

改进的宽带TOFS角度估计算法

曾耀平

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 针对TOFS算法需要信源先验数目的问题, 提出了一种改进方法。该方法只利用最小特征值对应的向量矩阵作为估计的噪声子空间, 克服了传统的需要全部噪声特征向量作为估计的噪声子空间, 无需信源数目就可实现宽带信号的DOA估计。新算法同时也克服了TOPS算法容易出现伪峰的缺点, 算法稳健性高, 通用性好, 仿真结果验证了算法的有效性。

关键词: 宽带信号; DOA估计; TOPS算法; 改进TOFS算法

中图分类号: TP802.7 **文献标识码:** A

The Improved TOFS Algorithm for Wideband DOA Estimation

ZENG Yaoping

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: For the problem of needing prediction for the TOFS (Test of Orthogonality of Frequency Subspaces) algorithm, this paper proposes an improved approach. The new approach utilizes the minimum vector according to the minimum eigenvalue to estimate the noise subspace, and overcomes the traditional noise subspace needing all noise eigenvectors as estimated noise subspace, and finally realizes the wideband signals DOA (Direction Of Arrival) estimation with unknown number of signals. The new approach also overcomes the shortcoming of TOPS algorithm and has high robustness and good generality. The computer simulation confirms the effectiveness of this method.

Keywords: wideband signals; DOA estimation; TOPS; Improved TOFS algorithm

1 引言(Introduction)

随着现代通信技术的发展, 智能天线已经成为一个热点, 而作为天线的核心技术, 信号测向受到了广大科技人员的极大关注^[1-3]。由于宽带信号携带的信息更广, 含有的有用信息更多, 因此有关宽带信号的检测是信号测向的一个主流^[4]。

最常用且比较经典的DOA估计算法是基于子空间分解的MUSIC法及ESPRIT算法^[5]。最早的宽带DOA估计算法是非ISSM(ISSM: Incoherent Signal Subspace Method)法^[6], 但是ISSM算法对SNR(Signal to Noise Ratio)有一定的要求。CSSM(CSSM: Coherent Signal Subspace Method)是一种聚焦类的宽带DOA估计算法^[7], CSSM类算法主要有RSS、SST、TCT^[8], 不过CSSM类算法需要进行聚焦操作, 算法的工程计算复杂度较高。文献[9]提出的投影子空间正交性测试法(TOPS), 该算法无需聚焦, 在中等SNR下性能较好, 因此

受到了许多学者的广泛关注, 相关改进算法层出不穷^[10-12]。TOPS算法的缺点是微弱信号环境下算法的误差较大, 有时会出现虚报谱峰的现象。文献[13]—文献[14]提出的TOFS算法, 该算法由于同时利用了多个频点上的效果, TOFS的估计性能要好于TOPS, 因此该算法也受到了学者的关注^[15]。随着测向技术的不断发展, 宽带DOA估计技术得到了更为广泛的关注^[16], 但是大部分宽带DOA估计算法仍需事先获取信号数目的先验信息, 为此, 本文研究了一种无需信源数目的改进TOFS算法。

2 宽带阵列信号模型(Model of wideband array)

为方便, 这里用符号 $(\bullet)^T$ 、 $(\bullet)^*$ 、 $(\bullet)^H$ 、 $E\{\bullet\}$ 来代表转置、共轭、共轭转置、均值。阵列是 M 个阵元的均匀线列阵, P 个宽带信号从远场入射, 其入射角度分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$, 阵列的输出为

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t) \quad (1)$$

这里, $X(t)$ 、 $A(\theta)$ 、 $S(t)$ 分别是均匀线列阵的输出向量、

均匀线列阵的方向矩阵、信号矢量、噪声向量, 其中 $X(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ 、 $S(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t)]^T$ 、 $N(t)=[n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$ 。

