

适用于跳频通信系统的循环相关 约束差分恒功率算法

刘云志¹ 俞石云¹ 潘亚汉¹ 王海燕²

(1. 总参第六十三研究所, 南京 210007; 2. 江苏省经贸职业技术学院信息技术系, 南京 210007)

摘要: 针对跳频通信系统所使用的恒功率算法 (CPA) 存在的问题: 收敛性较差和误捕干扰, 结合跳频信号解跳后的恒功率特性和循环平稳特性, 提出了一种新的循环相关约束差分恒功率算法 (CCDCPA)。建立了合理的阵列权矢量代价函数, 详细推导了该种算法的迭代公式。仿真结果表明, CCDCPA 算法不仅收敛性优于 CPA 算法, 而且可以抑制窄带干扰和宽带干扰, 是一种特别适用于跳频通信系统的盲波束形成算法。

关键词: 跳频通信系统; 阵列信号处理; 循环平稳; 恒功率算法

中图分类号: TN914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)12-1819-06

Differential constant power algorithm with cycl-correlation constrains specially used in frequency-hopping communication systems

LIU Yun-zhi¹ YU Shi-yun¹ PAN Ya-han¹ WANG Hai-yan²

(1. The 63rd research institute of PLA GSH, Nanjing 210007; 2. Information Technology Department Jiangsu Institute of Economic & Trade Technology, Nanjing China 210007)

Abstract: Constant power algorithm (CPA) is a blind beamforming algorithm used in frequency-hopping spread spectrum (FH-SS) communication systems. However, it suffers two problems. One is that its convergence speed is slow because the target power value needs to be included in the cost function to be optimized as a parameter. Another problem is that it may capture constant power (CP) interference rather than the CP signal of interest (SOI) when such interference as wideband interference or tracking interference in the environment is CP. In order to overcome the shortages, this paper proposes a novel beamforming algorithm, named Differential Constant Power Algorithm with Cycl-correlation Constrains (CCDCPA), which combined two characters of the de-hopped frequency-hopping signals, that is constant power character and cyclostationary character. A reasonable cost function of the array vector is established followed with the deduced iterative formula in this paper. The simulation results show that convergence of the proposed algorithm is faster than that of CPA. Moreover, the proposed algorithm can effectively suppress not only narrowband interference but also wideband interference. Thus, it is an appropriate blind beamforming algorithm used in frequency-hopping system.

Key words: frequency-hopping communication system; array signal processing; cyclostationary; constant power algorithm

1 引言

跳频通信是一种有效的抗干扰通信方式。与直扩通信相比,跳频通信对同步精度要求不高。但是,强干扰的存在会严重影响通信的质量,特别是在军事通信应用场合,甚至会使得通信完全瘫痪。自适应阵列信号处理技术与跳频技术结合,可以相互弥补彼此不足,大幅提高通信系统的抗干扰能力。对该问题的研究一直受到国内外学者的广泛关注[1-8],并且在一些系统

中已经得到应用。早期,学者提出了多种利用自适应阵列处理抑制威胁跳频系统干扰的算法,其中,大部分需要跳频图案、训练序列或者方向信息(DOA)等条件。近年,学者们提出一些应用于跳频系统的盲自适应波束形成算法,这类算法通常不需要先验信息,受到越来越多的关注^[1-10]。例如,文献[1-2]研究了跳频与恒模阵列(CMA)有机结合的算法,该方法可以实现对多种类型干扰的抑制,适用于对付多种类型的干扰。但是这种方法仍存在两点不足,一是当恒模干扰击中概率

很大时,算法将失效;二是恒模算法通常对同步比较敏感,因此对跳频系统的同步精度要求高^[3]。文献[3]提出了一种针对跳频通信系统的恒功率算法(CPA),这种算法对同步误差不敏感,但是仅限于抑制窄带干扰(在跳频系统中又称为间歇干扰),且收敛性较差。文献[5-8]提出了最大最小(Maximin)算法及其改进算法,该算法利用跳频信号和干扰的频谱特性差异实现对干扰的抑制,其优点在于不需要训练序列、方向信息等先验信息;其主要不足是需要一个监控信道(monitor channel)的辅助,这增加了系统的复杂性。基于通信信号循环平稳特性的波束形成算法也是一类常用的盲波束形成算法,对该问题的研究由来已久^[9-15]。但是,这类算法普遍对同步误差、循环延时误差较敏感,不适用于跳频通信系统;另外有些还需要其他先验信息^[12-13],因此不能称为完全意义上的盲算法。

