用方式,使得任一时刻仅需传送两个信号分量,从而无须引入乘积项即可实现恒包络调制。TD-AltBOC 调制基带信号的数学表达式为:

$$s(t) = [s_1(t) + s_2(t)][SC_{B,\cos}(t) - jSC_{B,\sin}(t)] + [s_3(t) + s_4(t)][SC_{B,\cos}(t) + jSC_{B,\sin}(t)] \quad (5)$$

式中: $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 分别为下边带数据通道与导频通道的信号,两个信号分量时分复用; $s_3(t)$ 、 $s_4(t)$ 分别为上边带数据通道与导频通道的信号,两个信号分量时分复用; $SC_{B,\cos}(t)$ 、 $SC_{B,\sin}(t)$ 分别为余弦及正弦相位二进制偏移副载波。TD-AltBOC 调制信号的每个时隙波形为一个两信号 AltBOC 调制波形,其星座图如图 2 所示。

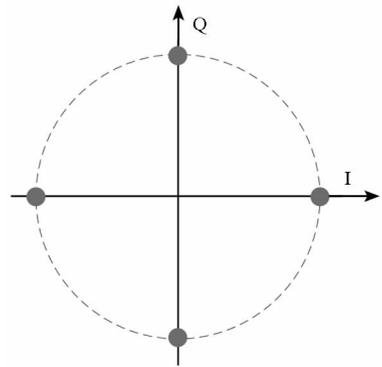


图2 TD-AltBOC 信号星座图

Fig.2 Constellations of TD-AltBOC signal

当 B2a 和 B2b 都被当作 QPSK 信号接收,TD-AltBOC 调制的复用效率为 81.06%。

3.2 ACE-BOC 调制

ACE-BOC 调制是一类较 AltBOC 调制更加广义的双频调制技术,可以实现两个边带两个 QPSK 信号四个信号分量任意功率配比的恒包络发射。

设上边带需要复用的信号为 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$,两个信号构成一个 QPSK 信号;下边带需要复用的信号为 $s_3(t)$ 、 $s_4(t)$,两个信号构成一个 QPSK 信号。则经过 ACE-BOC 调制后的双频恒包络基带信号的解析表达式为:

$$s(t) = \alpha_1 \text{sgn}[\sin(2\pi f_{sc}t + \varphi_1)] + j\alpha_2 \text{sgn}[\sin(2\pi f_{sc}t + \varphi_2)] \quad (6)$$

式中, f_{sc} 为子载波偏移频率,基带信号表达式中的幅度、相位取值分别为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sqrt{[s_1(t) + s_3(t)]^2 + [s_2(t) - s_4(t)]^2} \\ \alpha_2 = -\sqrt{[s_1(t) - s_3(t)]^2 + [s_2(t) + s_4(t)]^2} \\ \varphi_1 = \text{atan2}[s_1(t) + s_3(t), s_2(t) - s_4(t)] \\ \varphi_2 = -\text{atan2}[s_2(t) + s_4(t), s_1(t) - s_3(t)] \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\text{atan2}(y, x)$ 是四象限反正切函数, 当点 (x, y) 落入第一象限或第四象限时, $\text{atan2}(y, x) = \arctan(y/x)$; 当点 (x, y) 落入第二象限时, $\text{atan2}(y, x) = \arctan(y/x) + \pi$; 当点 (x, y) 落入第三象限时, $\text{atan2}(y, x) = \arctan(y/x) - \pi$ 。

当两个边带 QPSK 信号的两个支路的功率比分别为 1:3 时, ACE-BOC 调制信号的星座图为一个 12PSK 的星座图, 如图 3 所示, 在查找表实现方式中, 每一个子载波周期被等间隔分为 12 个时隙。