对 $X(t)$ 进行离散傅里叶变换, 写成矩阵形式为

$$X(f_j) = A(f_j)S(f_j) + N(f_j) \quad (2)$$

其中

$$A(f_j) = [a(f_j, \theta_1), a(f_j, \theta_2), \dots, a(f_j, \theta_p)] \quad (3)$$

$$S(f_j) = [S_1(f_j), S_2(f_j), \dots, S_p(f_j)]^T \quad (4)$$

$$N(f_j) = [n_1(f_j), \dots, n_M(f_j)]^T \quad (5)$$

对 $X(f_j)$ 进行相关运算, 则频率 f_j 处的ACM

$$R_s(f_j) = E[X(f_j)X^H(f_j)] = A(f_j)R_s(f_j)A^H(f_j) + R_n(f_j) \quad (6)$$

其中

$$R_s(f_j) = E[S(f_j)S^H(f_j)] \quad R_n(f_j) = E[N(f_j)N^H(f_j)] \quad (7)$$

3 TOPS算法(TOPS method)

TOPS是一种针对宽带非相干信源的有效方法。该算法利用带宽范围内任意频点处信号子空间和噪声子空间相互正交的特点来进行方DOA估计, 同时该算法也利用了带宽范围内所有频点的信息。当带宽范围内某频率和信号的空间角度满足

$$f_k = f_i + f_j \quad (8)$$

$$\sin(\theta_k) = \frac{f_i}{f_k} \sin(\theta_i) + \frac{f_j}{f_k} \sin(\theta_j) \quad (9)$$

对于假定的阵列方向矢量, 一定存在某个矩阵 $\Phi(f_j, \theta)$ 并且满足

$$a(f_k, \theta_k) = \Phi(f_j, \theta_j) a(f_i, \theta_i) \quad (10)$$

这里, $\Phi(f_j, \theta_j) = \text{diag}\{a(f_j, \theta_j)\}$ 称为变换矩阵, 通过 $\Phi(f_j, \theta_j)$ 可以把对应于某个频率和空间某个角度处的阵列方向向量转换为另一频率和另一角度处的阵列方向向量。当 $\theta = \theta_i$ 时, 则 $\theta_k = \theta_i$, 此时有

$$U_s(f_j, \phi) = \Phi(\Delta f_j, \phi) U_s(f_i, \phi) \quad (11)$$

公式(10)表明, 通过矩阵之间的变换, 在保证空间信号角度不变的情形下, 可将某频点的阵列方向向量转换到另外一个频点处。

再定义一个 $M \times P$ 维的矩阵 $U_i(\phi)$, $U_i(\phi) = \Phi(\Delta f_i, \phi) F_0$, $\Delta f_i = f_i - f_0$, F_0 是选定的某个参考点处的信号子空间。利用 $U_i(\phi)$ 可重构新矩阵

$$D(\phi) = [U_1^H U_{n1}, U_2^H U_{n2}, \dots, U_J^H U_{nJ}] \quad (12)$$

这里, U_i 、 U_{ni} 分别是 f_i 频点对应的信号及噪声子空间。当 ϕ 为空间真实角度时, 矩阵 $D(\phi)$ 会出现降秩现象, 利用判断 $D(\phi)$ 的秩情况, 通过一维角度遍历搜索即可估计出宽带信号的空间角。

实际中, 通过对 $R_s(f)$ 进行特征分解或奇异值分解我们可以获得 f_i 频点的信号及噪声子空间。为减小子空间相互泄露所

带来的估计误差, 可采用 $a(f_i, \phi)$ 的正交投影矩阵对 $D(\phi)$ 进行改进, 即用 U_i' 代替 U_i

$$U_i' = (I_M - a^H(f_i, \phi) a(f_i, \phi))^{-1} a(f_i, \phi) a^H(f_i, \phi) U_i \quad (13)$$

