

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.004

面向无人集群的通信定位一体化方法研究

胡晨骏¹, 辜方林¹, 赵林², 赵莺², 魏急波¹

(1. 国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073;

2. 北京信息通信技术研究中心, 北京 100036)

摘要:针对无人集群协同作战通信/定位的集约化设计需求,提出了一种单载波频域均衡(SCFDE)与直接序列扩频(DSSS)技术有机结合的通信定位一体化波形。一方面,利用SCFDE中频域均衡易于克服频率选择性衰落且便于与DSSS结合的优势,使系统具有良好的适应复杂场景的通信能力;另一方面,利用恒包络零自相关导频序列的优良自相关和互相关特性,将其作为导频序列并计算与本地导频符号的循环移位相关,检测相关峰值即可实现整数符号周期信号到达时间估计。同时,结合用于信道估计的导频序列,构建差分延时相关模型,有效解决了小数采样周期信号到达时间估计问题,实现了高精度的信号到达时间估计。

关键词:直接序列扩频;频域均衡;到达时间;通信定位一体化

中图分类号:TN95

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2022)05-0038-08

Research on Integrated Method of Communication and Positioning for Unmanned Swarm

HU Chen-jun¹, GU Fang-lin¹, ZHAO Lin², ZHAO Ying², WEI Ji-bo¹

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

2. Beijing Information and Communication Technology Research Center, Beijing 100036, China)

Abstract: Aiming at the intensive design requirements of communication/positioning in unmanned swarm cooperative operations, this paper proposes a communication and positioning integrated waveform that organically combines single carrier frequency domain equalization(SCFDE) and direct sequence spread spectrum (DSSS) technology. It makes use of the advantages of frequency domain equalization in SCFDE, which is easy to overcome frequency selective fading and easy to combine with DSSS, so that the system has good communication abilities to adapt to complex scenarios. On the other hand, using the excellent autocorrelation and cross-correlation characteristics of constant amplitude zero auto correlation pilot sequence, the arrival time of integer symbol period can be estimated by calculating the cyclic shift correlation between pilot sequence and local pilot sequence and detecting its peak. At the same time, combined with the pilot sequence for channel estimation, a differential delay correlation model is constructed to effectively solve the problem of arrival time of decimal symbol period, and to achieve high-precision arrival time estimation.

Key words: Direct sequence spread spectrum; Frequency domain equalization; Time of arrival; Communication and positioning integration

收稿日期:2022-06-13;修订日期:2022-07-14

基金项目:国家自然科学基金(61931020,62101569)

作者简介:胡晨骏(1990-),男,硕士,讲师,主要从事高精度无线定位授时方面的研究。

通信作者:辜方林(1986-),男,博士,副研究员,主要从事无线通信系统、无线授时定位等方面的研究。

0 引言

无人集群在协同作战中,相互之间除了信息传输必不可少之外,还得获取位置、速度等空间状态信息,即传输信息和测距定位都是无人集群实现协同工作的重要基础^[1]。而传统的通信和定位系统往往采用独立的硬件平台,使用不同的信号波形、调制方式和信号功率,占用不同的频率和带宽,难以实现无人平台通信与测量设备的集约化设计。鉴于通信链路进行信息共享是无人平台之间协作的基础,无线电定位以其独特的优势已然成为实现平台之间相对定位的一种自然手段。如果通信和定位波形在载波频率、射频天线、波形设计、调制方式和信号处理等方面进行统一设计,实现通信、定位系统深层次的一体化融合,则能够极大降低网络系统资源占用及信号处理复杂度,减少频谱占用和能量消耗。综上所述,研究无人协同系统的通信和定位一体化具有十分重要的意义^[2]。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的空间通信和导航(Space Communication and Navigation, SCA N)计划^[3]是近几年美国关于空间通信与导航定位系统研究的重要项目,聚焦于通导一体化波形设计、导航(测距测向)方法和组网协议等,值得我们借鉴。中国区域定位系统(Chinese Area Positioning System, CAPS)具备高精度定位授时和短报文的收发功能,且已在实际应用中发挥了巨大作用^[4]。约翰霍普金斯大学的应用物理实验室(Applied Physics Laboratory's, APL)构建了集成通信和导航的功能的 APL 系统^[5],其核心是利用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)循环测距的方法实现相对导航定位,但是由于 TDMA 系统时延较大,难以满足实际需要。冯奇^[6]从通信和导航的基本性能指标出发,提出了基于 V-OFDM 调制的通信和导航一体化系统;北京邮电大学邓中亮教授等^[7]提出了时分码分正交频分复用(Time & Code Division-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, TC-OFDM)信号体制,其核心是通过通过对通信信号资源的复用,实现高精度的室内外定位。但是,OFDM 信号体制的信号峰均比高、对频偏敏感且抗干扰能力弱,难以适用于军事行动、无人集群等面临的复杂、动态的应用环境。

