文章编号:1008-1542(2022)04-0386-07

PCSS 通信测距复合系统中一种改进的映射方法

孙　铭[1],侯艳丽[2],郭　鑫[2]

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所,河北石家庄　050081;2.河北科技大学信息科学与工程学院,河北石家庄　050018)

摘　要:为了提高通信测距复合系统的信息传输速率,实现数据与序列的完全映射,将并行组合扩频技术(parallel combinatory spread spectrum,PCSS)应用于复合系统,提出了一种改进的 r_组合数据序列映射方法。在发送端采用所提出的映射方法实现数据的扩频传输,在接收端采用改进的广义互相关算法进行时延估计和数据解扩,同时实现了信息传输和距离测量。仿真结果表明,改进的数据序列映射方法实现了映射的唯一性,提高了数据的映射效率,提升了 PCSS 通信测距复合系统的信息传输速率;改进的广义互相关算法在低信噪比下具有更好的时延估计性能。因此,所提方法能使 PCSS 通信测距复合系统更有效地完成测距任务和通信任务,可为通信测距复合系统的理论研究和工程应用提供参考。

关键词:无线通信技术;通信测距复合系统;PCSS;数据序列映射;时延估计;广义互相关

中图分类号:TN911.7　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2022yx04006

An improved sequence mapping method in PCSS communication and ranging composite system

SUN Ming[1], HOU Yanli[2], GUO Xin[2]

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China; 2. School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei, 050018, China)

Abstract: In order to improve the information transmission rate of the communication and ranging composite system and realize the complete data-sequence mapping, the parallel combinatory spread spectrum (PCSS) technology was applied to the composite system, so that an improved r_combinatory data-sequence mapping method was proposed. The proposed mapping method was used to implement the data spreading transmission at the transmitter, and an improved generalized cross-correlation algorithm was adopted to estimate the transmission time delay and data despreading at the receiver then the

收稿日期:2021-09-17;修回日期:2022-06-16;责任编辑:王淑霞

基金项目:河北省重点研发计划项目(21355901D)

第一作者简介:孙　铭(1987—),女,河北石家庄人,高级工程师,主要从事电子通信方面的研究。

通讯作者:侯艳丽副教授。E-mail:houyanli26@126.com

孙铭,侯艳丽,郭鑫.PCSS 通信测距复合系统中一种改进的映射方法[J].河北科技大学学报,2022,43(4):386-392.

SUN Ming, HOU Yanli, GUO Xin. An improved sequence mapping method in PCSS communication and ranging composite system[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(4): 386-392.

information transmission and distance measuring were implemented at the same time. The simulation results show that the improved data-sequence mapping method realizes the uniqueness of mapping, improves the data mapping efficiency and the information transmission rate of the PCSS communication and ranging composite system. The improved generalized cross-correlation algorithm has better delay estimation performance under low signal-to-noise ratio (SNR). Therefore, the proposed method makes the PCSS communication and ranging composite system accomplish ranging tasks and communication tasks more effectively, which provides a reference for the theoretical research and engineering application of the composite system.

Keywords: wireless communication technology; communication and ranging composite system; PCSS; data-sequence mapping; time delay estimation; generalized cross correlation

通信测距复合系统(简称复合系统)可以同时完成信息传输和距离测量,降低了设备的复杂程度和功耗。由于扩频技术有着较高的测距精度和良好的抗干扰能力,所以扩频系统能够完成通信任务和测距任务[1-2]。对于复合系统,通信性能和测距性能需要同时兼顾,而基于直扩技术的复合系统为获得好的通信性能和测距性能对伪随机码有着矛盾的需求。基于软扩频技术的复合系统可以缓解这种矛盾需求,但通信效率很低。随着具有更高传输速率的扩频技术-并行组合扩频技术(parallel combinatory spread spectrum,PCSS)的提出[3],学者们逐渐展开关于 PSCC 的研究和应用,主要集中于 PCSS 和各种多址方式的结合、PCSS 的抗干扰能力分析以及 PSCC 的数据映射方法等,关于将 PCSS 应用于复合系统的报道较少。数据映射是 PCSS 技术中的核心部分,决定了系统的传输性能。文献[4]采用一种数据调制映射算法,但是存在解调不唯一的矛盾。文献[5]提出了一种图匹配法,该算法的信息数据计算量较大,不易实现。文献[6]将基于 r-组合的数据序列映射算法应用在 PCSS 系统中,但是存在映射不全面的问题。文献[7]提出了一种改进的 r-组合数据序列映射算法,解决了输入数据全为 0 时不能映射的问题,但是当参数出现变化时,未提出解决方法。文献[8]提出一种基于 r-组合的可控映射算法,解决了任意参数下发送数据为 0 时不能映射的问题。

