

基于 GNSS 散射信号的双站雷达系统 干扰抑制的分析与研究

张建军^{1,2}, 袁 洪¹, 曲江华¹

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘 要: 利用 GNSS(全球卫星导航系统)卫星作为照射源,接收机在飞行器的收发分置的 GNSS-R 双站雷达探测系统作为一门新兴遥感技术越来越受到关注,但由于 GNSS 散射信号功率太弱,其接收机对 GNSS 干扰信号的抑制一直是个难点。根据直达波和邻近卫星信号干扰的特点,提出了改进的分块子空间投影算法,即首先对干扰信号进行捕获与跟踪,根据得到的干扰信号参数构筑相应的干扰子空间,利用改进的分块子空间投影进行干扰抑制,该方法既降低了跟踪误差对干扰性能的影响,又使计算量大幅下降,适合多变环境和多数据样本情况。通过对仿真结果的分析,验证了方法的有效性,也为后续系统的优化设计提供了依据。

关键词: GNSS; 干扰抑制; 分块的子空间投影

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2009)04-1477-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.028

0 引言

利用 GNSS(全球卫星导航系统)散射信号探测目标,由于其自身不发射电磁波,不容易被敌方侦察系统发现,可免受反辐射导弹的攻击,具有很强的系统生存能力,因此利用 GNSS 卫星作为照射源,接收机在飞行器的收发分置的 GNSS-R 双站雷达探测系统作为一门新兴遥感技术越来越受到关注,目前其主要的应用是接收机接收目标散射的 GNSS 信号,通过分析 C/A 或 P 码的相关函数波形,获得探测目标的相关信息^[1]。

由于 GNSS 信号要经过目标散射后才能接收,这样接收机接收到的只是很微弱的一部分能量,而直达波和其它卫星的干扰信号的强度要比目标回波信号的强度大得多。要在强大的干扰信号背景下检测出目标无疑是极其困难的,必须对干扰信号予以剔除。目前在 GNSS 中干扰抑制的方法很多,主要集中在自适应天线调零技术、空时波束形成技术等方面,适用于窄带干扰和连续波干扰等方面的抑制^[2]。而强 GNSS 信号属于相干干扰,在弱信号的捕获过程中,上述方法不能有效地予以抑制处理相干干扰,目前处理相干干扰的方法主要是 SIC(连续

的直接相减技术)方法,但 SIC 方法存在着抑制误差大等缺陷^[3]。为了实现 GNSS 散射信号对目标的探测要求,满足复杂环境下散射信号的接收需求,必须对干扰信号进行抑制处理。即而首要的任务就是对在强干扰信号的特性进行理论分析,研究干扰信号的特性的对 GNSS 散射信号的影响,进而提出剔除干扰信号的算法。另一方面,根据算法的特点进行剔除干扰信号的模拟与跟踪仿真,对跟踪算法进行验证,评估其效果与适用范围。

1 基于 GNSS 散射信号双站雷达的干扰信号分析

GNSS 卫星作为信号的发射源,发射的 GNSS 信号分两路到达飞行器上的接收机,接收机通过处理接收到的 GNSS 信号,得到探测的目标信息。

在对 GNSS 散射信号的接收中,除了白噪声之外,GNSS 卫星直达信号和其它邻近卫星的直射信号会从 LHCP(左旋圆极化)天线旁瓣进入到接收机中,这些强信号会对 GNSS 散射信号的接收产生干扰,导致接收机无法正确地区分强干扰弱信号之间的互相关与弱信号的自相关,产生很大的误差,因此,必须对干扰信号进行分析,并对干扰信号进行处理,从而达到捕获 GNSS 散射信号的效果。

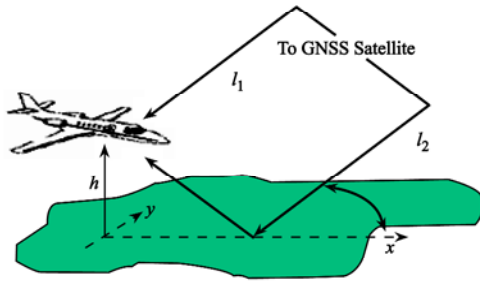


图 1 GNSS 卫星 - 镜面散射区 - 接收机方位图
Fig.1 GNSS satellite, specular scattered area and a GPS receiver

