

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.015

引用格式:赖平,陆锐敏,马世旺,等.基于子带阵列盲处理的空时干扰抑制[J].电讯技术,2014,54(8):1117-1122. [LAI Ping, LU Rui-min, MA Shi-wang, et al. Space-time Interference Suppression Based on Blind Sub-band Adaptive Array Processing[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8):1117-1122.]

基于子带阵列盲处理的空时干扰抑制*

赖平^{1,**}, 陆锐敏², 马世旺¹, 沈俊³

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007; 2. 南京电讯技术研究所, 南京 210007;
3. 解放军 92261 部队, 海口 570203)

摘要:在卫星智能天线终端,传统空时自适应滤波处理中自适应算法需要信号信息而缺乏实时性,阵列处理算法复杂而抗干扰能力不足,针对此问题,提出了一种子带盲自适应阵列处理算法,用于直扩系统空时干扰抑制技术。子带阵列处理相对纯空域处理提高了阵列自由度,相对传统空时的抽头延迟线阵列自适应结构又大大降低了算法复杂度。提出的子带指数型变步长线性约束恒模算法的自适应阵列处理算法能在低算法复杂度下提供较高的收敛速度和收敛精度,不需要发送训练序列,可实现盲自适应波束形成,易于实现实时跟踪信号变化。仿真结果表明新的空时干扰抑制方案具有更好的抗干扰性能。

关键词:空时自适应滤波;子带阵列处理;恒模算法;直扩系统;干扰抑制;盲自适应

中图分类号:TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1117-06

Space-time Interference Suppression Based on Blind Sub-band Adaptive Array Processing

LAI Ping¹, LU Rui-min², MA Shi-wang¹, SHEN Jun³

(1. Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;
2. Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China; 3. Unit 92261 of PLA, Haikou 570203, China)

Abstract: In the traditional Space-Time Adaptive Processing (STAP) of satellite smart antenna terminals, adaptive algorithms require signal information so that they have poor real-time performance and the array processing techniques are not only of high complexity but also suffer from inadequate anti-jammer capability. In order to solve these problems, a sub-band blind adaptive array processing algorithm is proposed in this paper, which applies the space-time interference suppression technology to Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) system. Compared with the pure space-domain processing, sub-band adaptive array (SBAA) greatly increases the freedoms of degree. It also simplifies algorithm complexity relative to Tapped-delay-line adaptive array (TDLAA) structure of traditional STAP. The proposed sub-band blind adaptive array algorithm using Exponential Linearly Constrained constant Modulus Algorithm (EXP-LC-CMA) can provide higher convergence speed and better convergence accuracy with low algorithm complexity. Furthermore, the novel algorithm doesn't need training sequences, increasing the ability of tracing signal changes in real time. Simulation results show that the novel space-time interference suppression scheme exhibits a better anti-jamming performance.

Key words: STAP; SBAA; CMA; DSSS; interference suppression; blind adaptive

* 收稿日期:2014-01-03;修回日期:2014-05-07 Received date:2014-01-03;Revised date:2014-05-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61301158)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61301158)

** 通讯作者:laiping0713@gmail.com **Corresponding author:** laiping0713@gmail.com

1 引言

频谱扩展和空域扩展是目前最常用也是最有效的抗干扰途径^[1]。直接序列扩频(DSSS)技术^[2]广泛应用于卫星通信系统;自适应阵列处理是空域扩展的典型应用,它通过调整空间响应灵敏度(即方向图)特性来改善接收系统的性能^[3]。在直扩系统中,为了抑制射频干扰,常常要利用自适应阵列处理技术对接收信号进行处理。在实际应用中,当接收信号同时含有宽带和窄带干扰时,就需要在每个阵元后面加入抽头延迟节点,从而形成传统的空时自适应处理技术(STAP)^[4-5]。

