

## 基于矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制

陈希信 黄银河

(南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘要:** 雷电等瞬态干扰严重影响了高频雷达的工作性能, 必须加以抑制。该文提出了基于矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制方法。该方法将高频雷达回波信号分段构成矩阵并进行奇异值分解, 首先根据矩阵有效秩的大小判断雷达回波中是否存在瞬态干扰, 然后利用奇异值分解的正交性实现雷达回波的正交分解, 使瞬态干扰分离出来, 以利于检测, 最后通过建立线性预测的全极点自回归模型对瞬态干扰位置处的回波信号予以恢复。实测数据处理结果表明该方法是有效的。

**关键词:** 高频雷达, 瞬态干扰, 奇异值分解

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1879-04

## A SVD-Based Approach of Suppressing Transient Interference in High-Frequency Radar

Chen Xi-xin Huang Yin-he

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract** The transient interferences, such as lightning impulse, meteor trail echoes and so on, have to be suppressed since they severely degrade the detection capability of High Frequency (HF) radar. An approach of suppressing the transient interference based on Singular Value Decomposition (SVD) is presented in this paper. In this approach, the HF radar echo is segmented and all segments constitute the columns of some matrix with its SVD computed. Firstly, it can be preliminarily judged whether the transient interference exists in the HF radar echo from the valid rank of the built matrix. Secondly, the orthogonal decomposition of the HF radar echo is obtained using the orthogonality of SVD, thus the transient interference is separated from the radar echo and so easily detected. Finally, the radar echo segment polluted by the transient interference is estimated by building the all-pole autoregressive linear prediction model. The effectiveness of this approach is demonstrated by examples of measured HF radar echo.

**Key words** HF radar, Transient interference, Singular Value Decomposition (SVD)

### 1 引言

高频雷达能够实现超视距目标探测, 因此具有重要的军事意义。但是高频雷达的工作频段上电磁环境非常复杂, 并且经常突发一些很强的瞬态干扰, 如雷电、流星余迹回波等, 这些干扰持续时间短, 强度大, 严重影响了雷达对目标的检测性能, 必须加以抑制<sup>[1-5]</sup>。

目前, 高频雷达瞬态干扰抑制仍然是高频雷达信号处理的难点之一, 是亟待解决的重要问题。抑制高频雷达瞬态干扰应首先检测雷达回波中是否存在瞬态干扰, 然后消除它的影响, 同时使目标信号损失尽可能小, 以利于对目标的检测和跟踪。

矩阵奇异值分解作为数值线性代数的一种有效工具, 近

年来在许多信号处理问题中获得了成功的应用。矩阵奇异值分解本质上是矩阵的一种正交分解, 正是根据这一性质该文提出了基于奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制方法。该方法将高频雷达回波信号分段构成矩阵并进行奇异值分解。首先根据矩阵有效秩的大小判断雷达回波中是否存在瞬态干扰, 然后利用奇异值分解的正交性实现雷达回波的正交分解, 使瞬态干扰分离出来, 从而确定它的确切时间位置; 最后通过建立线性预测的全极点自回归(AR)模型对瞬态干扰位置处的回波信号予以恢复, 其中AR模型的参数通过求解修正协方差方法的正则方程来得到<sup>[6]</sup>。

### 2 矩阵奇异值分解

设  $M$  是一个  $m \times n$  的复数矩阵, 其奇异值分解是指存在

一个  $m \times m$  酉矩阵  $U$  和一个  $n \times n$  酉矩阵  $V$ , 使得  $M$  可分解为

$$M = U \Sigma V^H = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^H \quad (1)$$

式中  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m], V = [v_1, v_2, \dots, v_n], \Sigma = [\text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r), :0]$   $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$  为  $M$  的  $r$  个奇异值,  $r = \min(m, n)$ ,  $u_i v_i^H$  为  $M$  的第  $i$  个特征项, 上标 H 表示共轭转置。

