



专题：空天地一体化通信技术

基于优化CCSK调制的低轨卫星通信 导航一体化信号设计方法

朱敏, 赵亚飞, 张雨曼, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 给出了一种基于优化循环码移键控 (cyclic code shift keying, CCSK) 方式的通信导航一体化信号设计方法, 使通信信号的互相关函数的正值与导航信号自相关函数的峰值一致, 从而克服互相关干扰, 提高通信速率。通过频分复用的方式划分通信信号和导航信号的频带, 基于正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术提出连续分配、交替分配和随机分配3种子载波分配方案。对优化CCSK调制和CCSK调制的一体化信号的自相关峰值性能进行仿真和分析, 结果表明, 在3种子载波分配方案下, 采用优化CCSK调制的一体化信号的自相关峰值性能均优于CCSK调制的一体化信号, 且采用优化CCSK调制的通信信号的互相关特性对相应的导航信号的自相关峰值有增强作用, 可提升通信导航一体化信号体制下导航信号的码相位同步性能。

关键词: 通信导航一体化; 正交频分复用; 循环码移键控; 信号设计

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024158

A signal design method for LEO satellite communication and navigation integration based on optimized CCSK modulation

ZHU Min, ZHAO Yafei, ZHANG Yuman, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: A signal design method was proposed for communication and navigation integration,utilizing optimized cyclic code shift keying (CCSK) as communication spread spectrum modulation. The positive value of the cross-correlation function of the communication signal aligns with the peak value of the autocorrelation function of the navigation signal to overcome the cross-correlation interference and enhance the communication rate. The frequency bands of communication signal and navigation signal were divided by frequency division multiplexing. Based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), three sub-carrier distribution schemes of continuous allocation, alternating allocation and random allocation were proposed. Simulation and analysis of the autocorrelation peak perfor-

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 北京市科技计划项目 (No.Z221100007722012)

Foundation Item: The Beijing Science and Technology Project (No.Z221100007722012)



mance of integrated signal with optimized CCSK and CCSK modulation were conducted. The results demonstrate that under three subcarrier allocation schemes, the autocorrelation peak performance of the integrated signal employing optimized CCSK modulation surpasses that using only CCSK modulation. And the cross-correlation characteristic of communication signal modulated by optimized CCSK will enhance the autocorrelation peak value of the corresponding navigation signal, and improve the code phase synchronization performance of navigation signal under the integrated signal system.

Key words: communication and navigation integration, orthogonal frequency division multiplexing, cyclic code shift keying, signal design

0 引言

全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 是一种基于卫星和地面设备的时空信息获取系统, 它以高精度、全球性、实时性为特征, 在定位、导航、授时 (position, navigation and timing, PNT) 以及遥感测绘等领域发挥重要作用, 已经成为现代社会重要的时空信息基础设施。但是 GNSS 目前还存在许多限制, 如操作范围受限、精度受干扰影响、时延不可忽略等^[1], 难以提供精准、实时、动态和全球的时空信息服务。近年来, 低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 通信星座迅速发展, 为克服 PNT 性能的瓶颈提供了新的发展方向。与中高轨卫星导航相比, LEO 卫星轨道高度较低, 信号传播距离较短, 空间传播衰减较低, 导航抗干扰能力可得到显著提升; LEO 卫星可监测中高轨 GNSS 信号, 在其性能不佳时, 提供辅助定位帮助, 提升中高轨 GNSS 的性能; LEO 卫星运动速度快, 空间几何变化较明显, 可以缩短高精度定位的收敛时间^[2], 在全球范围内建设 LEO 导航系统是未来的发展趋势^[3]。

通信导航一体化是指利用 LEO 卫星所提供的通信信号和时频信息, 在 LEO 卫星上将通信与 PNT 功能整合, 从而提供更加全面和多样化的服务^[4]。通信导航一体化是一种新兴的技术趋势, 其基本思想是将通信和导航功能在一个系统中实现融合。为了实现通信导航一体化, 需要对信号体制进行设计和优化, 以兼顾定位导航性能和通信

性能。LEO 卫星通信导航信号一体化是指在 LEO 卫星系统中, 将通信和导航功能集成到同一信号中的设计, 是通信导航一体化面临的核心问题^[5]。文献[6]针对 LEO 卫星大频偏、高动态的特点, 提出了基于正交时频空间调制的通信测距一体化信号, 能够实现 LEO 高动态场景下的高精度导航授时。文献[7]提出一种格形编码的正交频分复用信号技术, 通过将功率低于环境噪声水平的扩频定位信号嵌入通信信号之中, 实现了在通信操作的同时, 对扩频信号进行持续的捕捉和监控, 进而达到定位导航的目的。文献[8]采用了 4G 技术, 将其作为融合卫星导航与通信信号的技术框架, 并根据 IEEE 802.16 标准设计出了一个集导航与通信于一体的方案, 该方案成功达到了星际间厘米级别的定位精度。文献[9]通过设计安全定位技术体制用 L 频段通导融合信号播发导航电文方式实现导航定位与授时, 设计的通导融合安全定位技术体制对未来中国卫星互联网建设与发展具有重要参考价值。文献[10]在 5G 循环前缀正交频分复用 (cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing, CP-OFDM) 信号系统基础上, 提出了多载波直扩码分多址 (multi-carrier direct sequence spread spectrum code division multiple access, MC-DS-CDMA) 集成信号系统, 实现 PNT 信号与通信信号在相同的时隙进行播发。上述研究针对通信导航一体化信号在时频域的叠加方式、帧结构设计和星间链路传输等方面开展了相关的研究工作, 但在通信导航一体化信号调制方式的选择方面还