本文结合使用跳频信号解跳后的恒功率特性和循环平稳特性,提出了一种新的盲波束形成算法-循环相关约束差分恒功率算法(CCDCPA)。首先建立了跳频信号的阵列接收模型,其次给出了合理的阵列权矢量代价函数,并详细推导了该算法的迭代公式,最后对其性能进行了仿真分析和比较。仿真结果表明,CCDCPA算法不但具有传统CPA算法的优点,而且其收敛性优于CPA算法;可以抑制窄带干扰和宽带干扰,是一种特别适用于跳频通信系统的盲波束形成算法。

2 信号模型

2.1 跳频信号阵列接收模型

在跳频通信系统中,阵列天线接收到的信号模型的时频分部如图1所示。假设跳频信号和干扰来向不同,以部分频带干扰为例,根据跳频在频带中的位置,干扰会间歇出现。假设采用具有M个阵元的均匀线性阵列(ULA)且只有一个干扰,则第k跳的信号可以表示如下^[1]:

$$\mathbf{x}_k(n) = \mathbf{a}_k(\theta_d) s_k(n) + p_k \mathbf{b}_k(\theta_j) j_k(n) + \boldsymbol{\xi}_k(n) \quad n=1, \dots, N_s \quad (1)$$

式中, $\mathbf{a}_k(\theta_d)$ 为期望信号方向矢量, $s_k(n)$ 为期望信号, $\mathbf{b}_k(\theta_j)$ 为干扰信号的方向矢量, $j_k(n)$ 为干扰信号, N_s 为每跳采样点数。 p_k 表示干扰在第k跳是否出现,其取值为0或者1。需要特别指出的是,干扰在第k跳是否出现,可以用一个统计事件来表示,其概率为 p , p 代表了跳频系统干扰信号出现的间歇式特性,或者称作干扰击中概率,即跳频信号受到干扰的概率,例如, $p=0.5$ 表示有50%的跳频信号受到干扰的影响。对于部

分频带干扰, p 反映了干扰信号频带在总的跳频带宽中所占的比例。显然, $p=1$ 表示宽带阻塞干扰,即干扰击中了所有的跳频信号。为便于后续分析,假设信道为高斯白噪声信道,并且不考虑干扰部分击中某一跳的情况和频率偏移的存在,因此信号的方向信息可以完全保留下来。经过阵列处理的输出信号可以表示为:

$$y_k(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}_k(n) \quad (2)$$

其中, \mathbf{w} 表示阵列权矢量, H 为共轭操作符。

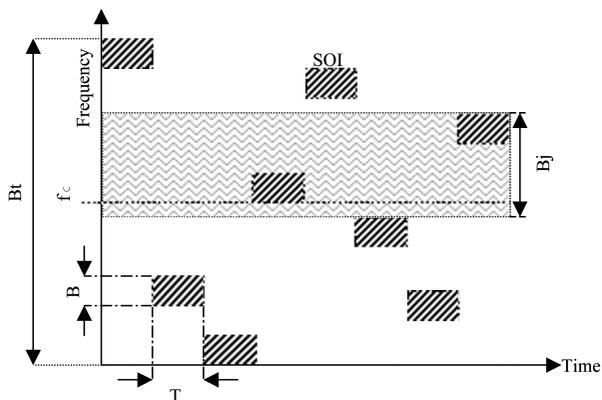


图1 跳频信号及部分频带干扰分布示意图

2.2 循环平稳信号及其特性

对于信号 $s(n)$, 其循环自相关函数可以定义为^[9]:

$$r_{ss}^\alpha = E \{ s(n) s^*(n-\alpha) e^{-j2\pi n\alpha} \} \quad (3)$$

其中, $*$ 表示共轭, α 为信号的循环频率。如果上式在循环频率 α ($\alpha \neq 0$) 处存在谱相关, 那么信号 $s(n)$ 就称为循环平稳信号。一般通信信号均具有循环平稳特性(图2给出了QPSK调制信号的循环自相关函数), 而干扰和噪声通常呈非循环平稳特性, 即它们的循环自相关函数 R 都为零, 因此可以利用此特性实现信号和干扰的分离。这也就是循环平稳类算法的本质所在。

