全球定位系统
GNSS World of China
• 中国科学引文数据库（CSCD）
• 中国学术期刊（网络版）（CNKI）
• 中文科技期刊数据库
• 中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）
• 中国核心期刊（遴选）数据库
• 中国超星期刊域出版平台
• 日本科学技术振兴机构数据库（JST）

基于正交子空间投影的伪卫星远近效应消除方法

施　上，王　庆，张　波，阳　媛，许九靖

Method for eliminating pseudolite near-far effect based on orthogonal subspace projection

SHI Shang, WANG Qing, ZHANG Bo, YANG Yuan, and XU Jiujing

引用本文:
施上，王庆，张波，等．基于正交子空间投影的伪卫星远近效应消除方法[J]．全球定位系统，2022，47(3)：9-15．DOI: 10.12265/j.gnss.2021111701
SHI Shang, WANG Qing, ZHANG Bo, et al. Method for eliminating pseudolite near-far effect based on orthogonal subspace projection[J]. Gnss World of China, 2022, 47(3): 9-15. DOI: 10.12265/j.gnss.2021111701

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021111701

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于SIC的伪卫星系统抗远近效应捕获算法研究

SIC-based anti near-far effect acquisition method for pseudolites systems

全球定位系统. 2020, 45(1): 12-18

卫星导航干扰抑制与信号增强算法研究

Study on anti-jamming and signal enhancement algorithms for satellite navigation

全球定位系统. 2019, 44(4): 47-52

基于频分相分联合的正交复用技术研究

Study on Orthogonal Multiplexing Technology Based on Frequency-Division and Phase-Division

全球定位系统. 2018, 43(5): 34-37

地基伪卫星单历元三频组合逐级模糊度解算方法

Single epoch three carrier ambiguity resolution for ground base positioning system

全球定位系统. 2020, 45(2): 44-48

可配置多模GNSS信号捕获技术研究

Research on Configurable Multimode GNSS Signal Acquisition Technique

全球定位系统. 2017, 42(1): 39-43

导航系统中的对流层延迟效应分析

Analysis of the Troposphere Delay Effect in Navigation System

全球定位系统. 2018, 43(2): 40-43

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2021111701

基于正交子空间投影的伪卫星远近效应消除方法

施上, 王庆, 张波, 阳媛, 许九靖
(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘　要: 针对地基伪卫星系统中接收机受到远近效应影响无法正确捕获远场伪卫星信号这一问题, 引入了基于正交子空间投影算法的捕获优化方法. 该方法应用于码分多址伪卫星信号, 通过常规滑动相关法得到的强信号码相位和多普勒频移计算正交投影算子, 将接收信号与其在强信号空间的投影相减得到弱信号空间并重新进行捕获, 以消除强信号对弱信号的干扰. 实验结果表明: 强弱信号在小于 30 dB 的功率比范围内, 应用正交子空间投影法可以有效改善弱信号捕获性能. 这对拓宽地基伪卫星系统的有效工作范围、提升伪卫星接收机信号功率比容忍限度具有重大意义.

关键词: 地基伪卫星系统; 码分多址 (CDMA); 远近效应; 正交子空间投影; 弱信号捕获概率
中图分类号: P228.4　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1008-9268(2022)03-0009-07

0　引　言

近年来, 随着社会的发展, 高精度的定位信息数据需求不断增大. 全球卫星导航系统 (GNSS) 因其自身信号传输的特性, 在城市、隧道、峡谷、室内等特殊场景无法发挥有效作用[1]. 在这些场景下布设伪卫星系统可以起到区域增强的作用, 其信号体制和 GNSS 的兼容性增加了可见卫星的数量, 从而提高用户设备的性能; 除此之外, 4 颗以上的伪卫星也可以实现自组网, 独立提供指定区域的定位服务[2]. 因此伪卫星系统有着良好的应用前景.

与 GNSS 的室外开阔应用场景相比, 伪卫星的应用场景具有相对狭小的特点, 发射机与接收机距离很近, 不同发射机与接收机之间的相对距离变化很大, 接收信号强度存在明显的差异[3]. 而伪随机码之间不完全正交的特性使其对功率的容忍度是有限的, 在一些位置上, 当强弱信号的接收功率比超过限度时, 会产生"远近效应", 使得伪随机码的自相关峰不够突出甚至不如互相关峰的现象, 远场伪卫星被近场伪卫星"遮蔽", 导致接收机在信号捕获时出现错误. 这对接收机后续准确跟踪可见伪卫星有很大的影响, 可能导致可见伪卫星失锁等问题.

远近效应的抑制方法主要包括信号发射端和接收端两处, 其中在接收端的技术按照实现位置可以分为天线端、基带信号处理端和导航解算端[4]. 天线端和导航解算端的方法需要增加额外设备或是对现有设备进行硬件改动, 成本较高且适用性较差[5]. 而在接收机基带信号处理端的方法具有成本低、无需对现有硬件进行改动和效果明显的优点, 主要有以下四种方法: 串行干扰抵消法、并行干扰抵消法、相关域抵消法和子空间投影法.