上述分析可知, TOPS算法的好坏与选定的参考点处的信号子空间 F_0 密切相关, 不恰当的参考点会造成算法性能急剧恶化, 有时会带来伪峰现象。

4 TOFS、改进的TOFS(TOFS and ITOFS)

TOFS算法利用宽带范围内每一个窄子带的噪声子空间均正交与对应的信号子空间, 即当 ϕ 为宽带信号的真实角时, 一定有

$$a^H(f_i, \phi) U_{ni} U_{ni}^H a(f_i, \phi) = 0 \quad (14)$$

利用 J 个标量 $U_{i,\phi} = a^H(f_i, \phi) U_{ni} U_{ni}^H a(f_i, \phi)$, $i=1, 2, \dots, J$, 重新设置一个矩阵

$$D(\phi) = [U_{1,\phi}, U_{2,\phi}, \dots, U_{J,\phi}] \quad (15)$$

利用判断 $D(\phi)$ 的秩情况, 通过一维角度遍历搜索即可估计出宽带信号的空间角。由于综合利用了所有频点的信息, TOFS算法估计效果优于TOPS。

TOFS算法中的 U_{ni} 指的是全部的噪声特征向量, 实际中由于信源数目未知, 准确获得全部的噪声特征向量很难。

通过进一步分析知, 最小特征值对应的特征向量属于噪声子空间, 且该子空间携带了大部分噪声子空间的信息, 尤其是在微弱信号下, 因此我们考虑只利用最小特征值对应的噪声特征向量作为估计的噪声子空间, 这就是ITOF算法的思想, 即ITOF只利用最小特征噪声特征向量来取代真实的噪声子空间, 这样无需预先估计宽带信源的数目就可以实现宽带源的角度估计。

5 仿真结果及分析 (Simulation results and analysis)

仿真采用6阵元的均匀线列阵, 两个等带宽等功率的宽带信号入射到均匀线列阵上, 其入射角度分别是 10° 、 20° , 两个入射信号是空间不相关的宽带信号。阵列的附加噪声是空间平稳零均值的高斯白噪声。将宽带信号分为11个窄子带, 每个子带的数据采样数均为256, 两个入射信号与噪声的信噪比均为5dB。

为了比较说明, 在同样的条件下对TOPS、TOFS、ITOF算法进行了仿真比较, 仿真结果如下:

仿真图1表明, 由于参考频点的选择具有随机性, 不恰当的频点会造成信号子空间向噪声子空间泄露, 因此TOPS算法虽然谱峰较为尖锐, 但是有伪峰产生。图2的仿真结果表明, TOF算法及ITOF算法都可以实现宽带信号的角度估计, 且谱峰都比较尖锐, 并且没有伪峰出现。

算法的均方根误差曲线(图3)表明, ITOFS的均方根误差

稍大于TOFS，不过ITOFS无需信源的先验数目信息，这有利于工程应用。图4的分辨概率曲线表明，ITOFS的分辨概率还要大于TOFS算法，说明小信噪比的情形下，ITOFS算法更有分辨能力，更适合工程应用。