本文将 PCSS 技术应用于复合系统,并在文献[8]的基础上提出一种改进的 r_组合数据映射方法,同时采用改进的时延估计算法进行接收端的相关解扩和到达时间差估计。

1　PCSS 通信测距复合系统的一般模型

基于 PCSS 复合系统的模型如图 1 所示。在发送端,待传输的通信数据进行 k 比特分组,每组(d_1,d_2,…,d_k)数据进行串/并转换,同时序列发生器生成 M 个备选伪随机序列(PN_1,PN_2,…,PN_i,…,PN_M),基于这 k 比特数据按照数据映射算法从 M 个备选序列中选择 r 个序列,并赋予他们一定的正负极性($q_i \in (+1,-1)$,$i=1,2,\cdots,r$);然后将这 r 个序列进行带极性累加,得到待传输的组合序列 S,再对组合序列进行数字调制后发送出去。

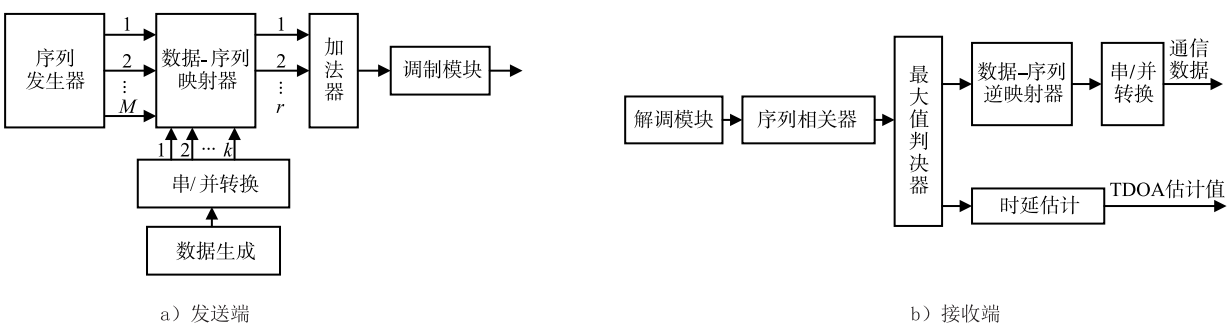


图 1　PCSS 复合系统模型

Fig.1　Model of PCSS composite system

$$S(j)=\sum_{i=1}^{r} q_i \mathrm{PN}_i(j), \qquad 1 \leqslant j \leqslant L \ , \tag{1}$$

式中:L 表示扩频序列的长度;$\mathrm{PN}_i(j)$表示第 i 个扩频序列的第 j 个比特位。

在接收端,将数字解调恢复出的序列和本地的 M 个序列作相关运算,得到系统的时延估计值,计算得到距离值,完成距离测量;同时估计出被使用的 r 个序列,进而利用数据逆映射方法恢复通信数据,完成信息传输。

2 PCSS通信测距复合系统的关键技术

2.1 改进的 r-组合数据序列映射算法

数据序列映射算法是组合扩频系统的最主要部分,直接影响到系统的传输能力[9-10]。目前比较常用的是基于 r-组合的映射算法,存在数据全零时不能映射的问题,后续出现了改进方法,其中效果较好的是文献[8]提出的基于 r-组合的数据序列可控映射算法、以及在此基础上的基于参考序列的改进方法及基于序列位置加权的改进方法。为进一步提高复合系统的传输速率,满足高速率应用需求,本文充分利用文献[8]中3种改进方法的优势,提出一种改进的 r-组合数据序列映射方法,可以实现 k' 比特信息与 C_M^r 种 r-组合的一一映射,而标准的 r-组合数据序列映射仅可实现 k 比特的信息映射,文献[8]中最多可实现($k'-1$)比特的信息映射。

