

通道失配对 GNSS 阵列抗干扰性能的影响分析*

陈飞强, 鲁祖坤, 陈雷, 李峥嵘, 孙广富
(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 卫星导航接收机极易受到电磁干扰的影响, 基于阵列接收机的空时(频)抗干扰技术被证明是目前最有效的抗干扰手段。在工程实现时, 阵列通道存在通道失配, 本文以统计性能的评估方法评估了通道失配对阵列抗干扰性能的影响。研究结果表明, 通道间群时延偏差和幅度失配是导致阵列抗干扰性能下降的主要因素, 前者可通过增加空时滤波器阶数来消除影响, 而后者对空时滤波器阶数不敏感, 需要进行必要的校正。

关键词: 卫星导航; 天线阵; 抗干扰; 功率倒置; 通道失配

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)03-050-06

Effect of channel mismatch on the anti-jamming performance of GNSS adaptive antenna arrays

CHEN Feiqiang, LU Zukun, CHEN Lei, LI Zhengrong, SUN Guangfu

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

Abstract: Satellite navigation receivers are highly susceptible to electromagnetic interference, and array-based space-time or space-frequency adaptive processing has been proved to be the most effective anti-jamming method. In actual engineering implementation, the channel mismatch is inevitable. Thus in this paper, the impact of channel mismatch on the performance of GNSS antenna array was evaluated according to the statistical evaluation method. The results show that, group delay bias and amplitude mismatch between channels are the two main factors leading to the deterioration of anti-jamming performance. The influence of the former can be eliminated by increasing the number of taps of space-time filter, while the latter is not sensitive to the number of taps and the necessary calibration is required.

Keywords: satellite navigation; antenna array; interference mitigation; power inversion; channel mismatch

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能为全球用户持续提供位置、导航和时间(Positioning, Navigation and Timing, PNT)等关键时空信息, 已经在国防、电力、通信、测绘、智能交通等领域得到了广泛的应用。然而, GNSS的脆弱性仍是一个无法回避的问题, GNSS用户极易受到电磁干扰的影响。有研究表明^[1], 辐射功率仅为1 W的干扰源即可使约15 km范围内的GNSS接收机无法正常工作。

在GNSS接收机层面, 已有多种技术应对电磁干扰, 包括时域抗干扰技术、频域抗干扰技术和空时(频)抗干扰技术等^[2-7], 其中基于阵列接收机的空时(频)抗干扰技术被证明是目前最有效的抗干扰手段^[8]。

阵列接收机由天线阵、多个射频通道以及数字处理芯片组成, 射频通道由低噪放、混频器、滤

波器等模拟器件组成。由于温度、环境差异及制造公差等因素的存在, 阵列接收机的各阵列通道在实现时难以做到完全相同, 不同通道间存在幅度和相位特性的不一致, 即通道失配。

已有不少研究表明, 通道失配会导致阵列接收机的抗干扰性能恶化^[9-13]。但这些研究在评估通道失配的影响时, 往往是在特定的信号干扰场景下进行的, 即假设干扰和信号从某几个固定的方向入射。我们已经知道, 阵列的抗干扰性能高度依赖于信号和干扰的入射方向, 在某些特定场景下得到的评估结果可能不具有一般性, 需要重新评估。另外, 以往的研究通常以定性评估为主, 缺少定量结果, 难以达到指导工程应用的目的。

本文尝试按照统计性能评估方法的原则和思路, 重新评估通道失配对阵列抗干扰性能的影响, 并得到定量结果。

* 收稿日期: 2019-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41604016)

作者简介: 陈飞强(1988—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, E-mail: matlabfly@hotmail.com;

鲁祖坤(通信作者), 男, 讲师, 博士, E-mail: luzukun@nudt.edu.cn

1 通道失配模型

通道的传输函数 $H(f)$ 可表示为:

$$H(f) = \begin{cases} A(f) \exp[j\varphi(f)] & |f| \leq B/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为频率, $A(f)$ 为幅频响应, $\varphi(f)$ 为相频响应, B 为传输带宽。

理想的通道应当满足无失真传输条件,即在传输带宽内具有平坦的幅度和线性相位。理想通道的传输函数 $H_{ideal}(f)$ 可表示为:

$$H_{ideal}(f) = \begin{cases} A_0 \exp(j2\pi f\tau_0) & |f| \leq B/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中,幅度 A_0 为与频率无关的常数, τ_0 为通道的群时延。

