

级联结构的阵列天线导航接收机抗干扰及多径抑制方法*

关刚强, 雍玲, 聂俊伟, 王飞雪

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:阵列信号处理技术因其能够提供空域分辨能力已被广泛应用于卫星导航接收机领域以实现抗干扰和多径抑制。根据干扰和多径信号对导航接收机基带处理影响的不同提出了一种以数字相关器为界线划分的抗干扰与多径抑制两级处理结构:第一级处理在解扩前估计阵列接收数据的空时协方差矩阵,根据干扰信号功率远大于导航信号及噪声的特点利用子空间投影技术实现抗干扰;第二级处理在解扩后进行空间平滑解相干处理,利用基于Householder变换的广义旁瓣相消技术进行波束形成以实现多径抑制。理论分析和仿真结果表明,该级联处理技术能够有效地压制强干扰,并显著减小多径信号对导航接收机伪码测量的影响。

关键词:阵列天线;抗干扰;多径抑制;导航接收机

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)03-015-06

A two-stage anti-jamming and multipath mitigation method in GNSS receivers using antenna array

GUAN Gangqiang, YONG Ling, NIE Junwei, WANG Feixue

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Array processing is widely used to achieve anti-jamming and multipath mitigation in GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers for its ability to provide spatial resolution. According to different influences of interference and multipath signals to the signal processing in GNSS receivers, a two-stage anti-jamming and multipath mitigation structure divided by the correlation integrator was proposed. In the first stage, before despreading the space-time covariance matrix was estimated and anti-jamming was realized by using the subspace projection technique with the assumption that the interference power was bigger than the sum of GNSS signal and noise. In the second stage, spatial smoothing was used for multipath decoherence, and then a beamformer based on GSC (Generalized Sidelobe Cancellation) method with householder transform was implemented for multipath mitigation. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed method can effectively suppress the strong interference and can significantly reduce the multipath signal effects on code measurement of GNSS receiver.

Key words: antenna array; anti-jamming; multipath mitigation; global navigation satellite system receiver

抗干扰和多径抑制能力已成为保证导航接收机稳健工作的关键,传统单天线导航接收机抗干扰技术主要从时域、频域上采用脉冲消隐、零陷滤波器实现抗窄带干扰^[1],而对于宽带干扰或者智能干扰等却无能为力。传统单天线多径抑制技术主要是通过缩短伪码延迟锁定环路中超前滞后码间隔以降低多径对码跟踪环路影响,或者直接将接收信号与本地参考波形的相关值作为码跟踪鉴别输出来实现^[2],在多径延时为小数码片或者多径信号功率比直射信号大的室内环境下,其抑制能力将受到很大程度的限制。基于大多数情况下干扰信号和多径信号与直视导航信号来波方向不

同的事实,可以在时频域完全重叠的干扰、多径信号从空域上将其与直视导航信号区分开。阵列天线和自适应信号处理技术为导航接收机抗干扰和多径抑制提供了空域处理能力,而且空域与时、频域联合处理极大地提高了抗干扰和多径抑制性能。目前国内外已有很多文献针对阵列天线导航接收机的抗干扰技术进行了广泛的研究,类似的有文献[1]、文献[3-5]等,利用阵列天线进行多径抑制的研究有文献[5-8]等。已有的文献均未能针对干扰和多径同时入射的场景提供有效的抑制方法。

* 收稿日期:2015-03-06

基金项目:教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-08-0144)

作者简介:关刚强(1986—),男,河南鲁山人,博士研究生,E-mail:closetoqi@163.com;

王飞雪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:feixuewang_nnc@163.com

1 级联结构处理模型

根据卫星导航接收机的数据处理流程,如图 1 所示,级联结构的抗干扰和多径抑制处理以相关积分器为界线划分为解扩前抗干扰和解扩后

多径抑制两级结构,第一级抗干扰处理首先估计阵列接收数据的协方差矩阵,根据干扰信号功率在解扩前占据支配地位的特点采用采样矩阵直接求逆或子空间投影技术实现对强干扰信号的压制。

