

## 基于二维虚拟空间平滑算法的跳频通信系统跟踪式干扰抑制研究

尚佳栋<sup>\*①</sup> 王祖林<sup>①</sup> 郭旭静<sup>①</sup> 周倩<sup>①</sup> 何善宝<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

<sup>②</sup>(中国空间技术研究院 北京 100194)

**摘要:** 基于均匀矩形阵列, 利用阵列接收信号及其共轭信息, 推导出 2 维的虚拟空间平滑算法。通过构造 2 维虚拟子阵, 消除干扰信号与期望信号之间的相关性, 避免了有效阵列孔径的损失, 提高了算法的空间谱分辨率。将该算法与相位补偿技术相结合, 给出了一种抗跟踪式干扰的跳频通信系统。通过理论分析和模拟仿真, 验证了该系统对跟踪式干扰具有较好抑制能力, 在干扰方向的零陷抑制深度达 50 dB 以上, 并且与普通跳频系统相比在 -3 dB 的强干扰环境下具有优良的误码率特性。

**关键词:** 跳频通信; 自适应波束形成; 跟踪式干扰; 2 维虚拟空间平滑; 相位补偿; 信干噪比

中图分类号: TN914.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1193-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00552

## Research of Tracking Interference Suppression in FH System Based on Two-dimensional Virtual Space Smoothing Algorithm

Shang Jia-dong<sup>①</sup> Wang Zu-lin<sup>①</sup> Guo Xu-jing<sup>①</sup> Zhou Qian<sup>①</sup> He Shan-bao<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

<sup>②</sup>(China Academy of Space Technology, Beijing 100194, China)

**Abstract:** The two-dimensional virtual space smoothing algorithm is derived employing the received signals of all array elements and their conjugate data based on the rectangular array. By constructing virtual sub-array to eliminate the correlation between the interference signal and the desired signal, the array aperture loss is reduced and the spectral resolution of space is improved. A frequency-hopping communication system with inhibition of tracking interference is designed by combining this algorithm with phase compensation. The theoretical analysis and simulation results show that the new system is good on the tracking interference suppression with a -50 dB interference rejection for the tracking rejection and has a good bit error rate characteristics at -3 dB strong interference environment.

**Key words:** Frequency-hopping communication; Adaptive beam-forming; Tracking interference; Two -dimensional virtual space smoothing; Phase compensation; SINR

### 1 引言

跳频通信技术的强抗干扰、抗截获性能使其在通信领域的应用越来越广泛, 通过载波频率的跳变来躲避干扰对信号的影响, 以达到抗干扰的目的。快速跟踪式干扰、宽带阻塞式干扰是对跳频通信威胁最大的两种干扰, 一般分别采取提高跳频速率和宽频带跳频的措施。然而, 这样会带来系统复杂性增加、技术难度增大等问题<sup>[1]</sup>。为解决这一问题, Frail 最先提出将天线调零技术和跳频技术相结合, 提高系统的抗干扰性能。

文献[1]中采用从波束形成网络来抑制宽带阻塞式干扰和跟踪式干扰, 但该方法没有考虑跳频对自适应波束形成产生的影响以及干扰源的相关性问题, 当相邻频点存在较大频差或者有相关干扰(跟踪式干扰)存在时, 系统的空域滤波特性受到严重影响。为此, 文献[2,3]提出了聚集算法和空间平滑算法。通过聚集矩阵来实现相邻跳频频点间的频率补偿, 并采用空间平滑矩阵对干扰信号进行去相关处理, 提高系统对相关干扰的抑制能力。文献[4]提出在均匀阵列中通过 2 维空间平滑实现波束形成的方法。但由于空间平滑算法以牺牲有效阵元孔径数来实现信号的解相关, 导致阵列有效孔径的损失和空间分辨率下降<sup>[5]</sup>。文献[5]提出了一种基于虚拟空间的矩阵平滑算法, 在不改变有效阵元孔径数的情况