实际的通道存在非理想特性,表现为幅度不平坦、相位非线性。对于阵列接收机,各通道的非理想特性也不一致,存在通道失配。文献[14]中提出了一种经典的通道失配模型,且被广为采用,在该模型中,阵列接收机第 n 个通道的传输函数 $H_n(f)$ 可用下式表示:

$$H_n(f) = \begin{cases} [1 + R_a^n \cos(2\pi f)] \exp\{j[R_p^n \cos(2\pi f) + 2\pi f(R_b^n + \tau_0)]\} & |f| \leq B/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_a^n 为幅度波动量(归一化值), R_p^n 为群时延波动量, R_b^n 为群时延偏差。

以两阵元阵列接收机为例,为定量描述通道失配,通常假设通道1具有理想传输函数,即 R_a^1 、 R_p^1 和 R_b^1 均为0,并通过控制通道2传输函数的参数 R_a^2 、 R_p^2 和 R_b^2 来刻画通道失配的程度。图1和图2分别给出了应用上述通道失配模型得到的幅度失配和相位失配模拟结果。

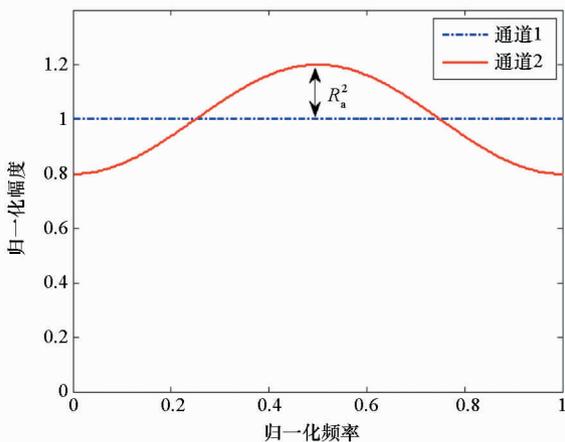


图1 通道幅度失配模拟结果

Fig.1 Simulation results of channel amplitude mismatch

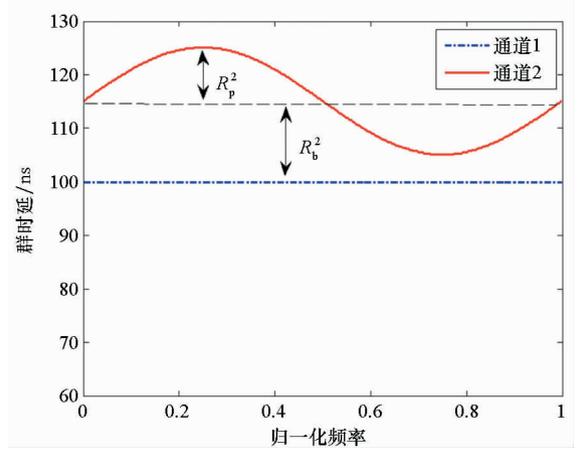


图2 通道相位失配模拟结果

Fig.2 Simulation result of channel phase mismatch

2 通道失配下的阵列抗干扰处理

为聚焦于通道失配的影响分析,假设天线阵元为理想各向同性天线,即不考虑各天线阵元方向图的差异及阵元间的互耦。不失一般性,考虑 N 元直线阵。假设远场处有一个期望信号(GNSS信号)和 P 个互不相干的干扰以平面波入射,到达角度分别为 θ_0 和 $\theta_k (k = 1, 2, \dots, P)$,则阵列接收信号矢量可表示为 GNSS 信号、干扰和噪声的叠加:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{s}(t) + \mathbf{j}(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{a}(\theta_0) \cdot \begin{bmatrix} h_1(t) * s(t) \\ h_2(t) * s(t) \\ \vdots \\ h_N(t) * s(t) \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^P \mathbf{a}(\theta_k) \cdot \begin{bmatrix} h_1(t) * j_k(t) \\ h_2(t) * j_k(t) \\ \vdots \\ h_N(t) * j_k(t) \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t) \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为 N 维数据矢量, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$; $\mathbf{n}(t)$ 为 N 维噪声矢量, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$,这里假设噪声为高斯白噪声; $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为信号导向矢量, $\mathbf{a}(\theta_k) (k = 1, 2, \dots, P)$ 为第 k 个干扰的导向矢量,导向矢量由信号(或干扰)的入射方向以及阵元相对参考接收点的位置坐标确定; $s(t)$ 为信号的复包络, $j_k(t)$ 第 k 个干扰的复包络, $h_n(t) (n = 1, 2, \dots, N)$ 为第 n 个阵列通道传输函数的冲击响应; 上标“T”表示转置操作,符号“ \cdot ”表示点乘,符号“ $*$ ”表示卷积。

