

单通道最优恒模自适应干扰抑制方法

石庆研^{①②} 吴仁彪^{*②} 钟伦珑^②

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国防重点实验室 西安 710071)

^②(中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室 天津 300300)

摘要: 针对民航地空通信中常见干扰具有恒定包络的特点, 该文提出了一种基于单通道最优恒模算法的自适应干扰抑制方法。该方法利用干扰信号的恒模特性, 采用非线性最小二乘的方法对干扰信号的幅度与相位进行估计, 并将其与接收到的混合信号相减, 从而实现了恒模干扰信号的抑制。该方法与现有民航地空通信系统具有较好的兼容性, 无需额外增加通道, 且避免了一般自适应干扰抑制算法中的收敛问题。仿真和实测数据的处理结果表明该方法具有较好的干扰抑制效果。

关键词: 民航通信; 单通道; 最优恒模算法; 自适应干扰抑制; 恒模阵列; 非线性最小二乘

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1126-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01071

Adaptive Interference Suppression Based on Single-channel Optimal Constant Modulus Algorithm

Shi Qing-yan^{①②} Wu Ren-biao^② Zhong Lun-long^②

^①(National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Taking account of the constant modulus characteristic of most interference signals in civil aviation air-to-ground communication, a single-channel optimal constant modulus algorithm is proposed. In this algorithm the amplitude and phase of the constant signal are estimated with nonlinear least squares method. Interference suppression is realized by subtracting the constant modulus signal from the mixed signal. This method has good compatibility with existing communication systems, and the number of channel is not increased. The convergence problem of the adaptive interference suppression can be avoided. Simulation and experimental results are provided to demonstrate the performance of the proposed method.

Key words: Civil aviation communication; Single-channel; Optimal constant modulus algorithm; Adaptive interference suppression; Constant modulus array; Nonlinear least squares

1 引言

随着通信事业的迅猛发展, 民航通信被干扰的现象越来越严重, 无线电干扰极大威胁了民航飞机的飞行安全。目前, 对于甚高频(Very High Frequency, VHF)地空通信干扰问题, 一般通过改频、监测和清查等被动的非技术手段加以解决, 但都治标不治本, 成为民航安全运营的一大隐患。

在VHF地空通信中, 干扰信号在频域上与民航甚高频地空通信信号相混叠, 单纯使用带通滤波器不能将其滤除。由于管制员要与来自不同方位的飞行员通话, 因而甚高频电台的天线近似是无方向的,

且干扰源具有随机性和未知性, 因此传统的自适应阵列信号处理技术^[1,2]难以应用。

地空通信采用带载波双边带幅度调制的工作方式, 通信信号为非恒模信号, 而具有恒定包络的恒模干扰是甚高频地空通信中的一种常见干扰(如大功率无绳电话、乡村调频广播电台、车载电台、寻呼台发射机等电台发出的信号等)^[3], 并且地空通信系统中同时出现两个干扰的现象较少, 因此本文主要针对接收信号为地空通信信号与一个恒模干扰信号混合的情况进行讨论。

文献[3]提出了基于恒模阵列的干扰抑制方法, 该方法采用多路通道信号, 利用恒模算法^[4-8]实现干扰信号的有效抑制。但该方案需要解决恒模算法的误捕获问题^[3,9], 并且存在初始值、步长选取等问题^[10]。本文提出了一种单通道最优恒模算法, 该方法利用非线性最小二乘方法进行恒模信号幅度与相位的直接估计, 算法速度快, 避免了普通自适应算

2010-10-09 收到, 2010-12-23 改回

国家科技支撑计划重大项目(2011BAH24B00), 天津市科技支撑计划重点项目(10ZCKFGX04000)和民航局科技基金(MY0517409)资助课题

*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

法初始值和步长因子难以选取的问题，并且本文方法只使用一路通道，与文献[3]中的恒模阵列算法相比，不必对系统进行较大的改动。本文方法也可用于其它调幅接收机中，实现恒模干扰的抑制，或者应用于有用信号为恒模信号的通信系统中，实现对非恒模干扰信号的抑制。

2 系统模型及干扰抑制方案

当甚高频地空通信系统受到干扰时，其接收信号模型为

$$x(t) = a_1s(t) + a_2J(t) + n(t) \quad (1)$$

其中 $x(t)$ 为系统接收到的信号， $J(t)$ 为干扰信号， a_1, a_2 为混合系数， $n(t)$ 为噪声， $s(t)$ 为地空通信信号，在甚高频地空话音通信系统中，采用带载波双边带幅度调制方式对语音信号进行调制，则地空通信信号为

$$s(t) = A_c[1 + m_a \tilde{s}(t)]e^{j2\pi f_c t} = A_c e^{j2\pi f_c t} + A_c m_a \tilde{s}(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (2)$$