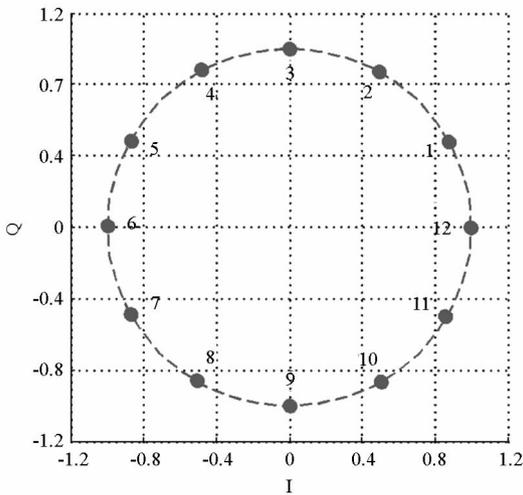


图 3 ACE-BOC 信号星座图

Fig. 3 Constellations of ACE-BOC signal

当 B2a 和 B2b 都被当作 QPSK 信号接收时, ACE-BOC 调制与 TD-AltBOC 调制的复用效率一样, 均为 81.06%。

4 B3 频段与 DualQPSK 调制及其广义形式

北斗全球系统的 B3 频段将在中心频率为 1268.52 MHz 上播发一个 QPSK(10) 及 BOC(15, 2.5) 调制的授权信号。BOC(15, 2.5) 信号包含一个导频通道和一个数据通道, 有两个扩频码分量, 可采用正交相移键控调制实现复用。因此, B3 频段需要解决的问题是如何恒包络调制两个相同中心频率的正交相移键控信号。

将两个相同中心频率的正交相移键控信号进行恒包络调制, 理论上最佳的解决方案是中国拥有自主知识产权的 DualQPSK 调制。DualQPSK 调制的基带复信号表达式为:

$$s(t) = \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{4} [s_1(t) + e^{-j\frac{\pi}{4}} s_2(t) + e^{j\frac{\pi}{4}} s_3(t) + e^{j\frac{\pi}{4}} s_4(t)] + IM(t) \quad (8)$$

式中: $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 正交, 分别调制 QPSK(10) 信号的 I 和 Q 支路; $s_3(t)$ 与 $s_4(t)$ 正交, 分别调制 BOC(15, 2.5) 信号的导频和数据; 交调分量 $IM(t)$ 表示为

$$IM(t) = \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{4} [e^{-j\frac{\pi}{4}} s_1(t)s_2(t)s_3(t) + e^{j\frac{\pi}{4}} s_1(t)s_2(t)s_4(t)] + \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{4} [s_1(t)s_3(t)s_4(t) + e^{j\frac{\pi}{4}} s_2(t)s_3(t)s_4(t)] \quad (9)$$

DualQPSK 复用效率等于复信号中四个等功率服务信号的功率之和与复信号总功率的比值, 其值为:

$$\eta = \left(\frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{4} \right)^2 \times 4 = 0.8536 \quad (10)$$