STAP 实质是将一维空域滤波技术推广到时间和空间二维域中,从而有效抑制杂波和干扰,这种结构又称为抽头延迟线自适应阵列结构(TDLAA)^[5]。对于具有 K 个时延单元、 M 个阵元的阵列,空时自适应处理可抑制干扰数约为 $(M-1)K-1$,比纯空域处理的自由度提高了约 K 倍。但最优处理需要对 $MK \times MK$ 维的相关矩阵进行估计和求逆,计算量巨大,大约为 $o(KM)^3$ 。传统的空时自适应处理算法对空间不同信号来向的干扰可以有效地抑制,但对于与信号同向的窄带干扰抑制程度不够。因为传统的窄带自适应处理器在频域的分辨率^[6]有限,由时域抽头数决定,而空时处理的复杂度导致时域抽头数不能无限增加,所以形成的频域零陷较宽,因而滤除了部分有用信号。

在 STAP 的基础上,文献[7-8]提出了子带结构的空时自适应处理,即子带自适应阵列处理(SBAA)。SBAA 能够进行高速并行处理,降低计算复杂度。但所用自适应算法大都需要信号的信息,这些信息通常通过发送训练序列来实现,而发送训练序列会降低传输速率,且当卫星或者地面终端快速移动时,没有足够时间发送训练序列,其收敛性和跟踪能力难以应用于时变环境。

为此,针对以上问题,本文分析了子带自适应阵列处理方法的基本结构及其性能,推导出了一一种简单的盲自适应算法,即指数型变步长线性约束恒模算法(EXP-LC-CMA)。该算法性能优越,易于实现实时处理。在此基础上,提出基于子带盲自适应阵列处理的空时干扰抑制技术,应用于直扩系统抗干扰进行仿真,验证方案的有效性和实用性。

2 子带自适应阵列处理

子带自适应阵列处理是建立在多抽样率信号处

理和多相滤波器理论基础之上的^[8],SBAA 基本结构如图 1 所示。假设天线阵元数为 M ,接收信号首先下变频到基带,然后经过 A/D 变为数字信号。第 M 个阵元接收到的信号 x_m 经过 K 倍抽取后输入 DFT 滤波器组转换到频域形成 K 个子带信号。然后对每个子带信号独立进行自适应算法处理,获得每个子带的最佳权值矢量 $\tilde{w}^{(k)}$ 。

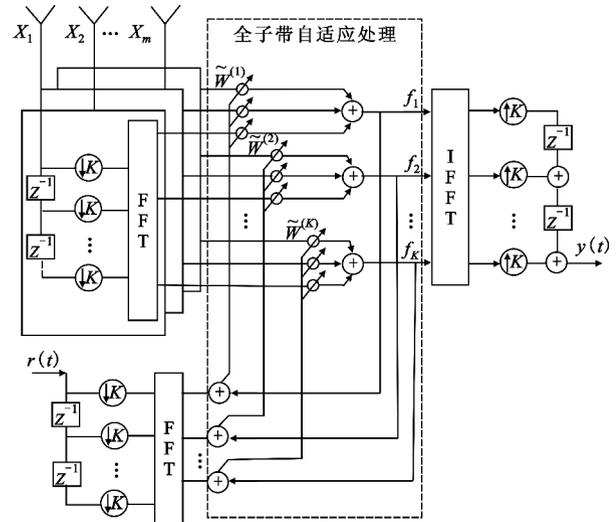


图 1 SBAA 基本结构图

Fig. 1 The basic construction of SBAA

阵列输出信号 y 由加权后的子带信号经过 IFFT 滤波器组转换到时域得到。为了更好地反映出子带阵列处理的特性,这里将反馈信号取为各个子带合并以后的信号,即采用局部反馈类型的 SBAA。传统的抽头延迟线 STAP 方法(TDLAA)是逐个样值处理,而子带自适应阵列处理方法是逐个数据块处理,而且块中的数据是并行处理。例如对于 K 个抽头 M 个阵元的阵列天线,当采用采样矩阵求逆算法时,TDLAA 方法在每一次权值更新时需要的计算量大约为 $o(KM)^3$,而具有 K 个子带的子带自适应阵列处理方法需要的计算量大约为 $o(KM^3)$,再加上每次迭代通常需要的 FFT 变换需要的计算量 $2K \ln K$,总的计算量大概为 $K(M^3 + 2 \ln K)$ 。通常在宽带通信中,传播信道会具有较大延迟扩展的多径衰落,所以 K 值一般较大,这时 $(KM)^3 > K(M^3 + 2 \ln K)$ 。与 TDLAA 相比,子带自适应阵列处理的计算量明显降低^[7]。

