

航空通信网络中复杂干扰过滤技术研究

刘振海¹, 李守英²

(1. 盐城工学院 现代教育技术中心, 江苏 盐城 224051;

2. 洛阳理工学院 数理部, 河南 洛阳 471023)

摘要: 航空通信环境中存在复杂的干扰信号, 对正常的通信信号造成强烈的干扰; 利用传统算法进行干扰信号过滤, 无法避免由于干扰信号过于复杂导致过滤不充分的缺陷; 提出一种基于加权残差优化算法的航空通信网络中复杂干扰过滤方法; 对原始信号进行降频处理, 能够消除峰值干扰信号, 提高了信号的准确性; 根据加权残差修正优化算法的相关原理, 对通信信号进行残差优化处理, 经过处理后的通信信号在受到干扰时会形成零陷, 实现了对复杂干扰信号的过滤; 实验结果表明, 利用该算法进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤, 能够有效提高过滤的准确性, 效果令人满意。

关键词: 航空通信网络; 干扰信号; 过滤; 加权残差

Research on Complex Interference Filtering Technology in Aviation Communication

Liu Zhenhai¹, Li Shouying²

(1. Modern Educational and Technological Center Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. Department of Mathematics and Sciences, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: aviation communication environment exists in the complex interference signal, strong interference on normal communication signals. The use of traditional algorithm for interference signal filtering, is inevitable because of the interference signal is too complex lead to inadequate filtration defects. For this, put forward a kind of optimization algorithm based on weighted residuals of aviation communication network in the complex interference filter method. The original signal frequency reduction processing, can eliminate the disturbance signal peak, improve the accuracy of the signal. Based on the related principle of weighted residual correction optimization algorithm, and residual optimization of communication signals, after processing the signal in the interference when zero trap formation, so as to realize the complex jamming signal filtering. Experimental results show that the algorithm presented in this paper for aviation communication network in the complex interference signal filtering, can effectively improve the accuracy of the filter, the effect is satisfactory.

Keywords: aviation communication network; jamming signal; filtering; weighted residuals

0 引言

在地面和空中的各类通信设施的数量逐渐增多的情况下, 航空通信网络在通信过程中的干扰问题也越来越严重^[1-4]。航空通信网络在通信的过程中, 如果受到复杂的干扰信号, 将会对航空器带来严重的安全隐患, 甚至会发生坠毁事故^[5-7]。

随着地面和天空各类通信设施数量逐渐增多, 航空通信网络受到的干扰也越来越复杂^[8-10]。传统的航空通信网络中干扰过滤技术进行复杂干扰信号过滤的过程中, 由于干扰信号复杂过滤不充分等弊端, 导致航空通信网络的通信性能严重降低, 因此, 利用传统的航空通信网络中干扰过滤技术难以满足航空通信网络正常通信的要求。

1 航空通信网络抗干扰的模型

航空通信网络通信过程包含大量干扰, 需要进行抗干扰处理, 其模型如下:

假设 r 是理想的不含干扰信号的通信信号, x 是含有干扰信号的通信信号, r_0 是理想通信信号 r 中的干扰信号, $\{x_i \in$

$R^m\}, i \in \{1, \dots, n\}$, 其中 $m \geq n$ 为含干扰信号的通信信号中对应区域的 r_0 的干扰信号, 能够用 $\{x_i\}$ 的线性组合进行描述 r_0 , 即 $r_0 = X\alpha$, 其中干扰信号的集合 $X = [x_1, \dots, x_n]$ 。由于 r_0 并非由 $\{x_i\}$ 构成的空间, 难以找到一个能够符合上式的解 α 。因此需要建立通信信号模型。

假设在 r_0 和 X 中都存在干扰信号:

$$r_0 + e_0 = (X + E)\alpha \quad (1)$$

式中, e_0 , E 分别用来描述 r_0 和 x 中的误差。定义 $\{r_i\}$ 为理想通信信号 r 中与 $\{x_i\}$ 对应的干扰信号, $\tilde{R}_0 = [\tilde{r}_1, \dots, \tilde{r}_p] \in R^{m \times p}$, $\tilde{r}_i = r_i - \bar{r}_i \in R^m$, $\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i \in R^m$, \bar{r}_0, \bar{x} 分别是 r_0 、 x_i 的各元素的均值, 则有:

$$\tilde{R}_0 + E_0 = (\tilde{X} + E)\alpha \quad (2)$$

其中: $E_0 \in R^{m \times p}$ 是相应的干扰信号, $\alpha \in R^{m \times p}$, 同样, 令 $A = \text{diag}(a_1, \dots, a_m) \in R^{m \times m}$, $B = \text{diag}(b_1, \dots, b_m) \in R^{(n+1) \times (n+1)}$, A, B 分别用来描述 $[E, e_0]$ 中行和列中的信号受到干扰的程度。则与其对应的奇异值能够分解成:

$$A[\tilde{X}, \tilde{R}_0]B = U\Sigma V^T \quad (3)$$

其中: $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_{n+p})$, $\sigma_i > \sigma_{i+1}$, $U \in R^{m \times (n+p)}$, 右奇异值为 $V \in R^{(n+p) \times (n+p)}$ 。