其中 $\tilde{s}(t)$ 为语音信号， A_c 为载波信号幅度， m_a 为调幅度， f_c 为载波频率。

由式(2)可以看出，采用带载波双边带幅度调制的地空通信信号中载波信号为恒模信号，当利用干扰信号的恒模特性对干扰信号进行抑制时，有可能抑制的是载波而不是恒模干扰，因此本文提出了如图1所示的单通道最优恒模干扰抑制方案。本方案首先利用Goertzel算法^[11]进行载频估计，然后利用无限长单位脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)陷波器滤除载波，再利用单通道最优恒模算法对恒模干扰信号进行估计，从而避免了恒模算法收敛到调幅信号载波上去。该方案无需增加额外通道，与现有通信设备具有良好的兼容性，且不存在一般自适应算法的收敛问题。

具体实现步骤如下：

(1)将通过天线接收的甚高频调幅信号转化为中频信号；

(2)对被转化的中频信号进行数字转换、滤波抽取；

(3)在调幅信号载频频率范围已知的基础上，对滤波抽取后的信号进行载频估计；

(4)以载波频率估计值作为参考信号，进行陷波，将调幅信号中的载波陷掉，从而避免恒模算法误捕获到调幅信号的载波上；

(5)对去除调幅载波的信号进行正交变换；

(6)对正交变换后的信号利用单通道最优恒模算法估计恒模干扰信号；

(7)将步骤(5)中正交变换后的信号与步骤(6)中估计的恒模干扰信号一起送入减法器，进行相减，实现恒模干扰信号的抑制；

(8)对步骤(7)输出的信号取实部，与步骤(4)输出的载波信号相乘，进行解调，再经低通滤波器滤除高频杂波后输出音频信号。

3 单通道最优恒模算法

基于恒模阵列的恒模算法可以实现恒模信号的提取，但需要对现有通信系统进行较大改动，需将原有的单通道接收系统改为多通道接收系统，与现有电台兼容性较差，且存在收敛性问题，因此本文提出了单通道最优恒模算法。单通道恒模算法的基本思想就是仅利用一路接收信号采用非线性最小二乘方法进行恒模信号的估计。

设未知恒模信号为

$$J(k) = \alpha e^{j\phi(k)}, \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3)$$

其中 $J(k)$ 表示恒模信号， k 为采样快拍 ($k = 0, 1, \dots, K-1$), K 表示采样快拍数， $\alpha > 0$ 表示恒模信号的幅度， $\{\phi(k)\}$ 为恒模信号的相位序列。

针对单通道系统，我们利用非线性最小二乘法进行恒模干扰信号幅度与相位的直接估计^[12]，代价函数如式(4)所示。

$$C = \sum_{k=0}^{K-1} \|u_1(k) - \alpha e^{j\phi(k)}\|^2 \quad (4)$$

其中 $u_1(k)$ 为图1中正交变换后的输出信号。

由式(4)可以得到

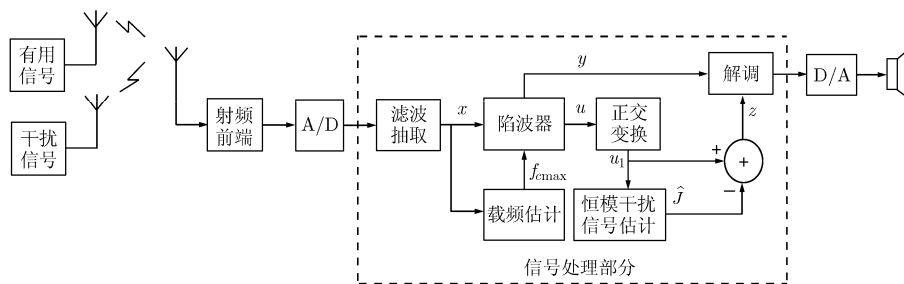


图1 单通道最优恒模干扰抑制方案

$$\begin{aligned}
C &= \sum_{k=0}^{K-1} \|u_1(k) - \alpha e^{j\phi(k)}\|^2 \\
&= \sum_{k=0}^{K-1} \{ |u_1(k)|^2 + \alpha^2 - 2\alpha \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \} \\
&= K \left\{ \alpha - \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \right\}^2 \\
&\quad - \frac{\left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \right\}^2}{K} + \sum_{k=0}^{K-1} |u_1(k)|^2 \quad (5)
\end{aligned}$$