对于双站雷达系统,接收机接收到的目标散射回波功率密度为:

$$S_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R_i^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R_i^2} \right) \quad (1)$$

其中 P_t 是 GNSS 卫星的发射功率, G_t 是发射天线的增益, R_i 为 GNSS 卫星与目标之间的距离, R_r 为接收机与目标之间的距离, σ 为雷达横截面积。

式(1)的第一项为直(发)射的 GNSS 信号在目标处的功率密度:

$$S_{direct} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_i^2} \quad (2)$$

信号功率被接收被天线主要依靠天线的有效孔径:

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (3)$$

其中 G_r 为接收天线的增益, λ 为 GNSS 载波的波长。

由(1)(2)(3)式得接收机接收到的目标散射信号的功率为:

$$P_r = S_{direct} \left(\frac{\sigma}{4\pi R_i^2} \right) \left(\frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \right) \quad (4)$$

接收机接收到直射信号的功率为:

$$P_{direct} = S_{dpi} \left(\frac{\lambda^2 G_{or}}{4\pi} \right) \quad (5)$$

$$S_{dpi} = \frac{P_t G_{oi}}{4\pi R_{oi}^2} \quad (6)$$

其中 G_{oi} 、 G_{or} 分别为发射天线的副瓣增益和接受天线的副瓣增益, R_{oi} 是卫星直达信号到接收机的距离。

散射信号与直射信号的功率比值为:

$$\frac{P_r}{P_{direct}} = \left(\frac{\sigma}{4\pi R_i^2} \right) \left(\frac{G_t}{G_{oi}} \right) \left(\frac{G_r}{G_{or}} \right) \left(\frac{R_{oi}}{R_i} \right)^2 \quad (7)$$

由于 GNSS 卫星离地面很远,

$$G_t = G_{oi}, G_r / G_{or} = 15 \text{ dB}, R_{oi} = R_i$$

根据式(7)和上述参数设置得图 2, 可以看到随着目标到接收机距离的增大, 信扰比减小的变化, 即直达波信号干扰对接收机的影响越来越大。所以, 在接收机接收 GNSS 散射的时候, 直达波干扰必须考虑予以剔除。

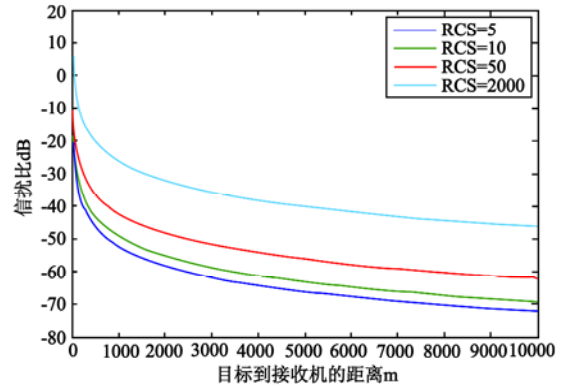


图 2 GNSS 散射信号的信扰比示意图
Fig.2 The signal ratio of GNSS scattered signal

2 基于子空间投影算法干扰抑制的分析与研究

2.1 子空间投影算法的分析

基于 GNSS 散射信号双站雷达系统的接收机首先对直达波和邻近卫星干扰信号进行捕获与跟踪, 根据得到的干扰信号参数即多普勒频率、码相位和载波频率相位对干扰信号进行子空间构筑, 将输入信号投影到构筑的干扰子空间中, 再利用输入信号减去估计的干扰信号, 从而得到需要的 GNSS 散射信号^[4]。