需要进一步研究。

本文针对LEO卫星通信导航一体化设计问题,首先对现有通信导航一体化信号设计方法进行分析,考虑导航信号与通信信号之间的干扰规避和信号检测概率提高问题,提出了采用优化循环码移键控(cyclic code shift keying, CCSK)的通信导航一体化信号设计方法,以提升导航系统码同步性能,期望通过本文的研究工作,对未来LEO卫星的通信导航一体化信号设计提供技术支撑。

1 现有通信导航一体化信号设计方法

按照融合程度不同,通信导航一体化设计可以分为3个阶段^[11],即服务增强、信号复用和波形重建。服务增强是通信和导航的体制不变,在应用层集成通信功能和导航功能,实现信息共享、信息共用、服务能力相互增强;信号复用是通信和导航占用不重叠的无线资源,通过频域、时域、码域或空域的资源分配实现信号一体化设计;波形重建是指通信信息和导航信息调制到同一波形上,可以充分利用资源,降低信号处理的复杂度。综上所述,信号复用通过合理的资源分配方案可以提高资源利用率,同时降低通信和导航之间的互相干扰,而且相对于一体化波形设计来说实现难度较小。

文献[12]以铱星的参数为限制条件,对伪距精度、多普勒精度以及通信容量和误码率等性能指标进行量化分析,提出了以下3种通信导航一体化信号复用的资源分配方案。

方案1 将低功率导航信号添加到通信信号中。

方案2 以冲激信号的形式在单独的时隙和频段播发导航信号。

方案3 将导航信号与通信信号在分离的频段发送。

频分复用设计方案可以使通信系统和导航系统共享时间资源。由于通信信号和导航信号占据不同的频段,相互之间的干扰较小。此外,通信

系统和导航系统还可以根据各自的特点和要求灵活设计波形。传统的频分复用技术将频带分解为多个子频带,将不同的数据子载波调制在不同的载频上,接收端使用一组滤波器来分离各个子信道。然而,这种方法需要在频域上设置保护间隔,以防止频域内发生波形重叠,从而导致频谱利用率较低^[13]。

在下一代LEO卫星移动通信系统的候选技术中,正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术由于其具有高频谱利用率、灵活的载波分配策略、良好的抗多径能力,以及与地面5G移动通信系统兼容等优势,受到极大关注,应用前景良好。文献[14]考虑在OFDM系统中使用无授权非正交随机接入(grant-free non-orthogonal random access, GF-NORA)来增加LEO卫星物联网的接入容量并降低接入时延。文献[15]研究了LEO卫星通信系统的大规模多输入多输出OFDM信道估计。针对OFDM系统在LEO卫星中多普勒频移问题,学者们提出一些抗多普勒频移的研究方案和解决思路,通过OFDM信号动态重构、设计OFDM的信号格式及采用非正交信号等处理方法保证通信质量。对比传统的频分复用技术,OFDM的子载波在频域上是相互重叠的。通过利用子载波的正交性,可以将它们区分开来,因此可以极大地提高频谱利用率^[16]。OFDM中各个子载波上信号的正交调制和解调在形式上等同于逆离散傅里叶变换(inverse discrete Fourier transform, IDFT)和离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)。在实际应用中,可以利用逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)来快速实现这些操作。随着大规模集成电路和数字信号处理技术的不断发展,当设置大量子载波时,FFT的复杂度也得到了降低^[10]。OFDM实现原理如图1所示。



图1 OFDM实现原理

2 基于优化CCSK的通信导航一体化信号设计

2.1 OFDM子载波分配方案

通信导航一体化信号设计首先要考虑的是频率资源的分配,即子载波的分配,将OFDM符号内的子载波分为通信子载波和导航子载波,分别调制通信数据和导航数据。OFDM子载波分配方案如图2所示,基于OFDM的通信导航一体化信号子载波分配方式有以下3种:连续子载波分别调制通信数据和导航数据、通信和导航信号占据交替的子载波、全部子载波随机分配给通信和导航数据。假设子载波数为 N ,用于通信的子载波数为 N_{com} ,用于导航的子载波数为 N_{nav} ,灵活调配的子载波数为 N_{flex} ,子载波频率间隔为 S_{CS} ,IFFT点数为 N_{IFFT} , $N_{\text{IFFT}}=N$,采样频率为 F_s 。以上参数应满足以下条件以确保传输数据完整和划分频带正确:

$$N_{\text{com}} + N_{\text{nav}} + N_{\text{flex}} < N_{\text{IFFT}} \quad (1)$$