3 子带恒模算法

当卫星或地面终端快速移动时,训练序列没有

足够的时间被发送, 这时子带自适应阵列处理就要考虑采用盲自适应算法。

本节针对盲自适应恒模算法 (CMA)^[9] 进行研究。恒模算法利用通信信号的恒模特征来调整接收机权系数, 使得输出信号的幅度保持恒定, 从而进行信号检测。

经典恒模算法 CMA 是基于 LMS 算法的最陡下降恒模算法 (SDCMA):

$$y(n) = w^H(n)x(n) \quad (1)$$

$$e(n) = 2 \left[y(n) - \frac{y(n)}{|y(n)|} \right] \quad (2)$$

$$w(n+1) = w(n) - \mu x(n) e^*(n) \quad (3)$$

式中, $e(n)$ 为误差信号, μ 为迭代步长因子, 恒模算法中则利用信号的恒模特性, 即期望信号直接取作 $y(n)/|y(n)|$ 。SDCMA 算法优点是计算简单, 缺点是收敛速度慢, 需要设置合适的步长, 对初始权值有一定的依赖。如果要快速检测信号或者实时跟踪快速变化信道, 用 SDCMA 就很难胜任。

最小二乘恒模算法 (LSCMA) 很好地解决了上述问题。LSCMA 将最小二乘估计与恒模算法相结合, 当输入数据线性独立的情况下, 算法全局收敛。其更新公式为

$$w(k+1) = w(k) - (XX^H)^{-1} X(y(k) - r(k))^* = (XX^H)^{-1} Xr^*(k) \quad (4)$$

其中, $r(k) = \left[\frac{y(1)}{|y(1)|}, \frac{y(2)}{|y(2)|}, \dots, \frac{y(k)}{|y(k)|} \right]^T$ 为复限幅输出数据向量, $X = [x(1), x(2), \dots, x(k)]$, $y(k) = [y(1), y(2), \dots, y(k)]^T$ 。迭代公式使用 K 个数据组成的单个数据块进行迭代。LSCMA 算法收敛速度明显比 SDCMA 快, 收敛误差小。然而 LSCMA 算法性能优化付出的代价是算法复杂度大幅提高, 均在 $o(L^3)$ 数量级 (L 为扩频码长度), 而且 LSCMA 算法需要进行矩阵求逆运算, 这是最优化方法力求避免的问题。

我们选取 SDCMA 算法进行改进。为了保证收敛的全局性, 并且收敛与算法的初始值无关, 我们采用线性约束^[10]的方法, 将算法改进为线性约束恒模算法 LC-CMA, 即 $w^T c = 1$, c 是长度为 L 的伪随机序列, 代价函数为

$$\begin{cases} J(w) = E\{| |y(n)| - 1|^2\} = E(|w^T x|^2 - 1) \\ w^T c = 1 \end{cases} \quad (5)$$

当采用固定的步长时, 算法的收敛速度与收敛精度对步长的要求是相互矛盾的, 步长较大时, 算法收敛速率快而收敛精度低, 步长较小时, 算法收敛精

度高而收敛速率慢, 所以在这里我们把变步长的思想引入进来。很多学者针对自适应算法在这方面都做了研究, 一般利用均衡器输出的误差信号或者均衡器输入信号的可靠度来控制算法步长, 从而达到控制效果。但误差信号和输入信号都会受到干扰与噪声影响, 若只用误差信号或输入信号来控制算法步长的话, 恒模算法性能会受到很大影响, 其权值矢量很难调整到最优。为了降低干扰和噪声的影响, 考虑用当前误差信号与上一步误差的自相关估计以更新权值矢量。为了减小算法性能对输入信号的敏感度, 我们利用归一化思想。因此, 本文利用下式实现步长变化改进方法:

$$\mu(n) = (\gamma + \beta (|e(n) \cdot e(n-1)|)^a) / x^H(n) \cdot x(n) \quad (6)$$