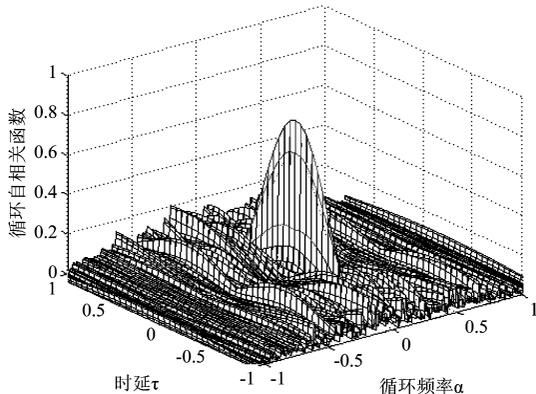


图2 循环自相关函数

3 循环相关约束差分恒功率算法

3.1 CPA 算法

CPA 算法由 Kamiya 提出^[3],其代价函数可以表示为:

$$F(\mathbf{w}) = E \{ |P_k - \varepsilon|^2 \} \quad (4)$$

其中 $P_k = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} y_k^*(n)y_k(n)$ 为第 k 跳接收信号的功率, ε 为目标功率值,为一常数, E 表示求统计平均操作。采用最陡下降法推导 CPA 算法的迭代算法如下:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu_w \nabla_w(k) \quad (5)$$

$$\nabla_w(k) = 2[P_k - \varepsilon] \Phi(\mathbf{w}(k)) \quad (6)$$

$$\Phi(\mathbf{w}(k)) = R_k \mathbf{w}(k) \quad (7)$$

$$R_k = \frac{2}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \mathbf{x}_k(n) \mathbf{x}_k(n)^H \quad (8)$$

该算法对抑制部分频带干扰特别有效,其机理在于输出信号功率在迭代过程中趋于恒定,期望信号本身为恒功率信号,因此期望信号得以保持,而干扰信号的功率在解跳后是变化的,使其在迭代过程中被抑制。研究表明,与恒模算法相比,这种 CPA 算法对同步误差并不敏感,可以有效抑制部分频带干扰。

3.2 循环相关约束差分恒功率算法

上述 CPA 算法存在两点不足,一是收敛性较差,其原因在于算法需要对代价函数中的目标功率值进行优化,因此迭代寻优过程缓慢;二是当干扰同样具有恒功率特性时(例如,宽带阻塞干扰或者跟踪干扰在解跳后,也具有恒功率特性),CPA 算法将无法区分信号和干扰,甚至更有可能捕获功率较强的干扰,而抑制信号。为此,本文提出了循环相关约束差分恒功率算法(CCDCPA),定义算法的代价函数为:

$$F(\mathbf{w}) = E \{ |P_{k-1} - P_k|^2 \} \quad (9)$$

$$s.t. \quad \mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta$$

显然上式是对(4)式的改进,主要包括两方面,一是将原来的恒功率思想改为连续两跳信号的功率差最小,这一改进称为差分,其物理含义在于解跳后恒定功率信号的连续两跳信号的功率差也趋于恒定;二是对(4)式进行了线性约束 $\mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta$,其中 \mathbf{c} 为循环相关约束矢量, δ 为常数,线约束的物理含义在于将对权矢量 \mathbf{w} 的寻优过程限制在满足 $\mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta$ 的直线上。关于矢量 \mathbf{c} 将在下一节具体讨论。

