

西安电子科技大学
博士学位论文
水下多目标定位关键技术研究
姓名：张群飞
申请学位级别：博士
专业：信号与信息处理
指导教师：保铮
20030501

## 摘 要

多目标定位是水下武器探测系统迫切需要具备的能力,它是反对抗、目标识别、精确打击的基础。多目标定位技术可以分解为方位估计、时延估计、参数配对等专项技术,本文对相关技术的最新进展进行了综述。

考虑到自导系统对多目标定位的特殊要求,作者提出了两类具有应用前景的多目标定位方法。第一类是基于参数配对算法的多目标定位技术,它在多目标方位、时延参数独立分辨的基础上,通过估计目标强度把两维参数对应起来完成定位。针对可能出现的两维参数分辨出的目标数目不等(参数兼并)的情况,作者提出了相应的配对策略。第二类是无需配对的多目标定位技术(ESPRIT-Corr)。这是一种方位-时延联合估计的方法它通过构造与常规 ESPRIT 不同的相关矩阵,用广义特征值估计多目标的方位,而用广义特征矢量估计多目标的时延(距离),同时方位和时延参数可自动配对。针对实际应用中普遍存在的不等强度目标源的问题,提出了一种修正算法。作者还进一步把 ESPRIT-Corr 推广到方位、频率、时延三维参数的联合估计。大量的计算机仿真结果验证了所提方法的有效性。

作者建立了一套多目标定位水池实验系统,开展了多目标定位实验和多目标三维参数联合估计实验研究,对几种稳健的方位估计方法的误差抑制能力进行了理论分析和水池实验验证。多目标定位实验数据分析结果表明:基于参数配对算法的多目标定位方法可较好的对双目标进行定位。基于参数联合估计的多目标定位方法在不同目标数目、不同信号包络的定位实验中都有较好的表现。在目标方位间隔大于半波束宽度时,可实现 2~4 个目标的三维参数联合估计。

关键词: 多目标 阵列处理 阵列校准 时延估计 参数配对 联合估计 实验研究

## ABSTRACT

Multi-target localization is the urgent requirement of exploration system in underwater weapon, which is the basis of anti-counterwork, target recognition, and accurate attack. The techniques of multi-target localization can be disassembled into bearing estimation, time-delay estimation, and parameter pairing. The novel improvements of relational topic are summarized in this dissertation.

In view of special requirements of homing system, we propose two kinds of multi-target localization methods. The first one is based on the algorithm of parameter pairing. Having resolved multiple targets both in bearing and time-delay domain, the method induct a intensity estimation to accomplish the pairing. In case of appearing different number of targets in bearing and time-delay domain, we introduce corresponding policy of pairing. The second localization method, called ESPRIT-Corr needs no pairing, which is based on the joint estimation of bearing and time-delay. By construct a correlation matrix different from conventional ESPRIT, the method estimates bearings using the general eigenvalues, estimates time-delays using corresponding general eigenvectors, and the parameters in two dimensions are paired automatically. In case of targets with different intensities, we proposed a modified algorithm. We also extend ESPRIT-Corr method to estimate 3-dimension parameter jointly. This two kind of localization methods were validated by plentiful computer simulation.

We establish a suit of water tank experiment system for multi-target localization, and then carry out a series of experiment research on multi-target localization and 3-dimension parameter estimation. The abilities of some robust bearing estimation to restrain the errors of sensor array are analyzed in theory and validated by experiments. The results of multi-target localization show that: The method based on pairing can locate two targets successfully. The method based on joint parameter estimation shows preferable performance almost at all times, in cases of various number of targets and various type of signal envelope. 3-dimension parameters of 2~4 targets can be jointly estimated as long as the direction intervals are greater than half beam width.

**Key Words:** Multiple targets, Array signal processing, Array calibration, Time-delay estimation, Parameter pairing, Joint estimation, Experimental study

## 独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人签名： 张群飞 日期： 2003.5

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文（保密的论文在解密后遵守此规定）。

本人签名： 张群飞 日期： 2003.5

导师签名： 张群飞 日期： 2003.6.27

## 第一章 绪 论

### § 1.1 本论文的研究目的和意义

在声纳、雷达、海洋开发、精确制导、生物医学、地质勘探等许多领域都需要对多个反射点（目标）进行定位，在一个平面极坐标系中，要确定一个点的位置，需获得其距离和方位两个参数，同时存在多个目标时还需要解决时延和方位的配对问题。本论文着重解决水下自导武器中的多目标定位技术。

随着水下对抗技术和装备的发展，自导鱼雷所面临的声学环境日益复杂，对多目标定位能力的需求也更加迫切。首先，鱼雷攻击的目标往往是一个舰艇编队，由于自导作用距离的增加，有可能在其搜索扇面内出现多个目标，这就要求鱼雷具有同时跟踪多个目标的能力，进而优选攻击目标；其次，即使攻击单个目标，目标也往往会采取施放干扰器或诱饵的方式进行对抗，在这种对抗环境中，自导扇面内有多个辐射源或反射体，也相当于是多目标。如果不能同时对目标和诱饵进行定位跟踪，即使具有对单一目标真伪的识别能力，也可能因弹道的不合理性而损失航程或丢失真目标，甚至有可能在搜索中再次被同一诱饵所诱骗。另外，随着舰艇防护能力的加强，要求鱼雷具有打击要害部位、垂直命中（定向爆破）的能力，而要做到这两点必须掌握目标的大致形状及姿态，即把目标看作是一个有体积的目标，而不是简单的点目标。描述体积目标的简单有效方法之一是建立多亮点模型，而同一目标上的多个亮点对自导系统而言也相当于多目标。只要实现多亮点的定位，就可估计目标的姿态、形状和要害部位，配合一定的弹道可垂直命中目标要害部位。

鉴于现代水下战对多目标定位技术的迫切需求，国外现役的新型鱼雷中已普遍采用了多目标定位技术，例如：瑞典的 TP2000、法国的海鳐均具有同时定位、跟踪多个目标的能力，英国的矛鱼在近距离能对目标的多个亮点进行定位，进而获得目标形状和尺度信息。我国在这方面与西方发达国家还有相当大的差距，严重影响了我军在复杂对抗环境中赢得水下局部战争的能力。

一方面声自导基阵的尺寸受到鱼雷体积的限制，另一方面工作频率的提高又受限于海水对声波的吸收特性，因此鱼雷自导系统无法通过增大孔径来提高定向精度和分辨能力，从而使水下多目标定位与空中的雷达相比具有特殊性和更大的难度。本论文的研究目的是寻求适于在水下自导兵器中应用的多目标定位相关技术，通过计算机仿真研究其性能特点，利用水池实验为该项技术的工程应用奠定基础。本项研究成果不仅可直接用于声纳、鱼雷声自导、水下武器

系统、水声对抗和反对抗、水声侦察、海洋地质勘探等水下海洋环境,还可用于雷达、通信、地震和生物医学工程及其它领域。

## § 1.2 多目标定位技术的进展

多目标定位技术在早期的雷达中就已经得到应用,这是由于雷达的工作原理和环境所决定的。雷达的探测距离远、覆盖范围大、目标比较密集,对多目标定位的需求迫切;雷达的波束较窄,方位分辨力高;雷达的脉冲窄,距离分辨能力强;随着相控阵雷达的出现,雷达的数据率进一步提高,多目标定位跟踪能力也得到大幅度的提高。现役相控阵雷达已经能对几十甚至上百个目标同时进行定位和跟踪。因此,多目标定位在雷达中已得到较好的解决,当前相关的研究热点已经转到动目标逆合成孔径成像、运动平台多目标跟踪等方面。

但是雷达中这种基于波束和脉冲分辨的多目标定位技术在水下声纳中的应用却不理想。首先,声纳的探测距离相对较近,为提高作用距离,往往工作在低频(海水的吸收损失小),而有限的阵列尺寸对低频的有效孔径小,波束宽度大,导致方位分辨能力差;其次,由于吸收损失和信道介质不均匀导致的声线弯曲,使水中声信道的衰减比雷达波在空气中的传播衰减要严重得多。为了提高处理增益,声纳中常用长脉冲进行时间累积,因此其距离分辨能力有限。由于水声信道的频率选择性衰弱很严重,宽带信号很难匹配,因此在雷达中常用的脉冲压缩技术在声纳中使用的效果也不好。另外,声纳的数据率很低,几秒甚至几十秒才能获得一次回波,加上信道的时变和空变,前后回波间波形的相关性较差,一般均要求在单次回波内完成检测和参数估计,给多目标定位增添了困难。由于声纳的这些特点,要求方位和距离两维都实现高分辨,突破波束宽度和脉冲宽度的常规分辨率限制,这样才能确保多目标定位技术在水下的实用性。鉴于本文的应用背景是水下自导武器,研究的重点是主动声纳的多目标定位技术,暂不涉及被动声纳的多目标定位。

如前所述,多目标定位技术涉及到多目标定向、多目标测距、多目标多参数的配对、方位和时延的联合估计等多个方面,各项技术由于其需求背景不同、受关注的程度不同,导致各自的发展也不平衡。下文对各方面的技术进展情况作一简要介绍。

### § 1.2.1 多目标高分辨定向技术的进展

定向是雷达、声纳、导弹、鱼雷等设备最基本的功能,定向精度和方位分辨的性能直接影响这些装备的使用效果,因此得到广泛的重视。最初的定向大多是基于波束形成的,利用波束扫描或多个波束输出的幅度差异来确定目标方



位。这些方法的优点是易于实现,尤其是便于模拟系统的实现。但其致命的弱点是探测多个目标时的方位分辨能力差,它在方位上区分两个等强度目标的最小极限是波束的 3dB 宽度(称为瑞利限)。当两个目标的方位差小于一个波束宽度时,系统只能估计出一个方位。