假设接收到的 GNSS 信号 y 包含强信号 s 和弱信号 w , 外加噪声 n 。

$$\begin{aligned} s &= \vec{S} a_s, w = \vec{H} a_w \\ y &= s + w + n \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $y \in C^{n \times 1}$, $s \in C^{n \times 1}$ 为包含 $n \times 1$ 向量的强信号, $w \in C^{n \times 1}$ 为包含 $n \times 1$ 向量的弱信号, $\vec{S} \in C^{n \times m}$ 为 $n \times m$ 的矩阵, 而 m 维代表 m 个单位幅度强信号矢量。 $\vec{H} \in C^{n \times k}$ 为 $n \times k$ 的矩阵, 而 k 维代表 k 个单位幅度弱信号矢量, $a_s \in C^{m \times 1}$ 为 $m \times 1$ 的强信号的幅度矢量, $a_w \in C^{k \times 1}$ 为 $k \times 1$ 的弱信号的幅度矢量,

n 为接收机的噪声矢量。

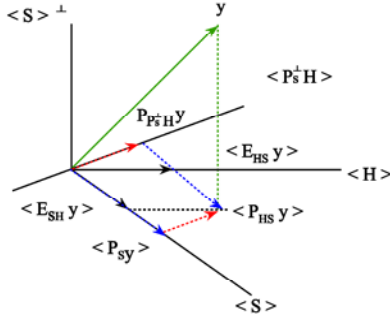


图 3 子空间投影原理示意图

Fig. 3 The principle of subspace projection

输入信号 y 投影到 $\langle HS \rangle$ 子空间为 $P_{HS}y$, $P_{HS}y$ 被进一步分解为两部分,一部分投影到 $\langle S \rangle$ 子空间,一部分投影到 $\langle P_s^>H \rangle$,如图 3 所示,则

$$\begin{aligned}
 P_s y &= \tilde{S}(\tilde{S}^T \tilde{S})^{-1} \tilde{S}^T y \\
 &= \tilde{S}(\tilde{S}^T \tilde{S})^{-1} \tilde{S}^T (\tilde{S} a_s + \tilde{H} a_w + n) \\
 &= \tilde{S} a_s + \tilde{S}(\tilde{S}^T \tilde{S})^{-1} \tilde{S}^T \tilde{H} a_w + \tilde{S}(\tilde{S}^T \tilde{S})^{-1} \tilde{S}^T n \\
 &= \tilde{S} a_s + n' \tag{9}
 \end{aligned}$$

其中由于干扰信号的幅度远大于散射信号的幅度,且强信号的自相关峰值远高于强弱信号互相关峰值,所以,上式的第二项可以忽略。

根据式(9)投影得到的强信号估计,可以得到所需的弱信号。

$$\Delta y = y - P_s y = \tilde{H} a_w + \Delta v + \Delta \xi \tag{10}$$

其中, Δv 是接收机噪声在子空间投影算法产生的误差, $\Delta \xi$ 是强信号捕获跟踪产生误差在算法中的影响^[5]。

2.2 分块的子空间投影算法的分析

为了实现子空间投影算法对干扰抑制的有效表征,必须对子空间投影算法进行改进和创新。现采用分块的子空间投影算法实现干扰的抑制,即根据子空间投影算法输入数据的特点,将长的数据进行分成小的块片段信号,在小的块信号中,根据跟踪的强信号的幅度、相位和多普勒频移构筑相对小块的投影子空间,这样不仅有利于投影误差的减小,也有利于信号的捕获与跟踪,分块子空间的计算量也得到了降低。算法采用多普勒跟踪误差和干扰剩余误差作为误差判断准则,实现分块子空间的自适应调整,当干扰剩余误差大于预先设定阈值时,表明此时

的数据分块太大,需要对该时的输入数据单元再进行细分^[6]。

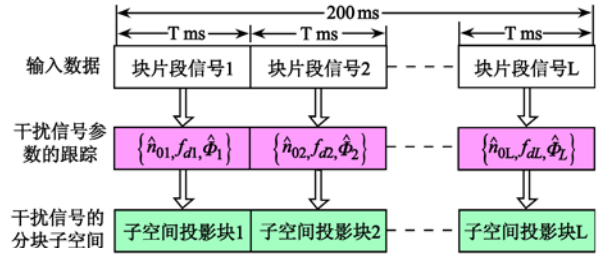


图 4 分块的子空间投影示意图

Fig. 4 Block subspace projection

对分块的子空间算法获得定量的分析,用 200ms 输入信号,根据分块的子空间投影算法,将数据分成 20 个 10ms 的片段数据块,用强信号的信噪比 $SNR = -19\text{dB}$ 计算干扰剩余后的误差。在码相位和信号载波合理的变化范围内,由图 5 可以看到,当 $|\Delta f| \leq \pm 5\text{Hz}$,干扰剩余误差功率小于 -30dBW ,远远小于输入的强信号功率 -19dBW ,剩余误差不会对弱信号的捕获产生干扰,随着 Δf 的增加到 50Hz 时,干扰剩余误差功率逐步达到输入强信号功率水平,这时分块的子空间投影算法失去作用。但在一个稳定的强信号跟踪中, Δf 的变化一般在几赫兹以内。