由式(1)可以看出: 矩阵奇异值分解的性质有 2: (1)由于  $U$  和  $V$  都是酉矩阵, 因此矩阵  $M$  的各特征项是相互正交的, 即  $u_i v_i^H v_j u_j^H = 0, v_i u_i^H u_j v_j^H = 0, i \neq j$ , 这表明矩阵奇异值分解实际上是矩阵的一种正交分解; (2)各特征项对  $M$  的贡献与对应奇异值的大小成正比, 这表明矩阵的主要分量与大奇异值相对应。

定义  $M$  的归一化奇异值为

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i / \sigma_1 \quad (2)$$

显然  $\bar{\sigma}_1 = 1$ 。选择一个正小数为阈值(例如 0.1), 将  $\bar{\sigma}_i$  大于此阈值的  $\sigma_i$  称为主奇异值, 其它的称为次奇异值。主奇异值的个数称为矩阵的有效秩。

### 3 高频雷达瞬态干扰抑制原理

抑制高频雷达瞬态干扰的基本思路是: 首先检测雷达回波中是否存在瞬态干扰, 然后确定它的具体时间位置, 最后剔除瞬态干扰并用合适的的数据填补该位置<sup>[3]</sup>。本节介绍解决这些问题的方法。

#### 3.1 瞬态干扰检测

假设脉冲后某距离门上的高频雷达回波为  $s_1, s_2, \dots, s_K$ , 其中  $K$  为积累周期总数, 将其平均分成  $n$  段, 每段有  $m$  个点, 令  $K = m \times n$ , 按如下方式构造矩阵  $M$

$$M = \begin{bmatrix} s_1 & s_{m+1} & \dots & s_{m(n-1)+1} \\ s_2 & s_{m+2} & \dots & s_{m(n-1)+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_m & s_{2m} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

现在对数据矩阵  $M$  按式(1)进行奇异值分解, 则  $M$  的每一列都被分解成  $U$  中各列的线性组合, 组合系数为  $V$  的相应列与奇异值的乘积。由于  $U$  的各列是相互正交的, 这样矩阵  $M$  的各列被正交分解, 即各段信号被正交分解。把  $M$  的各列中的正交分量分离开来, 等效于用各奇异值加权对应的特征项得到  $M$  的各正交分量, 恢复成一维信号(分段的逆过程), 那么这些一维信号也是相互正交的。这实际上是通过矩阵  $M$  的奇异值分解实现了高频雷达回波信号的正交分解。

高频雷达回波的主体成分是海(地)杂波, 另外还可能包括镶嵌在其中的偶发瞬态干扰(强度与杂波相当), 以及相对较弱的目标信号、噪声和其它干扰成分。由于海(地)杂波存在于整个时间段上, 而瞬态干扰只存在于部分时间段上, 并

且是区别于杂波等分量的不相关成分, 因此可以利用上述奇异值分解方法将其分离出来。而且, 由于瞬态干扰是雷达回波中的强分量, 在矩阵  $M$  中它也是主要分量, 因此它必定与某个主奇异值相对应, 也就是说用该主奇异值加权对应特征项并恢复成一维信号就能分离出瞬态干扰。

由矩阵奇异值分解的性质(2)可知, 当高频雷达回波中出现强瞬态干扰时, 矩阵  $M$  的主要分量将增多, 从而主奇异值增多, 有效秩将增大。因此可以根据矩阵有效秩的这一特点来判断高频雷达回波中是否存在瞬态干扰。

#### 3.2 瞬态干扰位置处的数据恢复

利用上一节的方法检测出瞬态干扰是否存在并确定其时间位置后, 我们将其剔除, 那么该位置处的目标信号也一同被去除了, 因此需要通过适当的途径来恢复这部分目标信号, 这里我们用其它位置的回波信号来线性预测这部分目标信号。但是, 与海(地)杂波相比, 目标信号属于微弱信号, 因此直接在原始雷达回波中线性预测这部分目标信号是不现实的。在本文中, 我们只在包含瞬态干扰的雷达回波分量上进行线性预测处理, 这样当目标信号也在该雷达回波分量上时, 就能避免杂波的影响从而更有效地预测目标信号。