准确测量节点之间的距离是实现网络中节点间相对定位的必要条件。根据无线电测距原理,距

离测量值等于信号到达时间与信号发送时间之差和光速的乘积,信号发送时间可以通过时间戳来标定,信道到达时间则需要通过精准到达时刻的测量获得。在准确到达时间测量的基础上,发展出了到达时间(Time of Arrival, TOA)定位方法和到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位方法等^[8]。可以看出,精准到达时间测量问题解决的好坏直接影响定位精度,因此,无线电定位系统的核心技术之一就是实现高精度无线电信号到达时间测量。直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)系统^[9]由于频谱展宽需要高的采样频率,对应的采样间隔的时间分辨率高,同时用于扩频的伪随机(Pseudo-random Noise, PN)码具有良好的相关特性,通过计算接收信号与本地 PN 码的互相关发现,接收信号与本地 PN 码完全对齐时互相关出现尖锐峰值,其余情况互相关值很小,因此,检测其峰值即可获得具有极高时间分辨率的同步性能。另一方面,DSSS 系统具有较强的抗窄带干扰能力,并且具有信息隐蔽、多址保密等优点,适用于军事行动等复杂应用场景。然而,目前 DSSS 技术局限于低速通信系统或者信道环境简单、干净的卫星通信系统,为了满足无人系统面临的多径环境下通信和相对定位一体化的需求,一方面需要引入均衡技术克服多径导致的频率选择性衰落,实现高效可靠通信;另一方面,通信定位一体化波形必须解决信号到达时间的高精度测量问题,现有方法一般是在实现定时同步(码片同步)的基础上,通过 Costas 环等环路鉴相^[10]或者训练序列进行载波相位估计实现精同步,从而满足定位、授时的需求。

本文提出了一种单载波频域均衡(Single Carrier Frequency Domain Equalization, SCFDE)与 DSSS 技术有机结合的通信定位一体化波形。一方面,SCFDE 系统具有与 OFDM 类似的实现框架,OFDM 的许多性质在 SCFDE 系统中同样适用。例如,利用频域均衡克服多径导致的频率选择性衰落、基于频域载波相位的高精度时间同步等,且相较于 OFDM, SCFDE 具有对频偏不敏感、易于与 DSSS 结合、峰均比较低等优点,能适用于高动态、电磁环境复杂等恶劣环境^[11-14]。另一方面,利用优选的恒包络零自相关(Constant Amplitude Zero Auto Correlation, CAZAC)序列作为信道估计的导频序列,根据 CAZAC 序列的傅里叶保持性质,将 SCFDE 系统中导频序列通过傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)变换到

频域,并与本地导频符号进行循环移位相关,检测相关峰值即可实现整数符号周期信号到达时间估计。在此基础上,结合用于信道估计的导频序列,构建差分延时相关模型,实现载波相位估计,解决小数采样周期信号到达时间估计问题,最终实现高精度的信号到达时间估计,使系统同时满足定位授时的应用需求。

1 基于 SCFDE 的 DSSS 通信抗干扰波形

本文提出了一种基于 SCFDE 的 DSSS 通信抗干扰波形,其系统框架如图 1 所示。该波形的核心思想是采用 DSSS 体制获得抗干扰能力,同时引入频域均衡克服信道频率选择性衰落的影响,实现高可靠通信。