针对传统定向技术在方位分辨能力上的缺陷,人们提出了一系列可以使方位分辨能力突破瑞利限的定向新方法,我们称之为高分辨方位估计方法。最早的高分辨方法是二十世纪六七十年代提出的自回归(AR)模型法<sup>[1]</sup>,其中典型的是 Burg 提出的最大熵法<sup>[2]</sup>。但高分辨定向方法真正得到关注是在七十年代末 Schmidt 提出了著名的 MUSIC 方法<sup>[3]</sup>之后,大家开始认识到高分辨定向方法的巨大潜力,吸引了一大批信号处理工作者从事这方面的研究,涌现出多种新的方法,如 ESPRIT、加权子空间拟合、交替投影等。整个高分辨定向技术的发展历程见表 1-1。

表 1-1 高分辨定向技术的发展过程示意图

理论研究	仿真研究	实验研究	DSP 实现	实际应用
◇ 高分辨定向算法理论研究  ◇ 阵列处理相关技术研究,如解相干方法、信源数目判定方法等  ◇ 高分辨定向方法统计性能分析研究,如 CRB 分析等	◇ 理想条件下不同算法性能比较  ◇ 非理想模型下高分辨定向算法性能分析比较研究  ◇ 高分辨定向算法性能评估,影响估计性能主要参数间关系	◇ 建立实验系统  ◇ 阵列误差分析、误差校准方法研究  ◇ 应用环节中实际问题的研究,如不等强度源问题、基于多波束系统的波束域高分辨定向、宽带信号的高分辨定向	◇ DSP 硬件实验系统研制  ◇ 高分辨定向技术的实时性研究  ◇ 快速、并行算法研究	◇ 超分辨雷达  ◇ 火控声纳  ◇ 目标尺度识别

经过二十多年的发展历程,从 80 年代的理论方法及性能研究到 90 年代的实验研究和 DSP 系统实现,高分辨定向技术已逐步走向完善和成熟,在某些领域已经开始得到应用。

### § 1.2.2 多目标时延估计技术的进展

首先需要明确一下时延估计的概念,水下信号处理中的时延估计包含两方面的内容:一是估计一个或多个目标回波到达同一接收点时相对于发射信号的时间延迟(time delay);二是估计同一个源辐射的信号到达两个接收点的时间

差(time difference)<sup>[4]</sup>。前者反映的是目标径向距离,常用于雷达和主动声纳;后者直接反映的是辐射源所处的相对于接收阵列的方位,在一定条件下通过适当的折算也可得到辐射源的距离<sup>[5]</sup>,常用在大孔径稀布阵的被动宽带系统中,如潜艇的舷侧阵声纳。由于本文的研究内容是主动声纳的多目标定位,关心的是多目标的距离估计,因此,后文中提到的时延估计均指的是前一种情况。对第二种情况感兴趣的读者可参阅文献[6]和[7]。

因为待估计的时延是回波相对于发射信号的时间延迟,最直接的估计方法是互相关法,即求出发射信号与回波的互相关函数,其峰值位置反映了回波时延。与它相类似的还有匹配滤波法,两者的机理相似,只是处理方法不同。这一类方法的时延分辨率受发射信号模糊度图的限制,约为信号带宽的倒数,对CW脉冲等简单信号,其分辨率大致与发射信号脉冲宽度相当。

为了提高时延估计的分辨率,人们提出了解卷积的方法,它把回波看作是发射信号与信道(包括目标)的卷积,而发射信号已知、回波可采集得到,因此只需要通过反卷积运算即可估计出信道的冲激响应,进而获得时延估计。根据反卷积算法的不同,这类方法包括最小平方反卷积<sup>[8]</sup>、预测误差滤波、频域反卷积<sup>[9]</sup>等多种方法。解卷积类方法的分辨率在理论上可以达到序列的采样间隔,在密集采样时可得到很高的分辨率。但是它有一个限制,要求发射信号必须是最小相位信号,否则会使反滤波器不稳定,导致信道冲激响应的估计出现拖尾而影响时延的正确估计。

倒谱作为一种同态处理的手段在地质勘探、语音分析等方面有一些成功的应用,也可利用其解卷积的能力进行时延估计<sup>[9]</sup>。但倒谱反映的是多个反射点两两之间的时延差,当反射点数目较多时很难反推出各反射点的时延参数。另外,倒谱的处理增益较低,要求回波的信噪比很高。因此,倒谱用于时延估计并不实用。

在频域反卷积的基础上,作者于1995年提出了时延频率估计的方法<sup>[10]</sup>,其时延分辨率在理想条件下可突破时间序列采样间隔的限制,成为一种高分辨的时延估计方法。该方法把信道的传递函数看作一特殊序列进行频谱分析,可以借用大量成熟的频谱估计方法<sup>[11]</sup>,给时延估计提供了一条新路。但是这类方法中含有反卷积的步骤,因而和解卷积类方法一样,要求发射信号为最小相位信号。此外该方法对信噪比和发射信号带宽也有一些限制。

1985年,M. Bruckstein和Tie-jun Shan等人将空间处理中的MUSIC方法推广到时延估计中<sup>[12]</sup>,成功地分辨出多个重叠的回波。但它要求有多次独立的样本以形成一个列满秩的相关矩阵。作者对它进行了改进<sup>[10]</sup>,利用阵列中多个阵元接收到的信号构成时延协方差矩阵,当目标方位不等时可在单次回波内实现时延MUSIC算法。依此类推,阵列处理中基于特征分解的方位估计方法几乎



都可以推广到时延域,形成一大类时延特征结构法。这类方法突出的优点是时延分辨率特别高,远小于时间序列的采样间隔,在短数据条件下特别有效。同时其分辨率不受信号带宽的限制,也不要求最小相位信号。它的缺点是运算量大,还存在相干源问题。

### § 1.2.3 多目标多参数联合估计技术的进展

一个目标有多个参数,如方位、距离、速度等。对于多个目标,在每一项参数域上均可估计出与目标数目相等的参数,不同参数域上的参数怎样与同一目标相关联就需要参数的联合估计。

联合估计可通过两种途径来实现:一是在两个一维估计的基础上用一定的配对算法将两维参数关联起来;二是直接采用二维参数估计方法实现真正的联合估计。

如前节所述,多个目标单一参数的估计理论、方法都已很成熟,如多目标方位估计、多目标时延估计、多个正弦波的频率估计等。利用两组单一参数的估计结果,配合一定的配对算法,可以间接地实现两维参数联合估计。这种基于配对的联合估计方法具有运算量较小、组合灵活多样、估计结果稳健等优点,在联合估计中已有一些应用<sup>[13]</sup>。这里的关键是有效的配对算法,配对算法也多种多样,有的利用回波强度估计结果<sup>[14]</sup>,有的利用二维方向矢量与噪声子空间的距离<sup>[15]</sup>,有的利用两个一维的信号子空间的运算关系<sup>[16]</sup>。但是现有的这些配对算法在低信噪比场合性能均较差,有的配对算法本身包含矩阵求逆等大运算量、不太稳健的步骤,在工程应用中受到限制。

早期的二维参数估计方法是將一些典型的一维估计方法扩展到二维,如多维最大似然(ML)、二维最大熵(ME)、二维最小方差(MV)和二维线性预测(LP)等方法<sup>[17]</sup>,这类方法归结为多维寻优或多维搜索,运算量巨大,很难实用。R. Roy 提出的 ESPRIT 方法因其无需搜索而在一维参数估计中得到广泛应用。对于二维同时具有旋转不变性的联合估计问题,如均匀平面阵的方位角和俯仰角的联合估计,可采用二维 ESPRIT 估计方法<sup>[18]-[20]</sup>。如果参数不具有旋转不变性,可以通过一定的变换使它具有旋转不变性。例如,时延参数在时域上不具有旋转不变性,作 FFT 转换到频域后就具有了旋转不变性,可以用二维 ESPRIT 估计方法<sup>[21]</sup>。由于 ESPRIT 方法只用特征值就可作一维的参数估计,利用这一特点,巧妙地构造相关矩阵,使广义特征分解后的特征值反映某一维参数,特征矢量反映另一维参数,无需配对,只需要一次广义特征分解就可以完成两维参数的联合估计<sup>[22]-[25]</sup>,而且只要求其中的一维参数具有旋转不变性。Peter Strobach 用三维 ESPRIT 方法联合估计多目标的方位角、俯仰角和载波频率<sup>[26]</sup>,

把 ESPRIT 方法进一步推广到多维参数的联合估计。

### § 1.3 多目标定位技术实验研究的进展

如上节所述,多目标定位主要涉及方位和时延参数的联合估计,这两个参数的估计理论应用于工程实践时都会遇到无法回避的实际问题。

时延估计的对象是收发波形(通常是包络)之间的时间延迟,往往假设接收波形与发射波形完全相似,只相差一个时延。而在实际环境中,发射波形受到发射、接收系统有限带宽、通带不完全平坦、信道衰落等影响会发生畸变,接收波形与发射波形的这种失配会导致时延估计的误差和分辨能力的下降。

方位估计是建立在阵列接收基础上的,因此方位估计又称为阵列信号处理。阵列信号处理中往往假设阵列流形是准确已知的,一般假设各传感器传输特性一致、各通道间无耦合、阵元几何位置与设计完全一致,而在实际环境中,不可避免地存在阵元特性不一致、机械安装误差、阵元间耦合、预处理通道不一致等与理想阵列有出入的现象,统称为阵列误差。阵列误差的存在,对常规波束形成的影响主要是旁瓣级抬高、主瓣展宽,而对高分辨定向方法的影响是十分严重的,不仅使分辨性能急剧下降,而且估计误差也随之大增<sup>[27]</sup>。

从上世纪 80 年代末开始,在将高分辨阵列处理技术应用于工程实践时,大家发现阵列误差是一个必须解决的问题,就此开展了超声、雷达的高分辨定向实验,提出了相应的解决方案。这些方案归结起来大致有三种:①离线阵列校准方法。它事先对阵列误差进行测量和估计,在阵列信号处理前对阵列误差作出补偿<sup>[28]~[32]</sup>。其特点是简单易行、运算量小。②在线自校正方法。它用迭代的方法使某种代价函数最小来同时求得阵列误差和目标方位<sup>[33]~[38]</sup>,它的特点是对阵列的适应性好,但算法复杂、运算量大。③稳健的阵列信号处理方法。这类方法对阵列误差不太敏感,直接处理带有阵列误差的数据即可获得较高的分辨率<sup>[39]~[44]</sup>,但它并没有消除阵列误差,其分辨率和估计精度会有所下降。