其中, α, β, γ 是波形控制常数, $\alpha > 0, 0 < \gamma < 2$ 。

分析算法步骤可知, 改进的算法仅涉及向量内积和数值运算, 复杂度为 $o(L^2)$ 。相比 LSCMA, 改进算法的复杂度降低了一个数量级; 相比 SDCMA, 算法复杂度也没增加多少。我们将改进的恒模算法定义为指数型变步长线性约束恒模算法 (EXP-LC-CMA)。

将 EXP-LC-CMA 算法结合子带阵列处理, 提出基于改进算法的子带盲自适应算法, 即子带 EXP-LC-CMA 阵列处理算法。第 k 个子带的阵列信号矢量和权矢量可以表示为

$$w^{(k)} = [w_1^{(k)}, w_2^{(k)} \dots w_M^{(k)}]^T \quad (7)$$

可以得到第 k 个子带权矢量的迭代公式为

$$w^{(k)}(n+1) = w^{(k)}(n) + \mu^{(k)} x^{(k)} y(n) \left(1 - \frac{1}{|y(n)|} \right) \quad (8)$$

其中, $\mu^{(k)}$ 为第 k 个子带阵列的步长, $\mu^{(k)}$ 满足式 (6) 条件。

4 算法仿真分析

4.1 子带 EXP-LC-CMA 算法的收敛性能

收敛特性是衡量自适应算法性能的重要指标, 在子带自适应空时处理算法中尤为重要。为了验证子带 EXP-LC-CMA 阵列处理算法的优越性, 在不同子带数 ($K=1, K=4, K=8$) 情况下, 我们比较了子带 EXP-LC-CMA 算法和子带 SDCMA、子带 LSCMA 算法的收敛性能, 即均方误差行数 $MSE = E[|e(n)|^2]$ (dB)。子带 EXP-LC-CMA 算法的变步长波形控制参数取作: $a=0.6, \beta=0.06, \gamma=1.2$ 。仿真中我们采用一个天线阵元数目为 $M=3$ 的均匀线阵, 期望信号为 QPSK 调制的直扩信号, 信号的波

达角为 0° , 输入功率为 0 dB 。假设采样速率 F_s 与信号的符号速率 F_d 相同, 信噪比为 $SNR=10\text{ dB}$, 受到一个干信比为 $SJR=-30\text{ dB}$ 、波达方向为 30° 的窄带干扰信号干扰, 仿真结果见图 2~4。

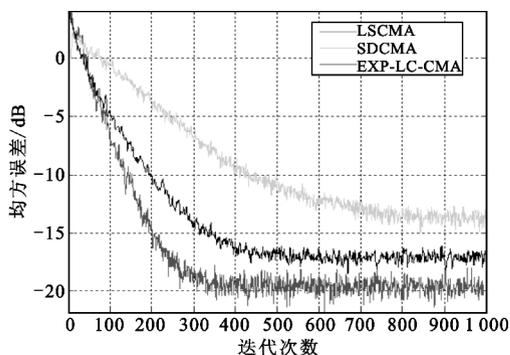


图 2 子带数 $K=1$ (无子带) 时子带恒模算法收敛曲线
Fig. 2 The convergence curves of sub-band CMA with $K=1$ (no sub-band)

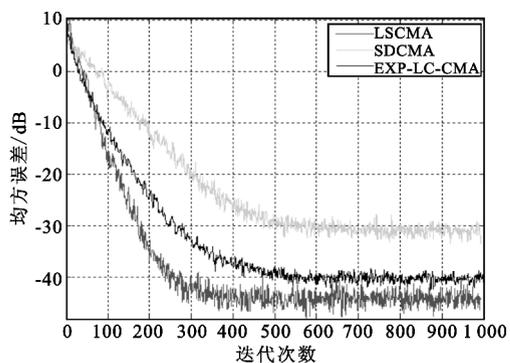


图 3 子带数 $K=4$ 时子带恒模算法收敛曲线
Fig. 3 The convergence curves of sub-band CMA with $K=4$