2010-06-01 收到, 2011-03-04 改回

教育部博士点基金(20091102120010)和中国空间技术研究院资助课题

\*通信作者: 尚佳栋 shangjiadong456@163.com

下实现了空间平滑,但该算法仅适用于1维线阵。2维虚拟空间平滑算法多用于对波达方向(DOA)的估计,在波束形成中应用较少。

本文基于均匀矩形阵列提出一种2维的虚拟子阵空间平滑算法,该算法能够有效地降低干扰信号与期望信号的相关性,并可以保持空间分辨率不变。同时将该算法与相位补偿算法相结合,给出了一种抗相关干扰的跳频通信系统方案。

## 2 2维虚拟空间平滑算法

### 2.1 阵列结构与信号模型

设均匀矩形阵列天线共 $MN$ 个阵元,如图1所示。 $x$ 轴与 $y$ 轴相邻阵元间距分别为 $d_x$ 和 $d_y$ ,取 $d_x = d_y = \lambda/2$ 。在采用阵元天线的跳频通信系统中, $\lambda$ 取为跳频的中心频点 $f_0$ 对应波长,入射波的方向角为 $\theta_d$ ,仰角为 $\phi_d$ 。

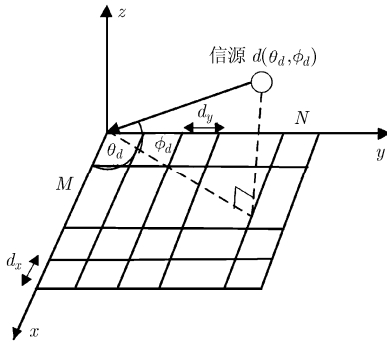


图1 均匀矩形阵列的结构图和入射信号模型

设有 $D$ 个波长为 $\lambda_{r_k}$ 的远场窄带相干信号,分别以俯仰角 $\theta_d$ 和方位角 $\phi_d$ 入射到阵列, $d = 1, 2, \dots, D$ , $\lambda_{r_k}$ 为第 $k$ 个跳频频点对应的信号波长。假定阵元的加性噪声为空域白噪声,功率为 $\sigma^2$ ,与各入射信号不相关,则得到的输出信号为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1(\theta_1, \phi_1), \dots, \mathbf{a}_D(\theta_D, \phi_D)]$ , $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$ 。其中 $\mathbf{a}_i(\theta_i, \phi_i)^T$ 为入射信号导矢量, $s_1(t)$ 为信号的复包络。 $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_D(t)]^T$ 为噪声信号矢量。由此得到阵列输出信号的相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{XX} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_{SS}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{R}_{SS} = E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]$ 为信号源协方差矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

### 2.2 算法理论推导

根据均匀阵列的平移不变性,利用阵列的接收数据及其共轭信息构造 $MN$ 个2维虚拟子阵。其中,第 $mn$ 个虚拟子阵的矢量表示形式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{mn}(t) &= \mathbf{A}\Phi_X^{(m-1)}\Phi_Y^{(n-1)}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}_{mn}(t), \\ m &= 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\Phi_X$ 和 $\Phi_Y$ 为虚拟子阵的构造矩阵,其中 $\Phi_X = \text{diag}[e^{j\alpha_1}, e^{j\alpha_2}, \dots, e^{j\alpha_D}]$ , $\Phi_Y = \text{diag}[e^{j\beta_1}, e^{j\beta_2}, \dots, e^{j\beta_D}]$ , $\alpha_i = (2\pi/\lambda)d_x \sin \theta_i \sin \phi_i$ , $\beta_i = (2\pi/\lambda)d_y \cos \theta_i \cos \phi_i$ 。