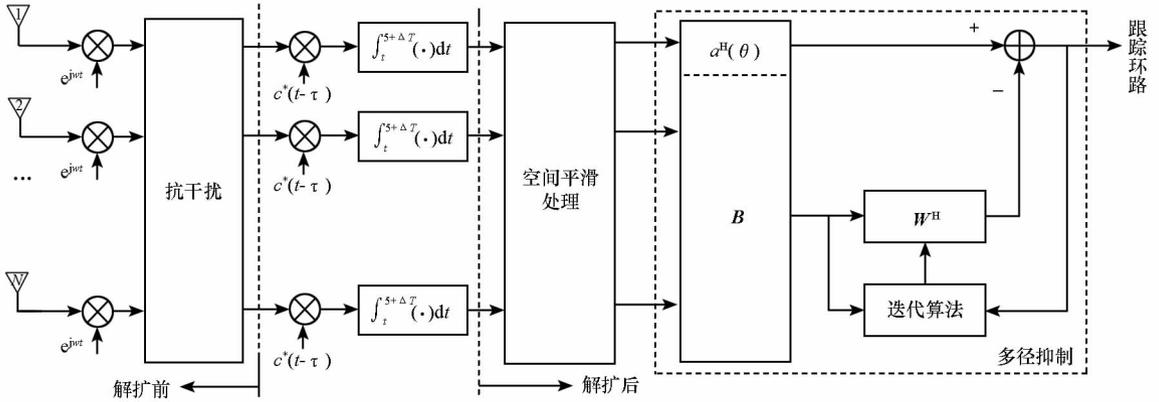


图 1 级联结构的阵列天线抗干扰及多径抑制处理框图

Fig. 1 Block diagram of two-stage process for anti-jamming and multipath mitigation using antenna arrays

考虑到将抗干扰后的参考阵元接收数据送入捕获模块即可实现本地载波多普勒频率和伪码相位的粗估计,因此不妨假定解扩环节相关积分器所采用的本地码相位和载波多普勒频率均与接收信号完全对齐,且相关积分周期内直视信号和多径信号的空域特性平稳。阵列天线接收数据经过抗干扰处理和相关积分解扩后,多径信号将成为引起导航测量误差的主要因素,而且由于多径信号在时域上仅为直视信号的延时和衰减,解扩后的阵列数据协方差矩阵是秩亏的,直接进行波束形成或参数估计将引起信号相消而导致多径抑制性能严重下降^[5]。为了避免信号相消现象第二级处理首先利用空间平滑解相干技术对阵列通道相关器输出协方差矩阵进行秩恢复,再利用广义旁瓣相消(Generalized Sidelobe Cancellation, GSC)原理波束形成从而实现多径抑制,跟踪环路对多径抑制后的相关值进行鉴相处理并将伪码相位误差和载波相位误差反馈至本地伪码生成和载波生成,以维持对导航信号的跟踪。

在复杂干扰和多径环境下的阵列天线接收数据矢量可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{B}j(t) + n(t) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_D]$ 为导航信号的导向矩阵; $\mathbf{B} = [\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \dots, \mathbf{i}_K]$ 为干扰信号的导向矩阵; $\mathbf{a}, s(t)$ 分别为导航信号的导向矢量和时域波形; $\mathbf{i}, j(t)$ 分别为干扰信号的导向矢量和时域波形; $n(t)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的加性通道高斯白噪

声; D, K 分别为多径和干扰信号个数。

阵列接收数据协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{A}\mathbf{E}[ss^H]\mathbf{A}^H + \mathbf{B}\mathbf{E}[jj^H]\mathbf{B}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{E}(\cdot), (\cdot)^H$ 分别为数字期望和共轭转置运算符; \mathbf{I} 为单位矩阵。一般情况下,导航接收机天线口面的干扰信号功率远大于导航信号接收功率和噪声功率,阵列接收数据协方差矩阵主要由干扰信号和噪声构成,可以表示为

$$\mathbf{R}_x \approx \mathbf{B}\mathbf{E}[jj^H]\mathbf{B}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (3)$$

2 抗干扰处理

对阵列天线接收数据协方差矩阵进行特征值分解,则有

$$\mathbf{R}_x = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M] \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_M \end{bmatrix} [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M]^H \quad (4)$$

