

文章编号: 1001-893X(2012)10-1586-05

基于时频子空间的多分量宽带调频信号 DOA 估计*

王雪飞, 尚朝轩, 王昌盛

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要:为在复杂电磁环境下实现对多分量宽带线性调频信号的到达角(DOA)估计,研究了基于时频子空间的到达角估计算法,对阵列接收信号通过二维时频掩膜滤波逐一提取各信源的时频自项,建立了空时频矩阵,运用子空间技术得到各信源的到达角估计,并与宽带聚汇算法比较,进行了仿真实验。仿真结果表明,由于充分利用了多分量线性调频信号的时频信息,在低信噪比条件下,宽带时频子空间方法比宽带聚汇算法具有更高的 DOA 估计的分辨率和估计精度。

关键词:雷达电子对抗;阵列信号处理;时频分布;空时频矩阵;宽带聚汇算法

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.006

Direction of Arrival Estimation for Multi-LFM Wideband Signal

WANG Xue-fei, SHANG Chao-xuan, WANG Chang-sheng

(Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In studies on direction of arrival(DOA) estimation of multi-LFM(Linear Frequency Modulation)wide-band sources in intensive electromagnetic environment, the method of narrowband source DOA estimation based on time-frequency subspace analysis is applied in wideband array model, which extracts the time-frequency characteristic of array received signals through the two-dimensional time-frequency mask filter, and then establishes spatial time-frequency distribution(STFD) matrix to use the subspace technology to get DOA estimation of sources. The proposed algorithm is compared with the wideband focusing algorithm. Computer simulation results prove that wideband time-frequency subspace method performs a better performance than wideband focusing algorithm.

Key words: radar ECM; array signal processing; time-frequency distribution; spatial time-frequency distribution; wideband focusing algorithm

1 引言

在雷达电子对抗中,信号密集,空间信号占据很宽的频段,利用阵列天线实现宽带信号的高分辨定位一直备受关注。信号子空间聚汇算法是解决宽带信号到达角估计的经典方法^[1-2],其中典型的是由 Wang 和 Kaveh 提出的宽带相干信号子空间方法(CSM)^[2],它通过将宽带数据分解为若干窄带数据之和,再通过聚汇矩阵将不同中心频率的信号子空

间聚汇到参考频率上,利用窄带测向技术实现到达角估计。该类算法需要 DOA 预估值,并且必须根据已知的预估计角度求解聚焦矩阵。

信源到达角估计的另外一类方法是时将时频分析与空域信号处理相结合,将时频分析应用到子空间算法中。时频分析是研究非平稳信号的有力工具,其中, Wigenr-Ville 二次时频分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)^[3]由于具有良好的时频聚集性,在通信、雷达等工程实践中得到广泛应用。Amin 提出的

* 收稿日期:2012-01-20;修回日期:2012-05-28

时频-子空间方法^[4-5],利用基于 WVD 的空间时频矩阵(STFD),代替传统的相关矩阵,通过对应时频点的信号与噪声子空间分解,获得信源的到达角估计,且具有优良的定位的精度和性能。

文献[6]将 Amin 的窄带阵列模型扩展到宽带,建立了时变的空时频分布矩阵,通过特征值分解获得时变的信号与噪声子空间,利用子空间投影实现对信源的到达角估计。但是在低信噪比条件下,由于时频特征被噪声掩盖而影响了估计精度。

本文将时频-子空间方法应用到多个宽带调频信源的到达角估计中,修正了二维时频点的选取方法,并与宽带聚汇算法比较,分析了该方法的估计性能、分辨率和噪声干扰下的稳健性。

2 接收信号阵列模型

假设有 P 个相互独立的宽带调频信号从远场以不同方向入射到一由 M 个增益为 1 的全向阵元所组成的线性阵列上,阵列噪声是与信号相互独立的加性高斯噪声,则第 m 个阵元在 t 时刻的输出为

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t - \tau_{mi}) + n_i(t), \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