利用下述公式能够获取原始通信信号最小二乘的解:

$$\alpha_{ls} = -\text{diag}(b_1, \dots, b_n)V_{1,2}^{-1}V_{2,2}^{-1}$$

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2014-07-08;

作者简介: 刘振海(1982-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机应用、网络技术、智能算法方向的研究。

$$diag(b_{n+1}, \dots, b_{n+p})^{-1} \quad (4)$$

$$A[E, E_0]B = -U_2 \Sigma_2 [V_{1,2}^T, V_{2,2}^T] \quad (5)$$

其中: 左奇异值矩阵能够描述为 $\Sigma_2 = diag(\sigma_{n+1}, \dots, \sigma_{n+p})$ 。由上能够获取关于理想通信信号的预测值:

$$\hat{R}_0 = \hat{X}_{ds} + [1, \dots, 1]^T [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_p] \quad (6)$$

但是干扰信号 r_0 是未知的, 需要给出存在干扰信号的原始通信信号模型, 利用下述公式能够描述该模型:

$$x = r + (k_0 + k_1 r) \eta \quad (7)$$

其中: x 是观测通信信号, r 是理想的不含干扰信号的通信信号, η 是方差为 1 的干扰信号, k_0, k_1 是已知常数。令 r_i 为关于 x_i 的理想通信信号 r 的干扰信号并且 $r_0 \in \{r_i\}$, 则 (7) 式转换为下述形式:

$$x_i = r_i + k_0 \delta_i + k_1 diag(s_i) \delta_i \quad (8)$$

其中: $\delta_i \in R^m$ 是均值为零, 方差为 1 的干扰信号。然后需要引入一个关键的矩阵 P :

$$P = (A[X, R_0]^T B)(A[X, R_0]B) = (U \Sigma V^T)^T (U \Sigma V^T) = V \Sigma^2 V^T \quad (9)$$

设置 $E\{\}$ 是期望通信信号, 则当 $m \gg n + 1$ 时, P 约等于 P 的期望信号, 利用下述公式能够描述:

$$P \approx E\{P\} = E\{(A[X, R_0]B)^T (A[X, R_0]B)\} = B \begin{bmatrix} P_{XX} & \tilde{R} A \tilde{R}_0 \\ \tilde{R}_0 A \tilde{R} & \tilde{R}_0 A \tilde{R}_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: $P_{XX} = E\{\tilde{X}^T A^2 \tilde{X}\} \in R^{n \times n}$ 。当 $m \gg n + p$ 时, $\sum_i a_i^2 \tilde{x}_{i,j} \approx E\{a_i^2 \tilde{x}_{i,j}\} = \sum_i a_i^2 \tilde{r}_{i,j}$ 对于 P_{XX} 则有:

$$P_{XX} = E\{\tilde{X}^T A^2 \tilde{X}\} = \tilde{R}^T A^2 \tilde{R} + \sum_{i=1}^m a_i^2 diag(k_0 + k_1 \bar{r})^2 + \sum_{i=1}^m a_i^2 k_1^2 diag(\tilde{r}_{i,1}, \dots, \tilde{r}_{i,n})^2 + \sum_{i=1}^m a_i^2 k_1 diag(k_0 + k_1 \bar{r}) diag(\tilde{x}_{i,1}, \dots, \tilde{x}_{i,n}) \quad (11)$$

最终能够根据由 P 的估计值得到 V , 再通过公式 (8) 得到航空通信网络中正常的通信信号 a_{ds} 。

2 航空通信网络复杂干扰信号过滤方法

利用传统算法进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤, 无法避免由于干扰信号复杂, 会出现过滤不充分等弊端, 导致航空通信网络的通信性能严重降低等弊端。为此, 提出一种基于加权残差优化算法的航空通信网络中复杂干扰过滤方法。

2.1 消除峰值干扰信号

在进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤之前, 需要将航空通信网络的原始信号进行降频处理, 从而获取消除原始信号中的尖峰干扰信号:

$$s_{JG}[p] = s_{JG}(pU_T) = B \cdot e(pU_T - v_0) d[(1 + \kappa) \cdot (pU_T - v_0)] \cos[2\pi(g_{JG} + g_E)pU_T + \varphi_0] + w_{JG}(pU_T) \quad (12)$$