类似(9)式的迭代算法均可以通过两步求得^[16]。

第一步:使 \mathbf{w} 沿 F 负梯度方向变化。可以得到递推公式

$$\tilde{\mathbf{w}}(k) = \mathbf{w}(k-1) - \mu_w \nabla_w$$

$$\nabla_w = 2[P_{k-1} - P_k] [\varphi_{k-1}(\mathbf{w}) - \varphi_k(\mathbf{w})]$$

$$\varphi_k(\mathbf{w}(k)) = R_k \mathbf{w}(k), \quad \varphi_{k-1}(\mathbf{w}(k-1)) = R_{k-1} \mathbf{w}(k-1)$$

$$R_k = \frac{2}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \mathbf{x}_k(n) \mathbf{x}_k(n)^H, \quad R_{k-1} = \frac{2}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \mathbf{x}_{k-1}(n) \mathbf{x}_{k-1}(n)^H。$$

其中 R_k 为自相关矩阵,与(8)式相同。需要特别注意的是,由于采用了差分操作,所以初始权值 $\mathbf{w}(0)$ 、 $\mathbf{w}(1)$ 必须选取不同的值,否则 $\nabla_w = 0$,造成迭代陷入死循环。事实上,上式得到的 $\tilde{\mathbf{w}}(k)$ 还不能满足相关约束条件 $\mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta$ 。所以,第二步需要在 $\tilde{\mathbf{w}}(k)$ 上加上一个平行于 \mathbf{c} 的矢量 $\gamma \mathbf{c}$,并且选择 γ 使 $\mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta$ 得到满足,即

$$\mathbf{w}(k) = \tilde{\mathbf{w}}(k) + \gamma \mathbf{c}$$

令 $\mathbf{w}(k)^H \mathbf{c} = \delta$,可以得到:

$$[\tilde{\mathbf{w}}(k) + \gamma \mathbf{c}]^H \mathbf{c} = \delta$$

$$\tilde{\mathbf{w}}(k)^H \mathbf{c} + \gamma \mathbf{c}^H \mathbf{c} = \delta$$

$$\gamma = \frac{\delta - \tilde{\mathbf{w}}(k)^H \mathbf{c}}{\mathbf{c}^H \mathbf{c}}$$

则 CCDCPA 算法的递推公式可以表示为:

$$\tilde{\mathbf{w}}(k) = \mathbf{w}(k-1) - \mu_w \nabla_w$$

$$\mathbf{w}(k) = \tilde{\mathbf{w}}(k) + \frac{\delta - \tilde{\mathbf{w}}(k)^H \mathbf{c}}{\mathbf{c}^H \mathbf{c}} \mathbf{c}$$

其中, $\tilde{\mathbf{w}}(k)$ 为算法的权矢量, μ_w 为步长, ∇_w 为性能表面的梯度, δ 为常数, \mathbf{c} 为循环相关约束矢量,下文将对其详细讨论。

3.3 循环相关约束矢量

本节讨论循环相关约束矢量 \mathbf{c} 。假设 $g(n)$ 为算法所需的循环相关参考信号,根据 2.2 节的分析, $g(n)$ 可以表示为:

$$g(n) = \mathbf{z}^H \mathbf{x}_k(n - \tau) e^{j2\pi \alpha n} \quad (10)$$

其中 α 为期望信号的循环频率, $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_M]^T$ 称为控制矢量。则 $E\{y_k(n)g^*(n)\} = \delta$ 即表示参考信号与阵列输出信号的循环相关函数,这里 δ 也为常数。将(10)式代入,可以得到:

$$E\{y_k(n)g^*(n)\} = E\{\mathbf{w}^H \mathbf{x}_k(n)g^*(n)\} = \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}_k(n)g^*(n)\} = \mathbf{w}^H \mathbf{c} = \delta \quad (11)$$

其中 $\mathbf{c} = E\{\mathbf{x}_k(n)g^*(n)\}$ 即为循环相关约束矢量。

对于(1)式的信号模型,假设干扰在参数 (α, τ) 条

件下的循环相关函数为零。则约束矢量 \mathbf{c} 可以表示为:

$$\mathbf{c} = \langle \mathbf{x}_k(n) \mathbf{g}^*(n) \rangle = a r_{ss}^\alpha(\theta_d) \mathbf{a}(\theta_d) + b r_{jj}^\alpha(\theta_j) \mathbf{b}(\theta_j) = a r_{ss}^\alpha(\theta_d) \mathbf{a}(\theta_d) \quad (12)$$