$$k'=k+1+[\log_2(r+1)]\ , \tag{2}$$

$$k=r+[\log_2 C_M^r]\ 。 \tag{3}$$

2.1.1 基于改进的 r-组合数据序列映射

假设备选的序列集合有($M+1$)个伪随机序列,任意选取一个序列当作参考序列 PN_0,同时把其余的序列进行编号 $\mathrm{PN}_1,\mathrm{PN}_2,\cdots,\mathrm{PN}_M$。把系统输入数据进行串并转换后的每($k+1+[\log_2(r+1)]$)比特信息分为 d_c,d_s 和 d_p 3部分。其中 d_s 为 r 比特,确定发送的 r 个序列的极性;d_p 为 $[\log_2(r+1)]$ 比特数据,确定发送的 r 个序列的加权位置;d_c 为($k-r+1$)比特,将其转化为十进制数 N'_d,以确定被选的 r 个序列。

$$N'_d=d_1\cdot 2^0+d_2\cdot 2^1+\cdots+d_{k-r+1}\cdot 2^{k-r}+c\ , \tag{4}$$

式中:c 为正整数常量,为完成数据与序列的映射,应满足 $0\leqslant c-1\leqslant 2C_M^r-2^{k-r+1}$。按照 N'_d 的取值可以分为2种情况。

1)当 $1\leqslant N'_d\leqslant C_M^r-1$,则 $N_d=N'_d+1$。此时根据文献[11]中定理1能够直接确定序列集合中的 r 个序列与其对应,并将序列按照在原序列集中的先后顺序进行自然数排序。根据 d_s 确定 r 个序列的正、负极性,再根据 d_p 的值确定对 r 个序列中哪一个序列进行较大系数的加权,并且发送正极性的参考序列 PN_0,最后把参考序列和 r 个扩频序列进行叠加,得到发射序列。

$$S(j)=\sum_{i=1}^{r}q_i w_i \mathrm{PN}_i(j)+\mathrm{PN}_0(j),\qquad 1\leqslant j\leqslant L\ , \tag{5}$$

$$q_i=(-1)^{b_i},\qquad 1\leqslant i\leqslant r\ , \tag{6}$$

$$w_i=\begin{cases}1, & N_p\neq 0, i\neq N_p,\\ W, & N_p\neq 0, i=N_p,\\ 1, & N_p=0。\end{cases}\quad 1\leqslant i\leqslant r\ , \tag{7}$$

式中:q_i 表示第 i 个序列的极性;w_i 表示第 i 个序列的加权系数;$\mathrm{PN}_0(j)$ 表示参考序列 PN_0 的第 j 个比特位;$\mathrm{PN}_i(j)$ 表示第 i 个扩频序列 PN_i 的第 j 个比特位;b_i 是 d_s 中第 i 位的比特值;N_p 是 d_p 段转化后的十进制数;W 为大于1的自然数。

2)当 $C_M^r\leqslant N'_d\leqslant 2C_M^r$,根据式(8)求得 N_d,采用和情况1)中相同的方法选择 r 个序列,确定 r 个序列的极性和待加权的一个序列,并且发送负极性的参考序列 PN_0,最后把参考序列和 r 个扩频序列进行叠加,得到发射序列,见式(9)。

$$N_d=(N'_d)\bmod C_M^r+1\ 。 \tag{8}$$

式中:$(N'_d)\bmod C_M^r$ 为 N'_d 关于 C_M^r 的余数,取值范围为[1,C_M^r]。

$$S(j)=\sum_{i=1}^{r}q_i w_i \mathrm{PN}_i(j)-\mathrm{PN}_0(j),\qquad 1\leqslant j\leqslant L\ 。 \tag{9}$$

2.1.2 基于改进的 r-组合数据序列逆映射

在PCSS接收端,将恢复的并行组合扩频序列分别与本地的($M+1$)个备选序列作相关运算,首先根据相关运算结果确定参考序列 PN_0 的极性、发送端选择传输用的 r 个序列及其极性,再恢复数据 d_c,d_s 和 d_p。具体如下。