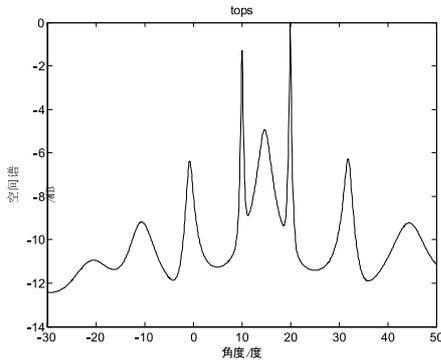


图1 TOPS算法的角度谱

Fig.1 Spectrum of TOPS

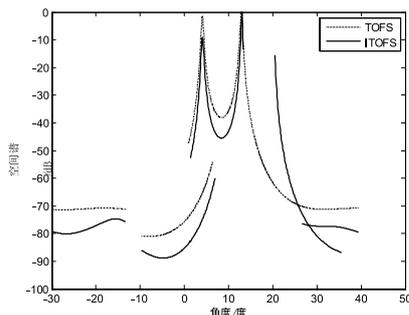


图2 TOFS、ITOFS算法的角度谱

Fig.2 Spectrum of TOFS and ITOFS

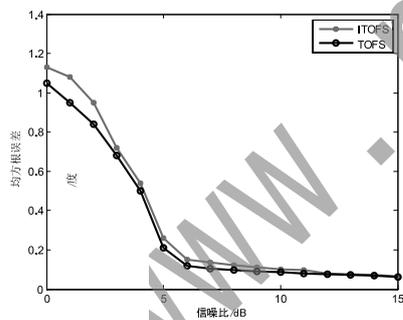


图3 TOFS及ITOFS算法的均方根误差曲线

Fig.3 MMSE of TOFS and ITOFS

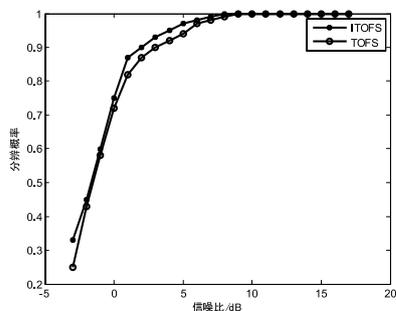


图4 TOFS及ITOFS算法的分辨概率曲线

Fig.4 Resolution probability of TOFS and ITOFS

6 结论(Conclusion)

针对TOFS算法需要信源先验数目的问题，提出了一种改进方法。该方法只利用最小特征值对应的向量矩阵作为估计的噪声子空间，克服了传统的需要全部噪声特征向量作为估计的噪声子空间，无需信源数目的先验信息就可实现宽带信号的DOA估计。新算法同时也克服了TOPS算法容易出现伪峰的缺点，算法稳健性高，工程实用性好，在微弱信号下的检测概率更高，仿真结果验证了算法的有效性。

参考文献(References)

- [1] L.Wang,L.F.Zhao,G.A.Bi.Novel Wideband DOA Estimation Based on Sparse Bayesian Learning With Dirichlet Process Priors[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2016,64(2):275-289.
- [2] J.Y.Liu,Y.L.Lu.DOA Estimation With Enhanced DOFs by Exploiting Cyclostationarity[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2017,65(6):1486-1496.
- [3] G.Fontgalland,P.I.L.Ferreira.Combining Antenna Array Elements by Using ICA Method for Remote Sensing of Sources IEEE Aantennas and Wireless Propagation Letters,2017,16:234-237.
- [4] J.Selva.Efficient Wideband DOA Estimation Through Function Evaluation Techniques[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2018,66(12):3112-3123.
- [5] H.Krim,M.Viberg.Two decades of array signal processing research[J].IEEE Transactions on Signal Processing,1996, 13(4):67-94.
- [6] H.Wang,M.Kaveh.Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources[J].IEEE Transactions on Acoustics,Speech,and Signal Processing,1985,33(4):823-831.
- [7] H.Hung,M.Kaveh.Focussing matrices for coherent signal-subspace processing[J].IEEE Transactions on Acoustics,Speech,and Signal Processing,1988,36(8):1272-1281.
- [8] S.Valaee,P.Kabal.Wideband array processing using a two-sided correlation transaction formation[J].IEEE Transactions on Signal Processing,1995,43(1):160-172.
- [9] Y.S.Yoon,L.M.Kaplan,H.Mccllellan.TOPS:New DOA estimator for wideband signals[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2006,54(6):1977-1989.
- [10] 李焜,方世良.基于波束域的子空间正交性测试宽带DOA估计方法研究[J].信号处理,2012,28(1):131-138.