其中 $\mathbf{a} = \mathbf{z}^H \mathbf{a}(\theta_d)$, $\mathbf{b} = \mathbf{z}^H \mathbf{b}(\theta_j)$ 。可见,约束矢量 \mathbf{c} 可以

看成是信号的方向矢量约束。因此,循环相关约束与方向矢量约束具有等价性,这一结论揭示了循环相关约束的本质。

综上所述,可以得到 CCDCPA 算法的处理结构图如图3所示。图中忽略了 A/D 转换部分。

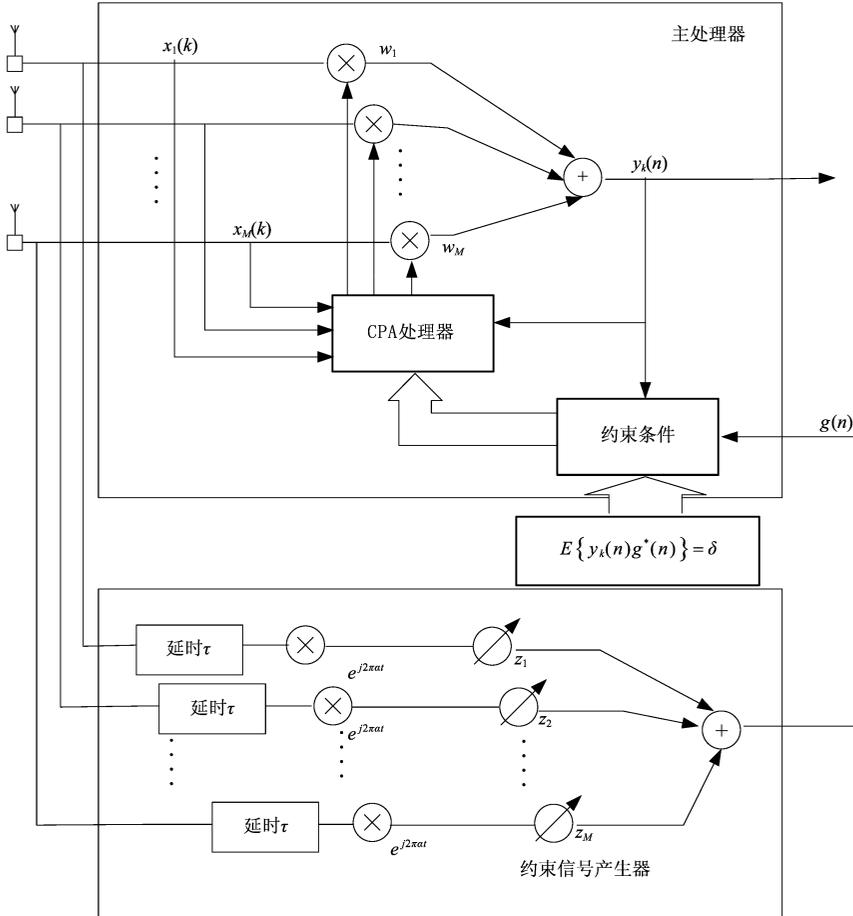


图3 CCDCPA 结构图

4 仿真分析

4.1 收敛性

仿真中采用 4 阵元均匀线阵,阵元间距为半波长,跳频信号的调制方式为 QPSK,其波达方向为 $\theta_d = 0^\circ$,信噪比(SNR)为 10dB。假设存在一个部分频带干扰,其中概率 $p=0.5$,波达方向为 $\theta_j = 50^\circ$,干噪比(JNR)为 20dB。控制矢量设为 $\mathbf{z} = [1, 0, \dots, 0]^T$,循环频率 $\alpha=1$, $N_s=50$ 。仿真得到如图4所示的 CPA 算法与 CCDCPA 算法的输出 SINR 收敛曲线。从图中可以看出,CCDCPA 算法的收敛的速度和稳定性明显优于 CPA 算法。其原因在于两方面,一是 CCDCPA 算法代价函数中的差分操作的引入避免了对常数 ϵ 的优化,二是循环相关约束提高了算法收敛的方向和速度。图5为两种算法的

