



空间谱估计无线电测向系统

陈旭彬, 任培明, 戴慧玲
(国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 空间谱估计测向方法以其超分辨率、高灵敏度和高准确度的测向性能被广泛应用, 并在无线电管理领域扮演主要角色。在对空间谱估计测向理论研究的基础上, 给出了具体算法, 并对算法进行了仿真, 最后通过对比测试论证了空间谱估计测向系统的实用性和优越性。

关键词: 空间谱估计; MUSIC 算法; 无线电测向

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017225

Radio direction finding system based on spatial spectrum estimation

CHEN Xubin, REN Peiming, DAI Huiling
State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

Abstract: The direction finding technology based on spatial spectrum estimation is widely used due to its' ultra-high resolution, high sensitivity, high accuracy and plays a leading role in radio management. Based on the theoretical study of spatial spectrum estimation, the algorithm was put forward and the algorithm was simulated. Finally, the practicability and superiority of the spatial spectrum estimation system were demonstrated.

Key words: spatial spectrum estimation, multiple signal classification algorithm, radio direction finding

1 引言

空间谱估计测向技术是一门在最近 50 年内发展起来的新兴测向处理技术, 这种测向技术具有传统测向体制无可比拟的技术优势, 正在展现出良好的应用前景, 并已经成为国际无线电测向领域的研究热点。

传统的无线电测向系统由于受到技术条件的限制, 测向天线所获得的方位信息只能在射频范围中进行处理, 测向功能和性能都受到了很大的限

制。但随着近代科学技术的迅速发展, 无线电测向系统中天线元采集到的数据, 经过多信道接收机分别进行放大、变频和数字化后再送到数字计算机中进行处理, 这样可以充分发挥数据的作用, 无线电测向系统的功能和性能得到了显著的提高。

空间谱估计测向体制的主要特点是能对多个相干入射电磁波进行同时测向, 也就是说, 这种体制能够同时对同一个信道中同时存在的多个信号进行测向, 另外, 空间谱估计测向体制还可以进行超分辨率测向(超分辨率测向是指对同一信道中



同时到达的,在测向天线阵能接收到的频率范围以内的两个或两个以上的入射电磁波进行同时测向)。空间谱估计测向体制对信号采样个数的要求很低,往往只需要对很少的信号采样,就可以对来波方位进行准确判定,因而空间谱估计测向体制对跳频信号的测向会有比较好的结果,测向准确度也会高很多。另外,空间谱估计体制对测向场地的要求不高,可以很方便灵活地选择天线阵元位置及其方向性。

2 空间谱估计测向原理和算法

2.1 原理概述

空间谱估计的一般方法是构造一个以信号方向为参数的“谱函数”,并使得在信号到达的方向上具有尖锐的峰值,这样在进行谱分析时,其峰值出现就指示了信号到达方向。现代空间谱估计的经典代表是子空间法,它利用信号子空间与噪声子空间的正交性建立谱函数,抛弃了传统天线波束的概念,从而突破了瑞利极限,具有很高的

精度和空间分辨率,其系统结构如图1所示。

其中,目标空间是一个由信号源与复杂环境参数组成的空间。空间谱估计系统的功能就是利用特定的方法从这个复杂的目标空间中估计出信号的各种参数。观察空间是按一定方式排列的天线阵,用来接收目标空间的辐射信号。由于环境的复杂性,所以接收数据中包含信号特征(方位、距离、极化等)和空间环境特征(噪声、杂波、干扰等)。另外由于空间阵元的影响,接收数据中同样也含有空间阵列的某些特征(互耦、通道不一致、频带不一致等)。这里的观察空间是一个多维空间,即进入处理器的信号是通过多个通道传输进来的,而传统的时域处理方法通常只有一个通道。特别需要指出的是,通道与阵元并不是一一对应,通道是由空间的一个、几个或所有阵元合成的;估计空间是利用空间谱估计技术从复杂的观察数据中提取信号的特征参数。