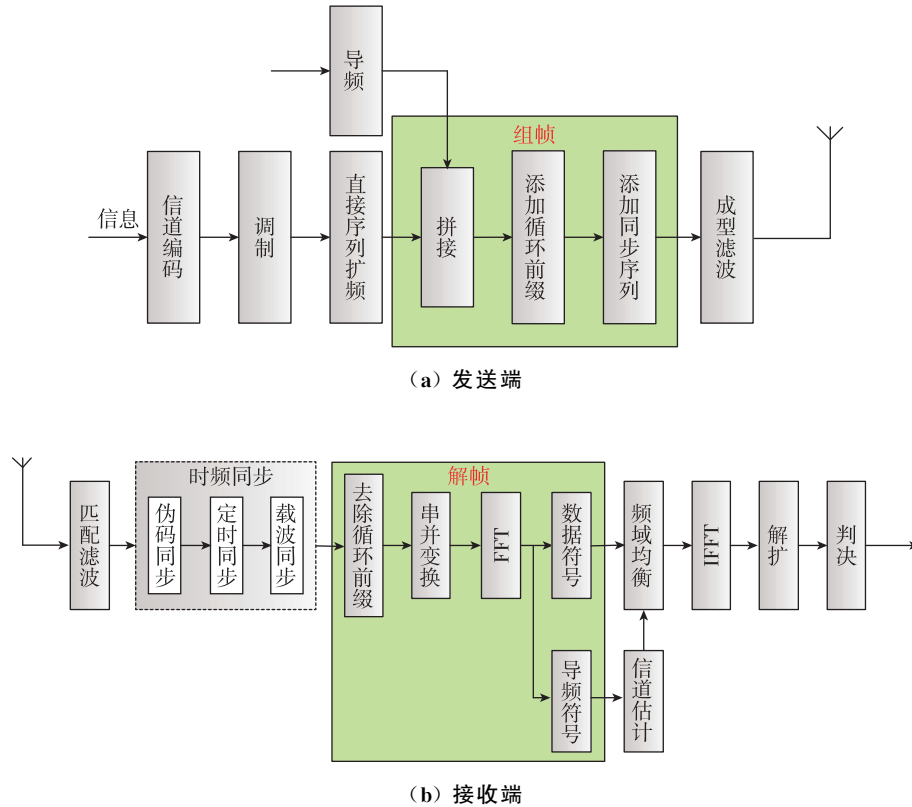


图 1 基于 SCFDE 的 DSSS 通信定位一体化波形框架

Fig. 1 DSSS communication positioning integrated waveform framework based on SCFDE

发送端由信道编码、调制、DSSS、组帧和成型滤波等单元组成,信息比特首先经过信道编码、调制等模块形成信息符号,再经过 DSSS 单元形成高速信息符号,此后将用于信道估计的导频符号与信息符号按照特定规律进行拼接,并添加循环前缀(Cyclic Prefix, CP)和同步符号完成组帧,最终经过成型滤波生成发射信号。接收端由匹配滤波、时频同步、解帧、信道估计与均衡、逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)、解扩及判决等单元组成,接收信号完成 A/D 转换后经过匹配滤波实现带外干扰抑制,而后经过时频同步模块实现伪码同步、定时同步和载波频差估计与补偿,在此基础上完成帧解析,并将信号通过 FFT 变换到频域,并利用导频符号完成信道估计与均衡,再将信息符

号通过 IFFT 转化为时域信号,完成解扩、信道译码等后续处理。

特别指出,导频符号与信息符号的处理方式不同,信息符号经过扩频、解扩处理以保证高的接收机灵敏度和好的抗干扰等通信能力指标,而导频符号则不进行扩频处理,便于实现 DSSS 带宽扩展后高的时间分辨率,提升时间同步精度,进而提升定位精度。假设 CP 的长度大于信道的冲激响应长度,则导频用于频域信道估计的过程可以表示为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_k + \mathbf{W} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Y}_k = \text{FFT}(y_k)$ 表示接收的导频符号对应的频域值; $\mathbf{X}_k = \text{FFT}(x_k)$ 表示导频符号的频域值; $\mathbf{H} = \text{FFT}(h)$ 表示信道响应的频域值; $\mathbf{W} = \text{FFT}(w)$ 表示噪声的频域值; 符号“ \cdot ”表示 2 个向量的点乘。

可以看出,若导频符号的频域信号 \mathbf{X}_k 幅值恒定,则信道估计不需要除法,只需要乘法就可以实现,可以大大减少实现复杂度。另一方面,为了使发送信号的峰均比小,需要导频符号的时域信号 x_k 幅值恒定。综合上述分析,本文提出了导频信号采用 CAZAC 序列^[15],CAZAC 序列有两个优良特性:一是序列具有良好的自相关特性和互相关特性,即该序列互相关值很小几乎为零,而自相关值较大,在做相关运算时能够表现出优异的峰值特性;二是幅值恒定,且 CAZAC 序列经过 FFT 和 IFFT 后仍为 CAZAC 序列,所以同时使用了 FFT 和 IFFT 运算的系统不会对该序列的性质产生影响。

2 面向定位的高精度信号到达时间估计方法

无线电定位的核心是实现高精度的信号到达时间测量。事实上,无线通信系统的核心和难点之一也是通过时频同步模块实现收、发端之间的时间和频率校准,但是它对信号达到时间测量的精度要求没有定位系统那么高。例如,对于 SCFDE、OFDM 等插入 CP 进行码间串扰保护的系统,只需达到小于 CP 保护间隔的时间同步精度要求。然而,无线电定位系统则对信号到达时间的检测精度要求十分严苛,即使达到信号采样周期这样的精度也远远不够。例如,假设采样率为 10MHz,理论上得出的信号到达时间差最小为 100ns,换算成距离则是 30m,而这样的精度是没有办法接受的。