文献 [6] 提出了基于串行干扰抵消的 GPS 伪卫星远近效应抑制算法, 文献 [7] 基于该算法提出了一种基于跳时-直接序列扩频 (TH-DSSS) 伪卫星信号的应用. 这一方法的原理是对成功捕获跟踪的强信号进行逐个重构, 然后在原始接收信号中直接减去这些重构信号, 获得理论上的弱信号后再进行捕获. 文献 [8] 提出了基于并行干扰抵消的算法, 该方法的原理与串行干扰抵消法类似, 不同点是采取了并行处理的方法, 同时对成功捕获跟踪的强信号进行重构和消去, 提高了运行的效率. 文献 [9] 提出了基于相关域消除的算法, 通过在信号相关域减去强弱信号的互相关来增强弱信号的自相关, 从而提升对弱信号的捕获性能. 文献 [10] 中提出了一种正交子空间投影方法, 该方法通过传统捕获方法对强信号进行参数估计, 构造强信号空间的正交投影算子, 将接收信号投影到强信号空

收稿日期: 2021-11-17
资助项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFD1100202)
通信作者: 王庆 E-mail: wq_seu@seu.edu.cn

间进行相减得到弱信号与噪声的混合信号, 然后在上述混合信号中再进行捕获来提高弱信号捕获性能.

上述的四种方法中, 串行干扰抵消法需要对强信号进行逐个重构和相减运算. 当存在多个伪卫星强信号时很难保证对接收信号的实时处理; 并行干扰抵消法虽然可以并行进行强信号重构和相减运算, 但是仅适用于信号强度一致的情况, 具有较大局限性; 相关域抵消法因为不是对时域信号进行处理, 所以不能得到理论弱信号, 这对后续的信号处理带来了不便; 正交子空间投影法利用信号向量空间特性, 构造强信号正交投影算子无需估计信号幅度, 只需估计载波频率和码相位, 大大降低了参数估计误差. 根据文献 [11] 的仿真结果, 子空间投影算法复杂度与串行并行干扰抵消法相似, 性能要比串行干扰抵消算法更优秀.

本文分析了伪卫星系统远近效应的产生原因, 在地基伪卫星的应用场景中引入正交子空间投影方法, 并介绍了其原理和实现方法, 最后通过接收机捕获实验验证了该方法对弱信号捕获性能的提升.

1 信号模型

地基伪卫星系统通常由 4 个以上伪卫星发射机组成[12-13], 不同伪卫星发射机分别播发直接序列扩频信号, 其中扩频码采用伪随机码序列, 而每一颗伪卫星的导航电文数据码信号对不同的伪随机码进行调制, 因此构成了码分多址的信号体制.

第i颗伪卫星播发的信号$y_i(t)$为

$$y_i(t) = A_i D_i(t) C_i(t) \cos(2\pi f_i t + \delta_i) + G_i. \tag{1}$$

式中: A_i为发射信号幅度; $D_i(t)$为导航电文数据比特; $C_i(t)$为扩频伪随机码序列; f_i为载波频率; δ_i为载波初相; G_i为发射信号噪声干扰.

在发射机开机上电后, 每颗伪卫星根据预设的频点参数连续播发信号. 因此在接收机端, 天线接收到的信号为可见伪卫星信号的混合信号. 在经过接收机前置低噪声放大器、下变频、模拟低通滤波器和模数转换器等射频前端处理流程后, 高频伪卫星模拟信号会转变为数字中频信号, 该信号经基带数字信号处理模块可以完成对伪卫星信号的捕获、跟踪和数据码同步[14]. 数字中频信号的数学模型为:

$$\begin{aligned} &r(t) = \sum_{j}^{n} r_j(t), \\ &r_j(t) = A'_j D_j(t) C_j(t) \mathrm{e}^{j[2\pi(f_{\mathrm{IF}}+f_{d_j})t+\delta_j]} + g_j, \\ &t = m t_{\mathrm{s}}, m = 0,1,2,\ldots,M-1. \end{aligned} \tag{2}$$

式中: n为可见伪卫星数量; A'_j为经过射频前端处理后的中频信号幅度; f_{IF}为中频信号载波频率; f_{d_j}为多普勒频移; δ_j为中频信号初始相位; t_{s}为采样间隔; M为采样数目.

2 远近效应

本文中的地基伪卫星系统采用码分多址的信号体制, 在接收端捕获利用的是伪随机码近似正交的特性, 基带数字信号处理模块根据本地生成的伪随机码副本与接收信号进行相关运算, 寻找相关函数的峰值, 从而确定捕获的伪卫星号和码相位[15]. 但是在实际的场景应用中, 因为不同伪随机码之间具有不完全正交的特性, 当两个发射机与接收机的距离相差较大时, 接收信号中强弱信号的比值很可能超过扩频伪随机码的隔离度 (C/A 码的隔离度是 23 dB)[7]. 因此接收机本地伪随机码副本与近场发射机信号的互相关峰可能超过与远场发射机信号的自相关峰, 使得接收机错误的识别远场伪卫星的码相位, 得到错误的捕获结果.