其中, $\lambda_j (j = 1, \dots, M)$ 为阵列协方差矩阵的特征值,且满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K > \lambda_{K+1} = \dots = \lambda_M = \sigma^2$, \mathbf{u}_j 为特征值 λ_j 对应的特征矢量。定义 K 个大特征值对应的特征向量张成的子空间为干扰子空间 \mathbf{U}_I , $M - K$ 个小特征值对应的特征向量张成的子空间为信号噪声子空间 \mathbf{U}_N , 干扰子空间和噪声子空间互为正交补子空间即

$$\begin{cases} \mathbf{U}_N^H \mathbf{U}_I = \mathbf{0} \\ \mathbf{U}_I \mathbf{U}_I^H + \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H = \mathbf{I} \end{cases} \quad (5)$$

而且干扰子空间与干扰信号的导向矢量张成的子空间为同一子空间,噪声子空间与小的特征值对应的特征向量所张成的子空间为同一子空间^[9],即

$$U_I = \text{span}\{\mathbf{i}_1, \dots, \mathbf{i}_K\} = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_K\} \quad (6)$$

$$U_N = \text{span}\{\mathbf{u}_{K+1}, \dots, \mathbf{u}_M\} \quad (7)$$

通过将阵列天线接收数据矢量向噪声子空间投影,强干扰信号分量可以得到有效的压制。定义噪声子空间的投影矩阵为

$$P_N = \sum_{j=K+1}^M \mathbf{u}_j \mathbf{u}_j^H = \mathbf{I} - \sum_{j=1}^K \mathbf{u}_j \mathbf{u}_j^H \quad (8)$$

则经过子空间投影后的数据矢量将仅包含噪声和淹没其中的导航信号,投影后的数据矢量可表示为

$$\mathbf{y}(t) = P_N \mathbf{x}(t) \quad (9)$$

3 多径抑制技术

3.1 空间平滑

空间平滑技术作为解相干处理的一种有效方法,通过将整个天线阵列划分为 p 个重叠的子阵,每个子阵的个数为 m ,则有 $M = m + p - 1$ ^[9]。空间平滑技术以损失阵列孔径为代价实现对多径信号解相干的目的,根据子阵的划分方式可分为前向平滑、后向平滑以及前后向平滑。为了将平滑后的协方差矩阵恢复至满秩,重叠子阵的个数需满足一定的约束条件,同时考虑多径信号的相干性和第一级子空间投影抗干扰处理对协方差矩阵造成的秩亏,对于前向平滑和后向平滑有

$$D + K + 1 \leq p \leq M - D - K \quad (10)$$

而对于前后向平滑有

$$\frac{D + K + 1}{2} \leq p \leq M - D - K \quad (11)$$

空间平滑后的数据协方差矩阵为各子阵协方差矩阵的均值,即

$$\mathbf{R}_{ys} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbf{R}_{y_i} \quad (12)$$

其中 \mathbf{R}_{y_i} 为第 i 个子阵的数据协方差矩阵。

3.2 基于 Householder 变换的 GSC 多径抑制

采用 GSC 结构的多径抑制处理利用直视信号导向矢量将参考子阵列的解扩后数据矢量分为上下两个支路,上支路通过空间匹配滤波器保证直视信号来向的无失真响应,并且还保留有从旁瓣泄漏的多径信号,下支路将数据矢量经过阻塞矩阵后,仅包含多径信号和噪声,通过利用上、下支路中多径信号的相关性,对经过阻塞变换后的信号进行自适应滤波,从而抵消掉上支路中残留

的多径信号,并将期望的直视信号无失真输出^[10]。

直视信号导向矢量 \mathbf{a}_0 可以根据导航接收机的概略位置和星历数据估计得到,不妨假定为已知量,此时阻塞矩阵 \mathbf{B} 的构建对广义旁瓣相消器的性能具有至关重要的影响。本节采用 Householder 变换来构建阻塞矩阵,该方法在满足输出白噪声的同时不需要特征值分解,具有快速收敛的多径抑制能力。利用直视信号的导向矢量构建的 Householder 向量为

$$\mathbf{v} = \mathbf{a}_0 + \|\mathbf{a}_0\|_2 \mathbf{e} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{e} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 为单位向量, $\|\mathbf{a}_0\|_2$ 为导向矢量的二范数。基于 Householder 向量构建的 Householder 矩阵为

$$\mathbf{H}_v = \mathbf{I} - \frac{2\mathbf{v}\mathbf{v}^H}{\mathbf{v}^H\mathbf{v}} \quad (14)$$