国内多家单位近十年来开始阵列信号处理的实验研究,西安电子科技大学进行了空气声纳的有源校正实验<sup>[46]</sup>,西北工业大学在空气声纳实验中研究了高分辨阵列信号处理的性能<sup>[45]</sup>、在水下声纳实验中研究了阵列误差的综合补偿<sup>[47]</sup>,南京航空航天大学在相控阵雷达试验中研究了在线自校正方法<sup>[48]</sup>。

高分辨多目标定位技术要应用于实际环境也必须解决上述波形畸变、阵列误差等实际问题,因此迫切需要开展高分辨多目标定位实验研究。国内外报道较多的是多目标跟踪试验,它们都是在多目标定位参数已经获得的基础上研究数据关联、航迹跟踪,与本文的研究内容关系不大,真正进行多目标定位实验的文献很少。作者所在课题组在“九五”期间以消声水池为依托,建立了水下

多目标定位实验系统,开展了 2~4 个目标的定位实验,取得了较好的效果。

## § 1.4 本文的主要工作

本着先广泛后深入、先理论后实验的原则,本文的主要工作及各章节安排如下:

第一章绪论。介绍课题相关背景知识,根据掌握的资料对国内外在多目标定位相关技术领域的进展情况进行了综述,指出当前该领域的一些研究热点。

第二章问题的描述。介绍了本文对变量、矢量、矩阵等数学符号的表述。本文的多目标定位是基于主动声纳回波的,本章给出了可以同时反映多目标的时延、方位、多普勒频移信息的回波信号模型。

第三章基于参数配对算法的多目标定位技术。首先介绍了有望用于多目标定位的几种方位估计方法和两种时延估计方法,以及强度配对算法。然后设计了四种典型的多目标分布条件,通过大量的计算机仿真给出了基于配对的多目标定位方法的性能,并对多目标定位的实用性能、不等强度目标的定位等问题进行了专门的讨论。

第四章无需配对的多目标定位技术。提出了一种时延-方位联合估计方法 ESPRIT-Corr,它借鉴了旋转子空间不变的思想,通过构造与常规 ESPRIT 不同的相关矩阵,用广义特征值估计多目标的方位,而用广义特征矢量估计多目标的时延(距离),同时方位和时延参数可自动配对,并且整个算法可在单次回波内完成。计算机仿真结果验证了所提方法的有效性。另外还针对实际应用中普遍存在的的多强度目标源的问题,提出了一种修正算法。

第五章多目标定位水池实验研究。介绍了作者构建的一套多目标定位水池实验系统,它可以同时模拟 4 个目标的方位、距离、径向速度等参数。对实验研究中的一个主要问题——阵列误差抑制进行了探讨,分析了几种常见的误差抑制方法的作用机理,并用水池实验数据验证了理论分析的正确性。开展了双目标、三目标、四目标的水池实验,分别用第三章、第四章介绍的两类方法对实验数据进行了处理和分析,获得较好的定位结果。

最后给出全文总结,并指出有待进一步研究的工作。

## § 1.5 本章参考文献

- [1] H. Akaike, "Power Spectrum Estimation through Autoregressive Model Fitting", Ann. Inst. Statist. Math., Vol.21, pp.407-419, 1969
- [2] J. Burg, "Maximum Entropy Spectral Analysis", Ph.D. dissertation, Stanford University, 1975
- [3] R. O. Schmidt, "A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation", Ph.D. Dissertation, Stanford University, 1981
- [4] G. C. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing," IEEE Trans on ASSP, vol.29, No.3, June 1981
- [5] A. H. Quazi, "An overview on the time delay estimation in active and passive systems for target localization," IEEE Trans. on ASSP, vol.29, No.3, June 1981
- [6] 邱天爽, "几种基本时间延迟估计方法及其相互关系", 大连理工大学学报, 第 36 卷第 4 期, 1996 年 7 月
- [7] 马雯, "水下目标被动定位方法研究", 西北工业大学硕士论文, 2000.3
- [8] 周耀华, 汪凯仁, 《数字信号处理》, 复旦大学出版社, 1992.6
- [9] 张群飞, 《水下目标高分辨参数估计》, 西北工业大学硕士论文, 1993.3
- [10] 张群飞, 黄建国, 谢一清, "时延估计的高分辨方法", 声学学报, 第 20 卷第 3 期, 1995 年 6 月, pp.211-217
- [11] 黄建国, 武延祥, 杨世兴译, 《现代谱估计》, 科学出版社, 1994.5
- [12] M. Bruckstein, Tie-jun Shan, and T. Kailath, "The Resolution of Overlapping Echos", IEEE Trans. On ASSP, Vol.33, No.12, 1985, pp.1357-1367
- [13] 邹理和, 殷林, "信号空间分析与二维正弦参量估计", 电子学报, 第 15 卷第 1 期, 1988.1
- [14] 罗景青, "常规雷达目标高分辨技术研究", 西安电子科技大学博士论文, 1989
- [15] 唐斌, 肖先赐, "空间信号二维到达方向分离估计", 电子科技大学学报, 第 27 卷第 3 期, 1998.6
- [16] 王建英, 陈天麒, "频率、二维到达角和极化联合估计", 电子学报, 第 27 卷第 11 期, 1999.11
- [17] D. E. Dudgeon, R.M. Mersereau, Multi-dimensional Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1984
- [18] A.J.vanderVeen, P.B.Ober, and E.F.Deprettere, "Azimuth and Elevation



- Computation in High Resolution DOA Estimation", IEEE Trans. on SP, Vol.40, No.7, July 1992, pp.1828-1832
- [19] 葛利嘉, 陈天麒, 黄香馥, “多信号波长与方位的联合估计及其全局优化算法”, 电子学报, 第 21 卷第 10 期, 1993.10, pp.69-76
- [20] Mathews C P, Zoltowski M D., “Eigenstructure Techniques for 2-D Angle Estimation with Uniform Circular Arrays”, IEEE Trans. on SP, Vol.42, No.9, Sep. 1994, pp.3295-3306
- [21] A.J.van der Veen, M.C.Vanderveen, and A.Paulraj, “Joint Angle and Delay Estimation Using Shift-Invariance Techniques”, IEEE Trans. on SP, Vol.46, No.2, Feb. 1998, pp.405-418
- [22] M.D.Zoltowski, M.Haardt, and C.P.Mathews, “Closed-Form 2-D Angle Estimation with Rectangular Arrays in Element Space or Beamspace via Unitary ESPRIT”, IEEE Trans. on SP, Vol.44, No.2, Feb. 1996, pp.316-328
- [23] 葛利嘉, 陈天麒, “利用旋转不变技术实现方向/频率联合估计”, 电子学报, 第 24 卷第 12 期, 1996.12, pp.32-35
- [24] 廖桂生, 保铮, “未知阵列流形条件下波达方向—多普勒频率盲估计技术”, 电子科学学刊, 第 19 卷第 2 期, 1997.3
- [25] 张群飞, 黄建国, 保铮, 用子空间旋转不变法同时估计水下多目标的距离和方位, 声学学报, 第 24 卷第 4 期, 1999.7, pp.400-406
- [26] Peter Strobach, “Total Least Squares Phased Averaging and 3-D ESPRIT for Joint Azimuth-Elevation-Carrier Estimation”, IEEE Trans. on SP, Vol.49, No.1, Jan 2001, pp.54-62
- [27] B.Friedlander, “A Sensitivity Analysis of the MUSIC Algorithm”, IEEE Trans. on ASSP, Vol.38, No.10, Oct. 1990, pp.1740-1751
- [28] Y. Rockahand, P. M. Schultheiss, Array Shape Calibration Using Sources in Unknown Location-Part I: Far Field Sources, IEEE Trans. on ASSP, Vol.35, No.3, 1987, March, pp.286-299
- [29] A. J. Weissand, B. Friedlander, Eigenstructure Methods for Direction Finding with Sensor Gain and Phase uncertainty, Circuits System & Signal Processing, Vol.9, No.3, 1990, March, pp.271-300
- [30] 张群飞, “水下目标高分辨参数估计”, 西北工业大学硕士论文, 1993.3
- [31] 贾永康, 保铮, 吴涸, 一种阵列天线阵元位置、幅度及相位误差的有源校正方法, 电子学报, 第 24 卷第 3 期, 1996.3, pp.47-52
- [32] 章宏, 周希朗, 陈荆花, 阵元位置误差和通道不一致性的校正方法, 上海交通大学学报, 第 35 卷第 1 期, 2001.1, pp.118-122