设空时滤波器的阶数为 M ,则滤波器的输入数据矢量(NM 维)可表示为:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{s}}(t) + \hat{\mathbf{j}}(t) + \hat{\mathbf{n}}(t)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{s}(t) \\ \mathbf{s}(t - T_s) \\ \vdots \\ \mathbf{s}[t - (M-1)T_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{j}(t) \\ \mathbf{j}(t - T_s) \\ \vdots \\ \mathbf{j}[t - (M-1)T_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}(t) \\ \mathbf{n}(t - T_s) \\ \vdots \\ \mathbf{n}[t - (M-1)T_s] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, T_s 表示滤波器的抽头时延。

假设信号、干扰以及噪声之间不相关, 输入数据矢量的自相关矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\hat{\mathbf{x}}(t)\hat{\mathbf{x}}^H(t)] = \mathbf{R}_{ss} + \mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_{nn} \quad (6)$$

式中, \mathbf{R}_{ss} 表示信号自相关矩阵, \mathbf{R}_{jj} 表示干扰自相关矩阵, \mathbf{R}_{nn} 表示噪声自相关矩阵, 上标“H”表示共轭转置操作。经空时滤波器滤波处理后得到阵列输出信号为:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}^* x_n[t - (M-1)T_s] = \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (7)$$

式中: 上标“*”表示共轭操作; \mathbf{w} 为阵列权矢量, 它是由空时滤波器的系数组成的 NM 维矢量

$$\mathbf{w} = [w_{11}, \dots, w_{N1}, \dots, w_{N2}, \dots, w_{NM}]^T \quad (8)$$

为获得阵列权矢量, 在 GNSS 应用中通常采用不需要任何先验信息的功率倒置 (Power Inversion, PI) 算法^[15], 其基本原理是以某一个阵元接收信号作为参考, 调整空时滤波器的系数使阵列的输出信号功率最小。若以第一个阵元做参考, 由 PI 算法确定的最优阵列权矢量可表示为:

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{c} \quad (9)$$

式中, μ 为一常数, $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 为第一个元素为 1、其余元素为 0 的 NM 维列矢量。

当阵列权矢量确定时, 可以计算出阵列输出信干噪比, 其定义为阵列输出信号功率与干扰加噪声功率之比, 即:

$$SINR = \frac{P_s}{P_j + P_n} = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{ss} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_{nn}) \mathbf{w}} \quad (10)$$

阵列输出信干噪比可用来衡量阵列抗干扰处理后的信号质量。

3 基于统计性能的抗干扰性能评估

由于阵列抗干扰性能与信号及干扰的来波方向密切相关, 不同的场景设置得到的评估结果往往差异较大甚至自相矛盾。为全面、准确评估通道失配对阵列抗干扰性能的影响, 本文采用基于

统计性能的评估方法^[16]。

基于统计性能的评估方法基本思想是假定信号和干扰从各个方向随机入射, 并采用蒙特卡洛方法估计各指标超过一定门限的概率。更具体地, 本文采用信号可用率作为评估指标, 其定义为阵列输出信干噪比超过一定门限的测试场景数占总测试场景数的比例。

设蒙特卡洛实验的总次数为 L_0 , 阵列输出信干噪比门限为 $SINR_{th}$, 在 L_0 次实验中, 阵列输出信干噪比大于门限的次数为 L_1 , 则信号可用率 P 可表示为:

$$P(SINR \geq SINR_{th}) = \frac{L_1}{L_0} \quad (11)$$

4 仿真实验

为了分析评估通道失配对阵列抗干扰性能的影响, 用软件接收机进行仿真。首先用 MATLAB 生成阵列信号, 用来模拟产生天线阵接收到的不同入射方向上的 GNSS 信号、干扰以及噪声。然后用通道失配模型对阵列信号进行处理, 将通道失配的效应施加到阵列信号当中。最后用 PI 算法进行空时抗干扰处理, 并统计各种通道失配参数下的信号可用率。基本的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真中用到的参数