Householder 矩阵为复共轭对称的酉矩阵,且能够将导向矢量的某些元素变为零,并保持该向量的范数不变^[10]。取 Householder 矩阵 \mathbf{H}_v 的后 $M - 1$ 行作为阻塞矩阵 \mathbf{B} ,此时 $\mathbf{B}\mathbf{a}_0 = \mathbf{0}$,且 $\mathbf{B}\mathbf{B}^H = \mathbf{I}$,因此以此方式构建的阻塞矩阵能够完全阻塞直视信号,且输出为空间白噪声。

权值矢量 \mathbf{w} 的最优解通过最小化旁瓣相消器输出的多径和噪声功率求得,其目标函数为

$$J(\mathbf{w}) = [\mathbf{a}_0 - \mathbf{B}^H \mathbf{w}]^H \mathbf{R}_y [\mathbf{a}_0 - \mathbf{B}^H \mathbf{w}] \quad (15)$$

其中 $\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}(t)\mathbf{y}(t)^H]$ 为解扩后参考子阵列的数据协方差矩阵。为了避免秩亏和相关相消现象,在最优化权值矢量求解过程中将 \mathbf{R}_y 用经过空间平滑后的协方差矩阵 \mathbf{R}_{ys} 替代,求 $J(\mathbf{w})$ 对 \mathbf{w} 的梯度有

$$\nabla_{\mathbf{w}} = \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = (\mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{B}^H)\mathbf{w} - \mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{a}_0 \quad (16)$$

令梯度 $\nabla_{\mathbf{w}}$ 为零可得权值矢量最优解为

$$\mathbf{w}_{opt} = (\mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{B}^H)^{-1} \mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{a}_0 \quad (17)$$

从式(17)可以看出直接求解最优权值矢量需要较大的运算量,一般情况下采用低复杂度的自适应处理算法对其迭代运算,常用最速下降原理使权值矢量沿着目标函数下降最快的方向进行更新^[11],即

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{1}{2}\mu \nabla_{\mathbf{w}(n)} \quad (18)$$

其中: $\mathbf{w}(n)$, $\mathbf{w}(n+1)$ 为更新前后的权值矢量; $\nabla_{\mathbf{w}(n)}$ 为更新前的梯度矢量; μ 作为步长因子控制着迭代过程的收敛速度。

将式(17)代入式(18),则有

$$\mathbf{w}(n+1) = (\mathbf{I} - \mu \mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{B}^H)\mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{a}_0 \quad (19)$$

为保证权值矢量收敛,步长因子需满足

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda'_{\max}} \quad (20)$$

其中 λ'_{\max} 为矩阵 $\mathbf{B}\mathbf{R}_{ys}\mathbf{B}^H$ 的最大特征值。

经过旁瓣相消器完成多径抑制后的输出为

$$\mathbf{z}(t) = [\mathbf{a}_0 - \mathbf{B}^H \mathbf{w}_{opt}]^H \mathbf{y}(t) \quad (21)$$

4 仿真验证

本节以由 $M = 15$ 个全向阵元间距 d 为 0.5 个载波波长构成的均匀直线阵列为例对级联处理结构的抗干扰和多径抑制性能进行仿真验证,时域快拍长度为 7,仿真过程中忽略阵元位置误差、通道误差以及互耦等非理想因素的影响。仿真数据设置为不同干扰及多径场景下的 GPS L2 频点 BPSK 导航信号,信号射频频率为 1268.52MHz,数字中频频率为 48.16MHz,采样率为 65MHz,基带抽取系数为 3,伪码码率为 10.23MHz,前端滤波器带宽为 21.67MHz。考虑到导航信号伪码良好的互相关特性,仿真过程中仅考虑单颗卫星的导航信号及其多径,直射信号入射角度设定为 0° ,载噪比设定为 50dBHz,不同仿真场景下干扰和多径参数设置分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同仿真场景下的干扰参数设置

Tab. 1 Jamming parameters setting for different scenarios

仿真场景	干扰类型	入射方向/ ($^\circ$)	频率偏差/ MHz	干信比/ dB
I	CWI	10	0	70
	CWI	15	-3	70
II	NBI	30	-6	60
	WBI	4	0	50