由此可以看出,若使式(5)达到最小可以通过 $\frac{\left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \right\}^2}{K}$ 最大化以及 $\alpha - (1/K) \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] = 0$ 得到。即

$$\begin{aligned}
\min_{\alpha, \phi(k)} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \|u_1(k) - \alpha e^{j\phi(k)}\|^2 \right\} \\
\Leftrightarrow \begin{cases} \max_{\phi(k)} \frac{\left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \right\}^2}{K} \\ \alpha = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \operatorname{Re}[u_1(k)e^{-j\phi(k)}] \end{cases} \quad (6)
\end{aligned}$$

由此得到恒模干扰信号序列的相位估值为

$$\hat{\phi}(k) = \arg[u_1(k)], \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (7)$$

将式(7)中的相位估值代入式(6),可以得到恒模干扰信号序列的幅度估值为

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} |u_1(k)|}{K} \quad (8)$$

由式(7),式(8),可得恒模干扰信号的估计结果为

$$\hat{J}(k) = \hat{\alpha} e^{j\hat{\phi}(k)} \quad (9)$$

为实现干扰的自适应实时抑制,式(8)的幅度估计可用以下方式递推实现:

$$\hat{\alpha}_0 = |u_1(0)| \quad (10)$$

$$\hat{\alpha}_k = \frac{k\hat{\alpha}(k-1) + |u_1(k)|}{k+1} \quad (11)$$

式(7)的相位估计可以利用如下计算方法实现:

$$e^{j\hat{\phi}(k)} = \frac{u_1(k)}{|u_1(k)|} \quad (12)$$

式(12)有效地减小了由式(7)求解相位所需的运算量。

由此可以得到最终恒模干扰信号的估值为

$$\hat{J}(k) = \hat{\alpha}_k \frac{u_1(k)}{|u_1(k)|} \quad (13)$$

其中 α_k 利用式(10)与式(11)进行计算。

由于该方法对恒模信号的幅度与相位进行了估计,因此可以将估计出的恒模信号 $\hat{J}(k)$ 直接与 $u_1(k)$ 相减从而得到非恒模信号。

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真数据实验分析

将空管语音信号进行 AM 调制后与 FM 干扰信号进行混合,混合功率比 1:1,采样率 $f_s=2$ MHz 时,对混合后信号进行干扰抑制实验。图 2(a), 2(b)及图 2(c)所示分别为原始语音信号波形图、混合信号直接解调的语音信号波形和单通道恒模算法干扰抑制后解调语音波形。由图 2 仿真结果可见,如果不进行干扰抑制而直接解调,解调信号已与原始信号发生了很大的变化,干扰抑制再解调后所得波形与原始波形相似。

分别采用本文方法与双通道恒模阵列算法^[3]对干扰进行抑制,采样率 $f_s=2$ MHz, SNR=45 dB 时,AM 信号与 FM 信号功率比分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 每种情况进行 100 次 Mont Carlo 实验,得出随着信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)的变化干扰抑制后解调信号与原始语音信号相关系数的平均值,如图 3 所示。图 3(a)中双通道恒模算法初始加权矢量取 $\mathbf{w}(0)=[1,1]^T$,图 3(b)中双通道恒模算法初始加权矢量为 $\mathbf{w}(0)=[1,0]^T$,图 3(c)中双通道恒模算