以 GPS 使用的 C/A 码为例, 文献 [16] 对其相关性做了理论分析, 得出不同信号的功率比在 20~30 dB 时, 强信号与弱信号 C/A 码的互相关峰超过其自相关锋的概率约为 87.5% 的结论, 这表明在 20 dB以上接收功率比的情况下, 弱信号的捕获过程中极易受到强信号干扰, 导致错误的捕获结果.

3 正交子空间投影算法

因为实际应用场景通常有 4 颗以上的伪卫星发射机, 借鉴文献 [10] 提出的算法, 通过对其估计参数做出进一步改进, 降低计算复杂度, 使其适用于 4 颗以上伪卫星信号共存时的场景, 从而尽可能的消除远近效应, 提高远场弱信号伪卫星的捕获成功率.

3.1 算法原理

根据前文提出的接收机中频信号数学模型, 可以进一步将其划分为k组强信号和 1 组弱信号的组合[17]

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{A}_S + \boldsymbol{W}\boldsymbol{A}_W + \boldsymbol{n}. \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{r} = \left[\boldsymbol{r}(t_0), \cdots, \boldsymbol{r}(t_1)\right]^{\mathrm{T}}$为 M 个采样点的数字中频信号矢量; $\boldsymbol{A}_S = \left[\boldsymbol{A}'_{S1}, \cdots, \boldsymbol{A}'_{Sk}\right]^{\mathrm{T}}$ 为 k 组强信号的幅度矢量; $\boldsymbol{A}_W = \left[\boldsymbol{A}'_{W1}, \cdots, \boldsymbol{A}'_{Wk}\right]^{\mathrm{T}}$为 1 组弱信号的幅度矢量; $\boldsymbol{n}$为噪声干扰矢量, 这里我们近似看作高斯白噪声; $\boldsymbol{S}$为$M \times k$强信号矩阵, M 为采样数目; $\boldsymbol{W}$为$M \times 1$弱信号矩阵, 具体如下所示:

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} s_1(t_0) & \cdots & s_k(t_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_1(t_{M-1}) & \cdots & s_k(t_{M-1}) \end{bmatrix}_{M\times k},$$

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} w_1(t_0) & \cdots & w_1(t_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1(t_{M-1}) & \cdots & w_1(t_{M-1}) \end{bmatrix}_{M\times 1}. \tag{4}$$

式中: $s_a(t_b)=D_a(t_b)C_a(t_b)\mathrm{e}^{j[2\pi(f_{\mathrm{IF}}+f_{d_a})t_b+\delta_a]}$; $w_c(t_b)=D_{k+c}(t_b)C_{k+c}(t_b)\mathrm{e}^{j[2\pi(f_{\mathrm{IF}}+f_{d_{k+c}})t_b+\delta_{k+c}]}$; $a=1,\cdots,k$; $b=0,\cdots,M-1$; $c=1,\cdots,1$.

根据工程矩阵的向量空间理论, 我们可以将$\boldsymbol{S}$和$\boldsymbol{W}$分别看作是由k组强信号向量和 1 组弱信号向量组成的数字中频信号子空间. 然后根据正交子空间投影方法, 首先需要计算将数字中频信号$\boldsymbol{r}$投影到强信号子空间的正交投影算子$\boldsymbol{P}_r$.

$$\boldsymbol{P}_r=\boldsymbol{S}\left(\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\right)^{-1}\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}. \tag{5}$$

式中, $\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}$表示矩阵$\boldsymbol{S}$的厄尔米特共轭矩阵. $\boldsymbol{P}_r$可以将任意向量空间投影到由$\boldsymbol{S}$构成的子空间中, 所以结合式 (3) 我们可以得到

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}_r\boldsymbol{r}&=\boldsymbol{P}_r(\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}_S+\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}_W+\boldsymbol{n})\\&\approx\boldsymbol{S}\boldsymbol{A}_S+\boldsymbol{P}_r\boldsymbol{n}.\end{aligned} \tag{6}$$

式中, $\boldsymbol{P}_r(\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}_W)$和$\boldsymbol{P}_r\boldsymbol{n}$表示弱信号和高斯白噪声在强信号子空间的投影. 因为伪随机码之间有近似正交的特性以及弱信号接收功率远小于强信号, 所以可认为$\boldsymbol{r}$在强信号子空间的投影由强信号向量和噪声的投影向量组成. 然后将数字中频信号$\boldsymbol{r}$和它在强信号子空间的投影相减便可得到只包含弱信号和噪声的子空间

$$\begin{aligned}\boldsymbol{r}-\boldsymbol{P}_r\boldsymbol{r}&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{P}_r)\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}_W+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{P}_r)\boldsymbol{n}\\&\approx\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}_W+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{P}_r)\boldsymbol{n}.\end{aligned} \tag{7}$$

根据式 (7) 的结果再进行弱信号的搜索捕获时, 显然在理论上不再受到强信号的干扰, 从而提高可见伪卫星中弱信号捕获性能.

