

文章编号: 2095-4980(2020)05-0793-05

基于总体最小二乘的外辐射源雷达相消算法

杨志峰¹, 郑恒², 王海环²

(1.空装项目管理中心, 北京 100000; 2.华东电子工程研究所, 安徽 合肥 230000)

摘要: 提出一种基于总体最小二乘(TLS)的外辐射源雷达直达波相消算法, 该算法首先利用 TLS 获取直达波的数目和时延, 再基于既得的直达波信息构建直达波子空间, 最后将回波向该空间投影实现直达波相消。与传统扩展相消算法相比, 该算法所构建的直达波子空间阶数低, 精确度高, 在相关处理时间较短或直达波幅度时变的情况下, 仍具有良好的直达波抑制性能。仿真结果证实了算法的有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 直达波相消算法; 扩展相消算法; 总体最小二乘

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019145

A direct signal cancellation method based on TLS in passive radar

YANG Zhifeng¹, ZHENG Heng², WANG Haihuan²

(1.Air Force Equipment Project Management Center, Beijing 100000, China;

2.East China Institute of Electronic Engineering, Heifei Anhui 230000, China)

Abstract: A direct signals cancellation algorithm for passive radar based on Total Least Square(TLS) is proposed. First, the number and delay of direct signals are obtained by TLS, then the subspace of direct signals is constructed based on the available information of direct signals. Finally, the echo is projected into the sub-space to realize direct signals cancellation. Compared with the traditional extended cancellation algorithm, the direct signal sub-space constructed by this algorithm has low order and high precision, and it still has good clutter suppression performance in the case of short processing time or time-varying amplitude of direct signals. The simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: passive bistatic radar; direct signal cancellation method; extended cancellation method; Total Least Square

外辐射源雷达本身没有发射机, 而是利用空间内已经存在的电磁波信号, 如调频广播(Frequency Modulation, FM)信号、全球移动通信网络(Global System for Mobile communication, GSM)信号等, 实现目标探测定位跟踪的一种新体制雷达^[1-5]。该类雷达具有反隐身、生存能力强、构造简单、成本低等特点, 但是由于照射源的非合作性, 使得该体制雷达信号处理有别于传统有源雷达。外辐射源雷达通常具有 2 个接收通道: 参考通道和回波通道。其中, 参考通道用来接收来自辐射源的直达波信号, 回波通道用来接收目标反射回来的辐射源发射信号。通常情况下, 回波通道中除包含目标回波外, 还包含少量直达波及经地物反射回来的多径信号, 这些信号的幅度远远强于目标回波, 通常比目标回波高出 60~100 dB^[6-8], 因此外辐射源雷达在对参考信号和回波信号进行距离-多普勒相关之前, 必须先对回波信号进行直达波相消。

鉴于直达波抑制对外辐射源雷达的重要性, 国内外许多学者对其进行了深入研究。现阶段常用的直达波相消算法有 CLEAN 算法、最小均方(Least Mean Square, LMS)算法, 递归最小二乘(Recursive Least Square, RLS)算法, 扩展相消算法(Extended Cancellation Algorithm, ECA)等^[9-14]。CLEAN 通过寻找每次循环中的幅度最大的直达波并将其从回波中剔除以实现直达波消除; LMS 和 RLS 是基于最优化理论, 构建合理代价函数并利用递推求解的一类自适应滤波器, 属于闭环反馈滤波器; ECA 利用参考信号及其延时构建直达波子空间, 并利用最小二

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-07-06

作者简介: 杨志峰(1983-), 男, 博士, 主要研究方向为雷达系统工程。email:1195216929@qq.com

乘(Least Square, LS)算法估计直达波幅度, 回波信号与直达波子空间和其直达波幅度的加权和做差即可得到相消后剩余信号。LMS 算法存在收敛速度和稳态性能之间的矛盾, RLS 算法对数据利用更为充分, 因而其收敛速度比 LMS 算法更快, 但 CLEAN 算法和 RLS 算法计算量巨大, 这限制了其在现代雷达中的应用。ECA 算法不同于 LMS 和 RLS, 它不需要迭代, 属于开环滤波器, 其计算可并行实现。综合考虑相消性能和算法计算量, ECA 相消算法在外辐射源雷达中被广泛应用。但 ECA 的优良性能是以足够的数据长度为前提的, 这是因为 ECA 需构造阶数足够大的直达波空间以尽可能地包含探测范围内所有的直达波, 这要求相关处理时间足够长且在一个相关处理时间内直达波幅度保持不变, 才能使得回波向直达波空间的投影权值接近最优权, 因此, 当相关处理时间较短或者在一个相关处理时间内直达波幅度时变时, ECA 性能下降明显。