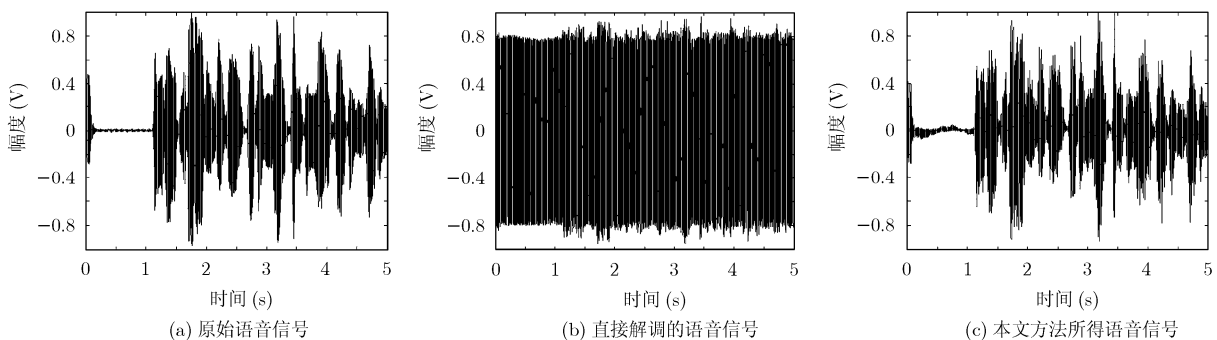


图2 信号波形图

法初始加权矢量随机选取。由图3可以看出，本文方法与基于恒模阵列的干扰抑制算法都能对信号进行有效抑制，但恒模阵列算法对于初始值的选取较为敏感，初始值不同时性能差距较大，而本文方法没有此类问题存在。

将 AM 信号与 FM 信号以功率比 1:1 进行混合，分别采用本文方法与双通道恒模阵列算法进行干扰抑制，干扰抑制后信号与原始信号的相关系数收敛曲线如图 4 所示，其中双通道恒模算法初始加权矢量取 $w(0)=[1,1]^T$ ，并分别采用步长 0.0005 及 0.001 进行实验。由相关系数收敛曲线可以看出本文所提出的新方法具有较快的收敛速度，并且不涉及步长选取问题。

4.2 实测数据实验分析

为了验证干扰抑制算法的有效性，我们搭建一套干扰抑制实验系统。使用惠普 8657B 信号发生器发射民航地空通信所使用 AM 信号，载频为 118 MHz，调制信号是管制语音信号，调制度为 0.3。采用前锋 QF1055A 信号发生器发射调频干扰信号，调频信号载频为 118 MHz，最大频偏为 8 kHz。通过改变惠普 8657B 信号发生器或者前锋 QF1055A 信号发生器来控制 AM 信号和 FM 信号的功率比。接收端首先利用混频电路将信号的载频下变频到 1.25 MHz，然后使用采集卡将模拟信号变为数字信号，采样频率为 5 MHz。由于信号的带宽只有 100 kHz，

使用数字抽取滤波的方法将采样率降到 200 kHz，实际使用 10 s 数据，利用实验系统采集到的实测数据进行算法验证。对于单通道干扰抑制系统，只需采用采集卡输出的一路信号。

分别采用本文单通道恒模算法与双通道恒模算法在干扰与有用信号不同功率比的情况下进行实验，双通道恒模算法初始加权矢量取 $w(0)=[1, 1]^T$ ，每次实验干扰抑制后解调信号与原始语音信号相关系数如图 5 所示。由图 5 可以看出，单通道最优恒模算法虽然只利用了一个通道的数据，但是处理效果与双通道恒模算法处理效果很接近。

5 结束语

针对地空通信系统中常见干扰具有恒定包络的特点，本文提出了一种单通道最优恒模算法，给出了单通道恒模干扰抑制方案。该算法利用非线性最小二乘方法估计出恒模信号的幅度与相位，从而实现恒模信号的提取。基于单通道最优恒模算法的干扰抑制系统可以直接利用现有电台结构，无须增加接收天线和使用参考信号，运算简单，实时性好。仿真实验结果表明该方法对民航地空通信具有较好的干扰抑制效果。另一方面，本方法也可用于其它调幅接收机中，实现恒模干扰信号的抑制，或者用于有用信号为恒模信号的通信系统中，例如甚高频地空数据链通信系统，实现对非恒模信号的抑制。