对于均匀线阵, $\tau_{mi} = (m-1)d \sin \theta_i / c$, 表示第 i 个信号到达第 m 个阵元相对于选定参考点的时间延迟; $s_i(t)$ 为第 i 个入射信号的时域波形, $n_i(t)$ 为第 m 个阵元在 t 时刻的加性噪声。记

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t - \tau_{mi}) \quad (2)$$

阵列输出为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T$ 是 $M \times 1$ 的阵列输入矢量, $\mathbf{Y}(t)$ 是 $M \times 1$ 的阵列输出矢量, $\mathbf{N}(t)$ 是 $M \times 1$ 的噪声矢量。

对于窄带信号,各阵元上信号的时域延迟表现为相位的变化,有:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (4)$$

$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_P(t)]^T$ 是 $P \times 1$ 的信号输入矢量, $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1) \ \mathbf{a}(\theta_2) \ \dots \ \mathbf{a}(\theta_P)]^T$ 是 $M \times P$ 的阵列流型矩阵, $\mathbf{a}(\theta_i) = [1 \ e^{-j2\pi f \tau_{2i}} \ \dots \ e^{-j2\pi f \tau_{Mi}}]^T$ 是第 i 个信号的 $M \times 1$ 的阵列流型矢量。

对于宽带信号,信号的瞬时频率发生变化,阵列流型矢量与时间有关,因此不再具有式(4)的形式。

3 宽带 DOA 估计算法

3.1 时频-子空间算法

Amin 针对窄带调频信号的到达角估计提出了时频子空间算法,基本思想是对各阵元数据建立空时频矩阵(STFD),代替阵元的数据协方差矩阵^[5]。对于式(3)的阵列模型,阵列的空时频矩阵定义为^[4]

$$D(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t + \frac{\tau}{2}) Y^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (12)$$

空时频矩阵的对角线项为阵元的自时频分布,非对角元素上为阵元的互时频分布,其中第 i 行第 j 列的元素为阵元 i, j 在时频点 (t, f) 上的互 WVD 分布:

$$D_{i,j}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} y_i(t + \frac{\tau}{2}) y_j^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (13)$$

将式(4)代入式(12),得到

$$D(t, f) = \mathbf{A} D_{ss}(t, f) \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (14)$$

$D_{ss}(t, f)$ 是时频点 (t, f) 上 $P \times P$ 的信号互 WVD 分布矩阵。如果信源互不相关,则 $D_{ss}(t, f)$ 为对角矩阵,第 i 个对角元素为第 i 个信号在时频点 (t, f) 上的能量谱 $D_{ss,i}(t, f)$ 。

选取第 i 个信号的自项时频点 (t, f) 构造空时频矩阵,利用瞬时频率 f 组成阵列流形矢量:

$$\mathbf{a}(\theta_i, t) = [1 \ \exp(-j2\pi f \tau_{2i}) \ \exp(-j2\pi f \tau_{3i}) \ \dots \ \exp(-j2\pi f \tau_{Mi})]^T$$

则有:

$$D(t, f) = \mathbf{a}(\theta_i, t) D_{ss,i}(t, f) \mathbf{a}^H(\theta_i, t) + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (15)$$

DOA 估计为

$$\theta_i = \max_{\theta_i} \frac{1}{\mathbf{a}(\theta_i, t) \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{a}^H(\theta_i, t)} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{G}$ 为由 (t, f) 对应的空时频矩阵最小的 $M-P$ 个特征矢量构成的噪声子空间。由于 (t, f) 是第 i 个信源时频自项上的点,因此最大的 θ 为第 i 个信号的到达角估计^[2]。

选择信号在自项的时频点分布,建立空时频矩阵,特征值分解后选取最大特征值对应的特征向量组成一维信号子空间 $U_{s_i}(t, f)$, 与该时频点对应的阵列流型 $\mathbf{a}(\theta_i, t)$ 张成相同的子空间,则第 i 个宽带信源的 DOA 估计为

$$\theta_i = \max_{\theta_i} \mathbf{a}(\theta_i, t) U_{s_i}(t, f) U_{s_i}^H(t, f) \mathbf{a}^H(\theta_i, t) \quad (17)$$