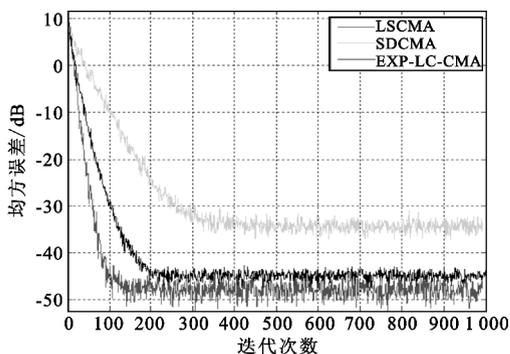


图 4 子带数 $K=8$ 时子带恒模算法收敛曲线
Fig. 4 The convergence curves of sub-band CMA with $K=8$

由图 2~4 分析可知, 随着子带数的增加, 均方误差减小, 收敛速度提高, 这是由于子带处理可以实现并行处理, 但增加子带数不能无限降低 MSE。与子带 SDCMA 算法相比, 子带 EXP-LC-CMA 算法在算法复杂度增加很小的情况下收敛性能要远优于子

带 SDCMA 算法。与子带 LSCMA 算法相比, 子带 EXP-LC-CMA 算法以牺牲很小的算法性能换取了算法复杂度的大幅降低。另外, 子带 EXP-LC-CMA 算法的均方误差值比较集中, 收敛精度比子带 SDCMA、子带 LSCMA 算法都更高。

4.2 算法的干扰抑制性能

结合上文研究结果, 在直接序列扩频 (DSSS) 系统中, 将基于子带 EXP-LC-CMA 阵列处理算法的空时处理技术 (下文称之为 SBAA) 用于干扰抑制中。

首先仿真分析当干扰来向接近有用信号时 SBAA 的抗干扰性能, 仿真参数设置为: 阵元数设为 4, $SNR=10\text{ dB}$, 一个窄带干扰 $SJR=-10\text{ dB}$, 子带自适应阵列处理采用子带数为 8, 期望信号用 PN 码对接受信号解扩提取出来。从图 5 中可以看出, 随着干扰靠近有用信号, 传统的纯空域自适应阵列处理和 TDCAA 技术的信干比 SJR 迅速下降, 在来向重叠时, 失去空域干扰抑制能力; 而子带自适应阵列处理即使在来向重叠时, 仍然具有近 8 dB 的干扰抑制能力, 这时可以理解为在丧失空间辨识能力^[11] 以后, 子带自适应阵列处理成了一个频域干扰消除器。

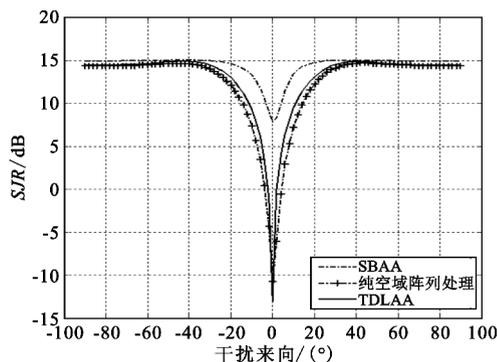


图 5 信号源方向干扰零陷图
Fig. 5 Interference null in the direction of signal sources

在干扰远离有用信号方向时, 子带自适应阵列在各个子带独立处理。前面已经分析过对于具有 K 个时延单元 M 个阵元的阵列, 空时自适应处理可抗干扰数约为 $(M-1)K-1$, 比空域滤波技术提高了约 K 倍。这里我们假设一个 4 阵元 8 子带的均匀线阵, 接收用户信号为扩频后的 QPSK 信号, 波达角为 0° , $SNR=-10\text{ dB}$, 扩频序列长度为 31; 我们可计算得到理论上 SBAA 和 TDCAA 能同时抑制 23 个干扰, 纯空域阵列处理只能抑制 3 个干扰。为方便比较, 这里假设存在 3 个强干扰: 单音干扰、宽带干扰和窄带干扰, 波达角为 -35° 、 25° 和 60° , SJR 都为