1)根据接收的序列与本地参考序列作相关运算的结果,确定参考序列 PN_0 的极性。

2)依据相关解扩的结果确定被选择的 r 个序列的序列编号,根据文献[11]中定理 2 求得 N_d。当参考序列为正极性时,$N'_d=N_d-1$,根据式(4)恢复出 d_c 对应的$(k-r+1)$比特信息数据;当参考序列为负极性时,根据式(10)求得 N'_d,再根据式(4)恢复 d_c 对应的数据。

$$N'_d=N_d+C_M^r-1\ 。\tag{10}$$

3) 根据 r 个相关峰值的极性可以恢复出 d_s 部分的 r 比特数据。

4) 将 r 个扩频序列根据编号由小到大进行排序,判断相关器输出绝对值的最大值是否大于式(11)中的门限值 TH,当排在第 i 个序列相关器输出绝对值最大且超过门限值 TH 时,则 $N_p=i$,将 N_p 转化为二进制数得到 d_p 对应的信息数据;当相关器输出绝对值均小于门限值时,则 $N_p=0$,d_p 对应数据全为 0。

$$\mathrm{TH}=\frac{W+1}{2}\ 。\tag{11}$$

2.2　伪随机序列的选择

在复合系统中,要求伪随机序列的相关性要好,且有足够长的码周期和足够多的独立地址数[12-14]。Gold 序列个数较多,结构简单易于实现,且有着良好的相关特性[15-16],适用于扩频通信相关解扩以及时延估计求解,是 PCSS 系统中常用的扩频序列。本文选择 Gold 序列作为备选伪随机序列。

2.3　改进的广义互相关算法

PCSS 复合系统利用相关运算进行时延估计,辅助实现数据-序列的逆映射。基于相关函数的时延估计算法较多,现有的通信测距复合系统中主要采用普通互相关算法[17]、广义互相关算法[18-21]以及循环相关算法[22]等。其中,循环相关算法的性能最优,但计算量较大,综合考虑算法的性能以及运算的复杂性,本文采用一种改进的广义互相关算法,减少了噪声的影响,增大了主峰和次峰的相对值,其工作原理如图 2 所示。

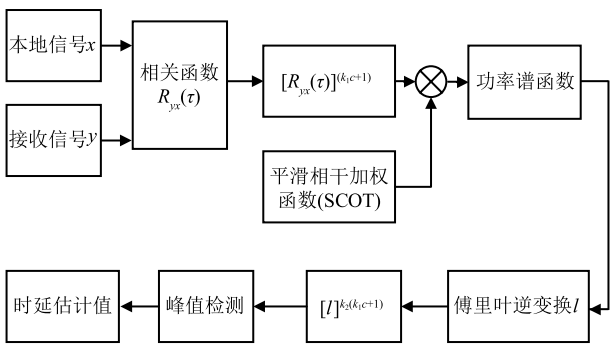


图 2　改进的广义互相关算法流程图

Fig.2　Flow chart of the improved generalized cross-correlation algorithm

图 2 中,k_1,k_2 为待确定的参数。k_1 值决定了信号和噪声压缩的倍数,为了削弱低信噪比下噪声对信号的干扰,k_1 应取任意小数;k_2 值决定了相关函数的峰值和算法的复杂度,当 k_2 为偶数时,得到的互相关峰值为正数,而为了保证时延估计结果能够体现出扩频序列正、负 2 个极性,k_2 应取奇数,且 k_2 的值越大,算法的复杂度越高。c 为信噪比,单位为 dB,当 $c=0$ 时,指数部分等于 1,结果是相关函数本身;当 $c<0$ 时,可同比例压缩信号与噪声的幅度;当 $c>0$ 时,相关函数能够看作平方运算。l 表示经过傅里叶逆变换后的函数。