上述线性预测问题可以等效为全极点 AR 信号建模, 这里我们利用修正协方差方法来估计 AR 模型的参数, 该方法能使前向和后向预测误差的平方和最小。线性预测问题可以表达为

$$\hat{s}_n = -\sum_{k=1}^p a_k s_{n-k} \quad (4)$$

式中  $\hat{s}_n$  为  $n$  时刻信号  $s_n$  的估计,  $s_{n-p}, s_{n-p+1}, \dots, s_{n-1}$  为前  $p$  个时刻的已知信号值,  $a_k (k=1, 2, \dots, p)$  为线性预测器系数,  $p$  为预测器阶数。

预测误差为

$$e_n = s_n - \hat{s}_n = s_n + \sum_{k=1}^p a_k s_{n-k} \quad (5)$$

上式实际上是全极点 AR 信号模型。我们用修正协方差方法来估计 AR 模型各参数  $a_k$ , 也就是求解如下线性方程组

$$\begin{bmatrix} r_s(1,1) & r_s(2,1) & \dots & r_s(p,1) \\ r_s(1,2) & r_s(2,2) & \dots & r_s(p,2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_s(1,p) & r_s(2,p) & \dots & r_s(p,p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s(0,1) \\ r_s(0,2) \\ \vdots \\ r_s(0,p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:

$$r_s(k,l) = \sum_{n=p+1}^K (s_{n-l} s_{n-k}^* + s_{n-p+l} s_{n-p+k}^*) \quad (7)$$

求解式(6)得到各参数  $a_k (k=1, 2, \dots, p)$  后, 就可以通过式(4)进行目标信号的线性预测了。

### 4 实测高频雷达回波中的瞬态干扰抑制

本节给出利用数据矩阵奇异值分解方法抑制高频雷达回波中瞬态干扰的实例。现有包含一段瞬态干扰的某实测高频雷达回波, 我们在其中加入一个 -5Hz 的复正弦弱信号表示目标信号, 组合信号的实部如图 1(a)所示, 其中位于 3.2s 到 4.2s 之间的快速变化部分为流星余迹回波干扰。图 1(b)是该组合信号的多普勒谱, 其中在 -6Hz 到 -3Hz 之间的峰值部分为流星干扰的多普勒谱。从两图中可以看到: (1)该雷达回波的主体成分是海(地)杂波, 瞬态干扰镶嵌在某一小段上, 强度与杂波相当; (2)与杂波和瞬态干扰相比, 目标信号要弱得多, 在多普勒谱上它被瞬态干扰所掩盖。

