

基于投影算法的雷达信号分离的 Simulink 仿真实现

魏亚贤, 韩明, 苑克剑
(中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 民航系统中大多使用 1090 MHz 的频率, 这些同频率的信号有可能在时间上发生重叠。利用信号特征值在时间上的分布来确定信号的重叠情况, 进而使用投影(PA)算法对信号进行分离。利用 Matlab 的 Simulink 工具箱建立了 1090 MHz 信号分离系统的仿真模型, 并得到了预期的效果。仿真结果表明, 该算法能够有效地分离两个混叠的 S 模式信号, 此算法对 A/C 模式信号依旧适用。

关键词: 阵列天线; 二次监视雷达; 信号分离; 投影算法; Simulink

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0054-05

Separation of Secondary Surveillance Radar Sources by Projection Algorithm Based on Simulink

WEI Ya-xian, HAN Ming, YUAN Ke-jian
(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The frequency of 1090 MHz is generally used in aviation systems. These signals with the same frequencies may superpose over the time. The distribution of signal characteristic values over the time is used to determine the superposing situation of signals, and then Projection Algorithm (PA) is used to separate the superposed signals. A simulation model was established by using the toolbox of Matlab Simulink for 1090 MHz signal separation, and expected results were obtained. The simulation results show that projection algorithm can effectively separate two superposed S mode signals, which is also adaptable for A/C mode signals.

Key words: array antenna; second surveillance radar; signal separation; projection algorithm; Simulink

0 引言

现在的监视系统多使用 1090 MHz 的下行频率, 包括二次雷达 SSR、多点定位 MLAT 和 ADS-B 系统的下行频率均为 1090 MHz, 包括 SSR 和 MLAT 的 A/C 模式、S 模式应答信号, ADS-B 的 1090ES 信号。当两架飞机距离较近时, 有可能同时对一个应答机进行应答, 应答的信号有极大的可能性混叠到一起。信号混叠到一起, 加大了识别信息码的难度, 导致信号解码的错误, 从而得到错误的飞机信息, 会严重影响飞行安全。因此, 在 1090ES 接收机系统设计中必须包含信号

分离的部分。而在信号分离部分使用阵列天线信号模型会使得信号数据的处理变得简单, 更加贴近真实的信号^[1]。

1 数学模型

在 MLAT 系统中, 飞机与地面站设备的检测、识别、跟踪以及通信大都是基于 SSR 实现的。根据 ICAO 标准附件 10 的规定, SSR 的地-空和空-地之间的数据传输使用模式 A/C 和模式 S。在下行链路中, 模式 S 和模式 A/C 都使用 1090 MHz 的频率, 在传输的过程中, 同种信号和两种信号之间有可能发生交叠, 这要求地面接收机在接收时必须对混叠的信号进行分离的能力, 以免影响信号的解码^[2]。

图 1 是 1090ES 接收机框图, 处理器对接收到的应答信号进行分离, 然后将每一个信号送至包含报头检测和解码的传统接收机。

收稿日期: 2015-03-12 修回日期: 2015-04-07

基金项目: 中央高校科技业务项目(3122014P001)

作者简介: 魏亚贤(1989—), 女, 河北石家庄人, 硕士, 研究方向为民航通信与监视系统。

其中, A 为 $m \times d$ 维的操纵矩阵, 它包含 m 元阵列天线的操纵向量 $a(\theta_i)$ ($1 \leq i \leq d$), 且有

$$a(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left(j \frac{2\pi f_i}{c} \Delta_2 \sin(\theta_i)\right) \\ \vdots \\ \exp\left(j \frac{2\pi f_i}{c} \Delta_m \sin(\theta_i)\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