针对上述问题, 本文提出一种基于总体最小二乘(TLS)的外辐射源雷达直达波相消算法, 该算法考虑到构建探测范围内完备直达波子空间对直达波幅度稳定性和相关处理时长的要求, 首先利用 TLS 算法估计直达波的数目和时延, 再根据得到的直达波信息构建直达波子空间, 最后通过将目标回波向该空间投影以消除回波中的直达波。与 ECA 算法相比, 本文所提算法构造的直达波子空间阶数低且准确度更高, 只需要较短的信号采样长度便可得到准确的直达波幅度估计, 因而该算法在相关处理时间较短时, 仍具有良好的直达波抑制性能。

1 信号模型

外辐射源雷达的参考信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = s(t) + n_r(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为来自辐射源的直达波信号; $n_r(t)$ 为参考通道内的噪声。

外辐射源雷达的回波信号 $e(t)$ 可表示为:

$$e(t) = A_0 s(t) + \sum_{i=1}^{N_c} A_i s(t - \tau_i) + A_e s(t - \tau_e) e^{j2\pi f_d t} + n_e(t) \quad (2)$$

式中: A_0 为直达波的幅度; N_c 为多径的数量; A_i 和 τ_i 分别为第 i 条多径的幅度和时延; A_e 和 τ_e 分别为目标回波的幅度和时延; f_d 为目标的多普勒频率; $n_e(t)$ 为目标回波通道内的噪声。

通常情况下, 由直达波和多径构成的直达波其幅度远远强于目标回波, 因此在进行距离-多普勒相关之前, 先要进行直达波相消。ECA 是常用的一种直达波相消算法, 其基本思想是利用直达波及其延时构造直达波子空间, 通过计算回波向该空间的投影权值获取不同时延直达波的幅度, 回波信号与该组权值和直达波空间的加权和做差即可消除直达波^[5]。直达波子空间构造如式(3)所示:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r(1) & 0 & \cdots & 0 \\ r(2) & r(1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(N-1) & r(N-2) & \cdots & r(N-K-1) \\ r(N) & r(N-1) & \cdots & r(N-K) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N 为信号长度; K 为多径最大时延。一般 K 的取值要足够大, 以尽可能地包含探测范围内的所有直达波。ECA 求解不同时延的直达波幅度, 可建模为求解如下最优化函数:

$$\alpha = \arg \min_{\alpha} \|e - \mathbf{R}\alpha\|_2^2 \quad (4)$$

式中 e 为回波通道采样信号, $e = [e(0), e(1), \dots, e(N-1)]^T$ 。利用 LS 算法可得

$$\alpha = (\mathbf{R}^H \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^H e \quad (5)$$

则消除直达波后的剩余信号可表示为:

$$\mathbf{y} = e - \mathbf{R}\alpha = [\mathbf{I} - \mathbf{R}(\mathbf{R}^H \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^H] e \quad (6)$$

回波通道中的目标回波具有多普勒频移, 可看作与直达波子空间正交, 因此 ECA 在消除直达波的同时, 可确保目标回波不被削弱。如上所述, ECA 算法的关键是准确估计直达波幅度, 当信号采样长度不够时, ECA 无法准确估计不同时延直达波强度, 性能下降明显。

2 TLS 直达波相消算法

针对 ECA 算法性能依赖于信号采样长度的问题, 本文提出了基于 TLS 的直达波相消算法, 该算法的基本思

想与 ECA 类似，区别之处在于所提算法采用 TLS 算法得到直达波的时延估计，基于直达波时延构建精确直达波子空间，该算法对直达波相消问题建模如下：

$$(\mathbf{R} + \Delta\mathbf{R})\vec{\alpha} = \mathbf{e} + \Delta\mathbf{e} \quad (7)$$

式中： $\Delta\mathbf{R}$ 为直达波子空间的扰动； $\Delta\mathbf{e}$ 为观测量的扰动； $\vec{\alpha}$ 为直达波幅度。式(7)可变形为：

$$\left(\begin{bmatrix} -\mathbf{e} & \cdots & \mathbf{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta\mathbf{e} & \cdots & \Delta\mathbf{R} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \vec{\alpha} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

进一步简化可得

$$(\mathbf{B} + \mathbf{D})\mathbf{z} = 0 \quad (9)$$

式中：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e} & \vdots & \mathbf{R} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\Delta\mathbf{e} & \vdots & \Delta\mathbf{R} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \vec{\alpha} \end{bmatrix} \quad (10)$$