3.2　实现方法

根据子空间投影算法原理, 实际应用中具体的工作流程图如图 1 所示.

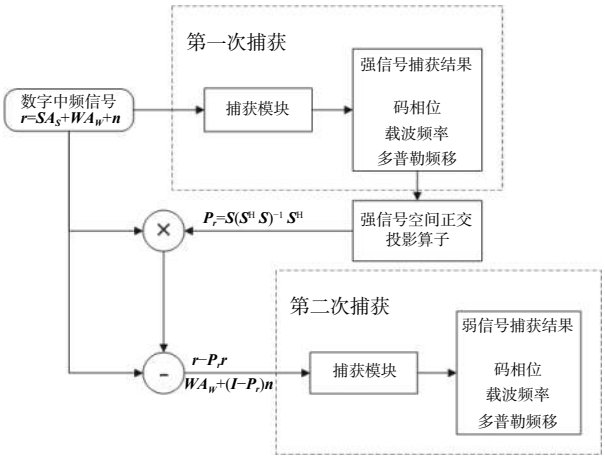


图 1　子空间投影算法实现流程图

根据本章介绍的算法原理, 实现子空间投影算法的关键在于得到强信号空间正交投影算子$\boldsymbol{P}_r$. 数字信号处理模块首先通过常规捕获算法对中频信号$\boldsymbol{r}$进行处理, 可以得到强信号的精确捕获结果. 然后根据初次捕获结果, 就可以对强信号进行参数估计. 由式 (2) 可知, 关键的参数为导航电文数据比特D、伪随机码C、多普勒频移f_d和初始相位δ. 为了减少参数估计误差对矩阵$\boldsymbol{S}$构建的影响以及矩阵运算复杂度, 现进一步简化子空间投影算法.

根据文献 [10] 提出的算法简化方式, 计算投影矩阵$\boldsymbol{P}_r$无需估计初始相位δ参数, 下面给出推理过程.

假设导航电文数据比特$\widetilde{D}$、伪随机码$\widetilde{C}$和多普勒频移$\widetilde{f}_d$为已知估计参数, 构造矩阵$\widetilde{\boldsymbol{S}}$

$$\widetilde{\boldsymbol{S}}=\begin{bmatrix} \widetilde{s}_1(t_0) & \cdots & \widetilde{s}_k(t_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \widetilde{s}_1(t_{M-1}) & \cdots & \widetilde{s}_k(t_{M-1}) \end{bmatrix}_{M\times k}. \tag{8}$$

式中, $\widetilde{s}_a(t_b)=\widetilde{D}_a(t_b)\widetilde{C}_a(t_b)\mathrm{e}^{j[2\pi(f_{\mathrm{IF}}+\widetilde{f}_{d_a})t_b]}$. 这里可认为$\widetilde{D}_a(t_b)=D_a(t_b)$, $\widetilde{C}_a(t_b)=C_a(t_b)$, $\widetilde{f}_{d_a}=f_{d_a}$, 则矩阵$\widetilde{\boldsymbol{S}}$和$\boldsymbol{S}$构成如下关系:

$$\boldsymbol{S}=\widetilde{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{\vartheta},\boldsymbol{\vartheta}=\mathrm{diag}\left[\mathrm{e}^{j\delta_1},\cdots,\mathrm{e}^{j\delta_k}\right]. \tag{9}$$

根据工程矩阵知识, $(\boldsymbol{AB})^{\mathrm{H}}=\boldsymbol{B}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{H}}$, $(\boldsymbol{ABC})^{-1}=\boldsymbol{C}^{-1}\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{A}^{-1}$, 则$\boldsymbol{P}_r$可以进一步表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}_r&=\boldsymbol{S}\left(\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\right)^{-1}\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\\&=\left(\widetilde{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{\vartheta}\right)\left(\boldsymbol{\vartheta}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{\vartheta}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{\vartheta}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}\right)\\&=\widetilde{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{\vartheta}\boldsymbol{\vartheta}^{-1}\widetilde{\boldsymbol{S}}^{-1}\left(\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{\vartheta}^{\mathrm{H}}\right)^{-1}\boldsymbol{\vartheta}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}\\&=\widetilde{\boldsymbol{S}}\left(\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{S}}\right)^{-1}\widetilde{\boldsymbol{S}}^{\mathrm{H}}.\end{aligned} \tag{10}$$

此外因为捕获过程所使用的信号长度仅为 1 ms, 而导航电文的速率为 50 bit/s, 因此在 1 ms 信号中基本不会产生导航电文数据的跳变, 而如果导航电文恰好产生跳变, 其仅改变信号的符号, 不会对伪随机码的正交性产生影响. 因此对强信号的参数估计进一步改进: 初次捕获时无需对导航电文D进行估计.