针对上述问题,结合基于 SCFDE 的 DSSS 通信抗干扰波形,本文提出了一种如图 2 所示的高精度到达时间估计实现框架。为了提升信号到达时间的估计精度,利用优选的 CAZAC 序列作为信道估计的导频序列。导频序列通过 FFT 变换到频域,并与本地导频符号进行循环移位相关,检测相关峰值即可实现整数符号周期信号到达时间估计。在此基础上,结合用于信道估计的导频序列,构建差分延时相关模型,实现载波相位估计,解决小数周期信号到达时间估计问题,最终实现高精度的信号到达时间估计,使系统同时满足测距和定位的应用需求。

2.1 整数采样周期信号到达时间估计

通过插入 CP 进行保护,只要时频同步模块引入的定时误差 δ (以符号周期为单位)小于 CP 长度,定时误差对时域和频域接收信号的影响如表 1 所示。

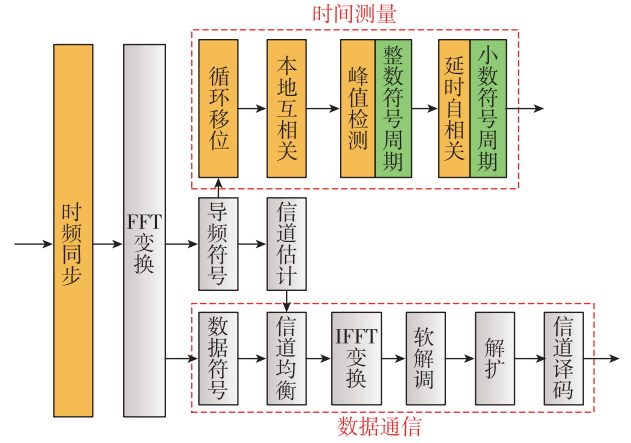


图 2 高精度信号到达时间估计框架

Fig. 2 Precision arrival time estimation framework

表 1 定时误差的影响

Tab. 1 Influence of timing offset

	接收信号	定时误差 δ
时域	$z(n)$	$s(n+\delta)$
频域	$Z(k)$	$e^{j2\pi k\delta/N} S(k)$

另一方面,假设 $\{a(n)\}$ 是一个长度为 N (N 为偶数)的 CAZAC 序列,则 $a(n)$ 可表示为

$$a_{\mu}(n) = \exp\left(j \frac{\pi \mu n^2}{N}\right) \quad (2)$$

其中, $n \in [0, N-1]$; μ 是与 N 互质的正整数。可以证明,CAZAC 序列具有恒模、傅里叶保持、良好的自相关和互相关特性,这些性质对于信道估计和高精度时间同步具有重要意义。

性质 1: CAZAC 序列通过 FFT 变换后仍然为 CAZAC 序列,可以表示为

$$A_{\mu}(k) = a_{\mu}^*(\tilde{\mu}k) A_{\mu}(0) \quad (3)$$

其中, $(\cdot)^*$ 表示共轭运算; $\tilde{\mu}$ 是 μ 以 N 为周期的数论倒数。根据性质 1,假设时域存在定时偏差 δ ,则等效为对应的频域 CAZAC 序列中存在 $\mu\delta$ 个以 N 为周期的循环移位偏差,其中 N 为 CAZAC 序列长度。因此,为了便于分析,通常取 $\mu = 1$ 的 CAZAC 序列作为导频序列。

性质 2: CAZAC 具有良好的自相关和互相关特性,CAZAC 序列的相关性可表示为

$$\sum_{k=0}^{N-1} a(k)a(k+\tau) = \begin{cases} N, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, τ 表示时刻偏差; N 表示序列周期。可以看出,它具有理想的周期自相关性质,即当序列完全对齐时,则存在尖锐的峰值,当序列存在偏差未