-45 dB, 归一化频率分别为 0.05、0.125 和 0.33。

图 6 给出了 SBAA 处理、TDLAA 处理和纯空域阵列处理的稳态方向图, 很明显 TDLAA 处理和纯空域阵列处理性能差不多, 而 SBAA 在所有强干扰方向都形成了更深的零陷, 比 TDLAA 处理和纯空域阵列处理改善了 20 dB 左右。

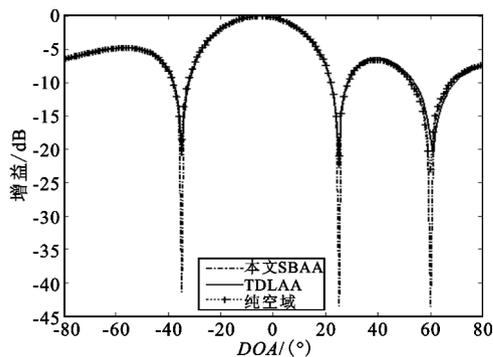


图 6 不同干扰 DOA 条件下的输出 SJR 方向图比较
Fig. 6 Output SJR directivity curves for different DOAs of strong interferences

图 7 给出了阵列处理的信号频谱性能。第一个图为阵列接收信号的频谱, 第二个图为阵列输出信号频谱。从图中可见 SBAA 技术基本上可以抑制所有的干扰。为了更直观看出所提出算法的优越性, 我们可以改变输入信干比 SJR 来比较输出 SJR。图 8 给出了不同输入 SJR 情况下的阵列处理输出稳态 SJR。从图 8 中可以看出, 当干扰越来越强, 相比 TDLAA 技术, SBAA 的干扰抑制性能优势体现得更加明显。这说明干扰越强, SBAA 在干扰方向上形成的零陷也越深。当输入信干比达到 -60 dB 时, SBAA 依然能将输出信干比提高到 -15 dB。

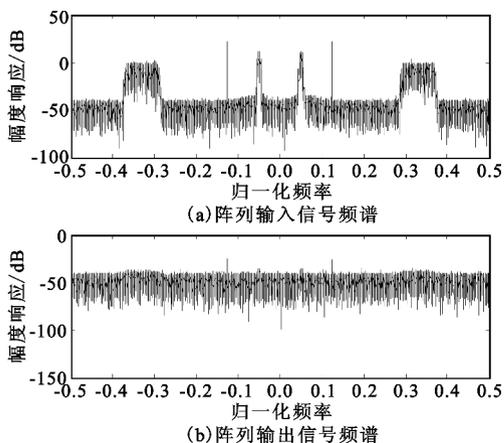


图 7 阵列信号频谱图
Fig. 7 The frequency spectrogram of array signal

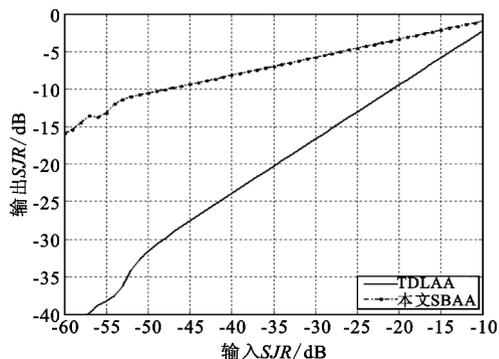


图 8 不同输入 SJR 阵列输出
Fig. 8 Output SJR curves for different input SJR

5 结 论

在卫星智能天线终端, 针对空时自适应滤波问题进行了研究, 提出了一种子带盲自适应阵列处理算法, 解决空时处理中自适应算法需要信号信息而缺乏实时性、阵列处理算法复杂而抗干扰能力不足的问题。提出的子带盲自适应阵列处理算法能在低算法复杂度下提供较高的收敛速度和收敛精度, 不需要信号和干扰的任何先验信息, 易于实现实时跟踪信号变化。结合直扩系统, 基于子带 EXP-LC-CMA 阵列处理的空时干扰抑制算法不仅在干扰来向靠近信号源时仍具有较强干扰抑制能力, 还能同时抑制多个多种干扰, 相比纯空域干扰抑制技术和 TDLAA 技术具有更好的抗干扰性能。本文在卫星通信系统抗干扰领域中具有一定的参考和应用价值, 但对算法分辨率性能和算法的工程实现问题尚未解决, 下一步将进行更加深入的研究, 并考虑采用性能更好的正交镜像 QMF 滤波器组实现子带阵列处理。