表 2 不同仿真场景下的多径参数设置

Tab. 2 Multipath parameters setting for different scenarios

仿真场景	多径时延/ chip	入射方向/ ($^\circ$)	多径幅度
I	0.05	20	-0.5
	0.1	37	-0.25
II	0.15	18	-0.5
	0.2	42	0.25

令抗干扰处理的噪声子空间投影矩阵的等效无约束权值矢量为 $\mathbf{w}' = \mathbf{P}_N \mathbf{s}$,且 $\mathbf{s} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 。则仿真场景 I 和场景 II 下的权值响应方向图分别如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出,子空间投

影处理在干扰信号的来波方向形成深的零陷,从而能够有效地压制干扰。

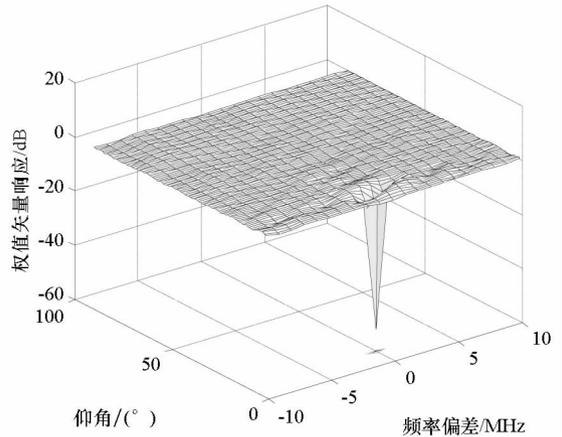


图 2 仿真场景 I 干扰抑制权值方向图

Fig. 2 Anti-jamming weight pattern for scenario I

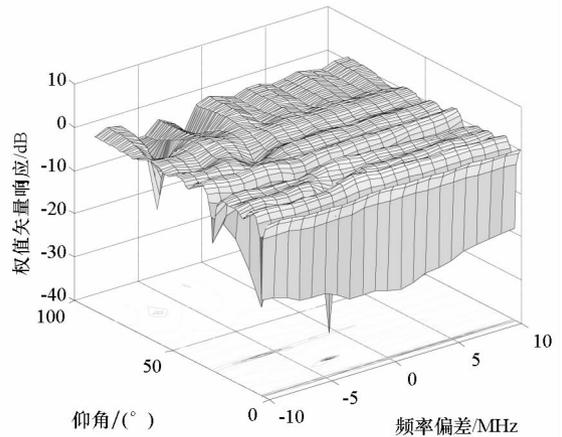


图 3 仿真场景 II 干扰抑制权值方向图

Fig. 3 Anti-jamming weight pattern for scenario II

经过子空间投影抗干扰并对干扰压制后的导航信号进行相关积分解扩处理后,多径的存在将使导航信号的理想相关峰函数发生变形,并将引起伪码延时锁定环路(Delay Locked Loop, DLL)的鉴相器出现过零点偏差。图 4 和图 5 分别为不同仿真场景下经过抗干扰处理后和多径抑制处理后的伪码相关峰函数与理想相关峰函数对比,图 6 和图 7 则为不同场景下采用非相干超前减滞后幅值法的 DLL 鉴相器输出曲线(S 曲线)与理想 S 曲线对比,图 8 为不同仿真场景下多径抑制处理的等价空域权值矢量波束方向图,从图 4~8 中可以看出本文提出的基于 Householder 变换的广义旁瓣相消结构能够有效地抑制不同时延的多径信号,并显著地减小多径信号引入的伪码跟踪测量误差。

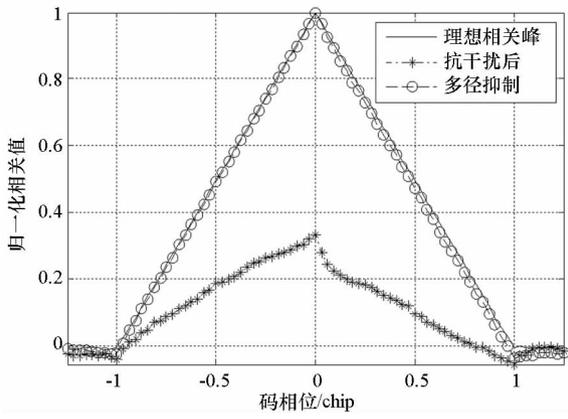


图4 仿真场景 I 多径抑制前后的相关峰对比
Fig.4 Before and after multipath mitigation correlation peak comparison for scenario I