- [33] Simon Haykin, "Advances in Spectral Analysis and Array Processing", Prentice-Hall, 1991
- [34] 吴涸, 贾永康, 保铮, "基于累量的方向估计与阵列校正", 电子学报, 第 25 卷第 4 期, 1997.4, pp.77-81
- [35] 郭振民, 毛健, 陈天麒, 信号频率方向及模型误差联合估计的优化算法, 扬州大学学报·自然科学版, 第 1 卷第 1 期, 1998.2, pp.61-65
- [36] Chong-Meng Samson See and Boon-Kiat Poh, "Parametric Sensor Array Calibration Using Measured Steering Vectors of Uncertain Locations", IEEE Trans. on SP, Vol.47, No.4, April 1999, pp.1133-1137
- [37] 王安义, 保铮, 张林让, "阵列估计误差和扰动误差引起方向图畸变的校正", 西安电子科技大学学报, 第 26 卷第 5 期, 1999.10, pp.614-617
- [38] Pascal Chargé, Yide Wang, Joseph Saillard, "A DIRECTION FINDING METHOD UNDER SENSOR GAIN AND PHASE UNCERTAINTIES", ICASSP'2000, San Diego, USA, May 2000
- [39] 廖桂生, 保铮, 王波, "基于四阶累量的 MUSIC 算法对阵元误差的稳健性分析", 通信学报, 第 18 卷第 8 期, 1997.8, pp.33-38
- [40] 张林让, 廖桂生, 保铮, "用投影预变换提高自适应波束形成的稳健性", 通信学报, 第 19 卷第 11 期, 1998.11, pp.12-17
- [41] Magnus Jansson, A. Lee Swindlehurst and B. Ottersten, "Robust Weighted Subspace Fitting in the Presence of Array Model Errors", ICASSP'1998, Seattle, USA, May 1998
- [42] 熊维族, 陈长龄, "基于信号的多谱勒特性的盲自适应波达方向估计法", 四川师范大学学报(自然科学版), 第 24 卷第 1 期, 2001.1, pp.61-64
- [43] 秦洪峰, 黄建国, 张群飞, "基于子空间类法的阵列幅相误差校正方法", 计算机工程与应用, 第 37 卷第 19 期, 2001.9, pp.55-57
- [44] 秦洪峰, 黄建国, 张群飞, "阵列幅相误差条件下的目标方位估计", 应用声学, 第 21 卷第 3 期, 2002.5, pp.6-10
- [45] 李斌, 孙超, 黄建国, "空气声纳实验数据的高分辨处理", 西北工业大学学报, 第 14 卷第 1 期, 1996.2, pp.54-58
- [46] 贾永康, 王亚军, 刘茂仓, "超声波阵列信号处理实验系统实现技术", 西安电子科技大学学报, 第 23 卷第 2 期, 1996.6, pp.218-223
- [47] 陈建峰, 黄建国, "阵列误差校正的综合校正补偿法", 声学学报, 第 23 卷第 6 期, 1998.11
- [48] 俞靖, 鲍明, "用 MUSIC 法确定声源频率和方位时误差的校正方法", 南京航空航天大学学报, 第 30 卷第 6 期, 1998.12, pp.680-684

## 第二章 问题的描述

在对多目标定位技术展开讨论之前,首先有必要给出相关的数学模型和本文涉及的符号表示。在后面的章节中,如无特殊说明,其含义均以本章的为准。

### § 2.1 符号定义

$(\cdot)^T$	矩阵、矢量转置运算
$(\cdot)^H$	矩阵、矢量共轭转置运算
$\text{Re}\{\cdot\}$	取实部
$\text{Im}\{\cdot\}$	取虚部
$E\{\cdot\}$	求数学期望
$\text{tr}\{\cdot\}$	矩阵的迹
$\text{diag}\{\mathbf{x}\}$	一个对角矩阵, 对角线元素为矢量 $\mathbf{x}$ 的元素
$\mathbf{I}$	单位矩阵
$\tilde{\mathbf{X}}$	$\mathbf{X}$ 的复包络
$\mathbf{x}_n$	矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 $n$ 列
$x_n$	矢量 $\mathbf{x}$ 的第 $n$ 个元素
$x_{ij}$	矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 $i$ 行第 $j$ 列的元素
$\hat{P}$	$P$ 的估计值

黑体大写英文字母、大写希腊字母表示矩阵, 如  $\mathbf{A}$ 、 $\Gamma$ ;

小写英文字母、希腊字母表示变量。如  $\omega$ 、 $f$ ;

黑体小写英文字母表示矢量。如  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{e}$ ;

### § 2.2 模型假设条件

在实际系统中实现多目标定位涉及到的因素很多,而且很多因素的内在规律很复杂,至今尚无较为准确的模型来描述它。为了便于仿真研究,本文对多目标定位中的仿真模型作了以下合理的简化或假设:

- ◆ 接收信号为窄带信号,其特性可以用相应的基带包络来描述;
- ◆ 接收阵位于信号源的远场,可近似认为接收到的信号为平面波,窄带信号包络在各个阵元间产生的时延可以忽略;
- ◆ 考虑到本文的应用背景为鱼雷自导系统,作用距离在 2000 米以内,故假设水声信道为一线性系统,忽略波形在信道中的畸变;
- ◆ 噪声为加性的零均值高斯白噪声,且各阵元间接收的噪声互不相关。

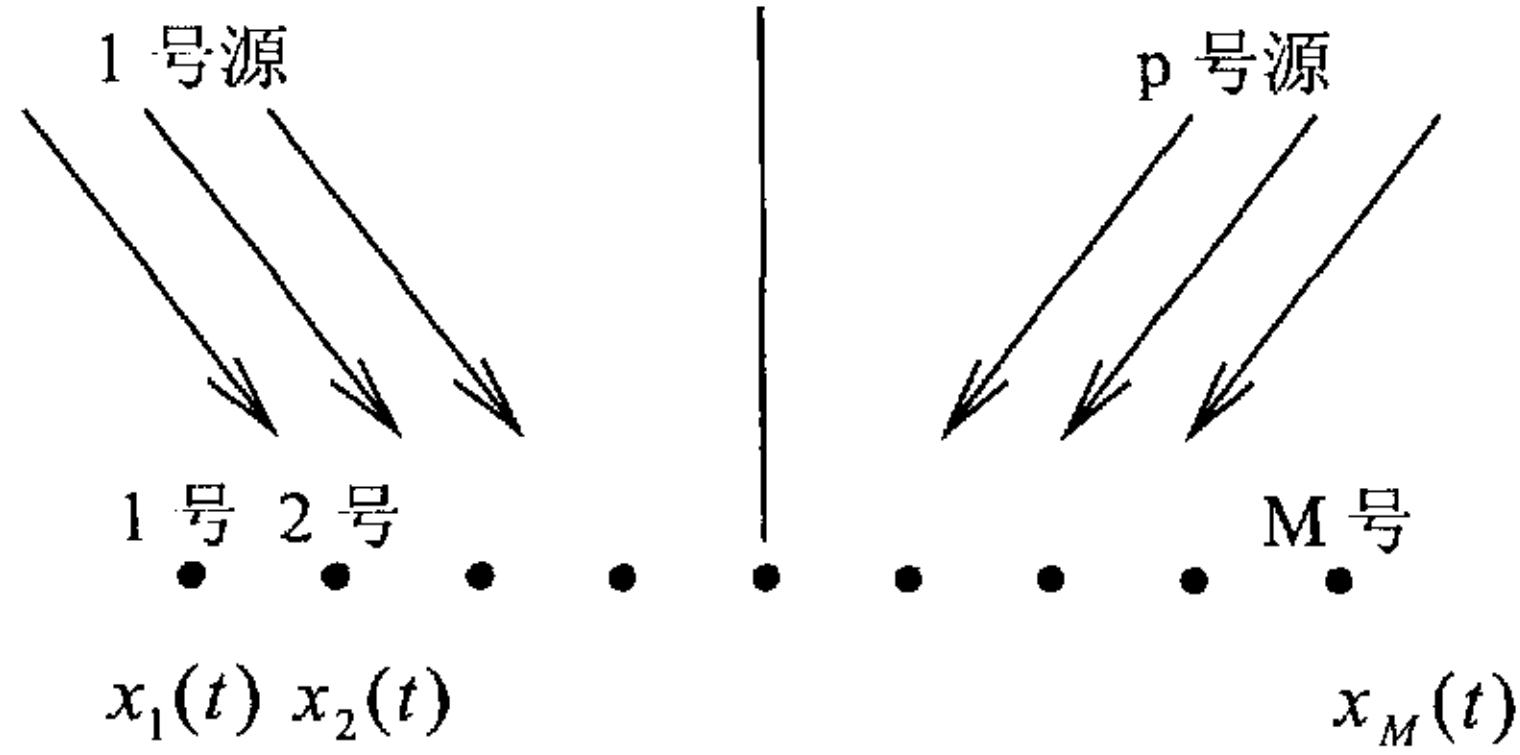
除了专门研究阵列误差的第五章以外,其它章节涉及到的仿真模型均假设阵列是理想的,即:

- ◆ 阵元的几何尺寸远小于入射平面波的波长 $\lambda$ ,且阵元无指向性,可近似认为阵元是点元,且空间增益为1;
- ◆ 阵元间相互影响可忽略不计;
- ◆ 阵元位置不存在安装误差。

### § 2.3 多目标多参数联合模型

主动声纳可以估计的目标参数主要包括距离、方位、径向速度,因此多目标多参数联合模型也应该包含这三个参数。

假设接收阵列是一个间距为 $d$ 的 $M$ 元均匀线列阵,发射信号包络为 $s(t)$ ,载波波长为 $\lambda$ ,有 $P$ 个目标(反射点),如下图所示。



回波的复包络为

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^p s(t - \tau_i) b_i \exp[j(2\pi f_{di}t + \varphi_i)] \mathbf{a}^T(\theta_i) + \mathbf{n}(t) \quad (2.1)$$

可表示为矩阵形式

$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{S}^T(t) \Phi \mathbf{A}^T(\theta) + \mathbf{N}(t) \quad (2.2)$$

其中

$\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$  是一个  $M \times P$  的 Vandermonde 矩阵,称为方向矩阵,它的每一列  $\mathbf{a}(\theta_i)$  为阵列方向矢量。对于均匀线列阵,

$\mathbf{a}(\theta_i) = \{1, \exp(-j\omega_i), \dots, \exp[-j(M-1)\omega_i]\}^T$ , 其中  $\omega_i = 2\pi \frac{d \sin(\theta_i)}{\lambda}$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  为各

源的空间角频率;

$\Phi = \text{diag}[b_1 \exp(j\varphi_1), b_2 \exp(j\varphi_2), \dots, b_p \exp(j\varphi_p)]$ ,  $b_i, \varphi_i$  分别为各源的强度和初相位;

$\mathbf{S}(t) = [s(t - \tau_1) \exp(j2\pi f_{d1}t), s(t - \tau_2) \exp(j2\pi f_{d2}t), \dots, s(t - \tau_p) \exp(j2\pi f_{dp}t)]$  为归一化回波包络时延频移矩阵, 它的第  $i$  列  $s(t - \tau_i) \exp(j2\pi f_{di}t)$  为第  $i$  个源的包络时延频移矢量,