仿真过程中使用 4 元的均匀线阵, 阵元间距为 $\lambda/2$, 信号的频率均为标准频率 f_c , 则 $a(\theta_i) = (1, \exp(j\pi \sin(\theta_i)), \dots, \exp(j\pi \sin(\theta_i))^{(m-1)})^T$ 。其中, θ_i 为信号相对于视轴方向的入射角。这里 M 可以认为是非参数化矩阵, 它可以反映多径和阵列的缺陷, 如校准误差、耦合误差、阵元的定位误差。认为 $m > d$, 假设 M 列满秩, 所以 M 为左可逆^[4-6]。

2 算法

信号的奇异值能够表征信号中 有用信号和噪声的能量分布情况, 奇异值分解以后, 隐含在噪声之中的特征信号就会被提取出来。所以, 信号的奇异值在时间上的分布在一定程度上能够代表信号在时间上的分布^[7]。

假设有两个在时间上重叠的 S 模式信号, 其具体格式见图 3, 信号重叠情况如图 4 所示。信号存在的时间区间为 $t_1 \sim t_4$, 其中 $t_1 \sim t_2$ 时间段内只存在 S_2 信号, $t_2 \sim t_3$ 时间段内 S_1 信号和 S_2 信号同时存在, $t_3 \sim t_4$ 时间段内只存在 S_1 信号。

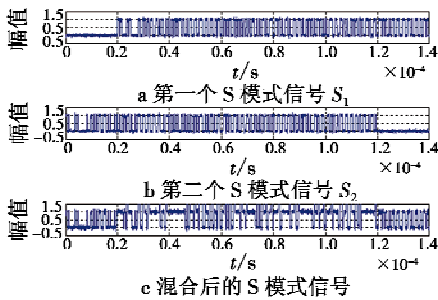


图 4 S 模式信号交叠

Fig. 4 Two overlapped mode S signals

符号 $(\cdot)^{(1)}$ 表示在时间区间 $[t_1, t_2]$ 内混合矩阵的列所构成的子集, 同理, 符号 $(\cdot)^{(2)}$ 表示在时间区间 $[t_3, t_4]$ 内混合矩阵的列所构成的子集。由之前的观测模型可以得到

$$\begin{cases} X^{(1)} = M \cdot S^{(1)} + N^{(1)} \\ X^{(2)} = M \cdot S^{(2)} + N^{(2)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $S^{(1)}, S^{(2)}$ 分别为 $d \times T^{(1)}$ 维、 $d \times T^{(2)}$ 维的矩阵, 同时也是矩阵 S 的子集, 分别包含在时间区间 $[t_1, t_2]$, $[t_3, t_4]$ 内所发射的信号样本的信息; $X^{(1)}, X^{(2)}$ 分别为接收的混合矩阵 S 的子矩阵 ($m \times T^{(1)}$), ($m \times T^{(2)}$);

$N^{(1)}, N^{(2)}$ 分别为接收机的噪声矩阵。

由于在时间区间 $[t_1, t_2]$ 内只存在信号 S_1 , 在时间区间 $[t_3, t_4]$ 内只存在信号 S_2 , 上述等式可以简化为

$$\begin{cases} X^{(1)} = m_1 \cdot s_1^{(1)} + N^{(1)} \\ X^{(2)} = m_2 \cdot s_2^{(2)} + N^{(2)} \end{cases} \quad (13)$$

式中: m_i ($i = 1, 2$) 为 M 的列向量; s_i ($i = 1, 2$) 为 M 的行向量。在无噪声情况下, 矩阵 $X^{(1)}$ 和 $X^{(2)}$ 的秩均为 1。分别对 $X^{(1)}$ 和 $X^{(2)}$ 进行 SVD 分解, 能得到 m_1 和 m_2 的估计值 \hat{m}_1 和 \hat{m}_2 , 其估计值等于相应的最大的奇异值所对应的特征向量。确定了 m_1 和 m_2 后, 便可以得到 M 的估计值 \hat{M} 。 \hat{M} 是一个列满秩的矩阵, 通过 MOORE-PENROSE 广义逆矩阵的性质, 可以求出混合矩阵 \hat{M} 的广义逆矩阵 \hat{M}^+ , 这就是分离矩阵 W 的估计值 \hat{W} , 即存在 $\hat{W} = \hat{M}^+ = (\hat{M}^H \hat{M})^{-1} \hat{M}^H$, 从而得到源信号的估计值 $\hat{S} = M^+ X^{[8-11]}$ 。