所以在算法实现中, 对正交投影算子$\boldsymbol{P}_r$的计算无需估计强信号相位δ和导航电文数据比特D, 只需要估计伪随机码C的相位和多普勒频移f_d构建矩阵$\widetilde{\boldsymbol{S}}$即可 [18]. 这大大降低了参数估计的计算复杂度和误差, 从而适用于 4 颗以上伪卫星信号共存时的场景.

4　算法验证

4.1　室内伪卫星信号捕获实验

为了验证本文提出的算法有效性, 进行了室内伪

卫星信号捕获实验. 本实验的伪卫星系统由 8 颗伪卫星组成, 成正八边形阵列分布, 采用 BDS B1 波段信号体制, 进行扩频调制的伪随机码 (C_{B11}码) 序列分别对应 1~8 号伪卫星, 接收机放置于伪卫星阵列的下方, 如图 2 所示. 可以看出, 当接收机位于图示位置时, 8 颗伪卫星的信号均处于接收机的可视范围之内. 信号发射功率为 6 mW, 因为场地大小的限制, 为了更好地模拟远近效应, 本实验通过在部分发射机天线上挂载功率衰减器的方法来加大信号强度的差异.

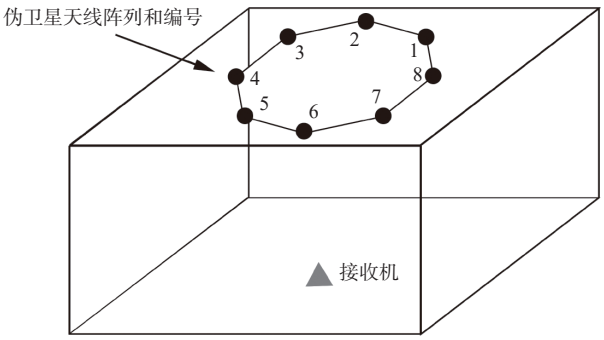


图 2 室内伪卫星定位系统实验示意图

整个实验分为四组衰减器挂载方案, 每组分别有 2 颗伪卫星发射天线进行功率衰减, 其余 6 颗卫星发射正常功率的信号. 具体如表 1 所示.

表 1 衰减器挂载方案

组别	挂载方案
1	1号星(20 dB)、8号星(30 dB)
2	2号星(20 dB)、7号星(20 dB)
3	2号星(20 dB)、7号星(40 dB)
4	3号星(30 dB)、6号星(60 dB)

接收机采用的是“星源北斗导航”的八通道多频 GNSS 中频信号采集器, 采集器和实验场景如图 3 所示. 每一组实验由 8 根天线同时采集 8 个不同静态点的信号, 上位机得到的结果为伪卫星数字中频信号. 本实验中信号的采样率设置为 16.369 MHz, 中频信号载波频率为 3.996 MHz. 为确保数据的稳定性和连贯性, 实验过程每组统一采集 5 min 时长的信号.

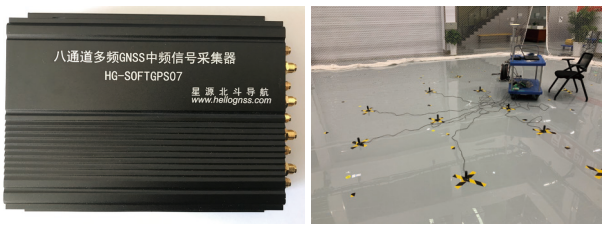


图 3 采集器和实验场景

4.2 捕获性能对比

为了验证子空间投影算法对接收机信号捕获性能改进的有效性, 将上述实验采集到的数据进行处理, 分别对经正交子空间投影算法处理前后的信号进行滑动相关法捕获验证.

文献 [19] 给出了伪卫星发射功率与覆盖范围的关系. 如表 2 所示, 本次实验场地接收机和伪卫星天线阵列之间的直线距离为 20 m, 根据表中数据, 挂载衰减器最大衰减比例 60 dB的信号覆盖范围也在实验场地的大小之内, 因此可以认为理论上所有伪卫星信号均在可视范围内.

表 2 伪卫星发射功率与覆盖范围的关系[19]

信号覆盖半径/m	信号发射功率/dBm
5	–74.4
10	–66.0
15	–61.1
20	–57.5
25	–54.8

4.2.1 捕获结果初步对比

首先使用常规的滑动相关法分别对上述四组信号进行捕获操作, 参与捕获的信号长度为 1 ms, 分别与本地生成的伪随机码副本和中频载波副本进行相关运算, 得到码相位和多普勒频移结果. 这里给出第一组实验通道一中 2 颗伪卫星的捕获结果: 正常发射功率的 2 号伪卫星和衰减 20 dB功率的 1 号伪卫星.