$$F_s \gg N_{\text{IFFT}} \cdot S_{\text{CS}} \quad (2)$$

2.2 优化循环位移数的CCSK调制方式

在卫星定位系统中,接收端通过频率搜索和码相位搜索捕获卫星发送的信号,然后进行信号跟踪。信号跟踪是一个与接收信号同步的二维信号的复制过程,将接收机生成的伪码与捕获的卫星信号的测距码作自相关运算,根据自相关函数的峰值,实现码相位同步^[17]。测距码是一种特殊的序列,具有良好的自相关性能,自相关峰值的位置和幅度能够准确地反映出信号的载波和码相位信息,可以作为信号跟踪的依据,且峰值检测的成功概率影响定位测量值的精度和导航电文的解算。然而,在实际情况中,通信导航一体化信号中通信扩频码和接收机生成的伪码之间的互相

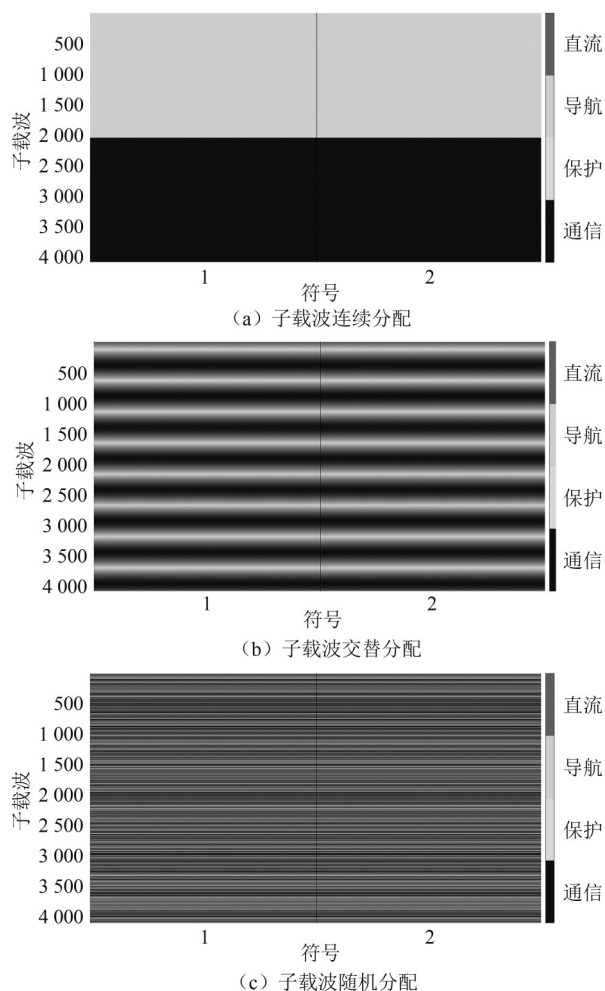


图2 OFDM子载波分配方案

关函数会对测距码自相关峰值的检测造成影响,继而影响导航测距码相位同步精度。

CCSK是一种数字通信中常用的调制技术,它的核心是利用循环码进行符号生成和数据传输。在CCSK中,首先需要选择一个合适长度的循环码作为基本序列,这个循环码通常是一个固定长度的伪随机序列,它的选择对于CCSK系统的性能和可靠性至关重要。通过对基本序列进行循环移位操作,生成一系列不同的循环移位版本,每个不同的循环移位版本代表着一个不同的

符号。这个过程与扩频技术类似，但不同之处在于 CCSK 是将数据映射到生成的不同符号序列上，而不是简单的二进制加法操作。假设基本序列的长度为 N_{seq} ，通过循环移位可以得到 N_{shift} 个不同移位数的序列，易知 $N_{\text{shift}} = N_{\text{seq}}$ 。不同的移位序列分别映射为不同的符号，可以表示为 $N_{\text{bit}} = \lg N_{\text{shift}}$ bit 的数据，相比于传统的单比特直接扩频方式下的信息传输速率，CCSK 可以实现 N_{bit} 倍的提升。8 bit 扩频序列映射见表 1，可以更好地理解 CCSK 信号的映射过程。

表 1 8 bit 扩频序列映射

8 bit 扩频序列	3 bit 数据
$c_1c_2c_3c_4c_5c_6c_7c_8$	000
$c_2c_3c_4c_5c_6c_7c_8c_1$	001
$c_3c_4c_5c_6c_7c_8c_1c_2$	011
$c_4c_5c_6c_7c_8c_1c_2c_3$	010
$c_5c_6c_7c_8c_1c_2c_3c_4$	100
$c_6c_7c_8c_1c_2c_3c_4c_5$	101
$c_7c_8c_1c_2c_3c_4c_5c_6$	110
$c_8c_1c_2c_3c_4c_5c_6c_7$	111