参考文献:

[1] Lightfoot L, Li Tongtong. Jamming mitigation using space-time coded collision-free frequency hopping [C] //Proceedings of IEEE ICASSP 2009. Taipei, Taiwan: IEEE, 2009: 2717-2720.

[2] Bojan D, Nenad M, Zorica N, et al. Performance analysis of reconfigurable receiver in DSSS system in the presence of interference [C] //Proceedings of TELSIKS 2009. Nis, Serbia: IEEE, 2009: 133-136.

[3] Vera B, Christo K, Vladimir K. STAP approach for DOA estimation using microphone arrays [C] //Proceedings of 2010 Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. Wilga, Poland: IEEE, 2010: 1488-1493.

- [4] Zhang Xianyi, Wang Xiaohong, Fan Guozhong. Research on knowledge - based STAP technology [R]. Nanjing, China: Institute of Electronics Technology, 2009; 1-4.
- [5] 赵兴, 赵琳, 温明. 一种新的 GPS 空时抗干扰方案 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(3): 322-327. ZHAO Xing, ZHAO Lin, WEN Ming. A novel GPS space-time anti-jamming scheme [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(3): 322-327. (in Chinese)
- [6] Hirofumi T, Kousuke T, Takuya S, et al. High range resolution medical acoustic vascular imaging with frequency domain interferometry [C] // Proceedings of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2010: 5298-5301.
- [7] 姚红超, 王华力, 胡昆. 子带阵列处理技术的导航抗干扰终端设计与实现 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 617-622. YAO Hong-chao, WANG Hua-li, HU Kun. Design and Implementation of Navigation Anti-jam Terminal Based on Subband Array Processing Technology [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 617-622. (in Chinese)
- [8] Dehghan F A, Reza A H. Combination of nested microphone array and subband processing for multiple simultaneous speaker localization [C] // Proceedings of 2012 International Symposium on Telecommunications. Yazd, Iran: IEEE, 2012: 907-912.
- [9] 康晓非, 杨家玮. 超宽带系统中基于恒模算法的盲 rake 接收机 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 985-989. KANG Xiao-fei, YANG Jia-wei. The blind rake receiver based on CMA for UWB systems [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 985-989. (in Chinese)

- [10] Medina C A, Raimundo S N. Channel estimation for RLS -based linearly constrained minimum variance receivers [C] // Proceedings of 2008 IEEE Vehicular Technology. Calgary, Canada: IEEE, 2008: 1550-2250.
- [11] Hirofumi T, Kousuke T, Takuya S, et al. High range resolution medical acoustic vascular imaging with frequency domain interferometry [C] // Proceedings of 2010 IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2010: 5298-5301.

作者简介:



赖平(1989—),男,江西于都人,硕士研究生,主要研究方向为卫星通信、扩频通信;

LAI Ping was born in Yudu, Jiangxi Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns satellite communication and spread spectrum communication.

Email: laiping0713@gmail.com

陆锐敏(1963—),男,江苏无锡人,研究员,主要研究方向为卫星通信;

LU Rui-min was born in Wuxi, Jiangsu Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor. His research direction is satellite communication.

马世旺(1989—),男,河北易县人,硕士研究生,主要研究方向为卫星通信;

MA Shi-wang was born in Yixian, Hebei Province, in 1989. He is now a graduate student. His research direction is satellite communication.

沈俊(1986—),男,浙江淳安人,2013年获硕士学位,主要研究方向为卫星通信、跳频。

SHEN Jun was born in Chun'an, Zhejiang Province, in 1986. He received the M. S. degree in 2013. His research concerns satellite communication and frequency hopping.