2.2 MUSIC 测向算法

承上所述,空间谱估计测向就是根据各 $X_n(t)$

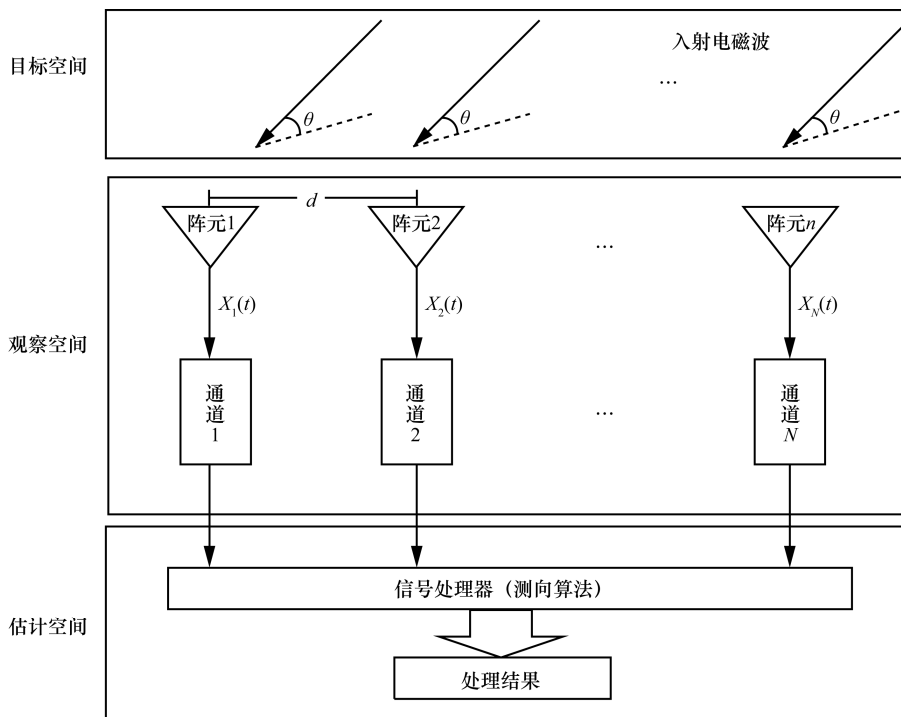


图1 空间谱估计系统结构

(即各阵元的输出信号)来估计空间频率,进而求出其他参数的。所以,各种谱估计算法都可用于测向,只要把搜索参数变成空间频率即可,在各种算法中,MUSIC(multiple signal classification)算法以高精度和超分辨率等特点被广泛应用。

设空间有 D 个互补相关的信号,且它们的波前都是垂直于地面的,即仰角为 0° ,这些信号以不同的方位角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_D$ 入射到一个 M 元均匀线阵,各阵元噪声 $N_i(t)$ 互不相关, $i=1,2,\dots,M$,且为空间白噪声,方差为 σ^2 ,噪声与信号互不相关,则阵列的输出为:

$$X(t)=AS(t)+N(t) \quad (1)$$

其中, $X(t)$ 是阵列输出矢量, $S(t)$ 是信号矢量, $N(t)$ 是噪声矢量, A 是阵列方向矩阵,且:

$$X(t)=\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} \quad N(t)=\begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_m(t) \end{bmatrix} \quad S(t)=\begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_m(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$A=[a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_D)]$ 表示 D 个信号的方向向量。其中 $a(\theta_k)$, $k=1,2,\dots,D$, 在各阵元特性相同、等距排列的一维直线阵情况下,有:

$$a(\theta_k)=\begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta_k} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi d}{\lambda}(M-1)\sin\theta_k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

但对于不同阵列,矩阵 A 是不同的,而且矩阵 A 中,任一行总是和某个辐射源信号的来向紧密联系着,也只有矩阵 A 才包含有辐射源信号来向的信息。

设各阵元输出信号相关矩阵为:

$$\begin{aligned} R_X &= E[X(t)X^H(t)] = E\{[As(t)+nm(t)][As(t)+nm(t)]^H\} \\ &= E\{[As(t)+nm(t)][A^H sH(t)+nmH(t)]\} = AE[s(t)s \\ &\quad H(t)]A^H + E[nm(t)nmH(t)] + AE[s(t)nmH(t)] + E[nm(t)s \\ &\quad H(t)]A^H \end{aligned} \quad (4)$$

由于噪声与信号不相关,各阵元输出噪声不行关,且方差为 σ^2 ,则有:

$$E[s(t)nmH(t)] = E[nm(t)sH(t)] = 0 \quad (5)$$

$$E[nm(t)nmH(t)] = \sigma^2 I \quad (6)$$

于是有:

$$R_X = AR_S A^H + \sigma^2 I \quad (7)$$

其中, σ^2 为各阵元输出噪声方差, R_X 为各阵元输出信号的协方差矩阵, I 为单位矩阵。

把 R_X 进行特征分解,求其特征向量,建立两个互相正交的子空间,即信号空间 N_S 和噪声空间 N_G 。且构成噪声空间的特征向量 G 满足:

$$a^H(\theta_k) \cdot G \cdot G^H \cdot a(\theta_k) = 0 \quad (8)$$

由此定义函数:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta_k) \cdot G \cdot G^H \cdot a(\theta_k)} \quad (9)$$