则利用 TLS 求解直达波幅度 $\vec{\alpha}$ 的问题可转化为求解如下最优化问题：

$$\begin{cases} \vec{\alpha} = \min_{\mathbf{D}, \vec{\alpha}} \|\mathbf{D}\|_F^2 \\ \text{s.t. } \mathbf{e} + \Delta\mathbf{e} \in \text{Range}(\mathbf{R} + \Delta\mathbf{R}) \end{cases} \quad (11)$$

式中的约束条件含义为： $\mathbf{e} + \Delta\mathbf{e}$ 在 $\mathbf{R} + \Delta\mathbf{R}$ 张成的子空间内。

由式(7)可以看出，TLS 相消算法的基本思想是通过在直达波子空间和观测量分别加扰动，来校正两者之间的内在偏差。TLS 算法对直达波子空间和观测量的波动敏感，因此即使在信号长度较短时也获取准确的直达波时延。基于直达波的时延和信息，便可构建规模小但更精确的直达波子空间。直达波相消情形下，式(11)一般为超定方程，解不唯一，本文中采用文献[15]中给出的一种解，如式(12)所示：

$$\vec{\alpha} = (\mathbf{R}^H \mathbf{R} - \varepsilon \mathbf{I})^{-1} \mathbf{R}^H \mathbf{e} \quad (12)$$

式中 ε 为一标量，其取值与矩阵 $[-\mathbf{e}, \mathbf{R}]$ 的最小特征值有关。

值得注意的是， $\vec{\alpha}$ 不能直接代入式(6)来计算回波剩余，这是由 TLS 算法的特性决定的，TLS 算法所得到的稀疏解只能保证其位置的正确性，但稀疏解的数值大小与真实值有偏差，即 $\vec{\alpha}$ 中直达波的直达波时延信息是准确的，但直达波幅度与真实值有偏差。本文根据 $\vec{\alpha}$ 中的直达波时延重新构建更为精准的时延矩阵 \mathbf{R}' ，将 \mathbf{R}' 代入式(5)便可得到准确的直达波幅度，将得到的结果 α (包含时延及其对应的幅度信息) 带入公式(6)进而得到回波剩余信号。由于 \mathbf{R}' 比 \mathbf{R} 更紧凑精确，因此 TLS 直达波相消算法在信号采样长度较短时仍能保持良好性能。

3 仿真分析

本文通过对 ECA 算法和 TLS 算法进行对比仿真分析，验证 TLS 直达波相消算法的有效性。仿真中设参考通道信噪比为 40 dB，回波中除目标回波外，还包含直达波和 4 条多径，其中直达波的信噪比为 40 dB，4 条多径分别位于时延单元 27, 56, 116 和 177 处，信噪比分别为 20 dB, 13 dB, 10 dB 和 7 dB，如表 1 所示。设目标回波的信噪比为 -20 dB，位于第 70 个距离单元处，多普勒频率为 200 Hz。

表 1 多径参数表

	number of multipath			
	1	2	3	4
time delay of multipath	27	56	116	177
R_{SN} of multipath/dB	20	13	10	7

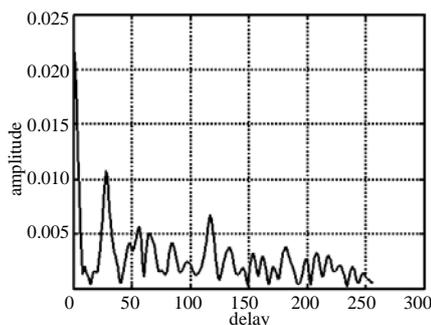


Fig.1 Direct signals delay estimation by ECA
图 1 ECA 直达波时延估计

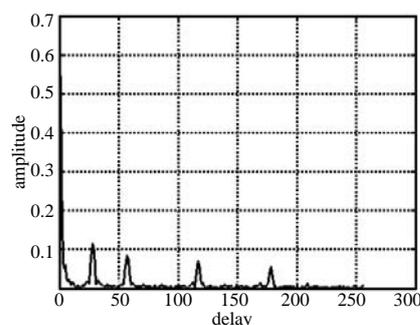


Fig.2 Direct signals delay estimation by TLS
图 2 TLS 直达波时延估计

本仿真中系统采样率为 200 kHz，假设相关处理时间为 2.5 ms，即可利用的数据长度为 500，ECA 对直达波

的估计结果如图 1 所示,可以看出,除去直达波外,4 个多径中 ECA 仅能检测出其中一条多径的时延,这是由于数据长度不足,导致 ECA 性能快速下降。利用基于 TLS 的直达波相消算法对直达波时延的估计结果如图 2 所示,可以看出回波中的直达波和 4 条多径信号均被准确检测出来。对比图 1 和图 2 可以看出,ECA 对信号长度敏感,相比之下 TLS 直达波相消算法的鲁棒性更好。