对齐时,则相关值接近于0。因此,利用该性质可实现高精度的定时估计。如图3所示,通过计算导频序列接收信号的频域响应与本地频域导频序列之

间的互相关,检测其相关峰值即可实现准确的整数符号周期的估计。

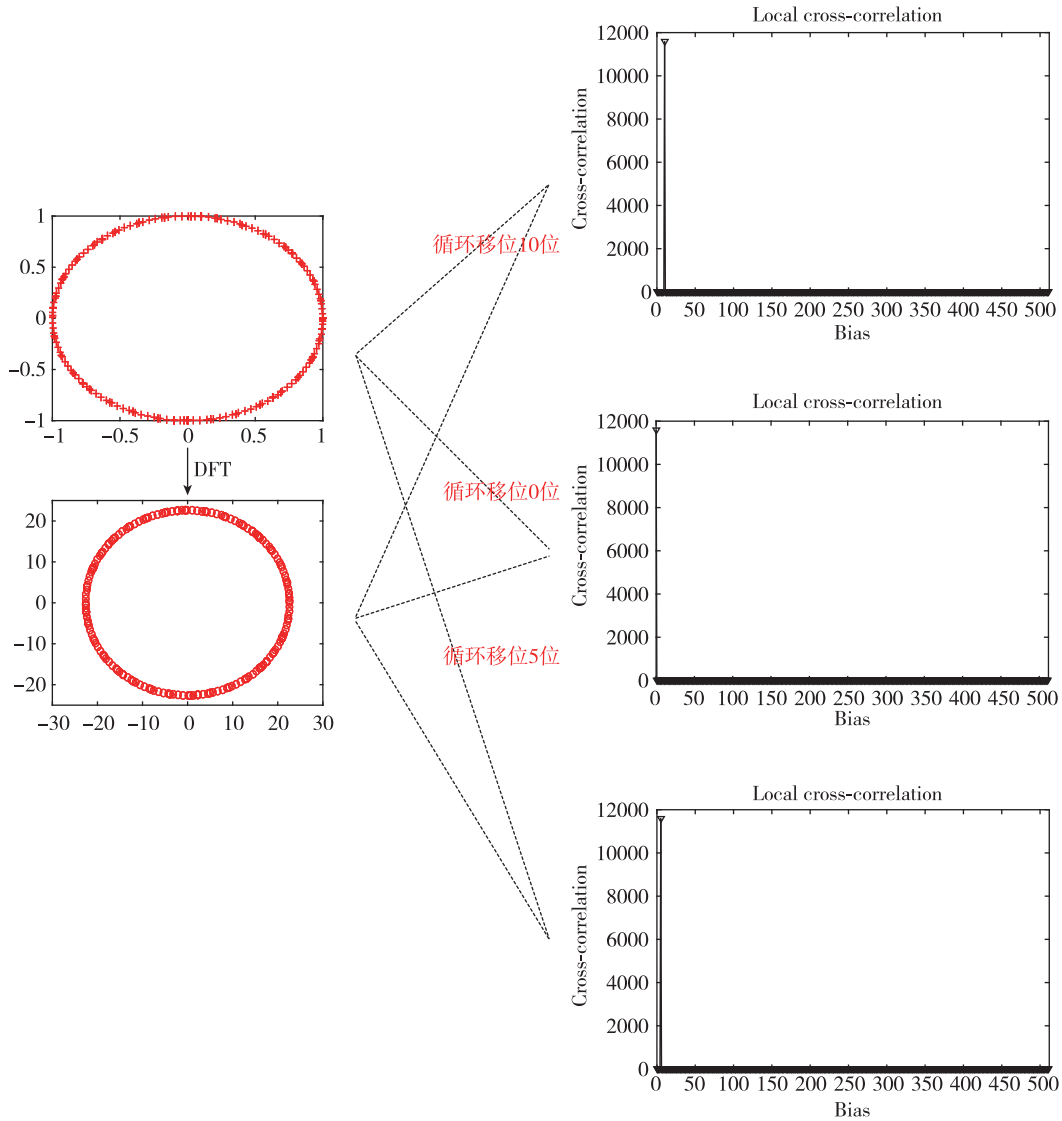


图3 基于本地互相关的整数符号周期时间估计

Fig. 3 Arrival time estimation of integer symbol period based on local cross correlation

2.2 小数采样周期信号到达时间估计

利用导频序列本地互相关模块估计得到的整数采样周期信号到达时间对接收信号进行时间校正,时间校准后频域导频信号可以表示为

$$Z_l = a e^{j\phi} s_l e^{-\frac{j2\pi r_{\text{float}}}{NT}} + W_l \quad (5)$$

式中, W_l 表示第 l 个子载波上的加性高斯白噪声。由于 s_l 已知,假定某一子载波数量间隔为 v ,且 v 是正整数, v 越小,能够估计的定时偏差范围越大,反之,亦然。利用导频序列本地互相关模块能够获得准确的整数采样周期估计,因此,小数采样周期