由此得到每个虚拟子阵的输出信号自相关矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{mn} &= E[\mathbf{X}_{mn}(t)\mathbf{X}_{mn}^H(t)] = \mathbf{A}\Phi_X^{(m-1)}\Phi_Y^{(n-1)} \\ &\cdot \mathbf{R}_{SS}(\Phi_Y^{(n-1)})^H(\Phi_X^{(m-1)})^H\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \end{aligned} \quad (4)$$

对每个自相关矩阵进行求和平均,得到阵列输出信号的虚拟空间平滑矩阵为

$$\mathbf{R}_V = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbf{R}_{mn} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{R}}_{SS}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (5)$$

其中 $\bar{\mathbf{R}}_{SS}$ 为信号源的虚拟空间平滑协方差矩阵。

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_{SS} &= \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \Phi_X^{(m-1)}\Phi_Y^{(n-1)}\mathbf{R}_{SS}(\Phi_Y^{(n-1)})^H(\Phi_X^{(m-1)})^H \\ &= \frac{1}{MN} \mathbf{C}\mathbf{C}^H \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{C}$ 为 $D \times MN$ 的矩阵,定义为 $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_y, \Phi_X\mathbf{C}_y, \dots, \Phi_X^{(M-1)}\mathbf{C}_y]$ , $\mathbf{C}_y = [\mathbf{S}, \Phi_Y\mathbf{S}, \dots, \Phi_Y^{(N-1)}\mathbf{S}]$ 。

将矩阵 $\mathbf{C}$ 的转置 $\mathbf{C}^T$ 进行如下分解:

$$\mathbf{C}^T = \mathbf{L} \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_D) \quad (7)$$

矩阵 $\mathbf{L}$ 定义为

$$\mathbf{L} = [\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_D] \quad (8)$$

其中 $\mathbf{l}_i = [l_{y,i}, e^{j\alpha_i}l_{y,i}, \dots, e^{j(M-1)\alpha_i}l_{y,i}]^T$ , $l_{y,i} = [1, e^{j\beta_i}, \dots, e^{j(M-1)\beta_i}]^T$ 。

由矩阵奇异值分解定理知: $\text{rank}(\bar{\mathbf{R}}_{SS}) = \text{rank}(\mathbf{C}) = \text{rank}(\mathbf{C}^T) = \text{rank}(\mathbf{L})$ 。根据文献[6]中的证明, $\bar{\mathbf{R}}_{SS}$ 为非奇异阵的充要条件为 $M \geq D$ 且 $N \geq D$ 。

### 2.3 算法小结

根据上节的理论分析,基于均匀矩形阵列的2维虚拟空间平滑算法的流程如下:

参量: $M = X$ 轴阵元个数, $N = Y$ 轴阵元个数, $D =$ 入射信号个数。(  $M \geq D$  并且  $N \geq D$  )。

运算步骤:

- (1) 利用接收数据,构造 $MN$ 个虚拟子阵 $\mathbf{X}_{11}, \mathbf{X}_{12}, \dots, \mathbf{X}_{MN}$ ;
- (2) 计算各虚拟子阵的自相关矩阵 $\mathbf{R}_{mn}$ ;
- (3) 利用公式(5)计算虚拟空间平滑矩阵。

## 3 基于相位补偿和虚拟空间平滑的抗跟踪干扰跳频通信系统

为消除频率跳变对波束指向方向的影响,本文采用了一种预置相位的相位补偿算法。

### 3.1 预置相位的相位补偿算法

相位补偿的目的实质上就是保证空域滤波器的权矢量随系统的工作频率发生相应变化，使得系统的波束指向保持不变。

假设跳频系统通过 FFT 载波捕获得到当前的工作频率为  $f_k$ ，根据上一频点的工作频率  $f_{r(k-1)}$  和自适应权矢量  $\mathbf{w}_{(k-1)} = \{w_{1,(k-1)}, w_{2,(k-1)}, \dots, w_{MN,(k-1)}\}$ ，预置频点  $k$  对应的初始权矢量为