Tab. 1 Parameters used in the simulations

参数类型	参数取值
天线阵型	阵元间距为半波长的 2 元直线阵
GNSS 信号类型	北斗 B3 信号 (PRN 1), 中心频率为 1268.52 MHz
信噪比	-30 dB
干扰频率	1268.52 MHz
干扰带宽	20 MHz
干扰干信比	60 dB

下面分别从幅度失配、群时延波动和群时延偏差三个方面分析通道失配的影响。值得注意的是, 下文中的失配参数均是结合了目前工程实现实际能达到的水平而设置的。

4.1 幅度失配的影响分析

仿真中, 将通道的群时延波动 R_b^2 和群时延偏差 R_a^2 设置为 0, 改变幅度波动 R_s^2 的大小。对于 R_s^2 的每组取值, 进行 1000 次蒙特卡洛仿真。考

虑实际中卫星信号一般在高仰角方向,而干扰一般从低仰角入射,仿真中 GNSS 信号设置为从仰角大于 15° 的方向随机入射,干扰的设置从仰角小于 30° 的方向随机入射,入射角度服从均匀分布。

图 3 给出了通道幅度失配对信号阵列抗干扰性能的影响,其中空时滤波器的阶数 M 设置为 5。从图中可以看出,幅度失配对信号可用率影响较大。以阵列输出信干噪比损耗 3 dB 为门限(实际抗干扰测试中约定的门限,即抗干扰后的信噪比比输入信噪比低 3 dB,在本实验中此门限值为 -33 dB),当幅度失配为 0.3 时,信号可用率由无失配时的 67.6% 降至 37.3%;为使信号可用率下降不超过 10%,应当使幅度失配小于 0.15。

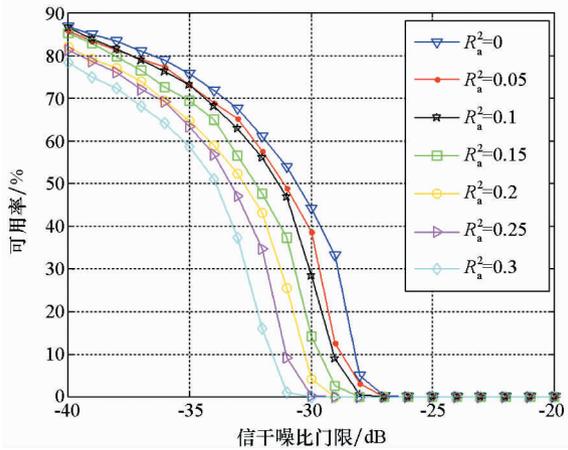


图 3 通道幅度失配对阵列抗干扰性能的影响
Fig. 3 Effect of amplitude mismatch on the performance of antenna array

图 4 进一步给出了在幅度失配 ($R_a^2 = 0.3$) 条件下,空时滤波器阶数 M 对信号可用率的影响。从图中可以看到,当 $M = 1$ 即采用空域抗干扰处理时,信号可用率为 0,这表明当存在幅度失配时,空域滤波处理对干扰的抑制效果不佳,阵列输出信干噪比损耗很大。另外,采用空时抗干扰处理时,增加空时滤波器阶数对信号可用率的影响十分有限,这表明,一旦通道存在幅度失配,难以通过增加空时滤波器阶数的方式减小幅度失配引起的阵列抗干扰性能下降。

4.2 群时延波动的影响分析

仿真中,将通道的幅度波动 R_a^2 和群时延偏差 R_p^2 设置为 0,改变群时延波动 R_p^2 的大小,其他参数设置与 4.1 小节相同。

图 5 给出了通道群时延波动对信号阵列抗干

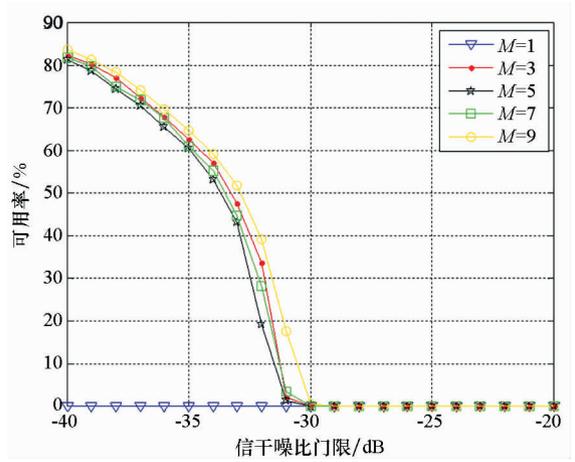


图 4 幅度失配条件下空时滤波器阶数对信号可用率的影响

Fig. 4 Effect of number of filter taps on the performance of antenna array under amplitude mismatch