$P(\theta)$ 即 MUSIC 谱估计的方向谱函数,使 $P(\theta)$ 取极大值的 θ 值就是对来波信号到达角的估计值。

综上所述,空间谱估计测向是充分利用天线各个阵元从空间电磁场接收到的全部信息(空间和时间),从而使其具有抗多径能力以及对相干信号进行测向的能力。

2.3 算法仿真

为了验证上述算法的可行性,用软件对 MUSIC 算法进行仿真。仿真工具为 MATLAB (V6.5),仿真对象为 20 阵元圆阵。仿真条件见表 1。

表 1 仿真条件

参数	表示	取值
入射信号个数	sn	2
信噪比/dB	snr	-10
天线阵孔径(半径波长比)	dw	2
快拍数	N	4 096
信号中频率/MHz	f	2, 3
调制频率/kHz	f_s	1.5, 4.0
采样频率/MHz	f_s	10
方位角	azi	$60^\circ, 125^\circ$
仰角	ele	$60^\circ, 80^\circ$



仿真程序设计如下所示。

```

Ss=zeros(sn,N);
for i=1:sn
    for m=1:M
        d(m,i)=exp(-j*2*pi*dw*cos(2*pi*(m-1)/M-
azi(i)*pi/180)*cos(ele(i)*pi/180))//定义导向矢量
    end
    ss(i,:)=snr(i)*(1+0.3*sin(2*pi*f(i)*n/fs))*
exp(j*2*pi*n*f(i)/fs)//定义 AM 调制信号
end
signal=d*ss//定义输入信号
noise=randn(M,N) //定义输入噪声
noise_h=(hilbert(noise.'))./sqrt(2)//对噪声进行
希尔伯特变化,映射到复数空间
x=signal+noise_h//定义接收信号
R=x*x'/N
[l,z]=eig(R) //定义特征值和特征向量
N_space=l(:,1:M-sn)//噪声子空间对应小的特征
值(从小到大排列)
for azi=1°:1°:180°//方位角范围
    for ele=1°:1°:90°//仰角范围
        for m=1:M
            AQ1(m,1)=exp(-j*2*pi*dw*cos(2*pi*
(m-1)/M-azi*pi/180)*cos(ele*pi/180))//构造函数
AQ1
        end
        Power=AQ1'*N_space'*N_space'*AQ1//在 1°~180°
范围内计算功率谱能量最大值
        P(ele,azi)= -10*lg(abs(Power))//求来波
信号方位角和仰角
    end
end
end

```

2.4 仿真结果分析

根据上述算法程序,得到的仿真效果如图 2 所示。

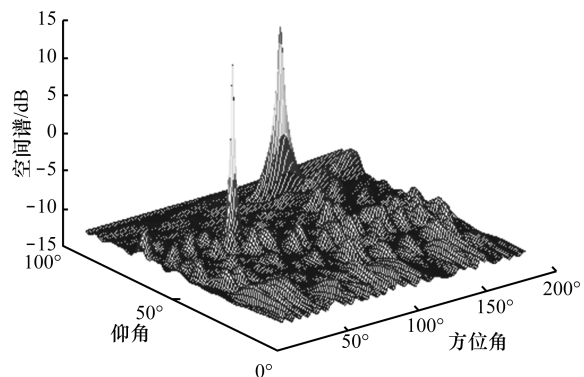


图 2 20 阵元圆阵仿真结果

从图 2 来看,目标信号谱峰尖锐,证明该仿真程序计算出的入射信号功率谱密度远远高于其他方位角信号,方位角和仰角显示结果与给定数值基本吻合,因此该程序正确计算出了给定入射信号的方位参数。另外,从仿真结果也可以看出,MUSIC 算法对空间多方向来波信号可以进行准确测向,较之以往的无线电测向理论和算法,有很好的实际应用价值,可以尝试在实际无线电测向工作中进行运用和推广。

3 对比实测验证及分析

为了进一步验证上述仿真算法在实际无线电测向中的可行性,特在上海无线电监测站搭建了实地天线场地和测试系统,对上述算法进行了对比实测验证。选取的对照系统是目前比较流行的相关干涉仪测向系统,测向参数一致,不再赘述,只对空间谱估计测向天线阵设计进行简单交代。

空间谱估计天线阵孔径(圆阵直径)为 110 m,天线高度均为 10.23 m,以 0°为正北方向,顺时针排列。其中,天馈系统、测向通信系统、测向系统不再赘述。对比实测验证统计见表 2。

从表 2 中可以看出,发射点距离测向天线阵越近时,其测得的示向度误差越小,随着距离增大,误差也随之增大。除 6 号实验点外,其余 7 个实验点上测得的数据均显示,空间谱估计测向系统比相关干涉仪测向系统在测向准确度方面要好很多,