3 Simulink 仿真

S 模式具有固定的时序格式, 信号由信号报头和数据块两部分构成。报头部分有固定的脉冲存在, 总长 8 μs , 在 0, 1.0, 3.5, 4.5 μs 处存在脉冲。其应答信号带宽 1 MHz, 即每码元宽度为 1 μs , 因此可输入报头数据 $s_0 = [1010000101000000]$; 由于 S 模式采用曼彻斯特编码, 根据真实接收到的 ADS-B 信号 8D78063399444512283481000000, 每一位数据采样 10 个点, 即采样率为 20 MHz。数据位数据总长度为 112 μs , 输入数据块数据 $s_1 = [100011010111100000001100011001110 01100101000100 010001010001001000101000001101001000001000000000 0000000000000]$, 每一位数据采样 20 个点, 采样率同样为 20 MHz。将信号报头与信号数据位在时间上连接到一起, 得到 S 模式的信号 y_2 , 给 y_2 加上时钟信息后构成输入信号 original, 输入到模型中^[12]。

图 5 是信号混合的 Simulink 模型, 其中, 信号由 From Workspace 模块输入, Scope 模块用来显示信号波形。

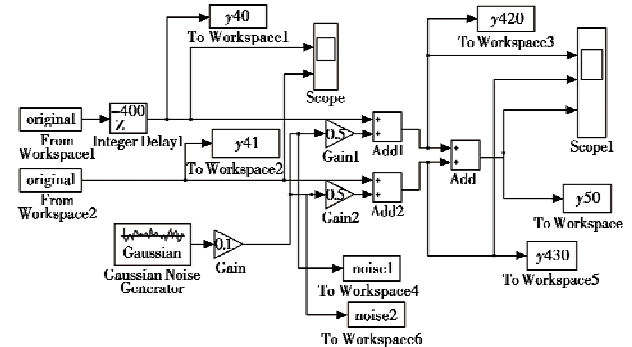


图 5 S 模式信号混合的 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of signal mixing

接下来是对在时间上交叠的信号进行 SVD 分解,估算出信号交叠的时间区间。图 6 是 SVD 分解的 Simulink 模型。受 Constant 模块输入参数长度的影响,可将信号分为前后两部分,再由 Vector Concatenate 模块将数据进行连接。Reshape 模块将输入的信号数据转化成矩阵,进而对矩阵的每一行进行 SVD 分解处理。