$$\mathbf{w}_{\text{equk}} = \mathbf{w}_{(k-1)} \mathbf{T} \quad (9)$$

式(9)中  $\mathbf{T}$  为权矢量预置矩阵， $\mathbf{T} = \text{diag}(1, e^{j\Delta\Phi_{k,x}}, \dots, e^{j[(M-1)\Delta\Phi_{k,x} + (N-1)\Delta\Phi_{k,y}]})$ ， $\Delta\Phi_{k,x}$  与  $\Delta\Phi_{k,y}$  分别为频点  $k$  下  $x$  方向和  $y$  方向的预置补偿相移， $\Delta\Phi_{k,x} = j2\pi d_x \sin\theta \sin\phi(f_{r(k-1)} - f_{rk})/c$ ， $\Delta\Phi_{k,y} = j2\pi d_y \cos\theta \cdot \cos\phi(f_{r(k-1)} - f_{rk})/c$ 。其中在 FH-DBF 系统中，每次频率跳变后期望信号的入射矢量为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_k(\theta, \phi) &= \text{diag}(1, e^{j\Delta\Phi_{k,x}}, \dots, e^{j[(M-1)\Delta\Phi_{k,x} + (N-1)\Delta\Phi_{k,y}]} \\ &\cdot \boldsymbol{\alpha}_{k-1}(\theta, \phi) = \mathbf{T}^* \boldsymbol{\alpha}_{k-1}(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (10)$$

得到期望信号经过空域滤波器后的方向增益为

$$\begin{aligned} G_k(\theta, \phi) &= \mathbf{w}_{\text{equk}} \boldsymbol{\alpha}_k(\theta, \phi) = \mathbf{w}_{(k-1)} \mathbf{T} \mathbf{T}^* \boldsymbol{\alpha}_{k-1}(\theta, \phi) \\ &= \mathbf{w}_{(k-1)} \boldsymbol{\alpha}_{k-1}(\theta, \phi) = G_{k-1}(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (11)$$

在频点  $k$  下，经过预置相位处理后得到的方向增益  $G_k(\theta, \phi)$  与频点  $k-1$  下相同，系统的波束指向在频率跳变时保持不变。

### 3.2 通信系统结构

根据前节中对自适应波束算法的分析和改进，本文提出一种新的基于 2 维虚拟空间平滑算法的跳

频通信系统，其系统结构如图 2 所示<sup>[7,8]</sup>。

在本跳频通信系统中，空间平滑处理模块、相位补偿模块和 LMS 自适应迭代模块一起构成自适应波束形成模块，前端处理模块主要实现信号混频和 A/D 采样，载波捕获模块通过 FFT 载波捕获法得到当前频点的频率，并将结果送往解跳模块和相位补偿模块辅助实现跳频信号的解跳，以及自适应波束形成中的相位补偿处理。

### 4 性能仿真和分析

假设该系统工作在 Ka 波段，射频频率  $f_U$  为 20 GHz，调制频率  $f_I$  为 100 MHz，最小跳频间隔  $\Delta f$  为 100 kHz，跳频频点  $N$  为 64，则频点  $k$  的工作频率为  $f_{rk} = f_U + f_I + k\Delta f$ 。采用 QPSK 调制，数据速率为 20 kbps。接收天线为  $15 \times 15$  的均匀矩形阵列，并取阵元间距  $d$  为  $\lambda_0/2$ ，其中  $\lambda_0$  为中心频点  $f_0 = f_U + f_I + 32\Delta f$  对应的信号波长。