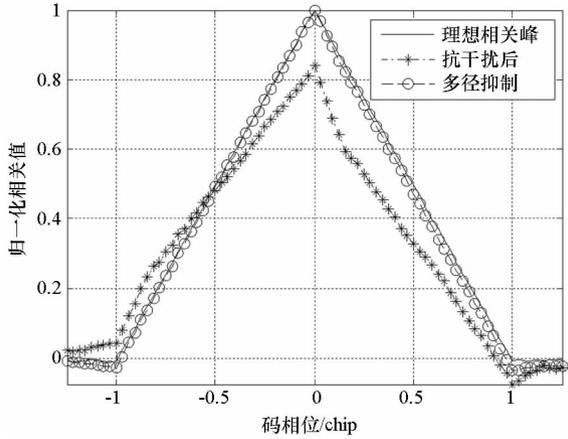


图5 仿真场景 II 多径抑制前后的相关峰对比
Fig.5 Before and after multipath mitigation correlation peak comparison for scenario II

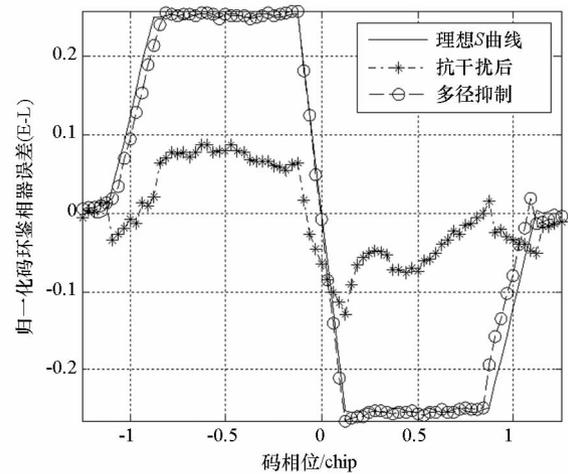


图6 仿真场景 I 多径抑制前后的接收机码环鉴相器误差曲线对比
Fig.6 Before and after multipath mitigation of the DLL S-curve comparison for scenario I

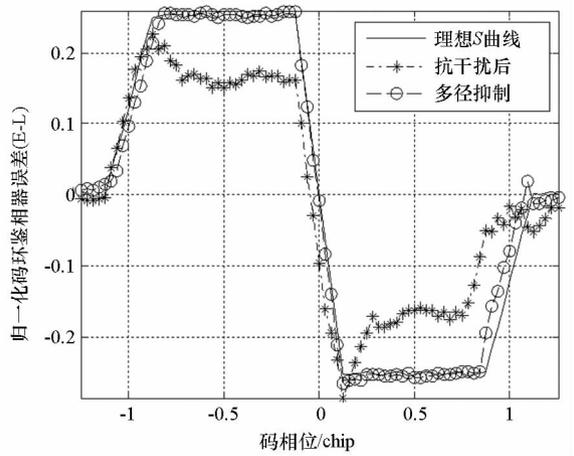


图7 仿真场景 II 多径抑制前后的接收机码环鉴相器误差曲线对比
Fig.7 Before and after multipath mitigation of the DLL S-curve comparison for scenario II

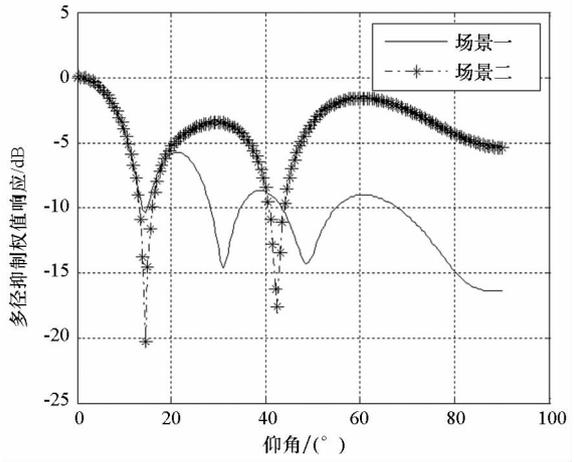


图8 不同仿真场景下的多径抑制权值响应
Fig.8 Weight response comparison for multipath mitigation under different scenarios