3　仿真结果及分析

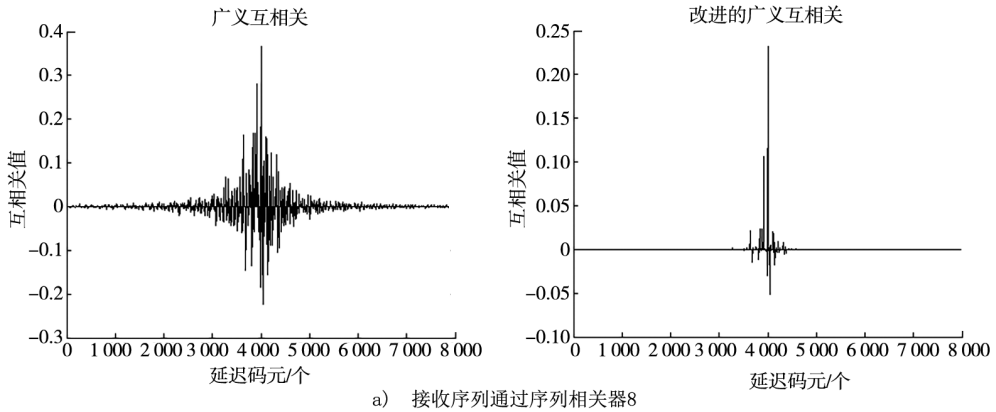
3.1　仿真参数的设置

在 Matlab 平台上建立复合系统的仿真模型,假设高斯白噪声信道。在改进的 r-组合数据序列映射方法中,设 $M=16$,$r=3$,则 $k=12$,$k'=15$,设式(4)中的常数项 c 取值为 50,选择 6 阶平衡 Gold 序列(按顺序标号记为 Gold1,Gold2,...,Gold17)作为备选扩频码,其中,Gold17 为参考序列。在改进的广义互相关算法中,设 $k_1=0.001$,$k_2=3$。

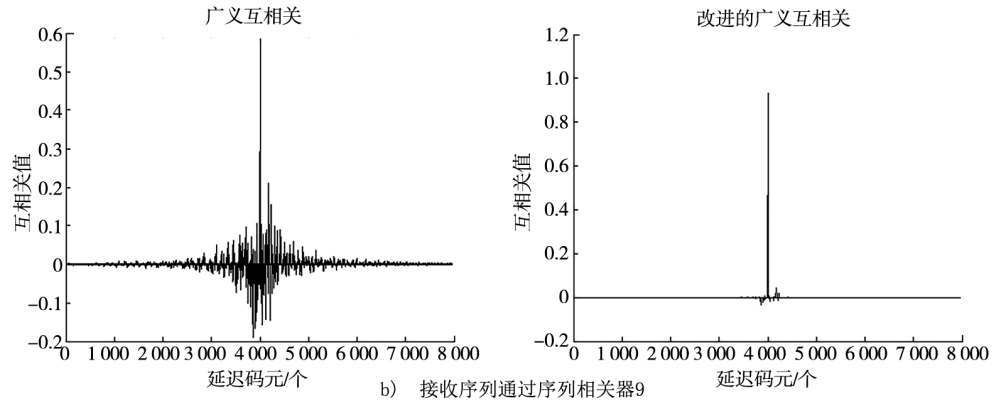
信号频率为 15 MHz,载波频率为 150 MHz,采用 16QAM 调制,信噪比为 −5 dB,随机产生 15 位二进制通信数据 011011000000110,每个码片周期采样 8 个点,假设接收信号延迟 4 000 个采样。

3.2 系统性能分析

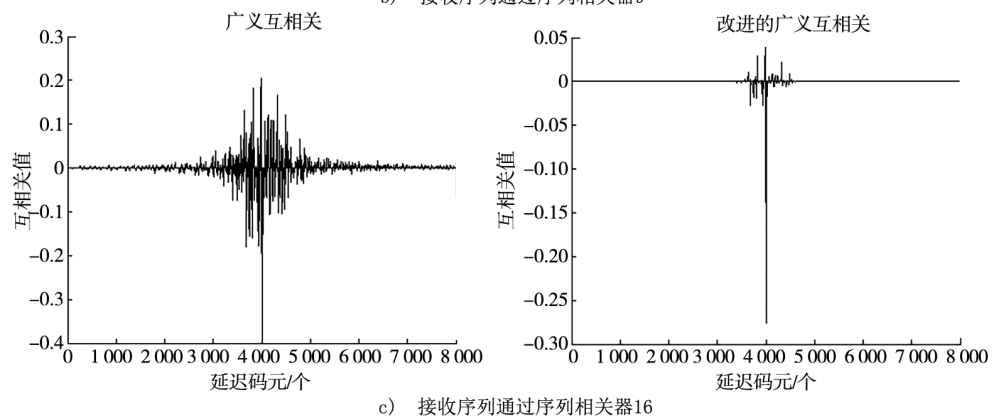
在接收端将解调后的扩频序列经过 17 个序列相关器，根据互相关函数峰值出现的时刻估计时延和“2.1.2”中基于改进的 r-组合数据序列逆映射方法恢复通信数据。相关运算采用改进的广义互相关算法，并且和广义互相关算法进行比较，仿真结果如图 3 所示。