稳态方向图,两种算法均在信号方向形成最大值,在干扰方向形成零陷。也就是说在部分频带干扰环境下,两种算法具有基本相同的抗干扰能力。

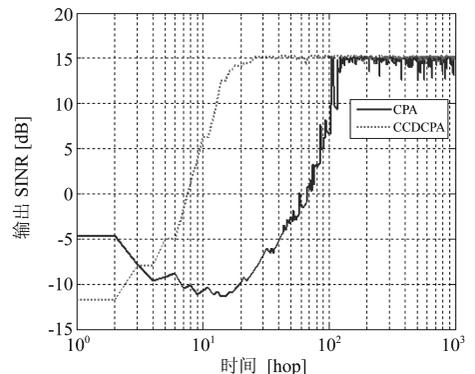


图4 两种算法收敛性比较图

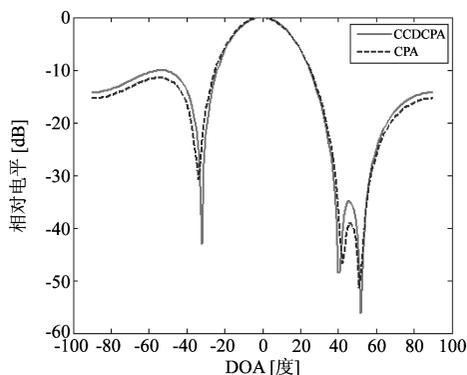


图 5 两种算法的稳态方向图

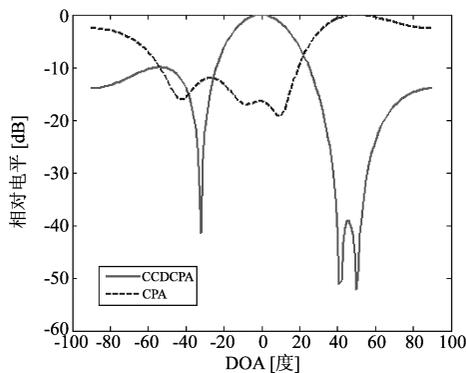


图 7 宽带干扰环境下两种算法的稳态方向图

4.2 抗干扰性能

在本例中,假设干扰为扫频干扰,其他仿真参数与上节相同,通过改变击中概率 p ,来比较 CCDCPA 算法与 CPA 算法在抗干扰性能上的差异,如图 6 所示。从图中可以看出,当击中概率 p 较小时,两种算法的稳态输出 SINR 基本相同,具有相同的抗干扰能力;当 p 较大时,特别是当 $p > 0.9$ 时,CPA 算法的稳态输出 SINR 显著下降,而 CCDCPA 算法的稳态输出 SINR 随着 p 的变化,基本保持不变。究其原因在于,随着 p 的增加,干扰逐渐呈现出宽带特性,因此 CPA 算法无法区别期望信号和干扰,甚至会捕获功率更强的干扰,抑制期望的跳频信号。

为了更直观地说明上述问题,图 7 给出了 $p = 1$ 时,两种算法的稳态方向图。可以看出 CCDCPA 算法的最大波束方向指向期望的跳频信号方向 0° ,同时在干扰方向 50° 形成零陷;而 CPA 算法形成了相反的指向。这类似于恒模算法,当干扰信号和跳频信号都具有恒功率特性时,CPA 算法会收敛于功率较强的信号。