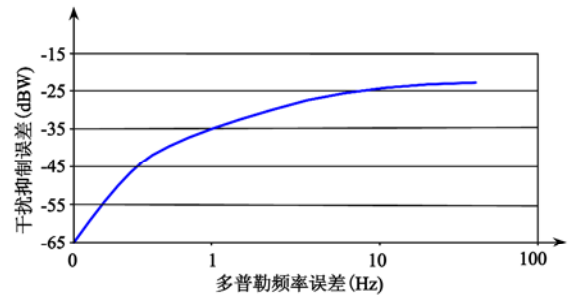


图 5 分块子空间投影算法的干扰抑制误差示意图

Fig. 5 Interference rejection error of block subspace projection algorithm

但如果划分数据块数据记录短,也容易引起捕获数据所产生的信噪比低,导致捕获失败。例如,如果对于 1ms 的数据进行数据处理,等效带宽为 1kHz ($1/10^{-3}\text{ms}$)。因为连续波信号是窄带信号,所以对降低带宽对信号幅度没有影响。但是,噪声却受带宽的限制,1kHz 带宽内的等效噪声功率是 -144dBm 。这样,对于输入为 -130dBm 的信号,1ms 的相干积分能够产生 14dB 的 S/N 。对 2ms 的数据进行相干

处理,相应的带宽为 500Hz,噪声基底为 -147dBm。这个方法产生的 S/N 为 17dB。因此捕获弱信号所需数据的长度越长,所得到的信噪比就越高,就越有可能超过捕获的门限,而如果采用的块数据太小的话,就可能使 S/N 太低,不能达到捕获所需门限,导致捕获失败。

因此,合理的对输入数据进行分块处理,其产生的误差不会对弱信号的捕获产生影响,并且对子空间进行分块处理,每个分块的子空间进行信号抑制时,降低了系统的计算量,使数据计算得到了优化。

3 场景模型和仿真计算

利用建立的“GNSS”软件接收硬件系统采集的实际卫星信标数据,数据采集时间在 2007 年 4 月 5 日 10:30 左右。接收机下视天线接收 PRN19 的散射信号,干扰信号为 PRN19 的直达波信号以及邻近卫星 PRN3 和 PRN21 的直达干扰信号,工作参数如下:GNSS 卫星工作在 L1 波段,工作频率为 1575.42MHz,地面散射功率 S_g 为 -135.0dBW/m²。

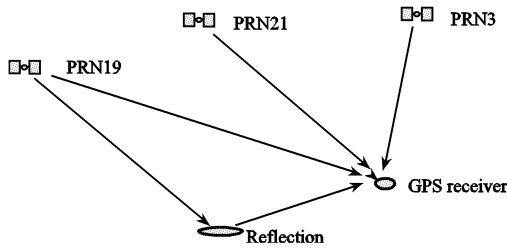
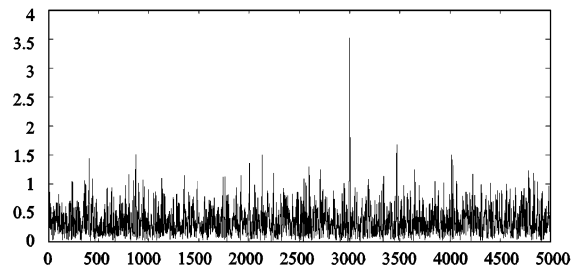


图 6 散射信号 - 干扰信号分布场景示意图
Fig. 6 The distributing of scattered signal, Interference signal