通过上面的恒包络双正交相移键控调制信号的基带表达式可以得到相应的星座图如图 4 所示。由图可以看出, DualQPSK 实现了四个导航信号的恒包络调制。

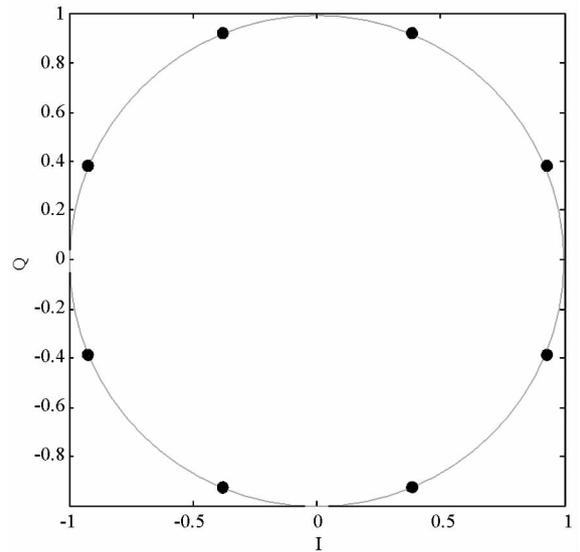


图 4 DualQPSK 调制信号星座图

Fig. 4 Constellations of DualQPSK signal

值得说明的是, DualQPSK 调制存在非等功率及非等中心频率的广义形式, 两个 QPSK 信号间的功率比及中心频率可调^[47]。

5 恒包络调制和复用的统一解析表示形式

针对不同的应用需求, 北斗系统中提出的以 TD-AltBOC、ACE-BOC、DualQPSK 等为代表的多种新型恒包络调制技术, 加上之前国外提出的 AltBOC 调制、Interplex、CASM、多数表决法以及 POCET 等导航信号复用技术, 形成了一系列恒包

络调制和复用技术。是否存在一种统一的恒包络调制和复用技术的解析表示形式?本节尝试对此进行探讨,在提出的 GCE-BOC 基础上,总结出恒包络调制和复用技术的统一解析表示形式。

设上边带需要复用的信号为 $s_k(t)$, 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, N$; 下边带需要复用的信号为 $\tilde{s}_l(t)$, 其中 $l = 1, 2, 3, \dots, M$ 。那么 GCE-BOC 的非恒包络调制的基带信号可以表示为:

$$s_0(t) = \sum_{k=1}^N s_k(t) e^{j\theta_k} e^{j2\pi f_1 t} + \sum_{l=1}^M \tilde{s}_l(t) e^{j\theta_l} e^{j2\pi f_2 t} \quad (11)$$

式中: θ 为信号相位; f_1, f_2 为信号频率。

进行恒包络调制处理时, GCE-BOC 调制分两个边带等中心频点与非等中心频点两种情况对需要恒包络调制的信号进行处理。

5.1 等中心频点恒包络调制和复用解析表示形式

若上、下边带的中心频率重合, 即 $f_1 = f_2$, 则非恒包络调制的基带信号可以重新表述为:

$$s_0(t) = e^{j2\pi f_1 t} \left[\sum_{k=1}^N s_k(t) e^{j\theta_k} + \sum_{l=1}^M \tilde{s}_l(t) e^{j\theta_l} \right] \quad (12)$$

从式(12)可看出, 单频 GCE-BOC 调制就是如何实现信号 $s_k(t)$ 及 $\tilde{s}_l(t)$ 的恒包络调制, 等价于经典的等中心频点恒包络调制技术, 经过恒包络调制后的恒包络信号表述为:

$$s(t) = e^{j2\pi f_1 t} Cr \left[\sum_{k=1}^N s_k(t) e^{j\theta_k} + \sum_{l=1}^M \tilde{s}_l(t) e^{j\theta_l} \right] \quad (13)$$

式中, $Cr(\cdot)$ 表示经过恒包络调制后的信号。恒包络调制的方法可以采用适用于等中心频点多信号分量恒包络调制的任意恒包络发射技术, 既可以是 Interplex、CASM、多数表决法以及 POCET 等为代表的典型导航信号复用技术, 也可以是以 DualQPSK、ADualQPSK 调制为代表的北斗系统新型调制技术, 还可以是时分复用这种特殊的信号复合方式。

因此, 单频 GCE-BOC 调制即为等中心频点恒包络调制, 该条件下的解析表达式即为上述提出的等中心频点恒包络调制和复用技术的统一解析表示形式。

5.2 非等中心频点恒包络调制和复用解析表示形式

若两个边带有非等中心频点, 即 $f_1 \neq f_2$, 则非恒包络调制的基带信号可以表述为式(11), 对上、下边带需要复用的信号分量分别进行恒包络调制, 得到上、下边带恒包络基带信号分别为:

$$\begin{cases} s_{\text{up}}(t) = s_{\text{up}}^r(t) + js_{\text{up}}^i(t) \\ s_{\text{down}}(t) = s_{\text{down}}^r(t) + js_{\text{down}}^i(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $s_{\text{up}}^r(t)$ 、 $s_{\text{up}}^i(t)$ 及 $s_{\text{down}}^r(t)$ 、 $s_{\text{down}}^i(t)$ 分别为上、下边带恒包络调制信号的实部与虚部。