导航和通信信号之间的互相关干扰是一项迫切需要解决的问题，文献[18]提出一种方案，针对 CCSK 调制方式设计了一种增强策略，通过优化 CCSK 信号的循环位移数，使互相关函数的值与自相关函数的峰值一致，避免导航信号与通信信号之间的干扰，提高信号检测概率。假设在 τ_{peak} 处测距码自相关函数取得峰值。CCSK 优化策略的核心思路是设置互相关峰值检测门限，不同移位数的 CCSK 序列与测距码作互相关运算，若在 τ_{peak} 处的互相关取值高于检测门限 T ，能够对测距码自相关峰值起到增强作用，则将对应的移位数标记起来；若在 τ_{peak} 处的取值低于检测门限 T ，则忽略此时的位移数，图 3 给出了优化策略。将所有符合门限要求的 CCSK 位移序列重新定义为映射到符号的有效映射序列，此时互相关函数大于门限 T 的正值将与自相关函数的峰值完

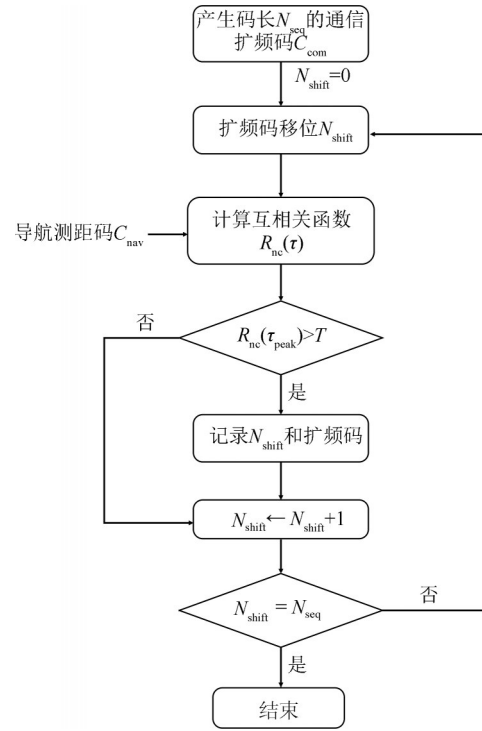


图 3 CCSK 优化策略

全对齐，从而增加自相关函数的峰值。通信导航一体化信号表达式为：

$$S_{\text{integrated}} = D_{\text{com}} C_{\text{com}} + D_{\text{nav}} C_{\text{nav}} \quad (3)$$

其中， D_{nav} 为导航电文， C_{nav} 为导航测距码， D_{com} 为通信数据， C_{com} 为通信扩频码。导航测距码的自相关函数表示为：

$$R_{\text{nav}}(\tau) = \sum_{m=0}^{N_{\text{seq}}-1} C_{\text{nav}}(m+\tau) C_{\text{nav}}(m) \quad (4)$$

其中， m 为码片， τ 为码片位移。

导航测距码和通信扩频码的互相关函数表示为：

$$R_{\text{nc}}(\tau) = \sum_{m=0}^{N_{\text{seq}}-1} C_{\text{nav}}(m+\tau) C_{\text{com}}(m) \quad (5)$$

当扩频码存在循环移位时，自相关函数表示为：

$$R_{\text{nc}}(\tau + N_{\text{shift}}) = \sum_{m=0}^{N_{\text{seq}}-1} C_{\text{nav}}(m+\tau+N_{\text{shift}}) C_{\text{com}}(m) \quad (6)$$

采用北斗 B1I 码作为测距码，选择码长为 2 046 的 Gold 码作为 CCSK 基本序列以调制通信



数据, 在采用不同优化阈值 T 的情况下, 满足阈值要求的循环移位数不同, 对应的有效 CCSK 序列也不同。不同门限值下的测距码与扩频码的互相关图像如图 4 所示, 以码长均为 2 046 的测距码和扩频码展示了门限值 $T=0.02$ 、0.05、0.07 时的互相关图像及互相关函数高于阈值的 N_{shift} 最终集合, 即优化循环移位数的集合。显然, 随着 T 值的增加, 最终可用的优化循环移数将更少, 通信信号的速率可能会降低, 但测距码相关函数峰值可以进一步提高, 更有利于接收机捕获跟踪。

本文设计的通信导航一体化信号基于采用优化策略的 CCSK 通信扩频调制, 以 3 种不同的频率分配方式分别进入 OFDM 调制系统, 经过信道处理后接收, 一体化信号产生原理示意图如图 5 所示。

3 仿真分析

仿真评估所提出的通信导航一体化信号体制的性能, 测距码采用北斗 B1I 码, CCSK 采用码长为 2 046 的 Gold 码作为基本序列, 优化移位数的 CCSK 有效序列的互相关阈值设置为 0.07。

在连续 OFDM 子载波分配方案下, 采用优化策略的 CCSK 的扩频码和 CCSK 序列调制后, 经过信道处理和噪声叠加, 对接收端的相关性能进行对比分析。连续 OFDM 子载波分配下的自相