$\mathbf{N}(t)$  为噪声矩阵。

对于一般的多目标定位, 只需要通过估计目标的方位和时延进行定位, 而没有必要考虑各目标的多普勒差异, 因此所用的模型可作简化, 不妨在式(2.1)中令

$f_{di} = 0$ , 得

$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \sum_{i=1}^p s(t - \tau_i) b_i \exp(j\phi_i) \mathbf{a}^T(\theta_i) + \mathbf{n}(t) \quad (2.3)$$

写作矩阵形式

$$\tilde{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{S}(t) \Phi \mathbf{A}^T(\theta) + \mathbf{N}(t) \quad (2.4)$$

其中  $\mathbf{S}(t) = [s(t - \tau_1), s(t - \tau_2), \dots, s(t - \tau_p)]$  为归一化回波包络时延矩阵, 它的第  $i$  列  $s(t - \tau_i)$  为第  $i$  个源的包络时延矢量。

## § 2.4 仿真波形举例

取发射波形为梯形调制的单频信号, 脉冲宽度 75ms, 载波频率 30KHz。它的实包络如图 2-1 所示。设水下存在三个等强度的目标, 其时延、方位参数见表 2-1。其中相邻目标的时延间隔约为常规互相关方法的 3/4, 相邻目标的方位间隔约为常规波束方法的一半。

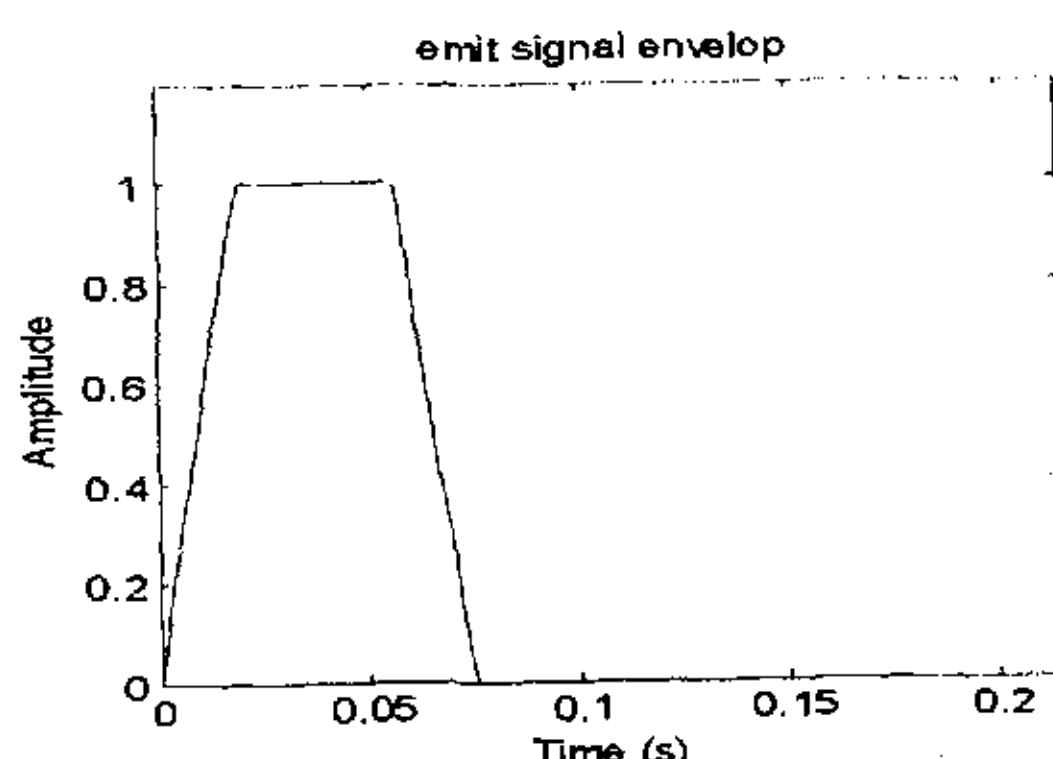


图 2-1 发射信号实包络

表 2-1 目标的真实参数

	时延(距离)	方位
目标 1	0.902 秒	-3.67 度
目标 2	0.933 秒	0.00 度
目标 3	0.968 秒	3.42 度

设定合适的距离门(本例中约为 0.22 秒)使其包含三个目标的反射信号, 用一間距为半波长的 16 元均匀线列阵来接收, 对距离门内复包络均匀采样 100 点(采样频率约为 455Hz), 得到  $100 \times 16$  的数据矩阵。当峰值信噪比为 20dB 时所得的各阵元

输出复包络的实部和虚部见图 2-2，相应的实包络见图 2-3，两图中的每条曲线表示一个阵元的接收信号序列。

从图 2-3、图 2-3 中可以看到，三个目标的回波已经相互重叠在一起，在时域上很难区分。如果对阵列输出数据直接做常规波束形成，则可得到如图 2-4 所示的密集波束扫描结果（ $-10^\circ \sim 10^\circ$ ，每隔  $0.1^\circ$  形成一个波束）。从图中可以看出用波束形成的方法无法区分出三个目标的方位。同样的，如果对每个阵元的接收信号做与发射信号的互相关，再对各阵元得到的互相关函数求平均得到图 2-5。从图中可以看出用常规互相关方法很难区分出三个目标的时延。