首先是 2 号伪卫星的码相位和多普勒频移相关结果, 如图 4 所示. 因为信号的采样率为 16.369 MHz, 所以码相位的坐标范围为 0~16 369; 多普勒频移的搜索范围为±10 kHz. 由图 4 可知, 2 号伪卫星在码相位 1 140 处相关结果峰值突出, 多普勒频移相关结果在 2.25 kHz 处峰值突出, 可以认为完成了正确捕获;

1 号伪卫星的码相位和多普勒频移相关结果如图 5 所示, 其码相位和多普勒频移的相关结果均没有明显的突出峰值, 可以认为没有完成正确的捕获.

为方便描述后续捕获结果, 图 6 中分别将 2 颗伪卫星的码相位和多普勒频移捕获结果合并到同一个三维坐标系来对比.

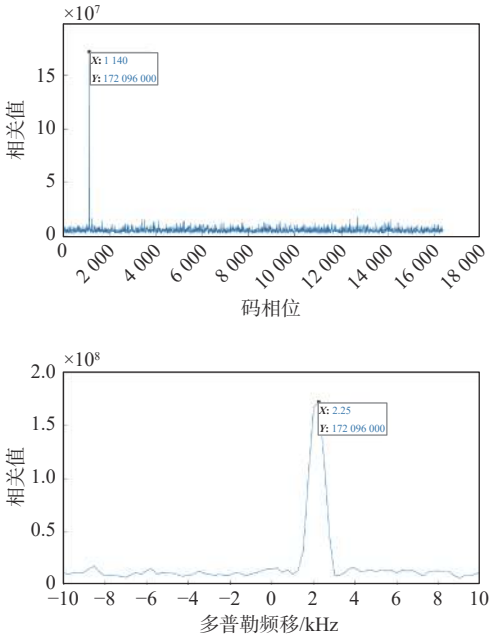


图 4　第一组 2 号伪卫星捕获结果

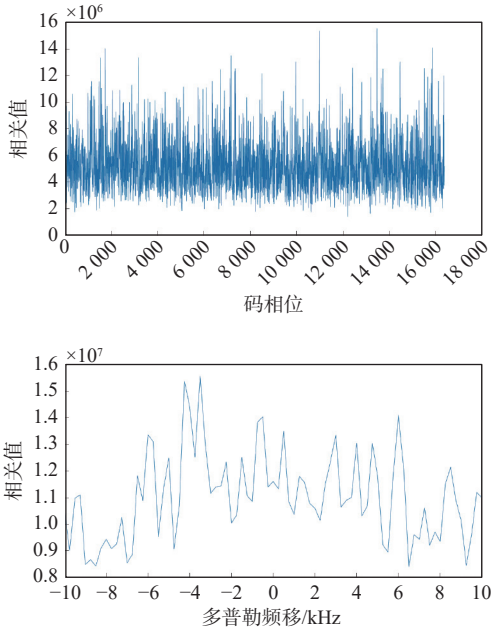
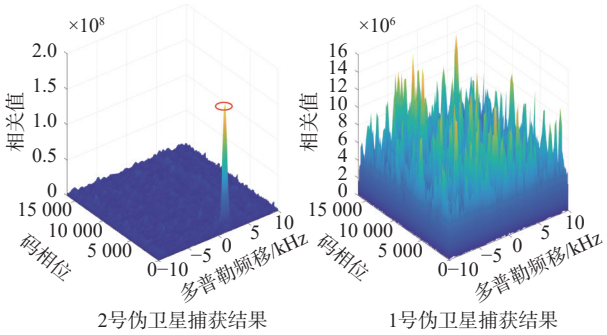


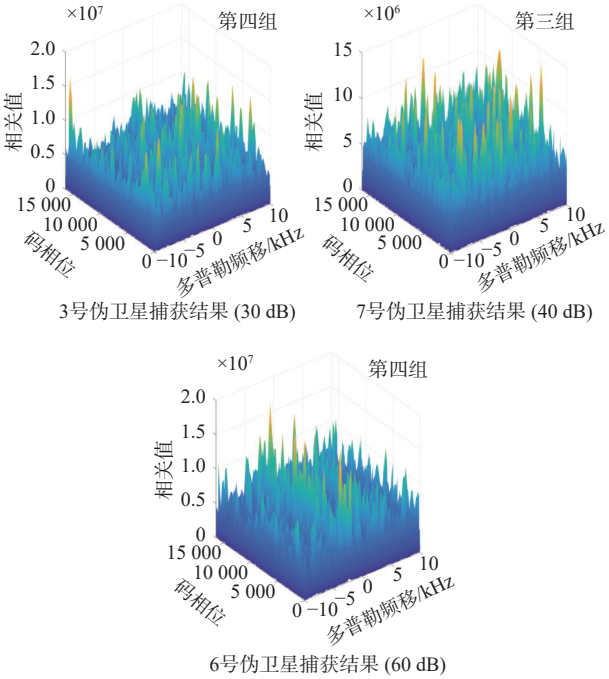
图 5　第一组 1 号伪卫星捕获结果



2号伪卫星捕获结果　　1号伪卫星捕获结果

图 6　第一组捕获结果对比

对于功率衰减 30 dB、40 dB、60 dB的伪卫星, 这里分别给出第四组的 3 号卫星、第三组的 7 号伪卫星和第四组的 6 号伪卫星的通道一捕获结果, 均采用三维坐标系表示. 由图 7 可知, 码相位和多普勒频移相关结果均没有明显的突出峰值, 可以认为没有完成正确的捕获.