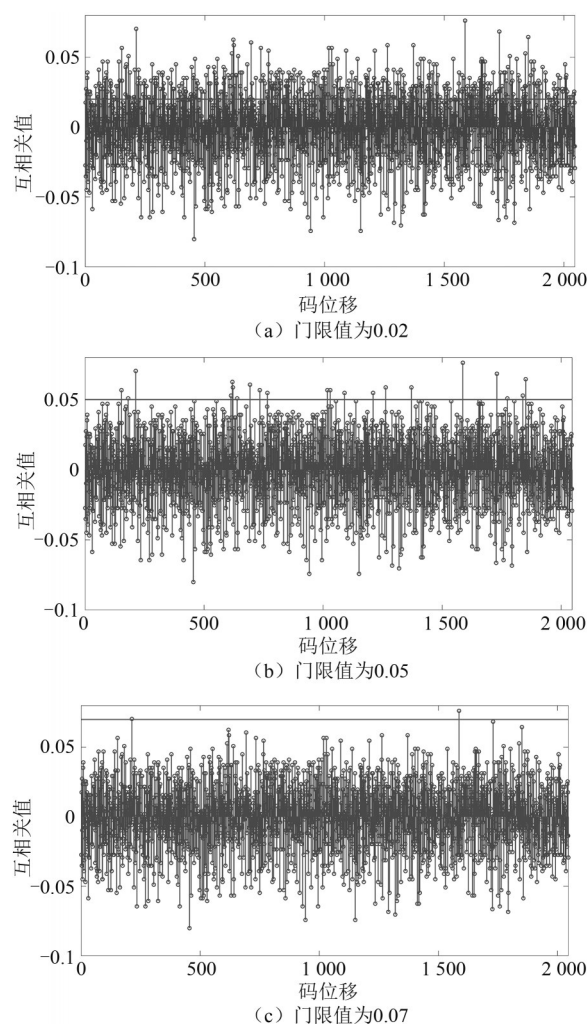


图 4 不同门限值下的测距码与扩频码的互相关图像

关、互相关三维示意图、叠加图分别如图 6、图 7 所示。从图 6 (a) 可以明显看到, 互相关对自相

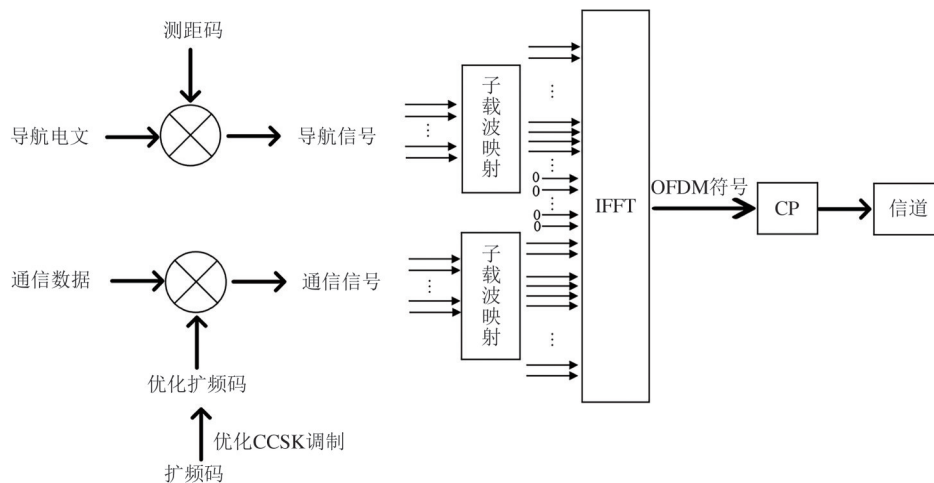


图 5 一体化信号产生原理示意图

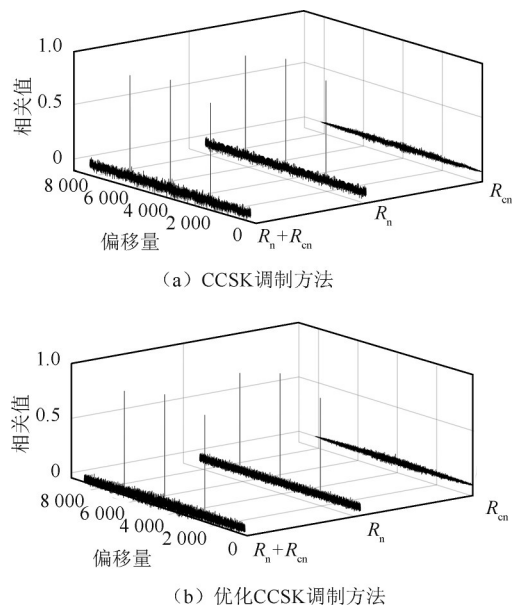


图6 连续OFDM子载波分配下的自相关、互相关三维示意图

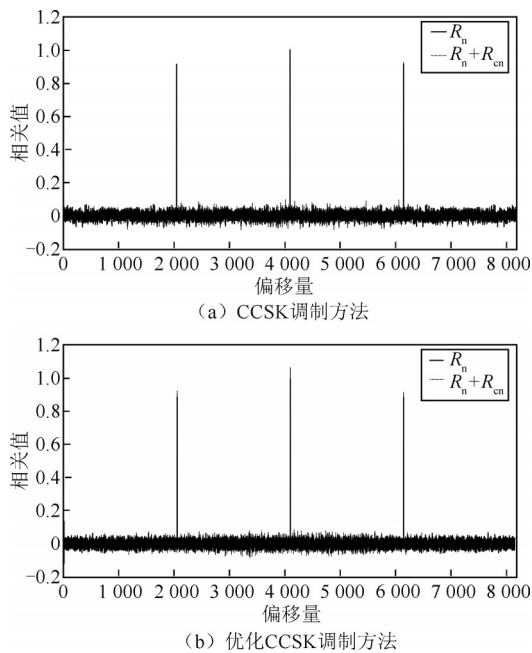


图7 连续OFDM子载波分配下的自相关、互相关叠加图

关峰值的增强作用较弱。如图6(b)所示,采用优化CCSK调制通信数据,在偏移量为2 046、4 092和6 138时,导航测距码取得自相关峰值,互相关函数可使自相关的峰值幅度得到加强。图7(b)将互相关与自相关图叠加在同一坐标系中,叠加后的峰值高于自相关峰值,根据峰值的高度变化也可以验证以上结论。对于CCSK调

制,偏移量为2 046时互相关取值导致自相关函数峰值的衰减,但偏移量为2 046和6 138时,互相关对自相关函数峰值有加强作用,连续OFDM子载波分配下的相关峰值见表2。综上所述,采用优化CCSK调制的通信信号时,通信导航一体化信号中,导航测距码的自相关峰值得到加强,而CCSK设计的互相关增强性能劣于优化CCSK,但CCSK调制下的测距码自相关峰值高于优化CCSK。根据表2通导融合信号峰值的对比可知,综合来看,采用优化CCSK的一体化信号的峰值更高、互相关增强性能也更优。