经过上、下边带恒包络调制后的双频基带信号可以表示为:

$$\begin{aligned} s_0(t) &= [s_{\text{down}}^r(t) + js_{\text{down}}^i(t)] e^{j2\pi f_1 t} + [s_{\text{up}}^r(t) + js_{\text{up}}^i(t)] e^{j2\pi f_2 t} \\ &= e^{j2\pi f_{\text{sc}} t} [\alpha_1 \sin(2\pi f_{\text{sc}} t + \varphi_1) + j\alpha_2 \sin(2\pi f_{\text{sc}} t + \varphi_2)] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, f_{sc} 为子载波偏移频率, 基带信号表达式中的幅度、相位取值为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sqrt{[s_{\text{down}}^r(t) + s_{\text{up}}^r(t)]^2 + [s_{\text{down}}^i(t) - s_{\text{up}}^i(t)]^2} \\ \alpha_2 = -\sqrt{[s_{\text{down}}^i(t) + s_{\text{up}}^i(t)]^2 + [s_{\text{down}}^r(t) - s_{\text{up}}^r(t)]^2} \\ \varphi_1 = \text{atan2}[s_{\text{down}}^r(t) + s_{\text{up}}^r(t), s_{\text{down}}^i(t) - s_{\text{up}}^i(t)] \\ \varphi_2 = -\text{atan2}[s_{\text{down}}^i(t) + s_{\text{up}}^i(t), s_{\text{down}}^r(t) - s_{\text{up}}^r(t)] \end{cases} \quad (16)$$

采用复数形式的二进制偏移载波替换上面复数形式的正弦载波, 得到双频恒包络二进制偏移载波调制的解析表达式为:

$$s(t) = \alpha_1 \text{sgn}[\sin(2\pi f_{\text{sc}} t + \varphi_1)] + j\alpha_2 \text{sgn}[\sin(2\pi f_{\text{sc}} t + \varphi_2)] \quad (17)$$

下面分别说明 GCE-BOC 与 ACE-BOC、TD-AltBOC 的等价性。

1) 与 ACE-BOC 调制的等价性说明: 设上边带需要复用的信号为 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$, 下边带需要复用的信号为 $s_3(t)$ 、 $s_4(t)$ 。对于上、下边带为两个信号分量的情况, 可以首先采用 QPSK 调制上、下边带的两个信号分量, 然后按照上面的解析形式进行双频恒包络二进制偏移载波调制, 可以得到调制后的基带表达式如式(17)所示。用 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 、 $s_3(t)$ 、 $s_4(t)$ 分别代替式(16)中的 $s_{\text{down}}^i(t)$ 、 $s_{\text{up}}^i(t)$ 、 $s_{\text{down}}^r(t)$ 、 $s_{\text{up}}^r(t)$, 可以得到式(7)的形式。

可以看出, 上面的恒包络基带表达式与 ACE-BOC 调制的基带表达式是等价的, 因此 ACE-BOC 调制可以认为是 GCE-BOC 调制在上下边带为两信号分量情况下的特殊形式。

2) 与 TD-AltBOC 调制的等价性说明: 当上、下边带分别为两个信号分量时, 可以先采用时分复用的方式分别复合两个边带上的两个信号, 然后按照上面的解析形式进行双频恒包络二进制偏移载波调制, 可以得到调制后的基带表达式为:

$$s(t) = \alpha_1 \text{sgn}[\cos(2\pi f_{\text{sc}} t)] + j\alpha_2 \text{sgn}[\sin(2\pi f_{\text{sc}} t)] \quad (18)$$