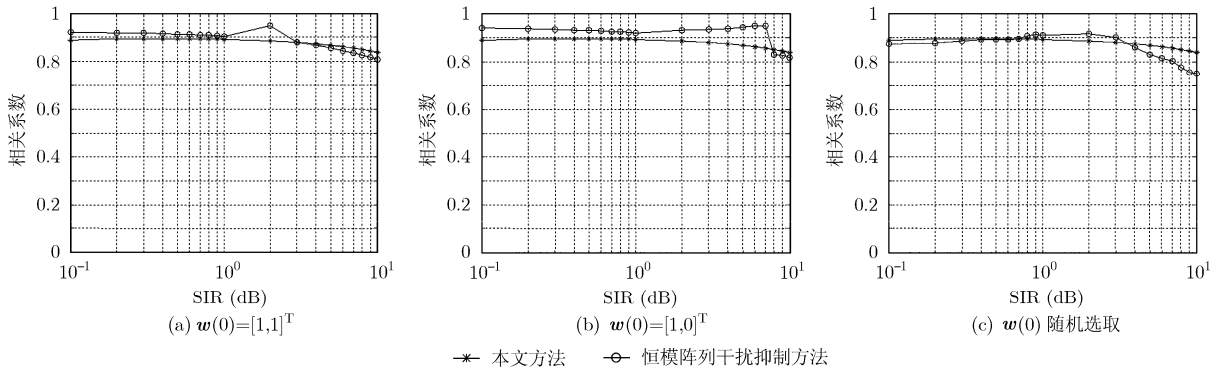


图 3 两种方法干扰抑制后信号与原始信号的相关系数

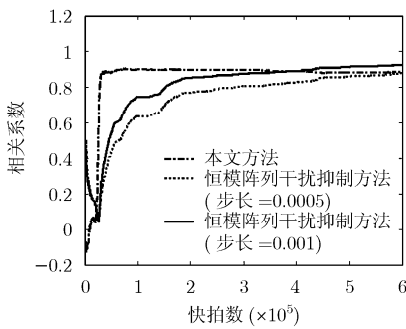


图 4 两种方法干扰抑制后信号与原始信号的相关系数收敛曲线

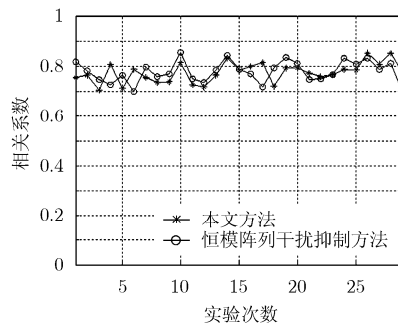


图 5 两种方法干扰抑制后信号与原始信号的相关系数

参 考 文 献

- [1] 任超, 吴嗣亮, 王菊, 李加琪. 基于空时处理的稳健自适应波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1381-1385.
Ren Chao, Wu Si-liang, Wang Ju, and Li Jia-qi. A robust adaptive beamforming algorithm based on space-time processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1381-1385.
- [2] 郭庆华, 廖桂生. 一种稳健的自适应波束形成器[J]. 电子与信息学报, 2000, 26(1): 146-150.
Guo Qing-hua and Liao Gui-sheng. A robust adaptive beamformer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2000, 26(1): 146-150.
- [3] 吴仁彪, 马健丽, 等. 基于恒模阵列的民航地空通信自适应干扰抑制方法及系统[P]. 中国, ZL 200710057268.9, 2010.
Wu Ren-biao and Ma Jian-li, *et al.*. An adaptive interference suppress method and system for air-to-ground communication in civil aviation based on constant modulus array[P]. China, ZL 200710057268.9, 2010.
- [4] Gooch R P and Lundell J D. The CM array: an adaptive beamformer for constant modulus signals[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Tokyo, Japan, April 7-11, 1986: 2523-2526.
- [5] Johnson R Jr, Schniter P, Endres T J, Behm J D, Brown D R, and Casas R A. Blind equalization using the constant modulus criterion: a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(10): 1927-1950.
- [6] Song Xin, Wang Jin-kuan, Wang Bin, and Han Ying-hua. Robust LSCMA under quadratic constraint[C]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Hong Kong and Macau, August 16-20, 2010: 464-467.
- [7] Chen Y X, Le-Ngoc T, Champagne B, and Xu C J. Recursive least squares constant modulus algorithm for blind adaptive array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(5): 1452-1456.
- [8] 孟艳, 汪晋宽, 朱俊. 基于子空间的线性约束最小二乘恒模算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 49-52.
Meng Yan, Wang Jin-kuan, and Zhu Jun. A linearly constrained LSCM algorithm based on subspace[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 49-52.
- [9] Lundell J D and Widrow B. Applications of the constant modulus adaptive beamformer to constant and non-constant modulus signals[C]. Twenty-First Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computer, Pacific Grove, CA, 1987: 432-436.
- [10] Miranda M D, Silva M T M, and Nascimento V H. Avoiding divergence in the constant modulus algorithm[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Las Vegas, Nevada, USA, March 30-April 4, 2008: 3565-3568.
- [11] Oppenheim A V, Schaffer R W, and Buck J R. Discrete-Time Signal Processing (2nd edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1989: 585-587.
- [12] Stoica P and Moses R. Spectral Analysis of Signals[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005: 300-302.
- 石庆研: 女, 1977年生, 讲师, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、盲信号处理.
- 吴仁彪: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应信号处理、传感器阵列信号处理、高分辨率雷达成像与自动目标识别、民航无线电干扰检测与自适应抑制、民航遥感信息处理与应用.
- 钟伦珑: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为自适应信号处理, 阵列信号处理.