从信号特征值在时间上的分布图中可估计出信号交叠的时间,从而将信号矩阵分解成两个单独的小矩阵,进行信号的分离,图 7 为信号分离的 Simulink

模型^[13]。

此方法也同样适用于分离两个在时间上交迭的 A/C 模式信号,分离结果见仿真结果及分析。

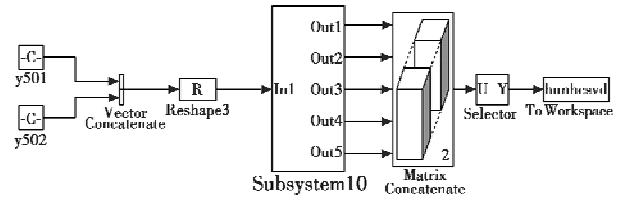


图 6 SVD 分解的 Simulink 模型

Fig. 6 Simulink model of SVD decomposition

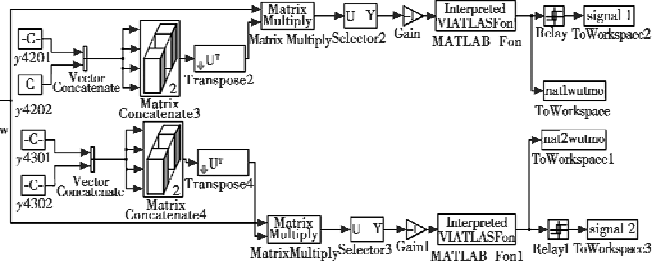
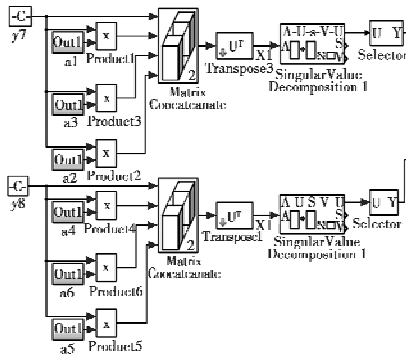


图 7 信号分离的 Simulink 模型

Fig. 7 Simulink model of signal separation

4 仿真结果及分析

Scope1 显示信号 S_1 和信号 S_2 以及它们交叠后的波形,如图 8 所示。

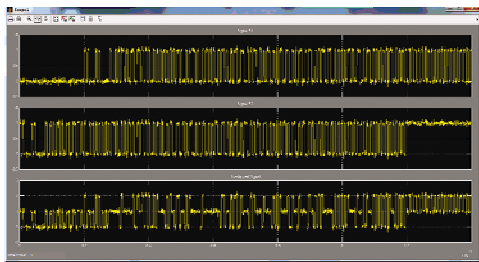


图 8 S_1, S_2 及两个 S 模式信号混叠后波形

Fig. 8 S_1, S_2 and overlapped signal(mode S)

对信号进行 SVD 分解后,得到各信号的特征值在时间上的分布情况,如图 9 所示。从图 9 可以估计出信号交叠的时间为 $20 \sim 120 \mu s$,从而可以判断出在 $0 \sim 20 \mu s$ 以及 $120 \sim 140 \mu s$ 这两个时间段内信号没有交叠,只存在一个信号^[14]。

由于该模型中的信号是基于数据流的,不利于信号的可视化作图,可将信号保存在 Workspace 中,在 Matlab 中作图,得到分离出的两个信号,抽样判决后的两个信号如图 10 所示。

将 PA 算法应用于分离两个在时间上混叠的 A/C 模式信号,仿真结果如图 11 ~ 图 13 所示。

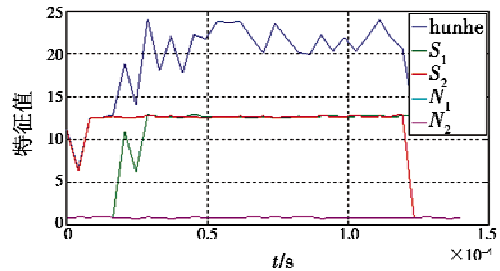


图 9 各信号特征值在时间上的分布(S 模式)

Fig. 9 Distribution of singular values over time (mode S)

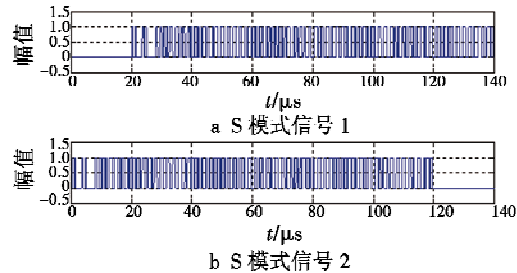


图 10 判决后的 S 模式信号

Fig. 10 S_1 and S_2 after sampling judgment (mode S)

PA 算法的稳定性可以从误码率方面进行验证,考虑不同信噪比对误码率的影响。在两个信号之间的延时为 $20 \mu s$ 的情况下,信号的信噪比在 $0 \sim 20 \text{ dB}$ 之间以 0.5 dB 的步长变化,得到误码率在不同信噪比情况下的结果^[15],仿真结果如图 14 所示。