本文的主要任务就是如何用各种联合估计方法把这种在时域和空域均不可分的多目标回波分辨出来，并给出各目标的方位和距离参数，实现多目标定位。

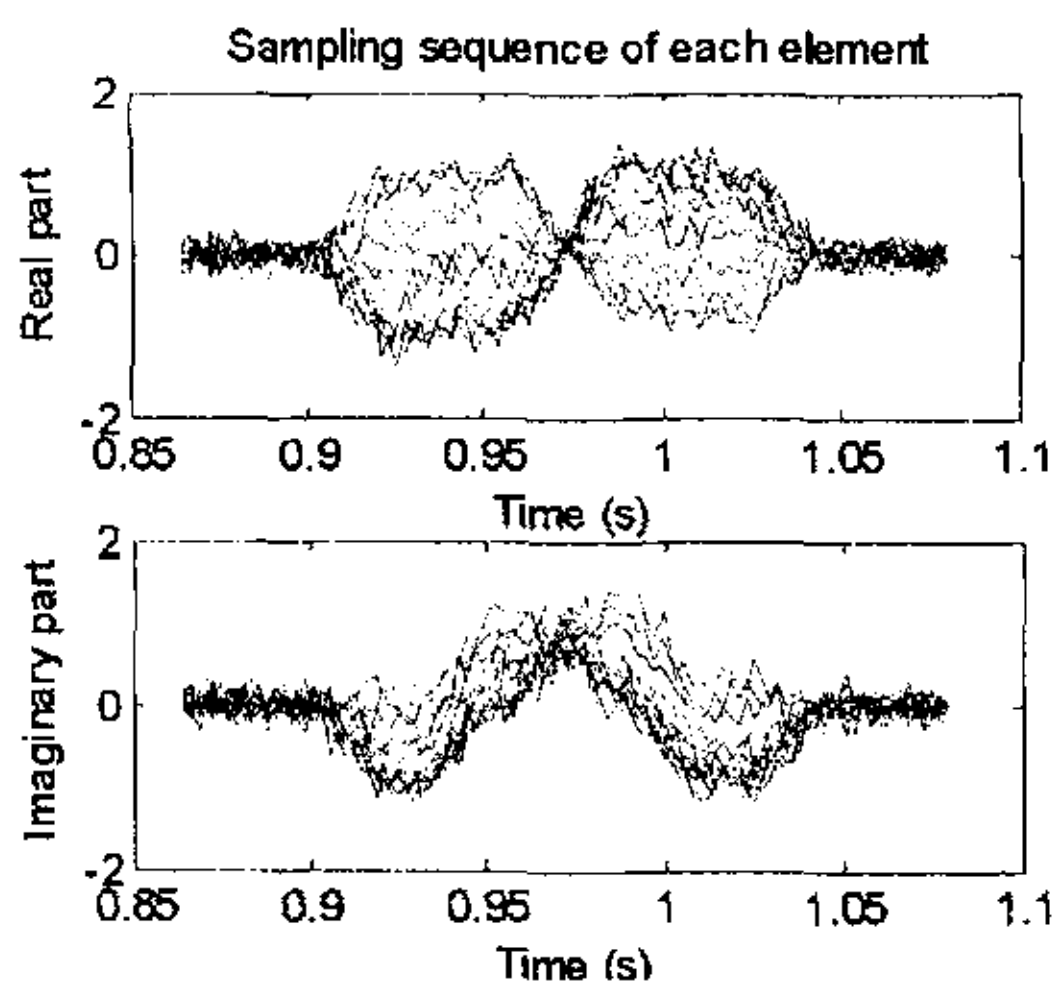


图 2-2 阵元输出复包络的实部和虚部

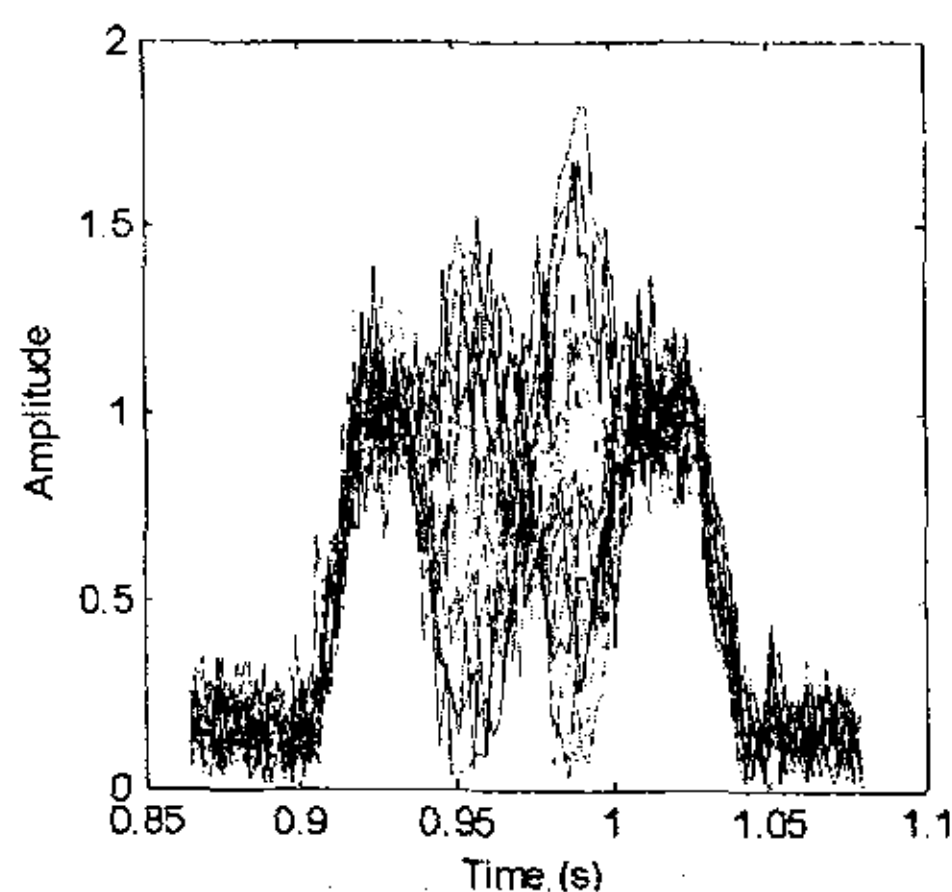


图 2-3 阵元输出的实包络

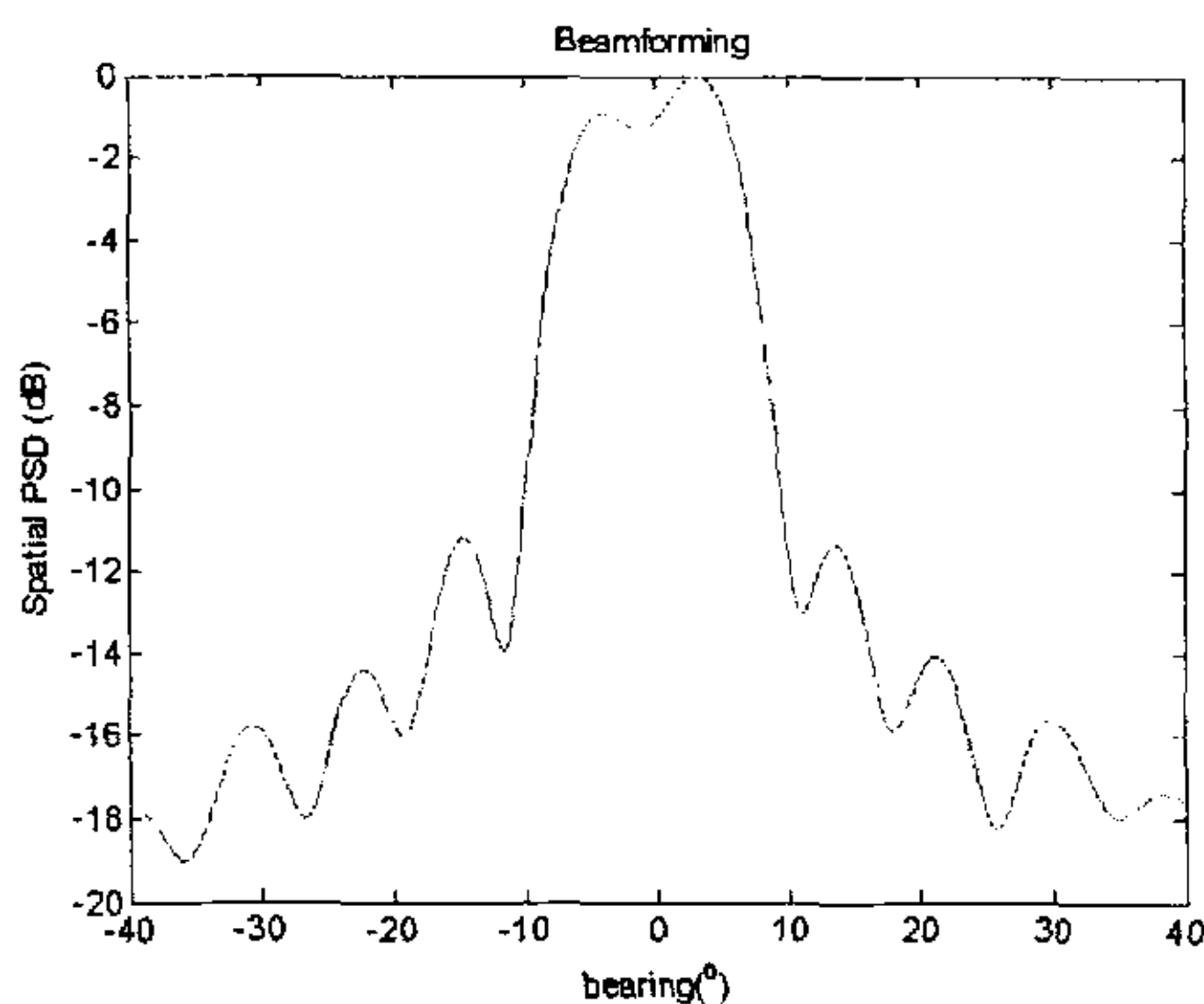


图 2-4 阵列输出的密集波束扫描结果



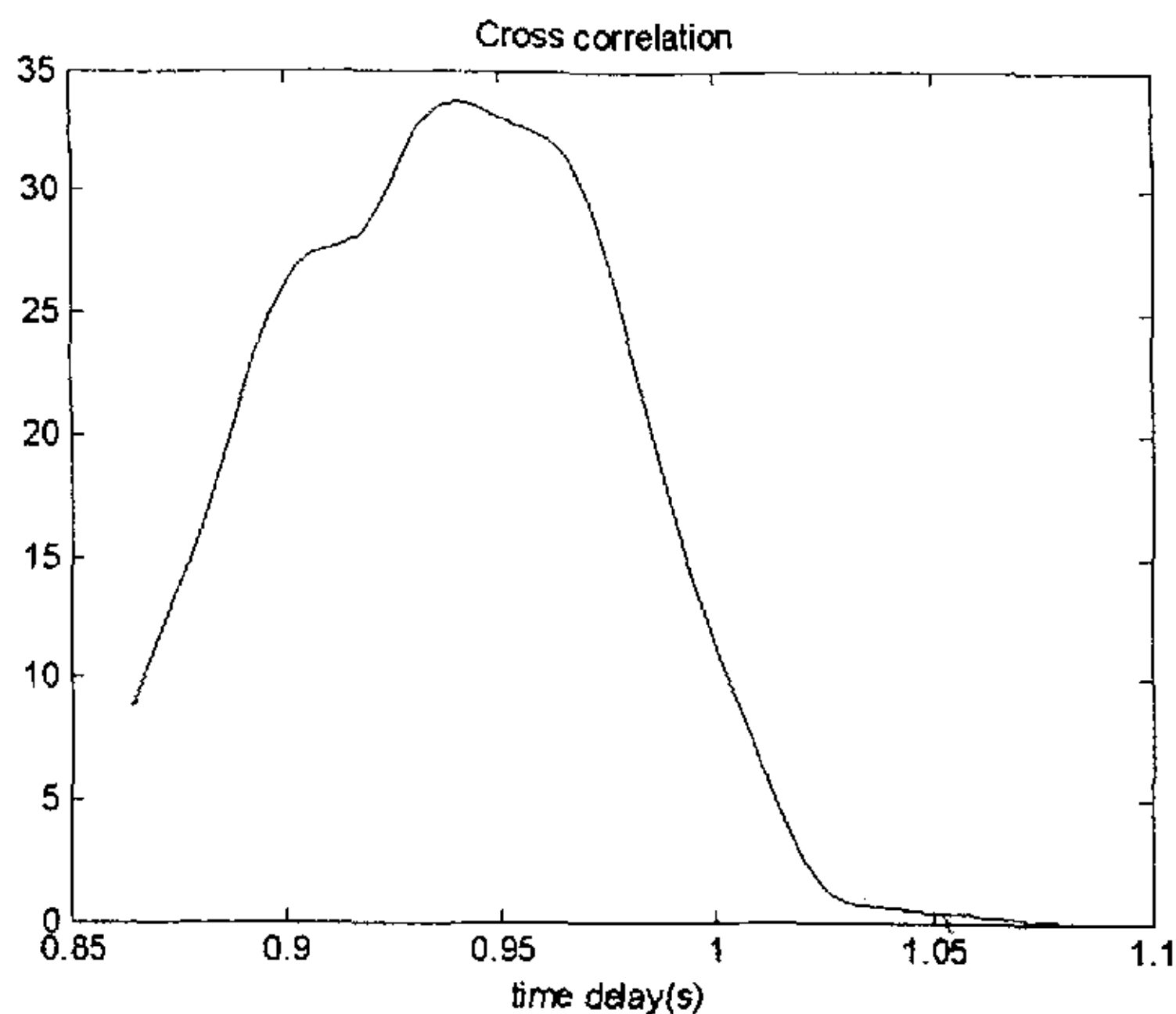


图 2-5 阵列输出序列与发射信号的互相关函数

## § 2.5 本章参考文献

- [1] P. Stoica, A. Nehora, MUSIC, Maximum likelihood, and Cramer-Rao Bound: further results and comparisons, IEEE T-ASSP, vol. 38, no. 12, Dec. 1990, pp.2140-2150
- [2] 张群飞, 黄建国, 保铮, “用子空间旋转不变法同时估计水下多目标的距离和方位”, 声学学报, 第 24 卷第 4 期, 1999.7, pp.400-406
- [3] 陈建峰, “水下高分辨定向关键技术研究”, 西北工业大学博士论文, 1999
- [4] 张鑫, “多目标多参数回波建模及硬件实现”, 西北工业大学硕士论文, 1999.3