信号到达时间重点解决 1 个符号周期偏差范围内的精确估计即可,因此, v 取值为 $N/2$ 。令

$$P = \sum_{l=0}^{N-v-1} Z_{l+v} X_{l+v}^* Z_l X_l^* \quad (6)$$

结合式(5)和式(6),可得

$$P = |a|^2 e^{-\frac{j2\pi v r_{\text{float}}}{NT}} \sum_{l=0}^{N-v-1} |X_{l+v}|^2 |X_l|^2 + W' \quad (7)$$

式中, W' 是噪声项。 P 的相位为

$$\hat{\varphi} = \text{angle}(P) \quad (8)$$

式中, $\text{angle}(\cdot)$ 表示取相位运算。如图4所示,每幅子图为式(6)、式(7)中 $0, 1, \dots, N-v-1$ 个

采样点展现出来的相位样值。通过计算这些相位的平均值可以看出,没有时延时,其相位平均值约为 0;1/4 符号时延偏差时,其相位平均值约为 0.78 ($\pi/4$);1/2 符号时延偏差时,其相位平均值约为 1.57 ($\pi/2$);3/4 符号时延偏差时,其相位平均值约为 2.35 ($3\pi/4$)。因此,式(8)计算求解的相位与分数符号周期时延之间存在一一对应关系。因此,SCFDE 信号的信号达到时间频域估计为

$$\tau_{float} = \frac{\hat{\varphi}}{-2\pi\nu}NT_s \quad (9)$$

综合整数采样周期信号到达时间估计和小数采样周期信号到达时间估计,设此信号到达时间为 $\nabla\tau$, 则信号到达时间的估计值为

$$\nabla\hat{\tau} = \hat{\tau}_{int} + \hat{\tau}_{float} \quad (10)$$

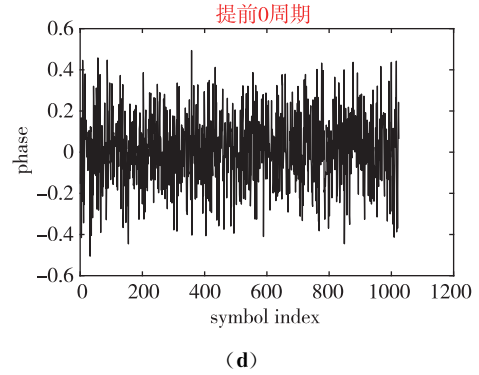
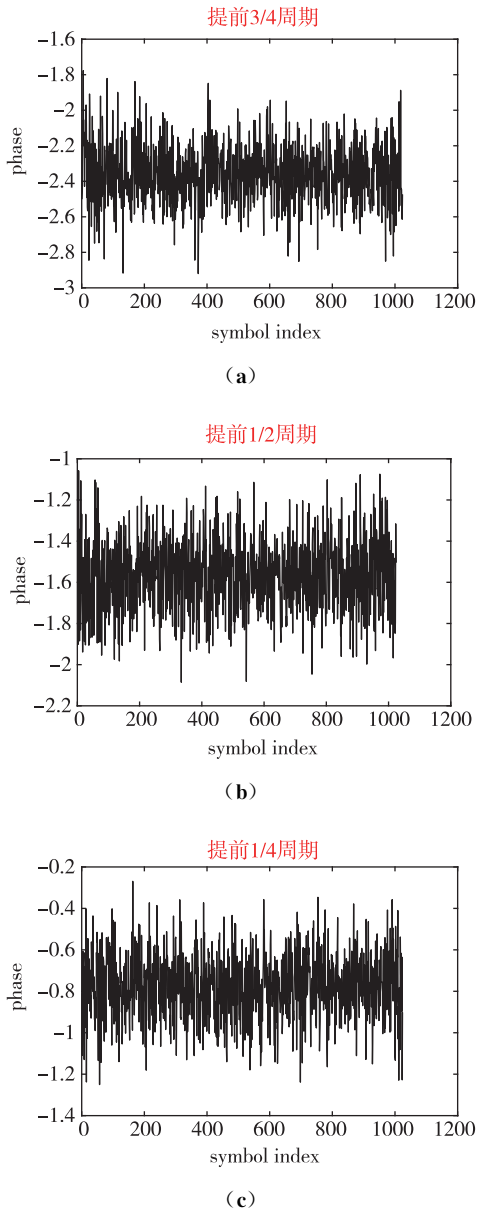


图 4 基于延时差分的小数符号周期时间估计
Fig. 4 Arrival time estimation of decimal symbol period based on differential delay correlation