从仿真结果可以看出,随着信噪比不断增大,误码

率也不断降低。当信噪比达到 16 dB 时, 误码率几乎为 0。说明 PA 算法在信噪比较低的情况下, 信号分离不够彻底。在信噪比大于等于 16 dB 时, 重叠的信号能够被完全分离。

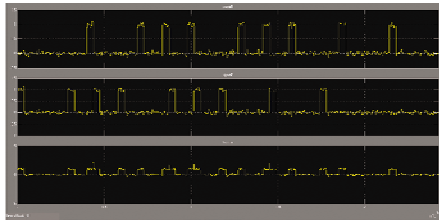


图 11 S_1, S_2 及两个 A/C 模式信号混叠后信号

Fig. 11 S_1, S_2 and overlapped signal (mode A/C)

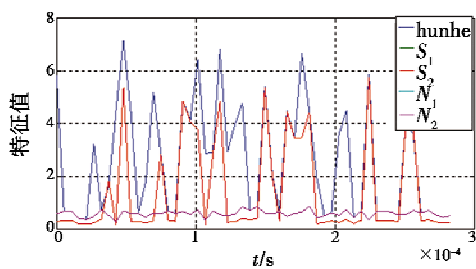


图 12 各信号特征值在时间上的分布 (A/C 模式)

Fig. 12 Distribution of singular values over time (mode A/C)

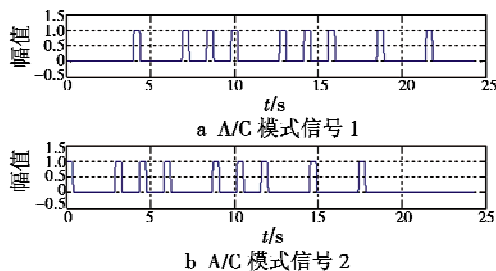


图 13 判决后的 A/C 模式信号

Fig. 13 S_1 and S_2 after sampling judgment (mode A/C)

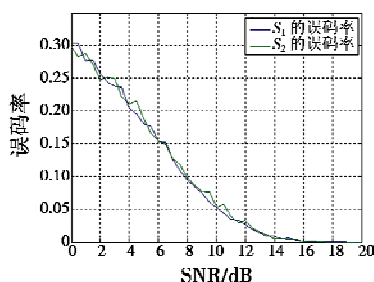


图 14 信噪比对误码率的影响

Fig. 14 Impact on BER caused by SNR

5 结束语

Matlab 仿真通信系统具有广泛的适应性和极高的灵活性。本文根据系统模型框图和数学模型, 利用 Matlab 的 Simulink 功能模块成功地对 1090 MHz 信号分离进行了可视化仿真。在此基础上给出了较详细的

实现方法和仿真结果, 仿真结果与理论结果一致, 充分证明了 PA 算法在分离阵列信号方面的可用性, 同样也证明了 Simulink 在通信系统仿真中的优势。通过调整本系统的模块或参数, 可以得到信号在不同交叠情况下的分离状况, 为相关领域的仿真研究提供了更多的数据资源^[16]。

参考文献

- [1] 张尉. 二次雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (ZHANG W. Principles of secondary radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [2] 邵玉斌. Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (SHAO Y B. Matlab/Simulink communication system modeling and simulation case study [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.)
- [3] 张英. 基于阵列天线模型的雷达信号分离算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009. (ZHANG Y. Separation algorithm based on radar signal array antenna model [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [4] 张洪渊, 贾鹏. 确定盲分离中未知信号源个数的奇异值分解法 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(8): 1155-1158. (ZHANG H Y, JIA P. Determination of the number of source signals in blind source separation by singular value decomposition [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, 35(8): 1155-1158.)
- [5] 弓喜英. 天线阵列信号的盲分离研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007. (GONG X Y. Blind separation of antenna array signal [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.)
- [6] 赵彬, 杨俊安, 王晓斌, 等. 混叠通信信号的盲分离处理 [J]. 电讯技术, 2005, 45(1): 81-84. (ZHAO B, YANG J A, WANG X B. Blind separation processing of overlapped communication signals [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(1): 81-84.)
- [7] 张云展, 王建新. 阵列信号处理技术在雷达中的应用 [J]. 火控雷达技术, 2001, 30(1): 13-21. (ZHANG Y Z, WANG J X. Array signal process technique for radar application [J]. Fire Control Radar Technology, 2001, 30(1): 13-21.)
- [8] 梅铁民. 盲源信号分离时域与频域算法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005. (MEI T M. Research on blind source separation algorithm in both time domain and frequency domain [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.)