扰性能的影响。从图中可以看出,群时延波动对信号可用率的影响几乎可以忽略,以阵列输出信干噪比损耗 3 dB 为门限,即使群时延波动 R_p^2 为 24 ns 时,与无失配时相比,信号可用率下降也不超过 4%。

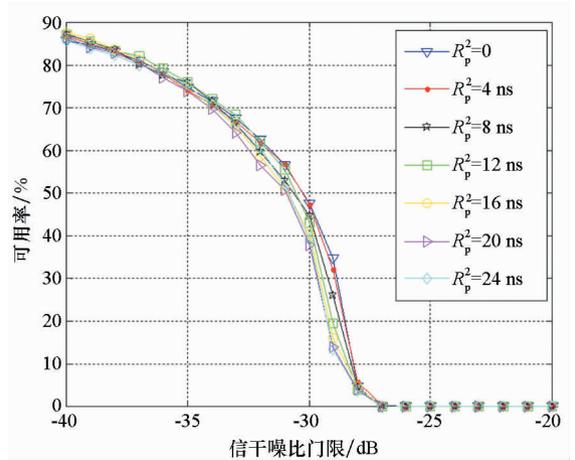


图 5 通道群时延波动对阵列抗干扰性能的影响
Fig. 5 Effect of group delay variation on the performance of antenna array

4.3 群时延偏差的影响分析

仿真中,将通道的幅度波动 R_a^2 和群时延波动 R_p^2 设置为 0,改变群时延偏差 R_b^2 的大小,其他参数设置与 4.1 小节相同。

图 6 给出了通道群时延偏差对信号阵列抗干扰性能的影响。从图中可以看出,群时延偏差对信号可用率影响较大。以阵列输出信干噪比损耗 3 dB 为门限,当幅度失配为 24 ns 时,信号可用率由无失配时的 67.6% 降至 22.0%;为使信号可用

率下降不超过 10%，应当使群时延偏差 R_b^2 小于 12 ns。

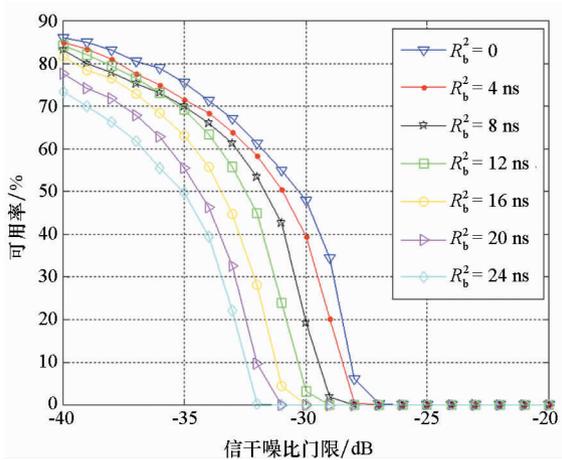


图 6 通道群时延偏差对阵列抗干扰性能的影响

Fig. 6 Effect of group delay bias on the performance of antenna array

图 7 进一步给出了在群时延偏差 ($R_b^2 = 24$ ns) 条件下,空时滤波器阶数 M 对信号可用率的影响。从图中可以看到,与幅度失配的情况类似,当存在群时延偏差时,空域滤波处理对干扰的抑制效果不佳。另外,采用空时抗干扰处理时,增加空时滤波器阶数对信号可用率有显著的提升,当空时滤波器阶数增加到 9 阶时,基本可以消除通道群时延偏差引起的阵列抗干扰性能损耗。