(1)波束形成方向图仿真 首先，对系统的波束形成方向图进行仿真，1 个期望信号与 2 个等功率的干扰信号(其中 1 个为跟踪式干扰)入射到天线阵列，3 个信号入射到阵列的俯仰角都为  $120^\circ$ ，期望信号方位角为  $-20^\circ$ ，跟踪式干扰和不相关干扰的方位角分别为  $0^\circ$  和  $-50^\circ$ 。信噪比为  $\text{SNR}=10$  dB，信干比  $\text{SIR}=-3$  dB，快拍数 600，分别采用经典最小均方误差算法(LMS 算法)、基于本文提出的 2 维虚拟空间平滑 LMS 算法(4 个  $10 \times 10$  的子阵做平滑处理)以及基于文献[9]中全阵空间平滑的 LMS 波束形成算法进行波束形成，其中迭代步长  $\mu = 0.001$ 。

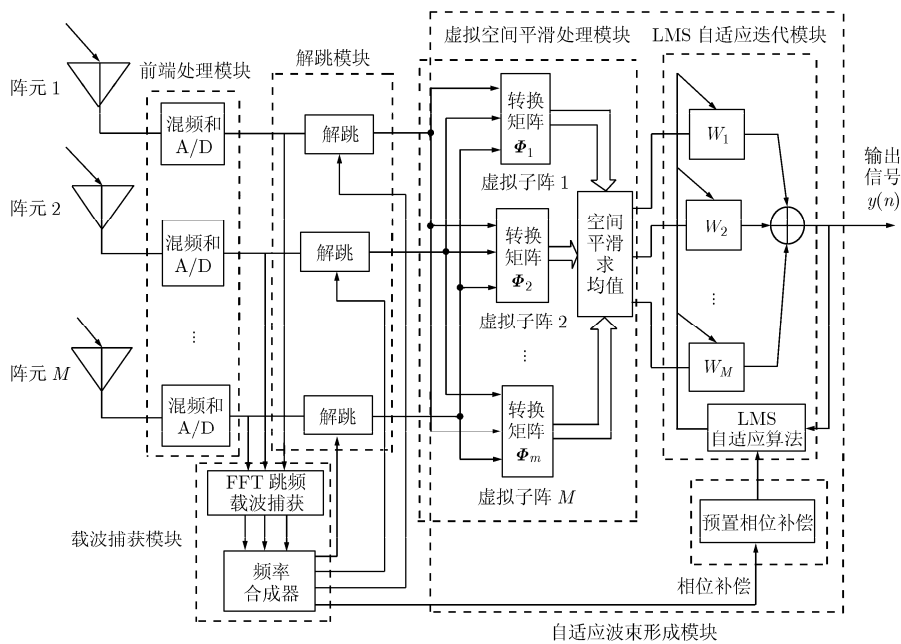


图 2 基于虚拟空间平滑的 FH-DBF 通信系统结构图

从图 3(a)中可以得知, 基于虚拟子阵空间平滑的 LMS 算法得到的波束方向图分辨率保持为 14, 避免了有效孔径的损失。从图 3(b)中可以得知, 在跟踪式干扰的来波方向(0°,120°), 基于虚拟子阵空间平滑的 LMS 算法的波束增益为-59.96 dB, 对跟踪式干扰的抑制能力优于前两种算法; 并且在(0°,50°)方向对非相关干扰的抑制能力也远大于其他两种算法。

选择 SNR=-5 dB 的低信噪比通信环境, 对本文提出的 2 维虚拟空间平滑 LMS 算法进行仿真, 结果如图 4 所示。

从仿真结果中可以得知, 在-5 dB 的低信噪比环境下, 本文提出的波束形成算法与基于空间平滑的波束形成算法相比, 对相关干扰的抑制能力高 10 dB 以上。

(2)输出平均信干噪比性能 对 3 种不同的算法进行输出平均信干噪比(SINR)仿真, 得到 SINR 与快拍数的关系如图 5 所示。

随着快拍数的增加输出 SINR 增大并趋于一个稳定值, 说明经过算法处理后的协方差矩阵接近于真实的协方差矩阵。并且, 本文中提出的基于 2 维虚拟子阵平滑的 LMS 算法得到平均输出 SINR 明显高于经典的 LMS 算法与空间平滑 LMS 算法。