### 第三章 基于参数配对算法的多目标定位技术

以鱼雷为中心, 建立平面极坐标, 要确定目标位置就需要径向距离  $r$  和方位角  $\theta$  两个参数, 因此, 多目标定位最终归结为方位和时延的联合估计。我们首先想到的是, 在两个独立的一维参数估计的基础上, 结合特定的配对算法实现两维参数的联合估计。方位估计和时延估计各自作为一维参数估计, 其理论、方法、性能都已经得到深入的研究, 形成了较为完整的体系<sup>[1]-[3]</sup>。本章首先简要回顾了高分辨方位估计和高分辨时延估计理论, 在此基础上利用配对算法把属于同一目标的方位和时延对应起来, 从而实现多目标定位。

#### § 3.1 多目标方位估计方法

##### § 3.1.1 方位估计理论概述

高分辨定向技术发展至今, 对其原理、方法、性能的研究已日趋成熟, 并已经形成了较为系统的高分辨阵列处理理论<sup>[1]-[3]</sup>。根据它们的原理和计算特点, 可大致分为以下几大类, 见表 3-1。

第一类, 传统波束形成方法。这类方法首先形成波束, 利用波束的幅度或相位特性来定向。例如波束最大值法、双波束等信号法、多波束内插法等利用波束对不同方向入射信号的输出幅度的差异来定向, 其分辨率大约等于波束 3dB 宽度。分裂波束正交相关法、分裂波束互谱法<sup>[4]</sup>则利用两个等效声中心不重合的分裂波束之间的相位差来定向, 一般只能用于单源方位估计。

第二类, 参数模型法。它假设信号是由某种模型产生的, 通过拟合得到的模型参数可以较好地描述信号特征, 这样就把原先从接收数据直接估计方位转换成从拟合得到的模型参数去估计方位。它解决了由于有限数据长度(数据加窗)带来的不利影响, 在数据不太短和信噪比不太低的情况下, 比传统方法具有更高的分辨率和更好的估计性能。它的缺点是需要事先确定模型的阶次, 模型阶次选择不合适会导致方位估计结果的异常。常用的模型包括有理传递函数模型<sup>[5]</sup>(自回归 AR 模型、自回归滑动平均 ARMA 模型)和复指数模型<sup>[6]</sup>。同一种模型可用不同的方法去估计模型参数, 形成一批方法。

第三类, 子空间类方法。其标志性方法是 1979 年 Schmidt 提出的 MUSIC 方法<sup>[7]</sup>, 随后 Kumaresan 和 Tufts 提出了 Mini-Norm<sup>[8]</sup>, Paulraj 和 Roy 等人提出了 ESPRIT<sup>[9]</sup>, Viberg 等人提出了加权子空间拟合(WSF)<sup>[10]</sup>, 促使子空间类方法成为近二十年来参数估计方面的研究热点。这类方法明确地把实际数据的

协方差矩阵的特征矢量划分为信号子空间和噪声子空间,其物理意义明确,比参数模型法在估计精度和分辨率上都有进一步的提高。这类方法从空间分辨率上大大突破了波束形成系统的瑞利限的制约。

第四类,解卷积方法。这类方法把阵列输出数据看作是目标信号与信道传递函数的卷积。与前面几类方法的不同之处在于,它们一般不是一步得到估计结果,而是经过多阶迭代、与预设门限多次比较并最终使代价函数达到最优后获得的。例如,增阶多参数估计法(IMP)<sup>[11]</sup>、迭代滤波法(IFA)<sup>[12]</sup>、CFAR 技术<sup>[13]</sup>和 WB<sup>2</sup> 方法<sup>[14]</sup>等。

第五类,极大似然方法<sup>[16]</sup>。作为在随机噪声中估计信号参数的最佳方法,极大似然法得到广泛的关注,它的分辨能力和低信噪比性能都是各种方法中最高的。但是似然函数是一个高阶非线性的函数,对其求极值需要多维搜索,运算量十分巨大。于是有人提出了简化的或者近似的极大似然法,例如交替投影<sup>[15]</sup>、Relax<sup>[17]</sup>等,这些方法往往采用迭代逼近的算法,运算量还是很大,而且还存在能否收敛、能否收敛到全局极值的问题。

第六类,其它方法。这类方法主要指不直接利用阵列数据的二阶矩的定向,如基于波束域的高分辨定向法、基于循环平稳的方位估计方法、高阶累积量方位估计方法。波束域方法可以提高定向方法的低信噪比性能、对阵列误差的容忍性。后两种方法在特定的场合(如高斯分布噪声、信号具有循环平稳特性等)表现出良好的性能,但所要的快拍数较多、运算量也较大。

表 3-1 定向方法分类表<sup>[3]</sup>

方法类型	方 法 名 称
传统波束形成方法	波束最大值法,双波束等信号法,三波束抛物线内插法,三波束映射内插法,分裂波束正交相关法,分裂波束互谱法等
参数模型法	AR 模型:自相关法,协方差法,Burg 最大熵法,修正协方差法,ARMA 模型:修正尤拉沃克法,梅恩法鲁赞法,复指数模型:普朗尼法,扩展普朗尼法等
子空间类方法	BT 主分量法, MUSIC, Johnson, Mini-Norm, Root-MUSIC, POP-MUSIC, WSF, FINE, FINES, ESPRIT, TLS-ESPRIT, GEESE 等
解卷积方法	IMP, IFA, CFAR, WB <sup>2</sup> , CLEAN 等
极大似然方法	Relax, Iterative Quadratic ML, MODF, Stochastic ML, Deterministic ML 等
其它方法	基于高阶累积量的定向方法,基于波束域的定向方法,循环平稳方位估计方法等

在对多个目标进行定向时,传统的多波束定向系统由于受到瑞利限的限制,对目标的分辨能力较差,对于在一个波束内入射的多个目标信号,通常视作一个目标。将高分辨定向技术应用于声纳等系统中,能有效地提高系统的多目标分辨性能。阵列处理高分辨定向技术的研究目标之一,就是突破瑞利限的限制,

用较少的阵元估计出位于一个波束宽度内多个目标的方位, 获得比多波束系统高得多的分辨率和估计精度。近些年来阵列处理新理论、新方法方面的进展很快, 对各种方法的性能特点的研究已经相当深入, 形成了较为完整的理论方法体系。图 3-1 和图 3-2 是文献[18]给出的各种方位估计方法的估计精度及分辨概率随信噪比变化的一个例子, 并与克拉美罗界(Cramer-Rao Bound)作了比较。