表2 连续OFDM子载波分配下的相关峰值

方法		偏移量		
		2 046	4 092	6 138
优化CCSK	导航自相关	0.887 6	1	0.887 6
	通导互相关	0.038 1	0.068 9	0.029 8
	通导融合信号峰值	0.925 7	1.068 9	0.917 4
CCSK	导航自相关	0.902 2	1	0.902 2
	通导互相关	-0.004 4	0.003 4	0.011 7
	通导融合信号峰值	0.906 6	1.003 4	0.913 9

在交替OFDM子载波分配方案下,通信数据采用优化CCSK和CCSK调制方式,经过信道处理和噪声叠加后,对接收端的相关性能进行对比分析。交替OFDM子载波分配下的相关峰值见表3,采用优化CCSK调制的通导互相关取值可使导航信号自相关的峰值幅度得到加强。交替OFDM子载波分配下的自相关、互相关三维示意图、叠加图分别如图8、图9所示。从图9(a)中可以明显看到,互相关并未对自相关峰值有增强的作用,

表3 交替OFDM子载波分配下的相关峰值

方法		偏移量		
		2 046	4 092	6 138
优化CCSK	导航自相关	0.941 3	1	0.941 3
	通导互相关	0.047 9	0.082 1	0.032 3
	通导融合信号峰值	0.989 2	1.082 1	0.973 6
CCSK	导航自相关	0.476 1	1	0.476 1
	通导互相关	-0.015 6	-0.008 8	-0.009 8
	通导融合信号峰值	0.460 5	0.991 2	0.466 3