(下转第 76 页)

4 结语

光电系统的核心部件是随动控制部件,该部件的接口信号又包括 3 种编码信号,即符合特定格式的编码信号、开关量控制信号和频率脉冲信号,即本文设计了能够模拟扫描机构和物镜的模拟负载,利用数学模型为模拟负载中各机构的设计提供理论依据,通过联合仿真对模拟负载中方位、俯仰机构设计尺寸和动态特性进行验证,同时,通过 LabVIEW 编程语言实现了待测数据的采集和分析,通过以上工作构建了整个检测平台。

参考文献

- [1] 郑国锋,于劲松,刘浩. 基于 PXI 总线的光学雷达自动测试系统研制[J]. 计算机测量与控制,2010,18(5):1095-1096,1120. (ZHENG G F, YU J S, LIU H. Design of automatic test system for optic radar based on PXI bus virtual instrument [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(5):1095-1096, 1120.)
- [2] 郑黎明,黄剑波. 基于 Adams 和 Simulink 的太阳跟踪器联合仿真[J]. 光学精密工程,2014,22(5):1212-1219. (ZHENG L M, HUANG J B. Co-simulation of Solar tracker based on Adams and Simulink [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5):1212-1219.)
- [3] 马如奇,赫双晖,郑伟峰. 基于 MATLAB 与 Adams 的机械臂联合仿真研究[J]. 机械设计与制造,2010(4):93-95. (MA R Q, HAO S H, ZHENG W F. Research on coordinated simulation of robot arm based on MATLAB and Adams [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(4):93-95.)
- [4] 蒿思哲,秦现生,汤军社. 基于 LabVIEW 的高精度转动惯量测控系统设计[J]. 测控技术,2014,33(7):69-72,75. (HAO S Z, QIN X S, TANG J S. Measurement and control system design of high-precision rotational inertia based on LabVIEW [J]. Measurement and Control Technology, 2014, 33(7):69-72, 75.)
- [5] 邹丽娟. 基于 Matlab/Simulink 的测量雷达伺服系统的仿真方法[J]. 现代雷达,2004,26(8):64-67. (ZOU L J. Simulation method of servo of instrumentation radar with Matlab/Simulink [J]. Modern Radar, 2004, 26(8):64-67.)
- (上接第 58 页)
- [9] PIRACCI E G, PETROCHILOS N, GALATI G. Super-imposed mode S signals: single-antenna projection algorithm and processing architecture [C]//IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, IEEE, 2007:166-170.
- [10] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCI E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3):965-982.
- [11] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCI E. Projection techniques for separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment [C]//The Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, IEEE, 2006:344-348.
- [12] RTCA. DO-260B Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B) [S]. Washington: RTCA, 2009.
- [13] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCI E. Application of array processing to receiving stations of multilateration systems based on SSR signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 45(2):965-982.
- [14] ZHOU M, van der Veen A J. Improved blind separation algorithm for overlapping secondary surveillance radar replies [C]//The 4th IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), IEEE, 2011:181-184.
- [15] PETROCHILOS N, VAN DER VEEN A J. Algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies [C]//Proceedings. (ICASSP'04). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE, 2004:ii-49-52.
- [16] PETROCHILOS N, GALATI G, MENÉ L, et al. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment by a novel projection algorithm [C]//Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, IEEE, 2005:125-130.