通过逐一选取 P 个信源的时频自项上的 (t, f) , 重复上述过程,可以得到 P 个信源的到达角估

计。可以看出,如果选取信号自项的时频点,每次只估计得到一个信源的 DOA 估计,阵元数目不再受到信源个数的限制。

3.2 时频点提取算法

对于宽带线性调频信号,阵列流形矢量与 t, f 有关,由于不同时刻的阵列流形矢量的频率不同,因此时频子空间算法不再适用。由式(12)得到

$$D(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\theta, t + \frac{\tau}{2}) S(t + \frac{\tau}{2}) S^*(t - \frac{\tau}{2}) \cdot A^H(\theta, t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau + \sigma^2 I \neq A(\theta, t) D_{ss}(t, f) A^H(\theta, t) + \sigma^2 I \quad (18)$$

为将宽带调频信源的时频特性信息扩展到宽带信号处理中, Gershman 提出了基于矩阵插值的宽带调频信号 DOA 估计算法(IMM)^[8],但是插值区间的选择需要 DOA 的先验信息。

文献[6]提出了基于短时 WVD 的空时频矩阵。为利用时频子空间方法,可将式(17)的积分限缩短,即加一个窄窗 T (相当于窄窗下的 PWVD),近似认为方向矢量在该区间内近似不变,从而可得

$$D(t, f) = \int_{-T/2}^{T/2} A(\theta, t + \frac{\tau}{2}) S(t + \frac{\tau}{2}) S^*(t - \frac{\tau}{2}) \cdot A^H(\theta, t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau + \sigma^2 I = A(\theta, t) D_{ss}(t, f) A^H(\theta, t) + \sigma^2 I \quad (19)$$

但是,在窄窗下,信号的时频聚集性却随之变差,影响信号时频自项信息的提取,文献[9]中基于阵列平均的时频特征提取方法,可以抑制较大的时频交叉项,然而在信噪比较小的情况下信号特征容易被噪声淹没。

由于时频分布中的自项通常对应时频图像中灰度值较高,且幅度较为恒定的低频部分。噪声的时频分布为时频图像上具有较高频率的灰度变化,交叉项具有高频振荡的灰度纹理。利用乘法滤波滤除高频项,具体过程如下:

- (1) M 个阵元的时频图像限幅;
- (2) M 个限幅后时频图像转化为灰度图像,进行相乘滤波;
- (3) 将滤波后的时频图像二值化处理,得到二值图像;
- (4) 利用该二值图像对原信号的时频分布进行掩膜滤波,从而得到信号的自项时频特征。

考虑到时频点的数目对运算效率的影响,本文先用二维时频掩模滤波提取时频自项,再选取时频

平面一维采样点的 10% 作为参与子空间分解的时频点数目,从而可以实现效率与精度的兼顾。实现流程如图 1 所示。

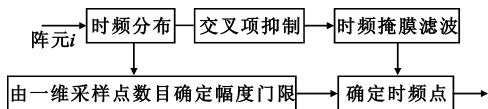


图 1 时频点提取算法
Fig.1 Diagram of selecting time-frequency point

4 仿真实验

为比较算法性能,用计算机仿真实验来进行算法的有效性验证。设定仿真条件如下:信号源为宽带线性调频信号,调频范围为 30 ~ 60 MHz,采样频率为 200 MHz,采用 8 个均匀间距的阵元,阵元间距为中心频率所对应波长的一半。

实验 1:线性调频信号源个数为 1,初始频率为 30 MHz,终止频率为 60 MHz,信号 DOA 为 5°。信噪比变化范围为 -10 ~ 20 dB,信号观测长度为 256。分别采用文献[7]中的宽带聚汇算法和本文算法进行 100 次蒙特卡洛实验得到的 DOA 估计均值和均方根误差的曲线如图 2 和图 3 所示。