表2 对比实测验证统计

发射点	示向度误差均方根值 $\Delta\theta_{\text{RMS}}$		发射点与测向天线阵中心距离/km
	相关干涉仪系统	空间谱估计系统	
#1	3.17°	1.75°	3.33
#2	1.68°	1.63°	3.03
#3	1.72°	1.32°	3.2
#4	1.24°	1.2°	2.9
#5	1.53°	1.45°	2.67
#6	0.94°	1.38°	3.46
#7	1.38°	1.28°	3.16
#8	3.43°	1.68°	2.93

并且均满足测向精度小于或等于 2° 的理论要求,这说明采用 MUSIC 算法的空间谱估计测向系统是可以进行实际应用的,并且其测向性能优于目前主流的相关干涉仪测向系统。

4 结束语

本文根据经典 MUSIC 理论,提出了可以运用于实际仿真和应用中的具体算法及仿真程序,对相关研究人员有一定的借鉴意义。本文根据仿真结果,进而提出了实际测向天线阵的布局方式,并在实际系统对比测试中验证了空间谱估计测向系统的可行性以及在多入射信号分辨和测向准确度方面的优越性,这对实际工程建设也有重要的参考价值。空间谱估计算法由于其高测向准确度、估计值比较接近真实值、对少量参数的偏差不是太敏感等优势,势必将有更广阔的应用前景。笔者认为,根据上述技术特点,空间谱估计测向系统将在低信噪比、多来波方向的精准无线电测向领域发挥更加重要的作用,目前国家无线电管理部门正在积极筹划建设的多个测向基地便是这一预测的最佳例证。

参考文献:

- [1] 王永良,陈辉,彭应宁,等.空间谱估计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2004.
WANG Y L, CHEN H, PENG Y N, et al. Theory and algorithm of spatial spectrum estimation[M]. Beijing: Tsinghua University

Press, 2004.

- [2] 刘德树,罗景青,张剑云,等.空间谱估计及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1997.
LIU D S, LUO J Q, ZHANG J Y, et al. Spatial spectrum estimation and its application[M]. Hefei: Chinese Science and Technology University Press, 1997.
- [3] 周鸿顺.频谱监测手册[M].北京:人民邮电出版社,2006.
ZHOU H S. Manual of spectrum monitoring[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006.
- [4] 冯剑,王平阳,王琳,等.基于能量获取的无线通信系统研究[J].电信科学,2015,31(2):124-131.
FENG J, WANG P Y, WANG L, et al. Research on energy harvesting communication system[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 124-131.
- [5] 周隲.基于空间谱估计的无源测向技术研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
ZHOU Z. Research on direction finding techniques based on space spectrum estimation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [6] 黄明峰.工业大数据发展态势与典型应用[J].电信科学,2016,32(7):175-178.
HUANG M F. Development trend and typical applications of industrial big data[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 175-178.
- [7] PILLAI S U, KWON B H. Performance analysis of MUSIC-type high resolution estimators for direction finding in correlated and coherent scenes[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1989, 34(3): 78-97.
- [8] LINEBARGER D A. Redundancy averaging with large arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 13(6): 41.
- [9] RUBSAMEN M, GERSHMAN A B. Direction-of-arrival estimation for nonuniform sensor arrays: from manifold separation to Fourier domain music methods[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 588-599.
- [10] PARK H R, KIM Y S. A solution to the narrow-band coherency problem in multiple source location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 56(2): 473-476.
- [11] 韩卫杰,陈向东,张瑞江,等.基于改进 MUSIC 算法的 DOA 精度影响因素研究[J].微计算机信息,2006,3(1):47-50.
HAN W J, CHEN X D, ZHANG R J, et al. Study of performance of DOA estimation on modified MUSIC arithmetic[J]. Microcomputer Information, 2006, 3(1): 47-50.
- [12] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 54(9): 276-280.
- [13] 张平,李建武,冯志勇,等.认知无线网络基础理论与关键技术研究[J].电信科学,2014,30(2):1-13.
ZHANG P, LI J W, FENG Z Y, et al. Research on basic theory and key technology of cognitive radio network[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(2): 1-13.



- [14] HWANG S, SARKAR T K. Direction of arrival(DOA) estimation using a transformation matrix through singular value decomposition[C]//2005 IEEE/ACES International Conference, April 3-7, 2005, Geneva, Switzerland. New Jersey: IEEE Press, 2005: 353-356.



任培明（1986-），男，国家无线电监测中心工程师，主要研究方向为无线电监测、无线电频谱管理。

[作者简介]



陈旭彬（1983-），男，国家无线电监测中心工程师，主要研究方向为无线电频谱管理、无线电频谱监测。



戴慧玲（1988-），女，国家无线电监测中心工程师，主要研究方向为无线电频率、无线电频谱监测。