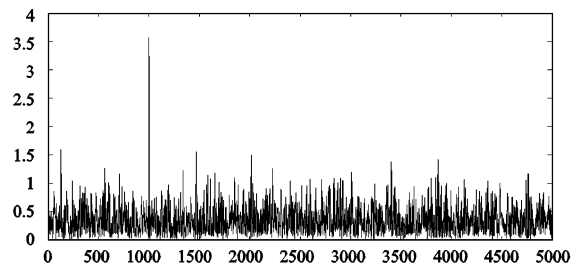
首先对邻近星 PRN3 和 PRN21 的干扰信号进行抑制,由图 7 可以看出,由于 PRN3 和 PRN21 的直达信号强,其各自的自相关峰值很大,利用 GNSS 的捕获跟踪方法可以很稳定地捕获跟踪这两颗星的信号。

图 8 可以看出,由于 PRN19 的直达波信号的幅度比 PRN3 和 PRN21 低 10dB,PRN19 的自相关被 PRN3、PRN21 与 PRN19 信号的互相关所淹没,其直达波信号不能被成功捕获,其散射信号的幅度比强信号低 20dB,在图 8 更没有显示其自相关峰值的迹象。

GNSS 接收机首先对 PRN3 和 PRN21 干扰信号进行捕获与跟踪,根据得到卫星 PRN3 和 PRN21 的参数即多普勒频率、码相位和载波相位进行强信号



(a) PRN3 C/A 码自相关示意图
(a) The correlation of PRN3 C/A



(b) PRN21 C/A 码自相关示意图
(b) The correlation of PRN21 C/A

图 7 PRN3 和 PRN21 强信号自相关示意图

Fig. 7 The strong signal correlation of PRN3 and PRN21

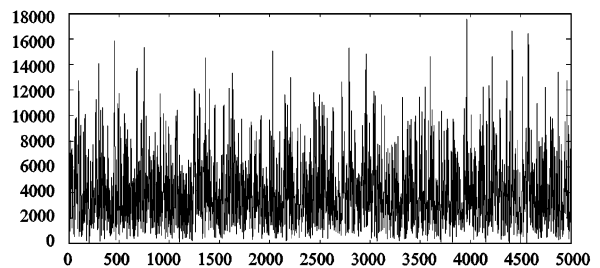


图 8 强信号干扰下 PRN19 C/A 码的自相关示意图
Fig. 8 The correlation of PRN19 C/A in strong signal interference

的干扰子空间构筑,由图 9 看到,利用子空间投影算法抑制掉 PRN3 和 PRN21 后能成功的捕获相对弱 PRN19 直达信号。图 10 为图 9 放大后的局部示意图,可以看到但其散射信号由于信号太弱的原因,被 PRN19 直达信号自相关的峰值所淹没,仍然不能被成功的探测。

图 11 显示直达波信号被抑制后,散射信号的自相关峰值,比噪声高 30dB,能被接收机成功捕获,图 12 为图 11 放大后局部示意图,从图可知到其码比直射信号延迟了 10 个码片,这也证明了在 GNSS 散射信号双站雷达系统中,子空间投影算法对干扰信号抑制的有效性。

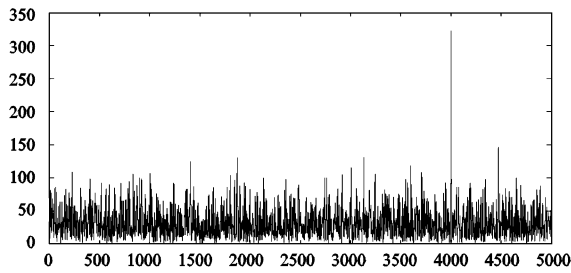


图 9 邻近卫星信号干扰抑制示意图

Fig. 9 The signal interference rejection of vicinity satellite

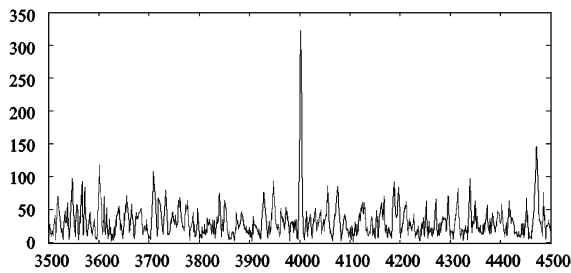


图 10 邻近卫星信号干扰抑制局部放大示意图

Fig. 10 The signal interference rejection partial enlarged detail of vicinity satellite