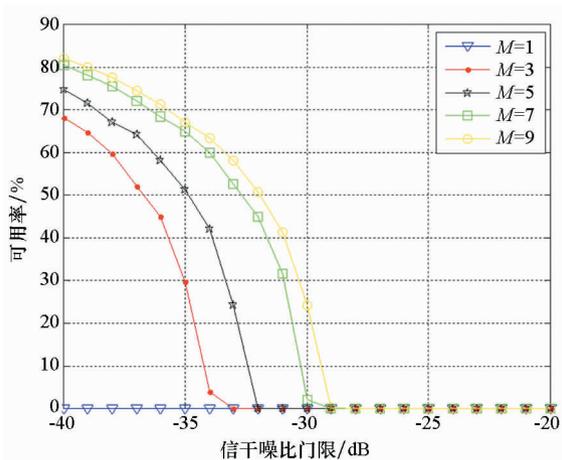


图 7 群时延偏差条件下空时滤波器阶数对信号可用率的影响

Fig. 7 Effect of number of filter taps on the performance of antenna array under group delay bias

5 结论

本文分析评估了通道失配对 GNSS 阵列抗干扰性能的影响,区别于传统的基于特定场景的评

估方法,本文采用了基于统计性能评估方法,得到的结果更为全面、准确。评估结果表明:①通道群时延波动对阵列抗干扰性能影响较小,幅度失配和群时延偏差是导致阵列抗干扰性能下降的主要因素;②群时延偏差的影响基本可以通过增加空时滤波器阶数予以消除,但幅度失配对空时滤波器阶数不敏感;③为减小通道失配对阵列抗干扰性能的影响,建议通过通道校正将幅度波动减小到 0.15 以内,同时采用 9 阶空时滤波处理消除群时延偏差的影响。

参考文献 (References)

- [1] 陈飞强. GNSS 天线阵接收机干扰抑制与测量偏差补偿技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017. CHEN Feiqiang. Interference mitigation and measurement biases compensation for GNSS antenna array receivers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [2] Fan G T, Tang X M, Nie J W, et al. A zero bias frequency-domain interference suppressor for GNSS receivers[J]. IEICE Transactions on Communications, 2016, E99B(9): 2081 – 2086.
- [3] Chang H K, Sun Y K, Chan G P. Global navigation satellite system interference tracking and mitigation based on an adaptive fading Kalman filter [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2015, 9(8): 1030 – 1039.
- [4] Arribas J, Fernandez-Prades C, Closas P. Antenna array based GNSS signal acquisition for interference mitigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 223 – 243.
- [5] Li M, Dempster A G, Balaei A T, et al. Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1564 – 1579.
- [6] Appel M, Iliopoulos A, Fohlmeister F, et al. Interference and multipath suppression with space-time adaptive beamforming for safety-of-life maritime applications [J]. CEAS Space Journal, 2019, 11: 21 – 34.
- [7] Hu Y F, Bian S F, Li B, et al. A novel array-based spoofing and jamming suppression method for GNSS receiver [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2952 – 2958.
- [8] O'Brien A J. Adaptive antenna arrays for precision GNSS receivers[D]. Columbus: the Ohio State University, 2009.
- [9] 许海龙, 庄学彬, 崔晓伟, 等. 通道幅相不一致对 SFAP 性能影响的分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(9): 1184 – 1189. XU Hailong, ZHUANG Xuebin, CUI Xiaowei, et al. Analysis of the effect of amplitude and phase inconsistencies between channels on SFAP [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(9): 1184 – 1189. (in Chinese)

- [10] Lu Z K, Nie J W, Chen F Q, et al. Impact on antijamming performance of channel mismatch in GNSS antenna arrays receivers [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, 2016: 1-9.
- [11] Fante R L, Vaccaro J J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 549-564.
- [12] Chuang Y C, Gupta I J. On-the-fly estimation of antenna induced biases in SFAP based GNSS antenna arrays [J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2014, 61(4): 323-330.
- [13] Lu Z K, Nie J W, Chen F Q, et al. Adaptive time taps of STAP under channel mismatch for GNSS antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017: 1-12.
- [14] Monzingo R A, Miller T W. *Introduction to adaptive arrays*[M]. New York: Wiley, 1980.
- [15] Compton R T. The power-inversion adaptive array: concept and performance[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, AES-15(6): 803-814.
- [16] Ulrey J A, Gupta I J. Optimum element distribution for circular adaptive antenna systems [C]// *Proceedings of the ION NTM*, Monterey, CA, USA, 2006: 76-81.