- [11] J.Zhang,J.S.Dai,Z.F.Ye.An extended TOPS algorithm based on incoherent signal subspace method[J].Signal Processing,2010,90(7):3317-3324.
- [12] 张进,叶中付,王伟.一种新的未知相关噪声下的宽带相干信号DOA估计算法[J].宇航学报,2012,33(8):1119-1126.
- [13] H.Q.Yu,Z.T.Huang,J.Liu,et al.TOFS:a new DOA estimator for wideband Sources[J].Journal of Astronautics,2007,28(5):1304-1313.
- [14] H.Q.Yu,J.Liu,Z.T.Huang,et al.A new method for wideband DOA estimation[C].Proceedings of International Conference on Wireless Communications,Networking and Mobile Computing(WICOM),2007,pp:598-601.
- [15] 于红旗,徐欣,黄知涛,等.一种新的宽带DOA估计方法[J].信号处理,2009,25(1):118-121.
- [16] 蔡进,刘春生,陈明建,等.聚焦的子空间正交性测试宽带DOA估计方法[J].信号处理,2018,34(2):221-228.

作者简介:

曾耀平(1975-),男,博士,讲师.研究领域:计算机通信.

(上接第16页)

设定为0.0000001,学习的速率为0.01^[6,7]。

```
Net.trainParam.epochs=5000;
```

```
[net,tr]=train(net,p1,t1);%训练
```

```
n=[2406 2131 682 1.5 3 4 734 7];%测试
```

```
n=premnmx(n);
```

```
m=sim(net,n);
```

```
c=postmnmx(m,mint,maxt);
```

运行结果显示,在通过866次重复学习在达到期望误差后完成学习,网络训练完毕后,预测9月库存为2709个零件,达到预定的算法目标,不考虑其他未知或不可控因素,可以根据2709个零件编制采购生产计划。

8 结论(Conclusion)

本文首先采用PCA主成分分析方法验证了选取库存影响因素的合理性,使用python进行数据降维度分析^[8,9]后,结果证明选取的库存影响因素可以代表库存的影响因素,随后建立BP神经网络模型,编写程序,预测9月的库存,有助于企业实现JIT的目标。但在实际中,库存的影响因素十分复杂甚至某些因素无法事先预知,接下来,仍需在企业生产中,统计企业库存的固定和偶然影响因素,并统计各项数据,增大训练集,才能使库存预测更加精确。

参考文献(Reference)

- [1] 孙文荣,周先春,嵇亚婷.基于直方图均衡化、PCA和SVM算法的人脸识别[J].软件,2014,35(08):11-15.
- [2] Marta Skiba, Maria Mrówczyńska, Anna Bazan-Krzywoszańska.

Modeling the economic dependence between town development policy and increasing energy effectiveness with neural networks. Case study: The town of Zielona Góra[J]. Applied Energy, 2017:188.

- [3] 冉维丽,乔俊飞.基于PCA时间延迟神经网络的BOD在线预测软测量方法[J].电工技术学报,2004(12):78-82.
- [4] 高蒙杰.基于BP神经网络的阀门制造企业库存需求预测应用研究[D].北京交通大学,2015.
- [5] M.A. Hakeem, M. Kamil. Analysis of artificial neural network in prediction of circulation rate for a natural circulation vertical thermosiphon reboiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017:112.
- [6] 吕健发.粒子群神经网络在手机物料库存预测中的应用[J].大众科技,2014,16(10):41-42.
- [7] 马法尧.基于BP神经网络模型与ARMA模型的库存预测比较[J].统计与决策,2014(19):34-37.
- [8] 王哲,李衍达,罗发龙.一种用于PCA与MCA的神经网络学习算法[J].电子报,1996(04):12-16.
- [9] 侯严庭.基于Three.js的机械产品自动装配演示[J].软件工程,2018,21(03):23-26.

作者简介:

腾杨刚(1991-),男,硕士生.研究领域:机器学习.

陈劲杰(1967-),男,硕士,副教授.研究领域:智能机器人.

葛桂林(1990-),硕士生.研究领域:软体机器人.