设置航空通信网络原始信号中能够直接检测到的数据是 $T(G_E, \hat{v})$, 则能够获取下述公式:

$$T(G_E, \hat{v}) = \begin{bmatrix} T_1(G_E, \hat{v}) \\ T_2(G_E, \hat{v}) \\ \vdots \\ T_{P_d}(G_E, \hat{v}) \end{bmatrix} = N \cdot \begin{bmatrix} S_1(G_E, \hat{v}) \\ S_2(G_E, \hat{v}) \\ \vdots \\ S_L(G_E, \hat{v}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

在上述公式中, $N = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_{P_d}]^T$ 用来描述降

频处理后的原始信号的排列矩阵。 P_d 是该矩阵中不同信号分量的数量。 N 是该矩阵中每一行元素不同干扰信号组合方式的数目。利用下述公式进行描述信号分量中干扰信号组合情况:

$$T(G_E, \hat{v}) = \max_j \{|T_j(G_E, \hat{v})|^2\} \quad (14)$$

根据航空通信网络中通信信号的线性组合法, 能够获取直接检测到的信号数据:

$$T(G_E, \hat{v}) = \max_j \{|T_j(G_E, \hat{v})|^2\} \quad (15)$$

根据上面上述方法, 能够消除航空通信网络中原始通信信号的峰值干扰信号, 从而能够提高航空通信网络通信信号的精确度。

2.2 航空通信网络复杂干扰过滤的实现

根据加权残差修正优化的相关原理, 对航空通信网络通信信号进行残差优化处理, 经过处理后的通信信号在受到干扰时会形成零陷, 从而提高通信信号的准确性。具体步骤如下所述:

通常情况下, 干扰信号的功率比航空通信网络中的通信信号高 10~50 db, 因此, 干扰信号是影响通信质量的主要因素。利用下述公式能够获取航空通信原始信号的方差矩阵:

$$S_{yy} \approx S_K + S_p \quad (16)$$

将上述信号矩阵进行分解, 能够得到干扰信号的特征子空间, 能够利用下述公式进行描述:

$$S_{yy} = \sum_{p=1}^p \mu_p f_p f_p^T \approx \sum_{p=1}^M \mu_p f_p f_p^T + \tau_p^2 \sum_{p=M+1}^p f_n f_n^T = V \sum_K V^T + R \sum_p R^T \quad (17)$$

在上述公式中, $\sum_K = diag\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M\}$ 用来描述通信信号的特征值, M 是干扰信号的数目, $\{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ 是干扰信号的子空间, 通信信号的特征分量是 $\{f_{M+1}, f_{M+2}, \dots, f_P\}$ 。利用下述公式能够描述通信信号中的干扰情况:

$$\begin{cases} \max_{x,d} |x^T S_{yy} d|^2 \\ x^T x = d^T d = 1 \\ x = V \frac{1}{L} \beta \\ d = T \frac{1}{L} \chi \end{cases} \quad (18)$$

利用下述公式获取航空通信网络中通信信号加权残差修正优化结果:

$$X_p = S_{yy}^{-1} R \beta \quad (19)$$

根据上面阐述的方法, 对通信信号进行加权残差修正优化处理, 能够获取通信信号的期望信号, 并在干扰方向上形成零陷, 从而实现了复杂干扰信号的过滤, 提高了通信信号的信噪比。

3 实验结果及分析

为了验证本文航空通信网络中复杂干扰过滤方法的有效性, 需要进行一次实验。利用 Matlab 7.1 编程模拟实验环境。在实验的过程中, 采集的存在复杂干扰信号的航空通信网络中的通信信号能够用图 1 进行描述。