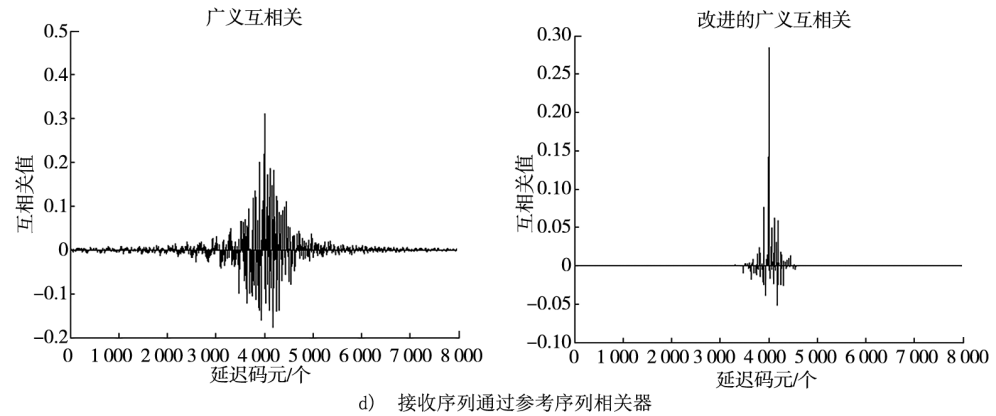
a) 接收序列通过序列相关器8



b) 接收序列通过序列相关器9



c) 接收序列通过序列相关器16



d) 接收序列通过参考序列相关器

图 3 SNR＝－5 dB 时延估计结果图

Fig.3 Time delay estimation results with SNR＝－5 dB

从图 3 可以看出，由相关器的峰值位置估计出信号延迟了 4 000 个采样，与发送端的设置相同；参考序列极性为正，除参考序列外，有 3 个序列相关器得到较大的相关峰值，依次为 Gold8，Gold9，Gold16，对应的序列号为{8，9，16}，根据文献[11]中定理 2 可求得组合序号 $N_d=483$，且由于参考序列相关值的极性为正，所以 $N'_d=N_d-1=482$，由式(4)可得 d_c 部分对应的十进制数为 432，转化为二进制数据 $d_c=0110110000$。根据第 8、第 9 和第 16 号相关器峰值的极性，恢复出信息数据 $d_s=001$。排在第 2 个序列相关器输出绝对值最大，因此 $N_p=2$，转化为二进制数得到 $d_p=10$。恢复出的二进制通信数据为 011011000000110，与发射端的通信数据一致，说明通信数据恢复正确。所以，PCSS 通信测距复合系统同时完成了通信任务和测距任务。由图 3 还可以看出，与广义互相关算法相比，改进的广义互相关算法的相关函数峰值更加突出，抗噪声性能更好，时延估计性能更好，在较低的信噪比下具有明显的优势。

在信噪比为－15～5 dB 条件下，分析 PCSS 复合系统中的误比特率性能，分别采用基于 r-组合的映射方法和本文改进的 r-组合映射方法，PCSS 复合系统的误比特率如图 4 所示。由图 4 可以看出，改进的 r-组合的映射方法可以获得较低的误比特率；与基于 r-组合的映射方法相比，性能略差，这是系统有效性提升的代价。具体地，从 16 个备选序列中选取 3 个序列进行信息传输，改进的 r-组合映射算法能够传输 15 比特信息数据，常规的 r-组合映射算法可传输 12 比特信息数据，即改进的 r-组合映射算法比常规的 r-组合的映射算法多传输 3 比特信息数据。