5 结论

算法分析和仿真结果表明:解扩前的空时子空间投影技术和解扩后的基于 Householder 变换的广义旁瓣相消技术能够分别压制不同类型的多个干扰信号和多径信号,并正确恢复导航信号的伪码相关峰函数,因此采用本文提出的阵列天线导航接收机级联处理结构能够显著降低复杂环境中干扰和多径对伪码测量的影响,极大地提高了导航接收机工作的稳健性。

参考文献 (References)

[1] 郭文飞. 抗干扰 GPS 接收系统关键技术研究及实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
GUO Wenfei. Research and implementation of key technologies in anti-jamming GPS receiver [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese)

- [2] 张镔. 现代卫星导航信号恒包络发射与抗多径接收技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
ZHANG Kai. Constant-envelope transmission and multipath mitigation for modern satellite navigation signals[D]. Changsha:National University of Deference Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] Zhao L, Amin M G, Lindsey A R. Subspace array processing for the suppression of FM jamming in GPS receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1):80-92.
- [4] Daneshmand S. GNSS interference mitigation using antenna array processing[D]. Canada:University of Calgary,2013.
- [5] Daneshmand S, Broumandan A, Nielsen J, et al. Interference and multipath mitigation utilising a two-stage beamforming for global navigation satellite systems application [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2013, 7(1):55-66.
- [6] Rougerie S, Carrie G, Vincent F, et al. A new multipath mitigation method for GNSS receivers based on antenna array[J]. International Journal of Navigation and Observation, 2012(2012).
- [7] Daneshmand S, Broumandan A, Sokhandan N, et al. GNSS multipath mitigation with a moving antenna array [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1):693-698.
- [8] Sahmoudi M, Amin M G. Optimal robust beamforming for interference and multipath mitigation in GNSS arrays [C]// Proceedings of IEEE international conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007, 3:III-693-III-696.
- [9] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法 [M]. 北京:清华大学出版社,2004:26-30.
WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, et al. Spatial spectrum estimation theory and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004:26-30. (in Chinese)
- [10] 王纯. 卫星导航接收机自适应抗干扰方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
WANG Chun. Research on adaptive interference suppression in satellite navigation receiver[D]. Xi'an:XiDian University, 2011. (in Chinese)
- [11] Windrow B. Adaptive filters[M]. USA: Holt, Rinehart and Winston, 1971:563-587.
- (上接第9页)
- [51] Psiaki M L, O' Hanlon B W, Bhatti J A, et al. Civilian GPS spoofing detection based on dual receiver correlation of military signals [C]// Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2011: 2619-2645.
- [52] Psiaki M, O'Hanlon B W, Bhatti J A, et al. GPS spoofing detection via dual-receiver correlation of military signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(4): 2250-2267.
- [53] O' Hanlon B W, Psiaki M, Humphreys T E, et al. Real-time spoofing detection using correlation between two civil GPS receiver [C]// Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2012: 3584-3590.
- [54] Swaszek P F, Hartnett R J, Kempe M V, et al. Analysis of a simple, multi-receiver GPS spoof detector [C]// Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2013: 884-892.
- [55] Swaszek P F, Hartnett R J. Spoof detection using multiple COTS receivers in safety critical applications [C]// Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2013: 2921-2930.
- [56] Heng L, Makela J J, Dominguez-Garcia A D, et al. Reliable GPS-based timing for power systems: a multi-layered multi-receiver architecture [C]// Proceedings of Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2014: 1-7.
- [57] Jafarnia-Jahromi A, Lin T, Broumandan A, et al. Detection and mitigation of spoofing attacks on a vector-based tracking GPS receiver [C]// Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2012: 790-800.
- [58] Heng L, Chou D, Gao G X. Reliable GPS-based timing for power systems[J]. Inside GNSS, 2014(6): 38-45.
- [59] Lo S, De Lorenzo D, Enge P, et al. Signal authentication: a secure civil GNSS for today [J]. Inside GNSS, 2009(5): 30-39.
- [60] Heng L, Work D B, Gao G X. Cooperative GNSS authentication: reliability from unreliable peers [J]. Inside GNSS, 2013(5): 70-75.