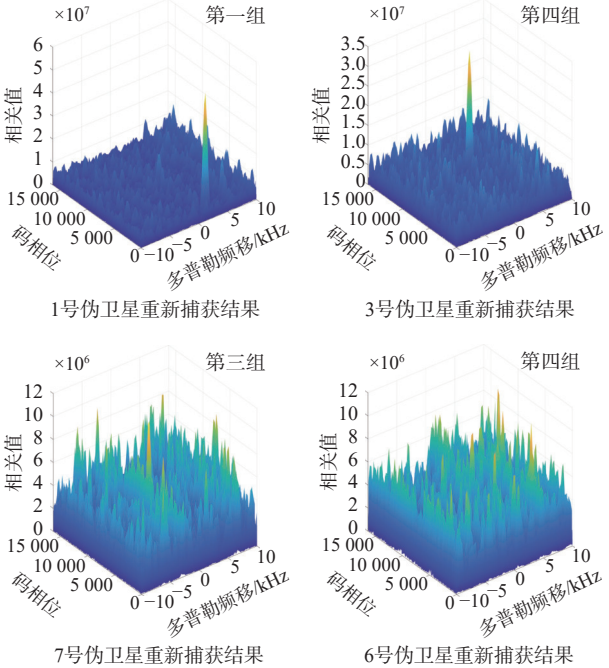


3号伪卫星捕获结果 (30 dB)　　7号伪卫星捕获结果 (40 dB)

6号伪卫星捕获结果 (60 dB)

图 7　衰减 30 dB、40 dB 和 60 dB 伪卫星捕获结果

通过本文提出的正交子空间投影算法对数字中频信号进行强信号干扰消除处理, 对产生错误捕获结果的伪卫星重新进行捕获. 这里给出上述没有完成正确捕获的伪卫星的重新捕获结果, 如图 8 所示.



1号伪卫星重新捕获结果　　3号伪卫星重新捕获结果

7号伪卫星重新捕获结果　　6号伪卫星重新捕获结果

图 8　重新捕获结果

可以看出对于强弱信号功率比在 20 dB和 30 dB 的信号重新捕获结果中码相位和多普勒频移相关峰值突出，完成了正确捕获；但是对于功率比进一步加大的信号 40 dB和 60 dB，码相位和多普勒频移的相关峰值没有明显突出，仍然不能完成正确的捕获.

4.2.2 正确捕获概率对比

为了进一步验证正交子空间投影算法对弱信号捕获结果的改善效果，将四组实验中挂载不同衰减器的伪卫星连续信号进行多段捕获，计算强弱信号在这四种功率比下，经正交子空间投影算法处理前后完成正确捕获的概率，结果如表 3 所示.

表 3 采用正交子空间投影算法前后正确捕获概率

强弱信号功率比/dB	正确捕获概率	
	处理前/%	处理后/%
20	0	96.3
30	0	91.7
40	0	23.1
60	0	4.4

通常正确捕获概率在 90% 以上才能为伪卫星接收机后续的跟踪环路提供可靠的结果[20]. 所以，可以认为在正确捕获概率为 90% 的前提下，滑动相关法所能容忍的最大强弱信号功率比小于 20 dB；而经正交子空间投影法处理后，这一功率比的容忍限度提升到了 30 dB. 由此可见，正交子空间投影算法可以显著地提高伪卫星系统中接收机对远场弱信号的捕获性能，能够较好地消除远近效应带来的影响.

5 总 结

本文针对地基伪卫星信号捕获过程中的远近效应问题进行了研究，通过引入正交子空间投影算法来消除强信号对弱信号的干扰. 通过理论分析，推导出了该算法在实现过程中初始相位对计算强信号正交投影算子没有影响，同时导航电文的比特跳变对伪随机码的正交性也不会产生影响，从而将实现该算法所需估计的参数优化为码相位和多普勒频率. 实验结果表明：当强弱信号的功率比在 20 dB 及以上时，常规的滑动相关方法不能得到可靠的远场伪卫星捕获结果；引入正交子空间投影算法能够有效提升接收机的捕获性能，在强弱信号之间的功率比≤30 dB 时，能够较好地克服远近效应问题，得到可靠的捕获结果. 这对伪卫星系统的应用中提高弱信号的成功捕获概率、拓宽系统的有效范围以及保障接收机的后续功能都有重要的意义.

参考文献

[1] 郭树人, 刘成, 高为广, 等. 卫星导航增强系统建设与发展[J]. 全球定位系统, 2019, 44(2): 1-12.