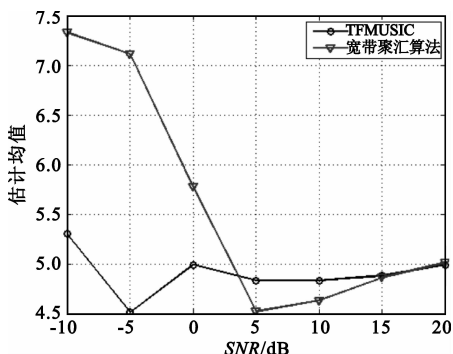


图 2 单分量线性调频信号的 DOA 估计均值
Fig.2 DOA estimation of single LFM signal

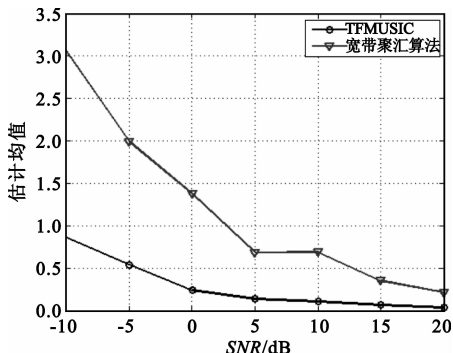


图 3 单分量线性调频信号 DOA 估计的均方根误差
Fig.3 RMSE of single LFM signal DOA estimation

由图 2 和图 3 可见,在低信噪比条件下,宽带聚汇算法的 DOA 估计偏差和估计精度较大,这是因为宽带聚汇算法需要角度预估,且为实现宽带信号的频域窄带分解,要求较高的数据量以获得较高的频域分辨率;而基于时频子空间的 DOA 估计算法,通过时频平面的增强算法,可以在噪声中有效提取信号自项的时频点,从而获得较好的 DOA 估计精度。

两线性调频信号的 DOA 估计谱如图 4 所示。

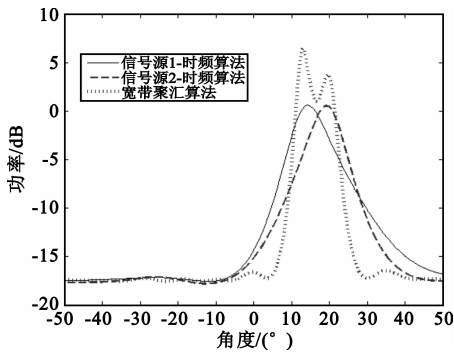


图 4 两线性调频信号的 DOA 估计谱
Fig.4 Spectrum of two LFM signal DOA estimation

图 4 表明,由于采用了时频单信号滤波,因此在低信噪比和低数据率的条件下,宽带时频子空间算法仍然可将不同 DOA 的信号区分开来;而宽带聚汇算法由于两个信号的调频范围相同,调频率相反,从而信号 1 的 DOA 估计偏差较大,且出现了谱峰模糊,信号 DOA 估计分辨率较差。

实验 2:信号源个数为 2,为调频特性相反的两线性调频信号,调频范围均为 30 ~ 60 MHz,采样频率为 200 MHz,信号 DOA 为 15°、20°。信噪比为 0 dB 时分别采用文献[7]中的宽带聚汇算法和本文算法的 DOA 估计结果如图 4 所示。分别进行 50 次蒙特卡洛实验得到的 DOA 估计偏差和均方根误差随信噪比变化的曲线如图 5 和图 6 所示。