(3)跟踪式干扰下的误码率仿真<sup>[10,11]</sup> 仿真条件保持不变, 对 FH-DBF 通信系统与跳频通信系统进行误码率特性对比仿真。输入信干比 SIR=-3 dB, 信噪比 SNR 范围为 5~15 dB。

由图 6 可以得知, 在相同的 SNR 和 SIR 下, 本文提出的基于 2 维虚拟空间平滑 LMS 波束形成算法的 FH-DBF 通信系统误码率特性优于普通的跳频通信系统, 并且随着 SNR 的提高性能越明显。

### 5 结束语

本文主要基于均匀矩形阵列, 推导出了 2 维的虚拟空间平滑算法, 该算法能够在 2 维阵列下消除跟踪式干扰信号与期望信号之间的相关性, 实现对

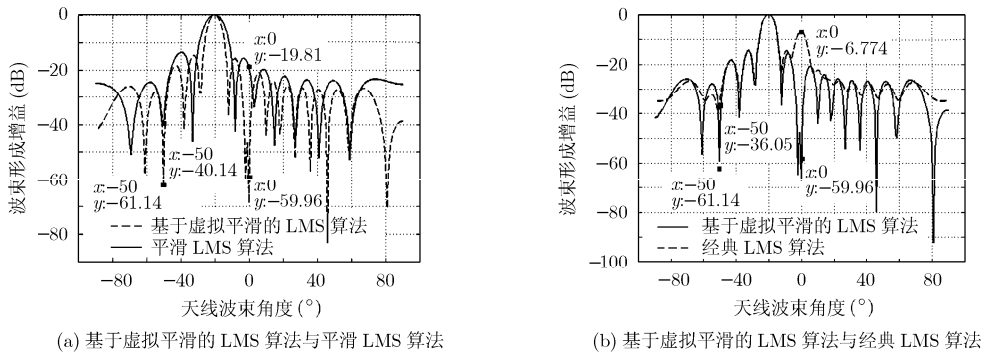


图 3 不同算法得到的波束形成方向图对比 (SNR=10 dB)

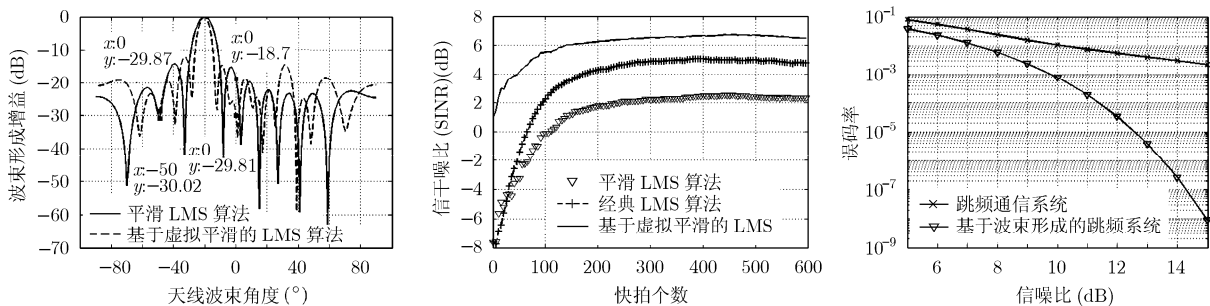


图 4 低信噪比 (SNR=-5 dB) 下的波束形成方向图

图 5 输出平均信干噪比与快拍的关系图

图 6 跟踪式干扰存在时系统的误码率曲线

跟踪干扰的有效抑制。结合相位补偿算法, 给出了一种 FH-DBF 通信系统。通过理论分析和仿真实验可知, 本跳频系统不仅对跟踪式干扰具有较好的零陷抑制能力, 并且在强干扰环境下的误码率性能远远优于普通的跳频系统, 可将其应用卫星的星间跳频通信中。