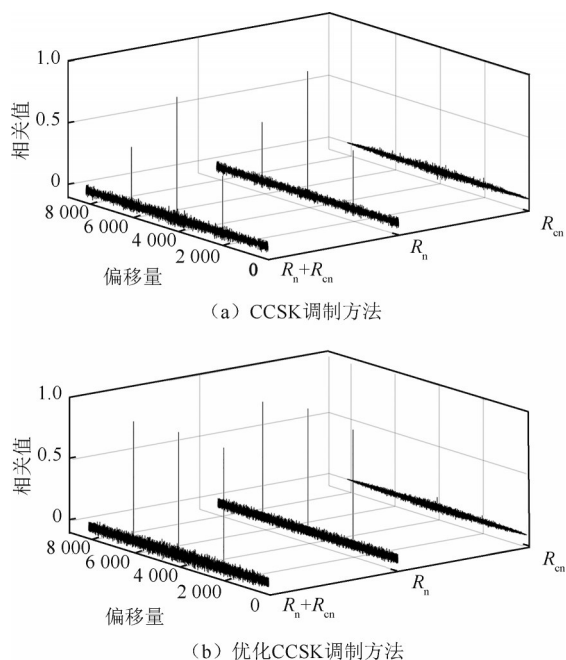


图8 交替OFDM子载波分配下的自相关、互相关三维示意图

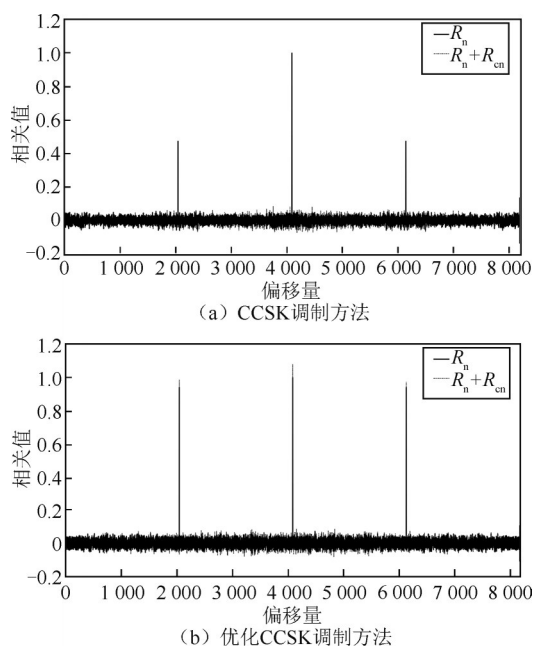


图9 交替OFDM子载波分配下的自相关、互相关叠加图

从图9(b)可以看出,互相关图与自相关图叠加后的峰值高于自相关峰值。采用CCSK调制时,互相关特性导致自相关函数峰值衰减。综上所述,在交替子载波分配方案下,采用优化CCSK调制的通信信号时,导航信号自相关峰值更高,在通信导航一体化信号中,导航自相关峰值也得到加

强,幅度更高,更有利于码相位同步峰值检测。

在随机OFDM子载波分配方案下,采用优化CCSK和CCSK调制的通信数据,经过信道处理和噪声叠加后,在接收端对其相关性能进行对比分析。随机OFDM子载波分配下的相关峰值见表4,与交替子载波分配方案对比结果一致,在随机子载波分配方案下,采用优化CCSK码设计的自相关峰值性能和互相关增强性能优于CCSK调制方式,更有利于码相位同步峰值检测。随机OFDM子载波分配下的自相关、互相关三维示意图、叠加图分别如图10、图11所示。通过对比图11中导航自相关峰值高度和通信导航一体化信号的峰值高度,也可以验证优化CCSK调制方式在自相关性和抗互相关干扰方面性能更优。

表4 随机OFDM子载波分配下的相关峰值

方法		偏移量		
		2 046	4 092	6 138
优化CCSK	导航自相关	0.942 3	1	0.942 3
	通导互相关	0.032 3	0.071 8	0.034 7
	通导融合信号峰值	0.974 6	1.071 8	0.977
CCSK	导航自相关	0.489 7	1	0.489 7
	通导互相关	-0.010 3	-0.030 8	-0.013 7
	通导融合信号峰值	0.479 4	0.969 2	0.476 0

综合以上仿真结果,优化CCSK方案中可以导航信号的自相关峰对齐的互相关取值大于优化阈值,因此通信导航一体化信号的相关峰得到加强,信号相关峰的位置用于确定码相位同步,相关峰的增加有助于提高信号接收性能。采用优化CCSK调制的一体化信号中,连续子载波分配方式和交替、随机子载波分配方式的测距码自相关性能和通导互相关增强性能不同,连续子载波分配方式的测距码自相关性能对比CCSK较差,但互相关增强性能较好,得以弥补测距码自相关峰值较低的问题。交替、随机子载波在导航信号自相关性能和通导互相关增强性能两个维度都有提升。但3种方案下优化CCSK调制的一体化信号