式中, f_{sc} 为子载波偏移频率, $\text{sgn}[\cdot]$ 为取二进制

电平, α_1, α_2 取值为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = s_1(t) + s_3(t) \\ \alpha_2 = s_1(t) - s_3(t) \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} \alpha_1 = s_2(t) + s_4(t) \\ \alpha_2 = s_2(t) - s_4(t) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)$ 为需要复用的四个信号分量, 采用时分复用的方式分别播发 $s_1(t), s_3(t)$ 或 $s_2(t), s_4(t)$ 。

可以看出, 上面的恒包络基带表达式与 TD-AltBOC 调制的基带表达式是等价的, 因此 TD-AltBOC 调制可以认为是 GCE-BOC 调制上下边带两信号分量采用时分复用时的特殊形式。

6 结论

针对北斗全球系统卫星导航信号的恒包络调制需求, 对北斗系统近几年提出的多种新型恒包络调制技术进行了全面论述, 包括适用于 B1 频段的 QMBOC 调制与 ADualQPSK 调制, 适用于 B2 频段的 TD-AltBOC 调制与 ACE-BOC 调制、适用于 B3 频段的双边带任意信号路数任意功率配比的恒包络调制的 GCE-BOC 调制。

进一步地, 在 GCE-BOC 调制的基础上, 系统地总结出一种恒包络调制和复用技术的统一解析表示形式, 可以对诸多恒包络调制和复用技术做统一解析表示, 对全面理解北斗全球导航卫星系统的设计思路及在此基础上发展设计新型恒包络调制技术均能提供重要的借鉴。

参考文献 (References)

[1] Betz J W, Blanco M A, Cahn C R, et al. Description of the L1C signal [C]//Proceedings of ION GNSS-2006, 2006.

[2] 胡修林, 唐祖平, 周鸿伟, 等. GPS 和 Galileo 信号体制设计思想综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 2285-2293.
HU Xiulin, TANG Zuping, ZHOU Hongwei, et al. Analysis on design principles of GPS and Galileo signal structure [J]. Systems Engineering & Electronics, 2009, 31(10): 2285-2293. (in Chinese)

[3] 黄旭方, 胡修林, 唐祖平. 星上高功率放大器对导航信号功率谱和伪码跟踪精度的影响 [J]. 电子学报, 2009, 37(3): 640-645.
HUANG Xufang, HU Xiulin, TANG Zuping. Impact of satellite's high power amplifiers on spectrum of navigation signals and PRN tracking accuracy [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 640-645. (in Chinese)

[4] Butman S, Timor U. Interplex—an efficient multichannel PSK/PM telemetry system [J]. IEEE Transaction on Communication, 1972, 20(3): 415-419.

[5] Dafesh P A, Nguyen T M. Coherent adaptive subcarrier modulation (CASM) for GPS modernization [C]//Proceedings of the 12th National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 1999: 649-660.

[6] Dafesh P A, Partridge M. Compatibility of the Interplex

modulation method with C/A and P(Y) code signals [C]//Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2000: 2122-2129.

[7] Spilker J J, Jr., Orr R O. Code multiplexing via majority logic for GPS modernization [C]//Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1998: 265-273.

[8] Wang G H, Lin V S, Fan T, et al. Study of signal combining methodologies for GPS III flexible navigation payload (Part I) [C]//Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2004: 2207-2218.

[9] Fan T, Lin V S, Wang G H, et al. Study of signal combining methodologies for future GPS flexible navigation payload (Part II) [C]//Proceedings of IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium PLANS, 2008: 1079-1089.

[10] Avila-Rodriguez J A. On generalized signal waveforms for satellite navigation [D]. Munich, German: University FAF Munich, 2008.

[11] Fan T, Lin V S, Wang G H, et al. The RF compatibility of flexible navigation signal combining methods [C]//Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2005: 810-818.