[2] 饶文利. 室内三维定位分类、方法、技术综述[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(3): 164-169.

[3] 杨芳, 范金峰, 马军, 等. 导航增强伪卫星时间同步技术与精度分析[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 132-136.

[4] 马鹏程, 唐小妹, 朱祥维, 等. 伪卫星应用中远近效应及其抑制技术分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(5): 28-34.

[5] 王福军, 丁小燕, 谢维华, 等. 卫星导航干扰抑制与信号增强算法研究[J]. 全球定位系统, 2019, 44(4): 47-52.

[6] MADHANI P H, AXElRAD P, KRUMVIEDA K, et al. Application of successive interference cancellation to the GPS pseudolite near-far problem[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2003, 39(2): 481-488. DOI: 10.1109/TAES.2003.1207260

[7] 刘旭, 姚铮, 吕红丽, 等. 基于SIC的伪卫星系统抗远近效应捕获算法研究[J]. 全球定位系统, 2020, 45(1): 12-18.

[8] PATEL P, HOLTZMAN J. Performance comparison of a DS/CDMA system using a successive interference cancellation(IC) and parallel IC scheme under fading[C]// International Conference on Communications, 1994. DOI: 10.1109/ICC.1994.368852

[9] YANG C, MORTON J. Adaptive replica code synthesis for interference suppression in GNSS receivers[C]//International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2009: 131-138.

[10] NUNES F D, SOUSA F M G. GNSS near-far mitigation through subspace projection without phase information[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2012, 48(3): 2746-2755. DOI: 10.1109/TAES.2012.6237626

[11] MORTON Y T, TSUI J B Y, LIN D M, et al. Assessment and handling of CA code self-Interference during weak GPS signal acquisition[C]//The 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2003: 646-653. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02532.x

[12] LIU X, YAO Z, LU M Q. Robust time-hopping pseudolite signal acquisition method based on dynamic Bayesian network[J]. GPS solutions, 2021, 25(2). DOI: 10.1007/s10291-020-01066-y

[13] XU L. Research on signal design method of pseudolite "near-far effect" based on TDMA technique[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2017: 417-429.

[14] 刘宇航, 蔡伯根, 巴晓辉. 基于伪卫星的导航系统定位方法研究[C]//第十二届中国卫星导航年会, 2021: 7.

[15] 谢超, 焦诚, 王乾. 一种跳时直接序列码分多址导航信号测距码优选方法[C]//第十二届中国卫星导航年会, 2021: 6.

[16] 王迪, 陈光武, 刘射德. 基于伪卫星信号捕获原理的抗远近效应方法研究[J]. 测绘科学与仪器, 2017, 8(3): 228-237.

[17] LI Y M, GAO J P, JI Y F, et al. Research on near-far Effect and anti-impact noise interference pseudo-code sequence blind estimation algorithm in pseudo satellite system[C]//The 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), 2020: 413-417. DOI: 10.1109/ICICSP50920.2020.9232101

[18] CHEN M L, ZHAN X Q, YUAN W H, et al. Technical concerns of near-far effect in GNSS space service volume (SSV)[J]. Journal of aeronautics astronautics & aviation, 2016, 48(3): 149-156. DOI: 10.6125/16-0405-883

[19] 程建强, 杜丹, 周云, 等. 基于多阵元的室内伪卫星几何布局研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 762-768.

[20] 汪夕琳, 周亚丽, 张佳. 基于伪码测距技术的无线定位系统设计与仿真[J]. 全球定位系统, 2018, 43(5): 84-90.

作者简介

施上 (1997—), 男, 硕士, 研究方向为室内定位伪卫星基站开发.

王庆 (1962—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为卫星导航与定位技术.

张波 (1989—), 男, 博士, 研究方向为无线电导航定位研究.

Method for eliminating pseudolite near-far effect based on orthogonal subspace projection

SHI Shang, WANG Qing, ZHANG Bo, YANG Yuan, XU Jiujing

(*School of Instrument Science and Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: Receivers in ground-based pseudolite systems are often affected by the near-far effect, causing failure acquisition of far-field pseudolite signals. An optimization method based on orthogonal subspace projection is introduced in this paper, which is applied to code division multiple access (CDMA) pseudolite signals. Firstly, strong-signal code phases and Doppler frequencies are obtained through conventional sliding correlation to calculate the orthogonal projection operator. Then the weak-signal space is obtained by the received signal subtracting its projection in the strong-signal space. Finally, the re-acquisition is done in the weak-signal space to eliminate of the interference of strong signals. The experimental result indicates that the orthogonal subspace projection can effectively improve weak-signal acquisition performance in the power ratio range of lower than 30 dB, which is of great importance to widen the effective working range of ground-based pseudolite systems and the limitation of pseudolite receivers' signal power ratio tolerance.

Keywords: ground-based pseudolite systems; code division multiple access (CDMA); near-far effect; orthogonal subspace projection; weak-signal acquisition performance