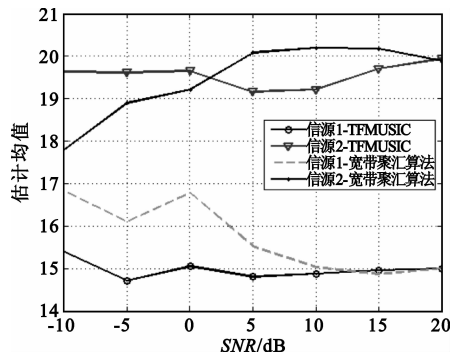


图 5 两线性调频信号 DOA 估计的均值
Fig.5 DOA estimation of two LFM signal

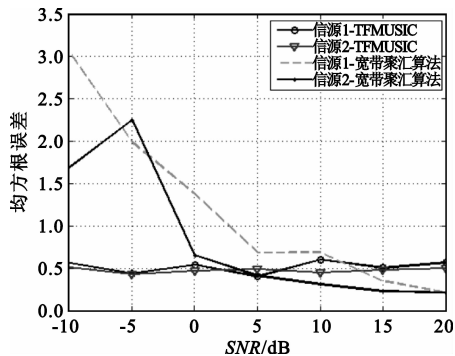


图 6 两线性调频信号 DOA 估计的均方根误差
Fig.6 RMSE of two LFM signal DOA estimation

图 5 和图 6 显示,对于多分量的宽带线性调频信号而言,宽带时频子空间方法在低信噪比条件下的 DOA 估计有明显的优势,测向偏差小,且测向精度几乎没有大的起伏,这是由于多分量信号情况下,各信号的时频信息互相影响,使得各 DOA 估计精度几乎完全由信号本身的时频分布情况决定,噪声由于在时频平面均匀分布,从而对估计影响很小。在高信噪比条件下,宽带时频子空间算法和宽带聚汇算法均具有较高的估计精度,算法性能相当。

5 结束语

本文研究了宽带多线性调频信源的到达角估计算法,对基于时频子空间的 DOA 估计算法和宽带聚汇算法的原理、性能进行了研究和仿真。仿真结果表明,低信噪比条件下,宽带时频子空间算法同宽带聚汇算法比较,具有良好的分辨率和估计精度,且克服了宽带聚汇算法需角度预估及聚焦频率的选取不当对算法的有效性造成的缺陷。对于多线性调频信源进行二维时频滤波提取时频点的高效算法是需要进一步研究的问题。

参考文献:

[1] Wax M, Tie-Jun S, Kaillath Y. Spatio-Temporal Spectral Analysis by Eigenstructure Method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1984, 32(4): 817 – 827.

[2] Wang H, Kaveh M. Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wide-Band Sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1985, 33(4): 823 – 831.

[3] Cohen L. Time-frequency Distributions-A review[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941 – 981.

[4] Zhang Yimin, Amin M G. Spatial averaging of time-frequency distributions[C]//Proceedings of 1999 IEEE International

Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 1999: 1337 – 1340.

- [5] Zhang Yimin, Mu Weifeng, Amin M G. Subspace analysis of spatial time-frequency distribution matrices[J]. IEEE Transactions on signal Processing, 2001, 49(4): 747 – 759.
- [6] 黄克骥, 田达, 陈天麒. 基于时频子空间分解的宽带线性调频信号 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(3): 344 – 349.
- HUANG Ke-ji, TIAN Da, CHEN Tian-qi. DOA Estimation of Wideband Chirp Signals Based on Time-Frequency Subspace Decomposition[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(3): 344 – 349. (in Chinese)
- [7] Valae S, Kabal P. Wideband Array Processing Using a Two-Sided Correlation Transformation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43: 160 – 172.
- [8] Gershman A B, Amin M G. Wideband direction of arrival estimation of multiple chirp signals using spatial time-frequency distributions[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2000, 7(6): 152 – 155.
- [9] 田达. 非平稳信号阵列多参量估计技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- TIAN Da. Research on Array Processing for Multi-parameter Estimation of Non-stationary Signals[D]. Chengdu: University of

Electronic Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)

作者简介:

王雪飞(1974—), 女, 河北元氏人, 2000 年于国防科技大学获硕士学位, 现为讲师, 主要研究方向为雷达信号处理、数据融合;

WANG Xue-fei was born in Yuanshi, Hebei Province, in 1974. She received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2000. She is now an lecturer. Her research concerns radar signal processing, data fusion.

Email: wxfwzt2005@tom.com

尚朝轩(1964—), 男, 河南人, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、武器装备故障诊断与性能测试、雷达组网等;

SHANG Chao-xuan was born in Henan Province, in 1964. He is now a Ph.D. supervisor. His research concerns radar signal processing, fault diagnosis and performance testing of weapons equipment, and radar networking.

王昌盛(1976—), 男, 山东人, 讲师, 主要研究方向为计算机网络、信息管理。

WANG Chang-sheng was born in Shandong Province, in 1976. He is now a lecturer. His research concerns computer networks and information management.