3 仿真分析

3.1 基于 SCFDE 的 DSSS 系统的通信性能

随着扩频倍数的增加,系统能否稳定获得扩频增益的改善是衡量所提方案用于构建通信链路的有效性的一个重要指标。因此,对基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在各种信道环境下进行误码率仿真分析。首先,仿真分析了基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在高斯白噪声信道环境下的误码性能。

图 5 给出了系统误码性能随接收信号信噪比变化的曲线,可以看出,随着扩频倍数的增加,系统的误码性能有明显改善,且扩频倍数每增加 1 倍,接收性能改善约 2dB。

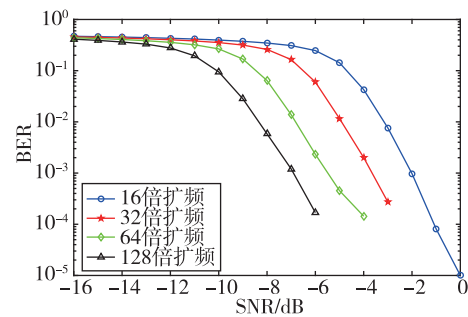


图 5 高斯白噪声信道条件下误码性能随接收信号信噪比的变化曲线

Fig. 5 Curves of BER with SNR under AWGN channel

其次,仿真分析了基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在典型多径信道环境下的误码性能。

图 6 给出了本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统不同扩频倍数下误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。可以看出,随着扩频倍数的增加,系统的

误码性能稳步改善,且扩频倍数每增加1倍,接收性能改善约1.6dB。因此,基于SCFDE的宽带DSSS系统能够适应复杂多径环境,实现可靠通信。

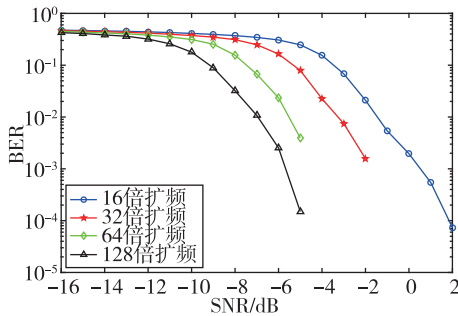


图6 多径信道条件下误码性能随接收信号信噪比的变化曲线

Fig. 6 Curves of BER with SNR under multi-path channel

3.2 基于SCFDE的DSSS系统的信号到达时间估计精度

信号到达时间估计精度是影响无线电定位系统的核心,因此,本文对基于SCFDE的宽带DSSS系统在各种信道环境下信号到达时间估计精度进行仿真分析,评估实现无线定位的可行性。具体仿真参数如表2所示。

表2 系统仿真参数

Tab. 2 Parameters of simulation system

信道带宽	采样速率	扩频倍数	信道类型 I	信道类型 II
12.8MHz	51.2MHz	128	高斯白噪声信道	IEEE 802.11g 信道模型
				最大多普勒频移 $f_d = 100\text{Hz}$
				多径信道平均时延 $t_{rms} = 20\text{ns}$

仿真分析了基于SCFDE的宽带DSSS系统在高斯白噪声和多径信道环境下的小数采样周期信号到达时间的估计精度。整数采样周期信号到达时间估计和小数采样周期信号到达时间估计模块是同时工作的,且需要这两个模块相互配合才能实现高精度的信号到达时间估计。由于CAZAC具有良好的相关特性,可以准确完成整数采样周期信号到达时间估计和补偿,此时理想的小数采样周期信号到达时间应该为零。但是由于噪声、多径等因素的影响,导致估计的小数采样周期信号到达时间存在误差,本文将该误差作为评估小数采样周期信号

到达时间估计精度的依据。

图7给出了本文所提基于SCFDE的宽带DSSS系统小数采样周期信号到达时间估计精度随接收信号信噪比的变化曲线。可以看出,其估计误差会随着系统信噪比的恶化而增大。高斯白噪声信道条件下,估计误差随信噪比增大而线性降低;多径环境下,估计误差随信噪比变化存在平层。但是,无论是高斯白噪声信道还是多径信道,在系统接收信号信噪比不低于0dB的条件下,小数采样周期信号到达时间的估计误差不会大于0.3个采样时刻,显著提升了信号到达时间的估计精度,满足定位授时所需的高精度时间同步要求。