分别利用不同算法进行航空通信网络中复杂干扰信号的过滤实验。利用传统算法进行复杂干扰信号过滤, 获取的信号波形能够用图 2 进行描述。

利用本文算法进行复杂干扰信号过滤, 获取的信号波形能

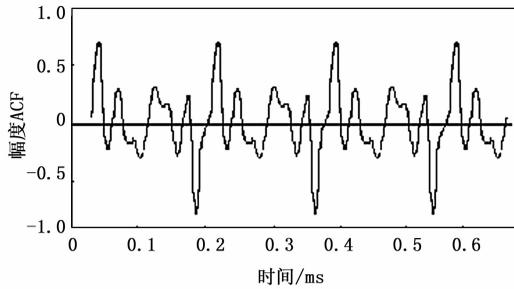


图 1 原始通信信号波形

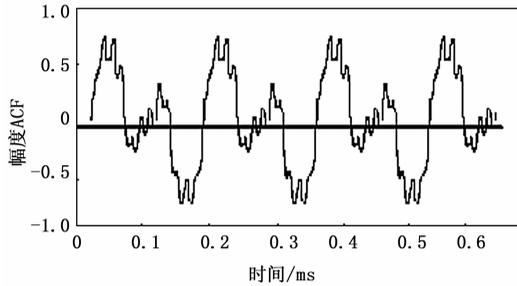


图 2 传统算法过滤结果

够用图 3 进行描述。

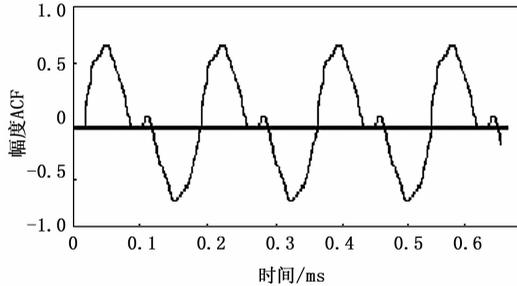


图 3 本文算法过滤结果

根据上图实验结果能够得知，利用本文算法进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤，获取的通信波形更准确。实验进行 10 次，获取的实验结果能够用图 4 进行描述。

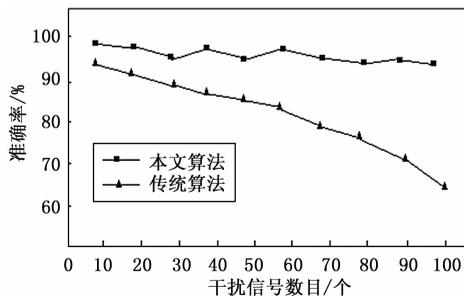


图 4 不同算法实验结果比较

将实验过程中的数据进行整理和分析，能够得到表 1 中的实验结果。

根据表 1 中实验结果能够得知，利用本文算法进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤，准确率明显高于传统算法，最终稳定在 98%；利用传统算法进行航空通信网络中复杂干扰信

号过滤，随着干扰信号的数目不断增大，过滤的过程越来越复杂，导致准确性越来越差。充分表明本文算法的优越性。

表 1 不同算法实验结果

实验次数	干扰信号数目/个	传统算法准确率/(%)	本文算法准确率/(%)
1	10	95	99
2	20	92	99
3	30	90	97
4	40	87	99
5	50	85	98
6	60	83	99
7	70	80	98
8	80	77	97
9	90	71	98
10	100	62	98

4 结束语

针对传统算法进行航空通信网络中干扰信号过滤，无法避免由于干扰信号过于复杂导致过滤不充分的缺陷。为此，提出一种基于加权残差优化算法的航空通信网络中复杂干扰过滤方法。首先对存在干扰信号的原始信号进行降频处理，能够消除峰值干扰信号。利用加权残差修正优化算法对通信信号进行残差优化处理，经过处理后的通信信号在受到干扰时会形成零陷，从而实现了对复杂干扰信号的过滤。实验结果表明，利用本文算法进行航空通信网络中复杂干扰信号过滤，提高了干扰信号过滤的准确性，满足了航空通信网络在复杂干扰环境中的通信要求。

参考文献:

[1] 李鹏伟, 王海顺. 基于通信网络算法在水下通信中仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2012 (4): 134-137.

[2] 沈楠. 基于信号仿真的通信对抗系统效能评估 [J]. 信息对抗学术, 2008 (4): 81-82.

[3] 刘文霞. 基于兴趣匹配的网络优化通信方法研究 [J]. 电子科技, 2012 (8): 90-92.

[4] 龚福祥, 王庆, 张小国. 通信网络中的 GPS/TDOA 混合定位算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2011 (2): 209-213.

[5] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Under-water acoustic sensor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Networks (S1570-8705), 2005, 3 (3): 257-279.

[6] 赵清华, 刘建霞, 李梁, 等. 非线性约束条件下的二次优化 RCAB 算法 [J]. 太原理工大学学报, 2008, 39 (5): 475-478.

[7] Du Ruiyan, Wang Jinkuan, Liu Fulai, Zhou Qinqing. An Effective Nulls Control Method [A]. Micro-wave Antenna, Propagation and EMC Technologies for wireless communications, 2009 3rd IEEE International symposium on [C]. 2009 (3): 666-668.

[8] 王永良, 丁前军, 李荣峰. 自适应阵列处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[9] Hardik M H R. Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2003: 19-24.

[10] 李振兴, 徐洪洲. 基于经验模态分解的小波阈值降噪方法研究 [J]. 计算机仿真, 2009, 2 (9): 325-328.