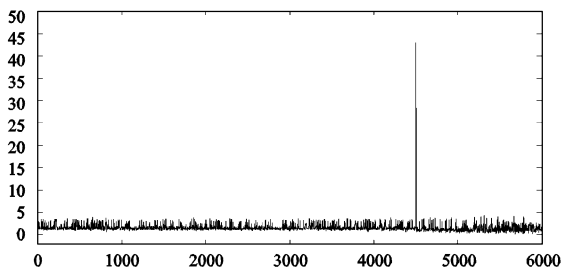


图 11 干扰信号全部抑制示意图

Fig. 11 The whole rejection of interference signal

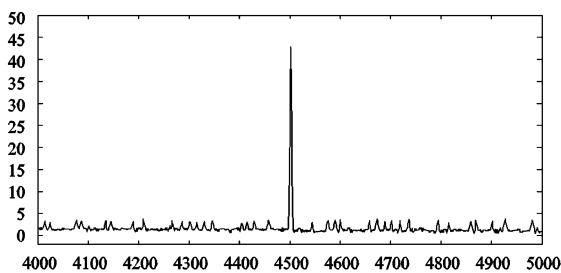


图 12 干扰信号全部抑制局部放大示意图

Fig. 12 The whole rejection partial enlarged detail of interference signal

4 结论

本文根据 GNSS 散射信号双站雷达系统干扰信

号的特性,提出了对干扰信号进行捕获与跟踪,根据得到的干扰信号参数构筑相应的干扰子空间,利用改进的分块子空间投影方法进行干扰抑制的算法,根据误差判断准则,实现分块子空间的自适应调整,通过对系统中邻近卫星信号和直达波信号逐步的抑制,得到了一系列仿真结果。对仿真结果进行了详细的分析,所得到的信号抑制示意图反映了信号抑制的情况,此外,由于子空间采用分块计算,又使计算量大幅下降,非常便于多变环境和多数据样本情况。由于 GNSS-R 双站雷达系统是一个相对新领域,对于其中的信号抑制研究有待于继续深入,下一步的研究工作是进一步完善干扰的特性分析,提高算法的抑制精度和在工程上实现其性能。

参考文献:

- [1] Lowe S T, Zuffada C, Lough M, Lerma J, Young L E. An ocean altimetry measurement using reflected GPS signals observed from a low altitude aircraft [C]. Proc. IEEE IGARSS, Honolulu, HI, 2000: 24 - 28.
- [2] Alison Brown, Dale Reynolds. Jammer and interference location system-design and initial test results [C]// Proceedings of the ION National Technical Meeting, 1999.
- [3] Madhani P, Axelrad P, Krumvieda K, Thomas J (2003). Application of interference cancellation to the GPS Near-Far problem [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 39 (2): 481 - 488.
- [4] Jade-Morton Y, Tsui J, Lin D, Liou L, Miller M, Zhou Q, French M, Schamus J. Assessment and handling of CA code self interference during weak GPS signal acquisition [C]// Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U. S. Inst. Of Navigation, Portland, Oregon, 2003, 9 - 12: 646 - 653.
- [5] Zhao L, Amin M, Lindsey A. Mitigation of periodic interferers in GPS receivers using subspace projection techniques [C]// Proceedings of the International Symposium on Signal Processing and its Applications, 2001, 13 - 16, 497 - 500.
- [6] Jade-Morton Y, Miller M, Tsui J, Lin D, Liou L, Zhou Q. GPS civil signal Self-interference mitigation during weak signal acquisition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55 (12): 5859 - 5863.

作者简介:张建军(1979 -),男,博士生,研究方向为计算机应用与控制,GPS 卫星导航,GPS 散射信号应用与处理。

通信地址:北京市中关村南二条一号中科院空间科学与应用研究中心(100190)

电话:(010)62576924

E-mail: zhangjlij@163. dom

(下转第 1488 页)