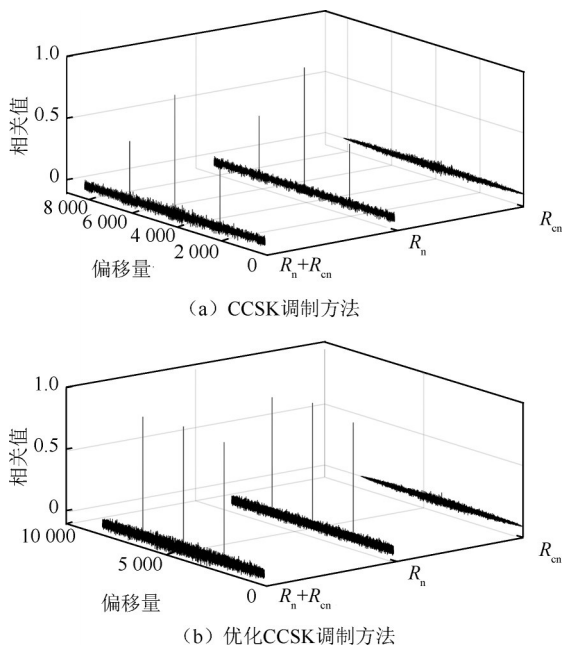


图10 随机OFDM子载波分配下的自相关、互相关三维示意图

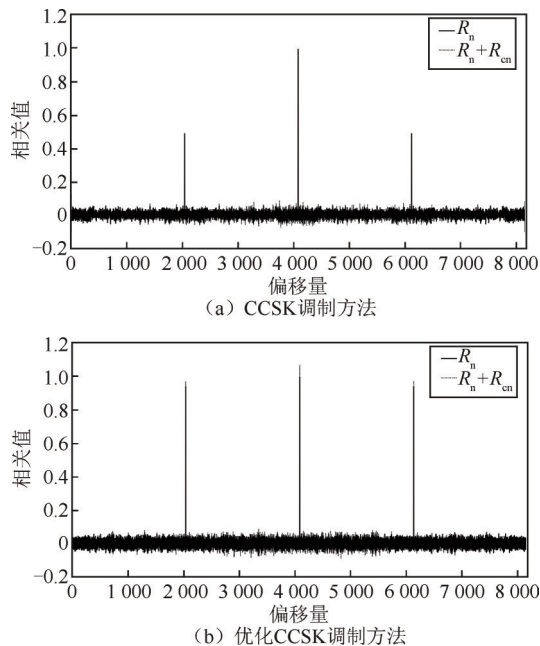


图11 随机OFDM子载波分配下的自相关、互相关叠加图

的自相关性能均强于CCSK调制下的一体化信号,故在此通信导航一体化信号设计体制下,通信对导航信号的码相位同步性能有增强效果。

4 结束语

本文提出了一种通信导航一体化信号体制。

为了消除通信导航一体化信号中导航与通信信号之间的相互干扰,增强导航信号的自相关峰值,本文采用了优化CCSK循环位移数的策略。此外,对基带信号采用OFDM的调制方式,并提出了3种子载波分配方案。仿真结果验证了该设计在增强一体化信号自相关峰值性能方面的有效性,与采用一般CCSK调制方式的通信导航一体化信号相比,采用本文提出的优化CCSK调制的一体化信号能够实现较高通信信息传输速率,提升导航服务能力。

参考文献:

- [1] 田润,崔志颖,张爽娜,等.基于低轨通信星座的导航增强技术发展概述[J].导航定位与授时,2021,8(1):66-81.
TIAN R, CUI Z Y, ZHANG S N, et al. Overview of navigation augmentation technology based on LEO[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(1): 66-81.
- [2] 袁洪,陈潇,罗瑞丹,等.对低轨导航系统发展趋势的思考[J].导航定位与授时,2022,9(1):1-11.
YUAN H, CHEN X, LUO R D, et al. Review of the development trend of LEO-based navigation system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(1): 1-11.
- [3] XIANG Z Y, GAO X Q, LI K X, et al. Massive MIMO downlink transmission for multiple LEO satellite communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024(99): 1.
- [4] 刘炳宏,赵亚飞,彭木根,等.低轨卫星通导一体化信号设计及处理[J].天地一体化信息网络,2023,4(3):40-47.
LIU B H, ZHAO Y F, PENG M G, et al. Design and processing of communication and navigation integrated signal based on LEO satellite[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 40-47.
- [5] 赵亚飞,闫冰,孙耀华,等.低轨星座通导一体化:现状、机遇和挑战[J].电信科学,2023,39(5):90-100.
ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [6] 谢卓成.铱星STL信号体制及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
XIE Z C. STL signal system and performance research of iridium satellite[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.



- [7] 王如霞. 通导融合系统中定位信号的设计与性能评估[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
WANG R X. The design and performance evaluation of positioning signal in integration system of communication and navigation system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [8] FERNÁNDEZ A, DE AGÜERO S G, PALOMO J M, et al. Wireless integrated communication and navigation system based on IEEE 802.16 standards[C]//Proceedings of the 2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-8.
- [9] 伍蔡伦, 郎兴康, 王同, 等. 基于低轨星的通导融合安全定位技术体制与性能验证[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 118-124.
WU C L, LANG X K, WANG T, et al. LEO-based communication and navigation fusion security positioning technology system and performance verification[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(6): 118-124.
- [10] ZHOU Y, HU J T, YAN T, et al. MC-DS-CDMA: an integrated communication and navigation signal for low orbit satellite constellation[C]//Proceedings of the 2023 4th Information Communication Technologies Conference (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 109-114.
- [11] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
YU B G, BAO Y C, YANG M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 1-14.
- [12] WANG L, LYU Z C, TANG X M, et al. LEO-augmented GNSS based on communication navigation integrated signal[J]. Sensors, 2019, 19(21): 4700.
- [13] LAN X, ZHANG M, WANG L T. OFDM chirp waveform design based on imitating the time-frequency structure of NLFM for low correlation interference in MIMO radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(2): 286-290.
- [14] ZUO Y, YUE M Y, ZHANG M C, et al. OFDM-based massive connectivity for LEO satellite Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(11): 8244-8258.
- [15] LI K X, GAO X Q, XIA X G. Channel estimation for LEO satellite massive MIMO OFDM communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(11): 7537-7550.
- [16] 杨彪. 基于 OFDM 子载波分配的雷达通信一体化波形设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
YANG B. Integrated sensing and communications waveform design based on OFDM subcarrier allocation[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [17] AKOPIAN D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(4): 277.
- [18] ZOU D Y, LI X Y, MA R F. A signal optimization strategy for next generation navigation and communication integration applications[J]. Physical Communication, 2022(50): 101510.

[作者简介]



朱敏 (2000-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为卫星通信导航一体化信号设计。



赵亚飞 (1987-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室副研究员, 主要研究方向为低轨星座通信导航一体化、星地融合网络等。



张雨曼 (2002-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为天地一体化网络切片技术。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线电接入网络等。