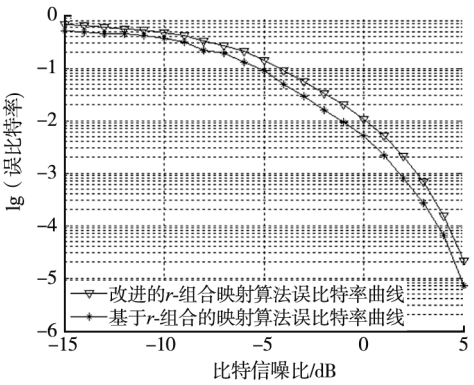


图 4　误比特率曲线图

Fig.4　Bit error rate graph

4　结　语

通信测距复合系统能够同时完成通信任务和测距任务，与同时使用单一的通信系统和测距系统相比，不仅降低了系统设计的成本和复杂度，而且提高了系统的利用效率，扩大了设备的应用领域，在设备日益集成化、小型化的今天，具有广阔的应用前景。基于 PCSS 技术的高速率传输特性，本文将 PCSS 技术应用于通信测距复合系统，针对 PCSS 通信测距复合系统展开研究，为进一步提高系统的信息传输速率，提出一种改进的 r-组合数据序列映射算法；为提升 PCSS 复合系统在低信噪比下的检测性能，利用改进的广义互相关算法进行接收端的相关解扩和时延估计。仿真结果表明，改进的 r-组合数据序列映射方法实现了通信数据和伪随机序列的完全映射，同时提高了数据的映射效率，使 PCSS 通信测距复合系统在满足可靠性需求的同时，实现了更多比特数据的映射，进一步提高了复合系统的信息传输速率。与广义互相关算法相比，改进的广义互相关算法在低信噪比下具有更好的时延估计性能，能更有效地辅助完成通信任务和测距任务。

本文从信息传输速率以及时延估计性能等方面对基于 PCSS 的通信测距复合系统进行优化，由于时间限制，本研究是在假设 PCSS 通信测距复合系统已经精确同步的基础上进行的，而复合系统的同步方式是一项任务量较大的工作，后续需要进一步开展研究。

参考文献/References：

[1] RAHMAN M R，BOJJA-VENKATAKRISHNAN S，ALWAN E A，et al.Spread spectrum techniques for interference mitigation in large bandwidth[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting，Atlanta，GA，USA：IEEE，2019：617-618.

[2] 迟博恩.基于 FMCW 雷达的多目标测距与定位系统的研究及实现[D].成都：电子科技大学，2020.
CHI Boen.Research and Implementation of Multi-target Ranging and Positioning System Based on FMCW Radar[D].Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2020.

[3] 高维珉，张永翼，苏爱东.并行组合扩频通信系统的自适应变速率数据传输模型[J].现代电子技术，2020，43(13)：32-35.
GAO Weimin，ZHANG Yongyi，SU Aidong.Adaptive variable rate data transmission model for parallel combinatory spread spectrum communication systems[J].Modern Electronics Technique，2020，43(13)：32-35.

[4] 衣强.并行组合扩频系统抗干扰性能及映射算法研究[D].哈尔滨：哈尔滨工程大学，2007.
YI Qiang.The Research on the PCSS Anti-jamming Performance and Mapping Method[D].Harbin：Harbin Engineering University，2007.

[5] 柴婉聪.基于 MQAM 调制的多路并行组合扩频通信系统的设计[D].哈尔滨：哈尔滨工程大学，2015.

CHAI Wancong.Design of Multi-Channel PCSS System Based on MQAM[D].Harbin:Harbin Engineering University,2015.

[6] 王奇.基于并行组合扩频的通信测距系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
WANG Qi.Research on Communication Ranging System Based on Parallel Combinatory Spread Spectrum[D].Harbin:Harbin Engineering University,2019.

[7] 王玫,郭黎利,于奇.基于改进 r-组合映射编码并行组合扩频通信系统的分析[J].舰船电子工程,2008,28(10):78-81.
WANG Mei,GUO Lili,YU Qi.Analysis of coded parallel combinatory spread spectrum comunication system based on improved r-combinatory mapping[J].Ship Electronic Engineering,2008,28(10):78-81.