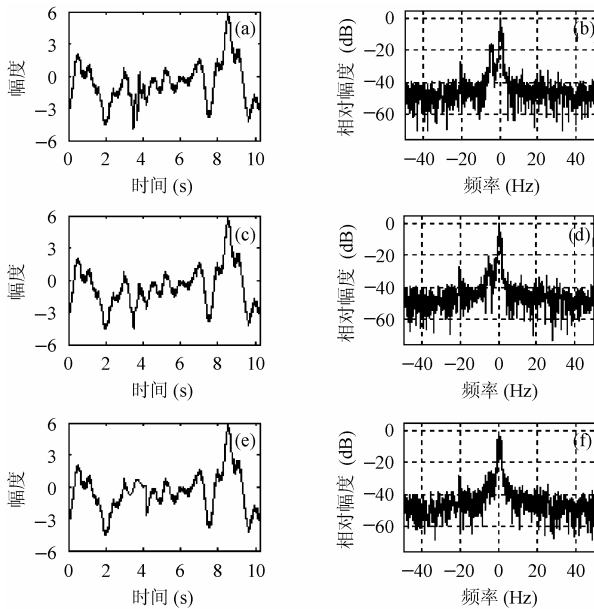


图 1 高频雷达回波去除瞬态干扰前后的时域波形和多普勒谱

该高频雷达回波的长度为 1024, 平均分成 32 段, 用起始第 1 段构成矩阵  $M$  的第 1 列, 第 2 段构成  $M$  的第 2 列, 依次类推, 这样就得到了  $32 \times 32$  的矩阵  $M$ 。对矩阵  $M$  进行奇异值分解, 得到归一化奇异值为  $\{1, 0.2969, 0.1420, 0.0723, 0.0393, 0.0351, 0.0304, 0.0240, 0.0219, 0.0214, 0.0198, 0.0187, 0.0162, 0.0157, 0.0146, 0.0134, 0.0127, 0.0116, 0.0110, 0.0099, 0.0093, 0.0085, 0.0076, 0.0068, 0.0054, 0.0045, 0.0038, 0.0029, 0.0020, 0.0015, 0.0010, 0.0002\}$ 。现在设置归一化奇异值的阈值为 0.1, 则矩阵  $M$  有 3 个主奇异值, 有效秩为 3。如前文所述, 瞬态干扰与某个主奇异值相对应, 因此我们分别用  $M$  的 3 个主奇异值加权对应的特征项, 用其它所有次奇异值加权对应的特征项, 从而得到矩阵  $M$  的 4 个正交分量, 分别将它们恢复成一维信号, 则这些一维信号也是相互正交的,

如图 2 所示。注意, 尽管这里设置归一化奇异值的阈值为 0.1 是适当的, 但是在实际应用中如何确定阈值大小是该文方法需要进一步解决的问题。

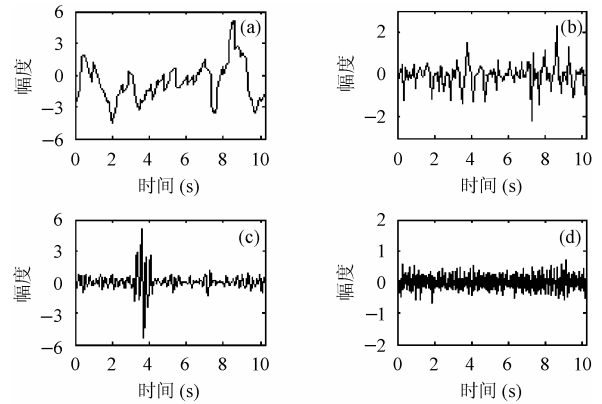


图 2 高频雷达回波的正交分解分量

图 2 中所示各图是高频雷达回波的 4 个正交分量的实部, 不难判断图 2(c)就是包含瞬态干扰的回波分量, 图 2(a), 2(b)主要是海地杂波, 图 2(d)是其它干扰成分。在图 1(a)中该瞬态干扰混杂在杂波主分量中, 难以检测出来, 但在图 2(c)中它被完全分离了出来, 通过设置门限非常容易检测。

在图 2(c)中确定出瞬态干扰的具体位置后, 将这段数据置为零, 然后利用前文所述线性预测方法对这段数据进行估计。估计后的该信号分量与其它 3 个正交信号分量相叠加, 则所得信号中不再有瞬态干扰了, 如图 1(c)所示。图 1(d)是该信号的多普勒谱, 可见在 -6Hz 到 -3Hz 之间的谱峰消失了, 并且在 -5Hz 处被瞬态干扰掩盖的目标信号又清晰可辨了。作为比较, 我们还给出了直接将原始雷达回波中的瞬态干扰置为零并进行线性预测的结果, 如图 1(e)所示, 图 1(f)是该信号的多普勒谱, 可见瞬态干扰的影响被消除了, 同时目标信号的损失也较大, 与图 1(d)相比损失达 5dB 以上。