[12] Dafesh P A, Cahn C R. Phase-optimized constant-envelope transmission (POCET) modulation method for GNSS signals [C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009: 1206-1212.

[13] Dafesh P A, Bow R, Fan T, et al. Receiver compatibility of POCET signal combining [C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2011: 1173-1180.

[14] Dafesh P A, Cahn C R. Application of POCET method to combine GNSS signals at different carrier frequencies [C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2011: 1201-1206.

[15] Lestarquit L. Method and device for generating a constant envelope navigation signal with four independent codes: US, 7561103 [P]. 2009-07-14.

[16] Lestarquit L, Artaud G, Issler J. AltBOC for dummies or everything you always wanted to know about AltBOC [C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2008: 961-970.

[17] Betz J W, Kolodziejki K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part I: lower bound and coherent processing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1538-1556.

[18] Betz J W, Kolodziejki K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part II: noncoherent processing and numerical results [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2009, 45(4): 1557-1564.

[19] 唐祖平. GNSS 信号设计与评估若干理论研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
TANG Zuping. Research on relevant theory for GNSS signal design and evaluation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[20] 唐祖平, 周鸿伟, 胡修林, 等. Compass 导航信号性能评估研究 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010(5): 592-602.
TANG Zuping, ZHOU Hongwei, HU Xiulin, et al. Research on performance evaluation of Compass signal [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010(5): 592-602. (in Chinese)