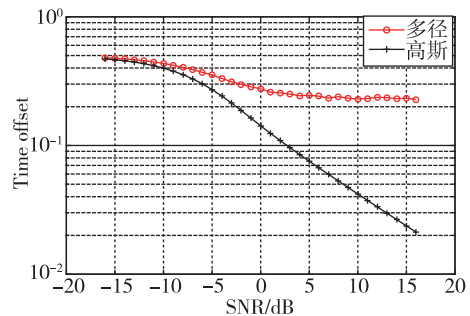


图7 小数采样周期到达时间估计精度随接收信号信噪比的变化曲线

Fig. 7 Curves of arrival time estimation accuracy of decimal sampling period with SNR

4 结论

本文提出了一种SCFDE与DSSS技术有机结合的通信定位一体化波形,在具有较高速率、抗窄带干扰通信能力的同时,利用CAZAC序列优良的自相关和互相关特性,将其作为导频序列并计算导频序列与本地导频符号的循环移位相关,检测相关峰值即可实现整数符号周期信号到达时间估计。特别地,结合用于信道估计的导频序列,构建差分延时相关模型,实现载波相位估计,完成小数采样周期信号到达时间估计,从而实现高精度的信号到达时间估计。

参考文献

- [1] 王慧楠. 飞行器群通信和相对定位一体化方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
Wang Huinan. Research on the integrated method of communication and relative positioning between aircraft group[D]. Xi'an: Xidian University, 2018(in Chinese).

- [2] 许笑笑. 通信导航一体化波形设计与接收方法优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Xu Xiaoxiao. Joint waveform design of communication and navigation and the optimization of receive method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [3] Brock J C, Wright C W, Sallenger A H, et al. Basis and methods of NASA airborne topographic mapper lidar surveys for coastal studies[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002; 1-13.
- [4] Ai G X, Shi H L, Wu H T, et al. A positioning system based on communication satellites and the Chinese area positioning system (CAPS)[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2008, 8(6): 611-630.
- [5] Bokulic R S, Reinhart M J, Willey C E, et al. Advances in deep-space telecommunications technology at the applied physics laboratory[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(2-6): 467-474.
- [6] 冯奇. 基于 V-OFDM 调制的卫星通信与导航一体化系统[D]. 南京: 南京大学, 2017.
Feng Qi. Integrated satellite communication and navigation system based on V-OFDM modulation [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017(in Chinese).
- [7] 邓中亮, 尹露, 唐诗浩, 等. 室内定位关键技术综述[J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(3): 14-23.
Deng Zhongliang, Yin Lu, Tang Shihao, et al. A survey of key technology for indoor positioning[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(3): 14-23(in Chinese).
- [8] 王慧强, 高凯旋, 吕宏武. 高精度室内定位研究评述及未来演进展望[J]. *通信学报*, 2021, 42(7): 198-210.
Wang Huiqiang, Gao Kaixuan, Lyu Hongwu. Survey of high-precision location and the prospect of future evolution[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(7): 198-210(in Chinese).
- [9] Shao J, Karsilayan A I, Rodenbeck C T, et al. An interference-tolerant synchronization scheme for wireless communication systems based on direct sequence spread spectrum[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(1): 415-427.
- [10] 宋建材, 赵小明, 杨兴文, 等. Costas 环在无线扩频定位系统中的应用技术研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(2): 56-59.
Song Jiancai, Zhao Xiaoming, Yang Xingwen, et al. Application of Costas loop in wireless spread spectrum positioning system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(2): 56-59(in Chinese).
- [11] Kenney B A, Jenkins S N, Majid A J, et al. Cyclic prefix direct sequence spread spectrum capacity analysis [C]// *Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conferences (VTC2020-Fall)*. IEEE, 2020: 1-6.
- [12] Baum K L, Thomas T A, Vook F W, et al. Cyclic-prefix CDMA: an improved transmission method for broadband DS-SS cellular systems[C]// *Proceedings of 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record, WCNC 2002 (Cat. No. 02TH8609)*. IEEE, 2002: 183-188.
- [13] Jenkins S N, Kenney B A, Majid A J, et al. CP-DSSS: a novel waveform for multiple access in IoT[C]// *Proceedings of 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. 2020: 1-5.
- [14] Farhang-Boroujeny B, Majid A, Moradiz H. CP-DSSS: an OFDM compatible variable rate modulation for 5G and beyond[C]// *Proceedings of 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*. 2020: 578-583.
- [15] 宫丰奎, 文妮, 李果, 等. 基于 CAZAC 序列的低复杂度抗频偏同步算法[J]. *通信学报*, 2021, 42(2): 64-71.
Gong Fengkui, Wen Ni, Li Guo, et al. Low-complexity and frequency-offset-robust synchronization algorithm based on CAZAC sequence[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(2): 64-71(in Chinese).

(编辑: 孟彬)