[8] 姜晓斐.并行组合扩频超宽带通信系统的关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
JIANG Xiaofei.Research on Key Technologies of UWB Communication Systems Based on Parallel Combinatory Spread Spectrum[D].Harbin:Harbin Engineering University,2012.

[9] CHEN Jiaxin,LU Shuling,WANG Qi,et al.Ranging technology based on parallel combined spread spectrum communication technology[C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT).Harbin,China:IEEE,2019:884-887.

[10] 李北明,王俊,薛伟,等.基于循环映射算法的并行组合扩频通信[J].系统工程与电子技术,2016,38(7):1654-1659.
LI Beiming,WANG Jun,XUE Wei,et al.Parallel combinatory spread spectrum communication system with cyclic mapping algorithm[J].Systems Engineering and Electronics,2016,38(7):1654-1659.

[11] 杜鹏宇.移动扩频水声通信及多址技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
DU Pengyu.Research on Mobile Spread Spectrum Underwater Acoustic Communication and Multiple Access Technology[D].Harbin:Harbin Engineering University,2016.

[12] SIHVO J,STROE D I,MESSO T,et al.Fast approach for battery impedance identification using pseudo-random sequence signals[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(3):2548-2557.

[13] 曾凌川,白燕,卢晓春,等.一种基于调制 m 序列的直接序列扩频信号调制方法[J].电子与信息学报,2021,43(8):2156-2164.
ZENG Lingchuan,BAI Yan,LU Xiaochun,et al.A signal modulation method of direct sequence spread spectrum based on modulated m-sequence[J].Journal of Electronics & Information Technology,2021,43(8):2156-2164.

[14] 刘心溥,元志安,王玲,等.副载波调制水下激光雷达测距性能仿真[J].红外与激光工程,2020,49(sup2):87-95.
LIU Xinpu,YUAN Zhian,WANG Ling,et al.Performance simulation of underwater lidar ranging system based on subcarrier modulation technology[J].Infrared and Laser Engineering,2020,49(sup2):87-95.

[15] 陈善学,杨翼豪,李方伟.基于扩频通信的伪随机码时间反演多址通信[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(2):248-254.
CHEN Shanxue,YANG Yihao,LI Fangwei.Pseudo-noise code time-reversal division multiple access communication based on spread spectrum communication[J].Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition),2020,32(2):248-254.

[16] TIAN Guoda,ODETALLA H,PRIYANTO B E,et al.Modified gold sequence for positioning enhancement in NB-IoT[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).Marrakesh,Morocco:IEEE,2019:1-6.

[17] 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.

[18] COMANDUCCI L,COBOS M,ANTONACCI F,et al.Time difference of arrival estimation from frequency-sliding generalized cross-correlations using convolutional neural networks[C]//IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing (ICASSP).Barcelona,Spain:IEEE,2020:4945-4949.

[19] DONG Zhe,YU Ming.Research on TDOA based microphone array acoustic localization[C]//2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI).Qingdao:IEEE,2015:1077-1081.

[20] 张伟,董阳泽,张刚强,等.一种基于广义互相关的水声直扩信号检测方法[J].声学技术,2021,40(1):44-48.
ZHANG Wei,DONG Yangze,ZHANG Gangqiang,et al.A detection method of underwater acoustic DSSS signal based on generalized cross-correlation[J].Technical Acoustics,2021,40(1):44-48.

[21] 钱隆彦,陈卫松,肖梦迪.基于广义二次互相关的低信噪比信号时延估计[J].无线电通信技术,2020,46(1):93-97.
QIAN Longyan,CHEN Weisong,XIAO Mengdi.Time delay estimation algorithm for low signal-to-noise ratio signals based on generalized quadratic cross correlation[J].Radio Communications Technology,2020,46(1):93-97.

[22] 吴昊,茅玉龙,曹俊纺.基于循环谱相关的雷达信号脉内分析改进算法[J].火力与指挥控制,2016,41(9):123-127.
WU Hao,MAO Yulong,CAO Junfang.A improved method based on cyclic spectrum correlation to analyze radar signal intra-pulse feature[J].Fire Control & Command Control,2016,41(9):123-127.