[21] Kharisov V, Povalyaev A. Optimal aligning of GNSS

- navigation signals sum [C]// Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2011: 3141 - 3155.
- [22] China National Administration of GNSS and Applications. COMPASS view on compatibility and interoperability [EB/OL]. [2016 - 05 - 28]. <http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/activities/2009/wga1/04.pdf>.
- [23] Yao Z, Lu M, Feng Z M. Quadrature multiplexed BOC modulation for interoperable GNSS signals [J]. Electronics Letters, 2010, 46(17): 1234 - 1236.
- [24] Zhang K, Zhou H W, Wang F X. Multiplexing performance assessment of POCKET method for Compass B1/B3 signals [J]. The Journal of Navigation, 2011, 64(s1): 541 - 554.
- [25] Huang X M, Zhu X W, Ou G. Constant-envelope dual QPSK-like modulation and its generalized form for modern GNSS signals [J]. Electronics Letters, 2015, 51(2): 175 - 177.
- [26] Tang Z P, Zhou H W, Wei J L, et al. TD-AltBOC: a new COMPASS B2 modulation [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(6): 1014 - 1021.
- [27] 冉一航, 胡修林, 刘禹圻, 等. Compass 系统导航信号的兼容性研究 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010(05): 676 - 684.
RAN Yihang, HU Xiulin, LIU Yuqi, et al. Compatibility analysis of Compass navigation signals [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010(05): 676 - 684. (in Chinese)
- [28] Zhou Z, Wei J, Tang Z, et al. CS-POCKET: a dual-frequency constant envelope multiplex method for GNSS signals [C]// Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2014: 835 - 843.
- [29] Yan T, Wei J L, Tang Z P, et al. General AltBOC modulation with adjustable power allocation ratio for GNSS [J]. Journal of Navigation, 2015, 69(3): 531 - 560.
- [30] Liu Y X, Tang X M, Ge R, et al. Analysis for cross correlation in multiplexing [C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2013: 81 - 90.
- [31] Yao Z, Lu M. Dual-frequency constant envelope multiplex with non-equal power allocation for GNSS [J]. Electronics Letters, 2012, 48(25): 1624 - 1625.
- [32] Yao Z, Lu M Q. ACED multiplexing and its application on BeiDou B2 band [C]// Proceeding of 4th China Satellite Navigation Conference, 2013: 25 - 34.
- [33] Yao Z, Lu M. Optimized modulation for Compass B1 signal with multiple processing modes [C]// Proceedings of ION GNSS, 2011: 1234 - 1242.
- [34] Yao Z, Lu M Q. Constant envelope combination for components on different carrier frequencies with unequal power allocation [C]// Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2013: 629 - 637.
- [35] Yao Z, Lu M Q. Design, implementation, and performance analysis of ACE-BOC modulation [C]// Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2013: 361 - 368.
- [36] Yan T, Wei J L, Tang Z P, et al. Performance analysis on single sideband of TD-AltBOC modulation signal [C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2013: 91 - 100.
- [37] Zhu Y, Yao Z, Cui X, et al. Comparative analysis of dual-frequency constant envelop multiplexing techniques for ARNS band [C]// Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2014: 792 - 801.
- [38] Yao Z, Lu M Q, Feng Z M. Unambiguous technique for multiplexed binary offset carrier modulated signals tracking [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(7): 608 - 611.
- [39] 姚铮, 陆明泉, 冯振明. 正交复用 BOC 调制及其多路复合技术 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010(5): 575 - 580.
YAO Zheng, LU Mingquan, FENG Zhenming. QMBOC modulation and its multiplexing techniques [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010(5): 575 - 580. (in Chinese)
- [40] Yao Z, Cui X W, Lu M Q, et al. Pseudo-correlation-function-based unambiguous tracking technique for sine-BOC signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010, 46(4): 1782 - 1796.
- [41] Zhang X M, Yao Z, Lu M Q. Optimizing the Gabor bandwidth of satellite navigation signals by MCS signal expression [J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(6): 1077 - 1082.
- [42] 朱亮, 姚铮, 陆明泉, 等. Compass B1 信号设计中的非对称 ALTBOC 复用技术 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012(6): 869 - 873.
ZHU Liang, YAO Zheng, LU Mingquan, et al. Non-symmetrical ALTBOC multiplexing for Compass B1 signal design [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012(6): 869 - 873. (in Chinese)
- [43] 姚铮, 刘琳琳, 张晓明, 等. 面向多接收模式的 GNSS 互操作信号调制 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(5): 621 - 625.
YAO Zheng, LIU Linlin, ZHANG Xiaoming, et al. GNSS interoperable signal modulation for multiple receiving modes [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(5): 621 - 625. (in Chinese)
- [44] 姚铮, 陆明泉. 新一代卫星导航系统信号设计原理与实现技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
YAO Zheng, LU Mingquan. Signal design principle and realization technology of the new generation satellite navigation system [M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [45] Huang X M, Zhu X W, Tang X M, et al. Asymmetric AltBOC modulation and its generalized form for BeiDou B2 signals [J]. Electronics Letters, 2016, 52(2): 146 - 148.
- [46] 张锴, 王飞雪, 欧钢, 等. 一种双正交相键控信号的调制方法和调制装置: 中国, CN201110451739.0 [P]. 2012-05-02.
ZHANG Kai, WANG Feixue, OU Gang, et al. DualQPSK: a modulation technique for satellite navigation; China, CN201110451739.0 [P]. 2012-05-02. (in Chinese)
- [47] 张锴. 现代卫星导航信号恒包络发射与抗多径接收技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
ZHANG Kai. Constant-envelope transmission and multipath mitigation for modern satellite navigation signals [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [48] Zhang K. Generalized constant-envelope DualQPSK and AltBOC modulations for modern GNSS signals [J]. Electronics Letters, 2013, 49(21): 1335 - 1337.
- [49] Huang X M, Zhu X W, Tang X M, et al. GCE-BOC: a generalized constant envelope multiplexing technology for dual-frequency GNSS signals [C]// Proceeding of 6th China Satellite Navigation Conference, 2015: 47 - 55.
- [50] 黄新明. 现代 GNSS 信号恒包络生成与稳健接收技术 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
HUANG Xinming. GNSS signal constant envelope generation and robust receiving technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)