作为比较, 下面给出另一个不含瞬态干扰的实测高频雷达回波信号的处理结果。矩阵  $M$  按前述方法构造并进行奇异值分解, 得到归一化奇异值为  $\{1, 0.2306, 0.0628, 0.0469, 0.0319, 0.0268, 0.0250, 0.0240, 0.0215, 0.0201, 0.0186, 0.0175, 0.0166, 0.0150, 0.0140, 0.0130, 0.0124, 0.0117, 0.0108, 0.0101, 0.0093, 0.0087, 0.0080, 0.0067, 0.0057, 0.0054, 0.0042, 0.0036, 0.0029, 0.0022, 0.0011, 0.0005\}$ 。与前面一样, 这里也把归一化奇异值的阈值设置为 0.1, 则矩阵  $M$  有 2 个主奇异值, 有效秩为 2。现在分别用  $M$  的 2 个主奇异值加权对应的特征项, 用其它所有次奇异值加权对应的特征项, 从而得到矩阵  $M$  的 3 个正交分量, 分别将它们恢复成一维信号, 如图 3 所示。

图 3(a)是实测高频雷达回波的实部,图 3(b), 3(c), 3(d)分别是该回波的正交分量的实部。该回波中不存在瞬态干扰, 其各正交分量中也均未出现瞬态干扰。并且注意到此例中数据矩阵的有效秩为 2, 而前面例子中数据矩阵的有效秩为 3, 这表明当雷达回波中存在强瞬态干扰时, 由此得到的数据矩阵的有效秩将增大, 大量实测数据处理结果也验证了这一结论。

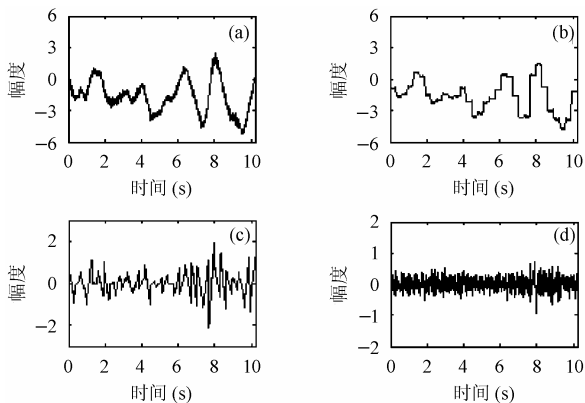


图 3 高频雷达回波及其正交分解分量

## 5 结束语

高频雷达回波中的瞬态干扰抑制问题是高频雷达信号处理的难点之一, 是目前亟待解决的重要问题。该文提出了基于数据矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制方法, 为这一问题的解决提供了新的途径。文中方法通过考察矩阵有效秩的大小判断雷达回波中是否存在瞬态干扰, 通过奇异值

分解的正交性实现高频雷达回波的正交分解, 使瞬态干扰分离出来, 然后在雷达回波的某分量上进行线性预测使得目标信号的损失大大减小。理论分析和实测高频雷达回波处理结果表明, 该文提出的高频雷达瞬态干扰抑制方法结构简洁, 效果良好。

## 参考文献

- [1] Godfrey S E. The removal of transients from Otsigna lsvia wavelets. IEEE Proceedings of International Radar Reference, Alexandria, Virginia, May 1995: 1080 – 1084.
- [2] Turley M D E. Impulsive noise rejection in HF radar using a linear prediction technique. IEEE Proceedings of International Radar Reference, Huntsville, Alabama, May 2003: 358 – 362.
- [3] 权太范, 李健巍, 于长军等. 高频雷达抑制冲击干扰的研究与实验. 电子学报, 1999, 27(12): 23 – 25.
- [4] 邢孟道, 保铮, 强勇. 天波超视距雷达瞬态干扰抑制. 电子学报, 2002, 30(6): 823 – 826.
- [5] 郁发新, 沈一鹰, 刘永坦. 适用于抗高频突发性冲击干扰的有效算法. 系统工程与电子技术, 2000, 22(6): 50 – 53.
- [6] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现. 北京: 清华大学出版社, 1997: 365 – 367.

陈希信: 男, 1972 年生, 工程师, 博士, 研究方向为雷达信号处理.

黄银河: 男, 1966 年生, 研究员, 研究方向为雷达信号处理.