但本文中提出的 2 维虚拟子阵空间平滑 LMS 算法主要适用于矩形天线阵列, 在圆形阵列以及六边形阵列中对相关干扰的抑制能力相对较弱, 在下一步研究工作中需要寻找适用性更强的 2 维波束形成算法。

## 参考文献

- [1] 段志强, 张林永, 朱永春. 基于自适应天线的跳频系统干扰抑制方法[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 296-299.  
Duan Zhi-qiang, Zhang Lin-yong, and Zhu Yong-chun. A jamming rejection method for FH system based on adaptive antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, 19(6): 296-299.
- [2] 魏小丽, 陈建, 林琳. 基于空间平滑算法的二维相干源 DOA 估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(5): 1160-1164.  
Wei Xiao-li, Chen Jian, and Lin Lin. Two dimensional DOA estimation of coherent signals based on spatial smoothing method[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(5): 1160-1164.
- [3] 张扬, 邹洲. 基于均匀圆阵的相干信号波束形成方法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 20-23.  
Zhang Yang and Zou Zhou. Beam-forming of coherent signals based on uniform circular array[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(2): 20-23.
- [4] 刘志刚, 汪浸宽, 王福利. 虚拟空间平滑算法[J]. 电子学报, 2007, 45(9): 1762-1765.  
Liu Zhi-gang, Wang Jin-kuan, and Wang Fu-li. Virtual spatial smoothing algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 45(9): 1762-1765.
- [5] 徐友根, 刘志文等. 修正的虚拟空间平滑算法[J]. 电子学报, 2009, 50(12): 2646-2650.  
Xu You-gen and Liu Zhi-wen, et al. Modified virtual spatial smoothing algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 50(12): 2646-2650.
- [6] 史荣昌, 魏丰. 矩阵分析[M]. 北京理工大学出版社, 2008: 190-195.  
Shi Rong-chang and Wei Feng. Matrix Analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 190-195.
- [7] Hislop G and Craeye C. Spatial smoothing for 2D direction finding with passive RFID tags[C]. Loughborough Antennas & Propagation Conference, Pennsylvania, USA, November 1-2, 2009: 267-271.
- [8] Gargouri A, Ghayoula R, Fadlallah N, Gharsallah A, and Rammal M. Steering an adaptive antenna array by LMS algorithm[C]. 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Yasmine Hammamet, Tunisia, Dec. 4-6, 2009: 459-462.
- [9] 程小震, 唐宏, 付红卫, 梁路江. 一种改进的全阵空间平滑技术[J]. 电讯技术, 2010, 50(3): 37-41.  
Cheng Xiao-zhen, Tang Hong, Fu Hong-wei, and Liang Lu-jiang. Improved spatial smoothing technique using full array[J]. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50(3): 37-41.
- [10] 王明哲, 王俊. 一种改进的虚拟变换自适应波束形成方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 101-103.  
Wang Ming-zhe and Wang Jun. A improvement on adaptive beamforming via virtual array transformation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 101-103.
- [11] 那振宇, 高梓贺, 郭庆. 对跳频通信系统典型干扰性能的分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(8): 2072-2076.  
Na Zhen-yu, Gao Zi-he, and Guo Qing. Typical interference on the frequency hopping communication system performance analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(8): 2072-2076.
- 尚佳栋: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为现代通信中的信号处理方法、卫星移动通信.
- 王祖林: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字图像处理、通信信号处理、电子与信息对抗、卫星通信网络管理等.
- 郭旭静: 女, 1974年生, 硕士生导师, 研究方向为通信系统理论与仿真、通信系统视频信号处理与传输、通信干扰与抗干扰技术等.
- 周倩: 女, 1987年生, 硕士, 研究方向为现代数字通信与卫星移动通信.
- 何善宝: 男, 1976年生, 高级工程师, 研究方向为新型信道编码技术、星间网络技术、卫星导航与卫星测控技术等.