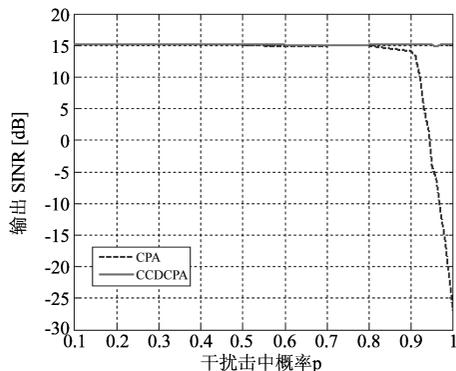


图 6 输出 SINR 与干扰击中概率的关系

5 结论

在综合考虑跳频信号的恒功率特性、循环平稳特性以及差分处理思想的基础上,本文提出了一种适用于跳频通信系统的循环相关约束差分恒功率算法 (CCDCPA)。仿真结果表明 CCDCPA 算法在收敛性和抗干扰能力方面均优于 CPA 算法,不但可以抑制窄带干扰,而且可以抑制宽带干扰,更适用于跳频通信系统。需要指出的是,本文仅仅对所提算法的理论思想、迭代公式推导以及抗干扰性能进行了分析,有关该算法中的控制矢量、步长因子、循环频率、延时等参数的优化等问题还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] Liu YZ, Wang HL, Zhu DS. A new anti-jamming method combining adaptive array antennas and frequency-hopping techniques [C], IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, Beijing, China, Oct, 2005, 246-249.
- [2] Suzuki Y, Umabayashi K, Kamiya Y, et al. A new approach for blind frequency-hopping detection using adaptive array antenna based on CMA [C], IEEE 18th international symposium on personal, indoor and mobile radio communications, Athens, Greece, Sept, 2007, 1-6.
- [3] Kamiya. Y, Besson O. Interference rejection for frequency-hopping communication systems using a constant power algorithm [J], IEEE Transaction on Communications, 2003, 51(4): 627-633.
- [4] Min KP, Ronald A. A beamforming algorithm for slow FH spread-spectrum systems [J], Signal Processing, 2004, 84(7): 1101-1113.
- [5] Torrieri D, Bakhru K. Anticipative maximin adaptive-ar-

- ray algorithm for frequency-hopping systems[C], Military Communications Conference, Washington, USA, Aug, 2006, 1-7.
- [6] Bakhru K, Torrieri D. The Maximin Algorithm for Adaptive Arrays and Frequency-Hopping Communications[J], IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Sept, 1984, 32(9): 919-928.
- [7] Balakrishnan RD, Nugroho BS, Kwon H M, Modified maximin adaptive array algorithm for frequency-hopping system[C], IEEE 7th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Application, KS, USA, Sept, 2002, 103-107.
- [8] Torrieri D, Bakhru K. The maximin adaptive array algorithm for Direct-sequence systems[J], IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 1853-1860.
- [9] Wu Q, Wong KM. Blind adaptive beamforming for cyclostationary signals[J], IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(11): 2757-2767.
- [10] Lee JH, Lee YT, Shih WH. Efficient robust adaptive beamforming for cyclostationary signals[J], IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(7): 1893-1901.
- [11] Castedo L, Tseng CY, Figueiras-Vidal AR. Linearly-constrained adaptive beamforming using cyclostationary signal properties[C], IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April, 1994, 19-22.
- [12] Chevalier P, Maurice A. Constrained beamforming for cyclostationary signals[C], IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 1997, 21-24.
- [13] Champagne B, El-Keyi A. Semi-Blind Adaptive Beamforming for Cyclostationary Signals: A Kalman Filtering Approach[C], Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2007, 113-117.
- [14] Kihira K, Kikuma N, Inagaki N. Correlation constrained CMA adaptive array using cyclostationary signal properties [J], Electronics and Communications in Japan, 2001, 84(1): 48-55.
- [15] Torrieri D, Bakhru K. Frequency Compensation in an Adaptive Antenna System for Frequency-Hopping Communications[J], IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, July, 1987, 23(4), 448-467.
- [16] Simon H. Adaptive array principles[M], Third Edition, Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1999, 220-227.

作者简介



刘云志(1976-),男,山东聊城人,博士,在站博士后,研究方向为通信抗干扰、阵列信号处理等。

E-mail: lyz760904@yahoo.com.cn

俞石云(1973-),男,浙江湖州人,工程师,研究方向为卫星通信、通信抗干扰等。

潘亚汉(1962-),男,浙江海宁人,高工,研究方向为卫星通信、通信抗干扰等。

王海燕(1975-),女,甘肃兰州人,讲师,研究方向为无线通信、计算机网络应用等。