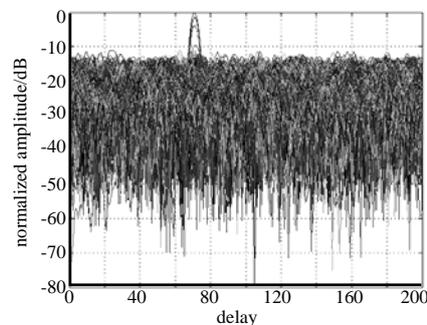


Fig.3 Correlation result after cancellation by ECA
图 3 ECA 相消后相关处理结果

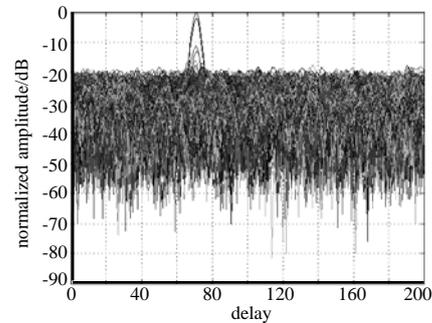


Fig.4 Correlation result after cancellation by TLS
图 4 TLS 相消后相消处理结果

将相关处理时间增加至 0.1 s, 相关处理时间内目标幅度保持不变, 每隔 2.5 ms 直达波幅度改变一次, 分别用 ECA 和 TLS 直达波相消算法进行直达波抑制, 然后进行距离—多普勒二维相关的处理结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出, 经过 ECA 算法抑制直达波和相关处理后, 目标被准确检测且目标幅度高出平台大约 12 dB。图 4 中, 经 TLS 直达波相消算法处理后的剩余信号, 经过相关处理后, 其幅度高出平台大约 20 dB。由此可以看出, 在直达波幅度时变的情形下, 本文所提 TLS 算法的直达波抑制性能明显优于 ECA 算法。

4 结论

针对 ECA 算法在信号长度不够时算法性能下降明显的问题, 本文提出了一种基于总体最小二乘(TLS)的直达波相消算法。该算法利用 TLS 估计直达波数目和时延, 基于直达波时延构建紧凑直达波子空间, 再将回波向该空间投影实现直达波抑制。仿真结果表明, 本文算法在信号长度不足时, 其直达波抑制性能远优于 ECA 算法。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS H D,BAKER C J. Passive coherent location radar systems. Part 1:performance prediction[J]. IEEE Proceedings-Radar,Sonar and Navigation, 2005,152(3):153-159.
- [2] WANG Y,BAO Q,WANG D,et al. An experimental study of passive bistatic radar using uncooperative radar as a transmitter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015,12(9):1-5. DOI:10.1109/LGRS.2015.2432574.
- [3] OLSEN K E,BAKER C J. FM-based passive bistatic radar as a function of available bandwidth[C]// IEEE Radar Conference. Rome,Italy:IEEE, 2008. DOI:10.1109/RADAR.2008.4721012.
- [4] SUN H,LU Y. Aircraft target measurements using a GSM-based passive radar[C]// IEEE Radar Conference. [S.l.]:IEEE, 2008.
- [5] PASTINA D,COLONE F,MARTELLI T,et al. Parasitic exploitation of Wi-Fi signals for indoor radar surveillance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015,64(4):1401-1415. DOI:10.1109/TVT.2015.2392936.
- [6] 陈刚,王俊,王珏,等. 外辐射源雷达参考信号提纯方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018,40(1):45-49. (CHEN Gang, WANG Jun,WANG Jue,et al. Reference signal purifying method in passive bistatic radar[J]. System Engineering and Electronics, 2018,40(1):45-49.) DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2018.01.07.
- [7] 王珏,高博,李英军. 基于 L 波段导航信号无源雷达探测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):216-220. (WANG Jue,GAO Bo,LI Yingjun. Target detection based on L-band navigation signal for passive radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):216-220.)
- [8] CRISTALLINI D I,PISCIOTTANO H Kuschel. Multi-band passive radar imaging using satellite illumination[C]// International Conference on Radar(RADAR). [S.l.]:IEEE, 2018.
- [9] FU Y,WAN X,ZHANG X,et al. A parallel processing algorithm for multipath clutter cancellation in passive radar[C]// International Symposium on Antennas. [S.l.]:IEEE, 2017. DOI:10.1109/ISAPE.2016.7834000.
- [10] KULPA K. The CLEAN type algorithms for radar signal processing[C]// Microwaves,Radar and Remote Sensing Symposium. [S.l.]:IEEE, 2008:152-157.