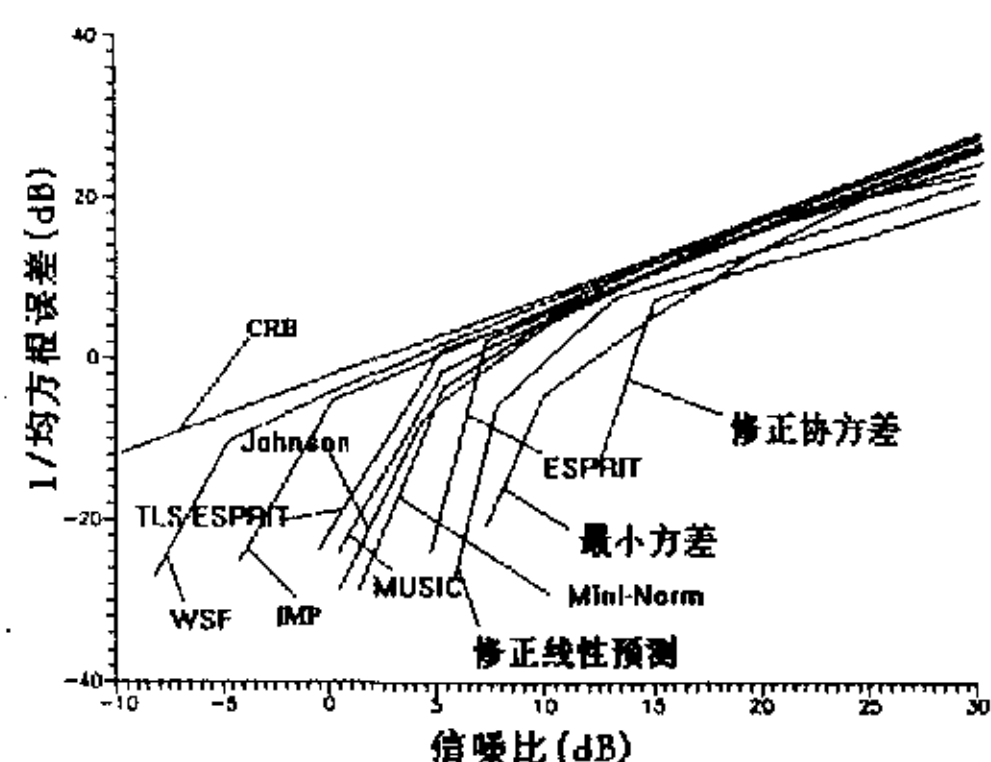


图 3-1 各方法估计精度与 CRB 的比较

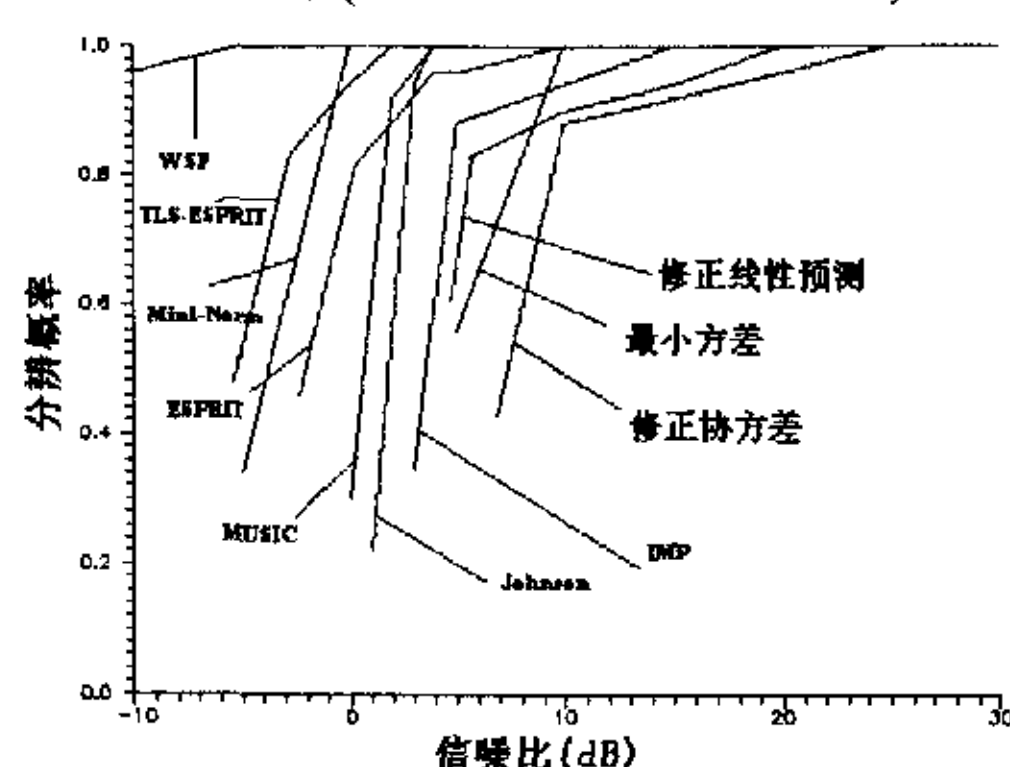


图 3-2 各方法分辨概率比较

### § 3.1.2 多目标定位中的方位估计

把多目标定向方法应用于多目标定位时, 我们关心的是下面一些指标:

- (1) 估计精度。算法在给定条件下, 多次估计结果的统计均方根误差 RMSE(Root Mean Square Error)。定向的估计精度越高, 在其基础上进行空间定位的精度也越高。
- (2) 角度分辨概率。算法在给定条件和分辨准则下, 对多个源能够成功分辨的概率。在其它参数估计性能一定的情况下, 角度分辨概率越高, 成功区分多个目标的概率也越高。
- (3) 角度分辨门限。算法在一定条件下, 按照确定的判断准则所能够分辨的最小夹角。角度分辨门限越低, 对密集多目标的定位能力越强。
- (4) 最低信噪比门限。算法在给定两目标源夹角的前提下, 能够以一定的概率分辨两目标源的最低信噪比。
- (5) 解相干源。算法是否不需要采取附加处理, 如空域平滑技术等, 就可以直接估计相干多目标源。这一点在对同一目标的多个亮点进行定位时尤为重要。
- (6) 稳健性能。稳健的算法应当对各种阵列误差、环境影响、模型失配等因素不敏感, 对算法所需设定参数(如模型阶数)具有一定的宽容性。
- (7) 实时性能。算法是否简便、运算量小, 是否在代价适中的前提下能够在硬件系统中实现, 并能够给出实时结果。

针对水下多目标定位的应用背景, 权衡上述指标参数, 我们选取下列三种有望用于水下多目标定位的方位估计方法:

### 一、MUSIC 方法

对式(2.2)中的回波复包络矩阵  $\tilde{X}(t)$ , 先求其协方差矩阵

$$\mathbf{R} = \tilde{\mathbf{X}}^H(t) \tilde{\mathbf{X}}(t) \quad (3.1)$$

再对  $\mathbf{R}$  进行特征分解

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{E} \mathbf{V}^H \quad (3.2)$$

其中,  $\mathbf{E} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ ,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$  为降序排列的特征值,  $\mathbf{V}$  的每一列  $\mathbf{v}_i$  为对应于特征值  $\lambda_i$  的特征矢量。在目标数目  $p$  已知的情况下, 可以把  $\mathbf{V}$  分成信号子空间和噪声子空间两部分, 两者相互正交。信号子空间  $\mathbf{V}_S = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_p]$  由前  $p$  个特征矢量组成, 噪声子空间  $\mathbf{V}_N = [\mathbf{v}_{p+1}, \mathbf{v}_{p+2}, \dots, \mathbf{v}_M]$  由后  $M - p$  个特征矢量组成。

MUSIC 方法通过检验各方向矢量与整个噪声子空间的正交性把空间谱定义为方向矢量在噪声子空间投影的倒数:

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_N \mathbf{V}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (3.3)$$

角谱  $P(\theta)$  的  $p$  个峰值对应的  $\theta$  就是  $p$  个目标的方位估计。由于通过特征分解得到的  $\mathbf{V}_N$  是噪声子空间的一个估计, 当信噪比偏低或阵列误差较大时,  $\mathbf{V}_N$  与实际的噪声子空间相差较远, 从而造成与  $\mathbf{V}_N$  正交的目标方向矢量估计值与真实目标相差较远。

### 二、最小模方法

最小模方法也是基于特征分解的, 只不过它利用噪声子空间的方法不同。它依据模最小的准则在噪声子空间寻找一个“典型”的矢量, 该矢量只与  $p$  个目标的方向矢量正交, 而不会与阵列的其它方向矢量正交<sup>[8]</sup>。因此最小模方法的角谱只需要通过检验各方向矢量与这个“典型”矢量的正交性来获得:

$$P(\theta) = \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{g}|^2} \quad (3.4)$$

式中,  $\mathbf{g} = [\mathbf{1}, \mathbf{g}_1]^T$ ,  $\mathbf{g}_1 = \frac{\mathbf{V}_{N1} \mathbf{C}^*}{\mathbf{C}^H \mathbf{C}}$

其中  $\mathbf{V}_{N1}$  和  $\mathbf{C}$  是噪声子空间所对应特征矢量所构成的矩阵的两个分块矩阵,  $\mathbf{C}$  是其第一行的转置,  $\mathbf{V}_{N1}$  是其余行, 即:

$$\mathbf{V}_N = \begin{bmatrix} V_{p+1,1} & V_{p+2,1} & \dots & V_{M,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{p+1,2} & V_{p+2,2} & \dots & V_{M,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{p+1,M} & V_{p+2,M} & \dots & V_{M,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \\ \dots \\ \mathbf{V}_{N1} \end{bmatrix}$$



由于“典型”矢量是噪声子空间各矢量的一个优化综合，类似于统计学中的最小二乘拟合，可以抑制  $\mathbf{V}_N$  作为噪声子空间估计的部分误差，因此最小模方法在某些方面比 MUSIC 具有更好的性能，如低信噪比特性、阵列误差容忍性。

### 三、TLS-ESPRIT 方法

假设接收阵由两个阵列流形完全相同而相距为  $\Delta$  的子阵组成，其中一个子阵的输出复包络如式(2.2)所示，则另一个子阵的输出复包络可表示为

$$\tilde{\mathbf{Y}}(t) = \tilde{\mathbf{S}}(t)\Phi\mathbf{A}^T(\theta) + \mathbf{N}_y(t) \quad (3.5)$$

其中

$$\Phi = \text{diag}[\exp(j\omega_1), \exp(j\omega_2), \dots, \exp(j\omega_p)] \quad (3.6)$$

$$\omega_i = 2\pi \frac{\Delta \sin(\theta_i)}{\lambda}, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

为对角阵，其对角线元素为各入射信号在两子阵间产生的相移。

TLS-ESPRIT 方法将两个子阵的输出构成一个复合矩阵

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}^H(t) \\ \tilde{\mathbf{Y}}^H(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

求  $\mathbf{Z}$  的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_Z = \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H \quad (3.8)$$

$\mathbf{R}_Z$  的  $p$  个最大特征值所对应的特征矢量构成的信号子空间矩阵记作  $\mathbf{V}_s$ ，把  $\mathbf{V}_s$  在列方向分成均匀的两块：

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_X \\ \mathbf{V}_Y \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

把这两个分块矩阵进行重新组合：

$$\mathbf{V}_{XY} = [\mathbf{V}_X \quad \mathbf{V}_Y] \quad (3.10)$$

再对矩阵  $\mathbf{V}_{XY}^H \mathbf{V}_{XY}$  进行特征分解：

$$\mathbf{V}_{XY}^H \mathbf{V}_{XY} = \mathbf{E} \mathbf{\Gamma} \mathbf{E}^H \quad (3.11)$$

把所得的特征矢量矩阵分成相同大小的 4 个方阵：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11} & \mathbf{E}_{12} \\ \mathbf{E}_{21} & \mathbf{E}_{22} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

用其中的两个方阵构造出一个新矩阵，并对它进行特征分解：

$$-\mathbf{E}_{12}\mathbf{E}_{22}^{-1} = \mathbf{\Pi} = \mathbf{T}\mathbf{\Lambda}\mathbf{T}^H \quad (3.13)$$

则其特征值组成的对角阵就是  $\Phi$  的估计，即

$$\hat{\Phi} = \mathbf{\Lambda} \quad (3.14)$$

再根据式(3.6)就可解出各目标源的方位。

TLS-ESPRIT 法既保留了 ESPRIT 法不需要扫描空间角谱、直接给出方位估

计值的优点,同时改进了 ESPRIT 法在低信噪比下的性能,估计精度和分辨率比 ESPRIT 法有一定程度的提高。

### § 3.1.3 方位估计仿真举例

与第二章中的例子一样,取发射波形为梯形包络的单频信号,载波频率为 30KHz。设水下存在三个等强度的目标,其时延、方位参数见表 2-1。其中相邻目标的时延间隔约为时延模糊区间的一半,相邻目标的方位间隔约为常规波束方法的一半。

设定一个合适的距离门(本例中约为 0.22 秒)使其包含三个目标的反射信号,用一间距为半波长的 16 元均匀线列阵来接收,在距离门内均匀正交采样 100 点(采样频率约为 455Hz),得到一个  $100 \times 16$  的数据矩阵。当峰值信噪比为 10dB 时,通过对数据矩阵的奇异值分解,计算出的 AIC 判阶曲线见图 3-3,准确地给出了目标数目为 3。可以分别采用不同的方法进行方位估计。

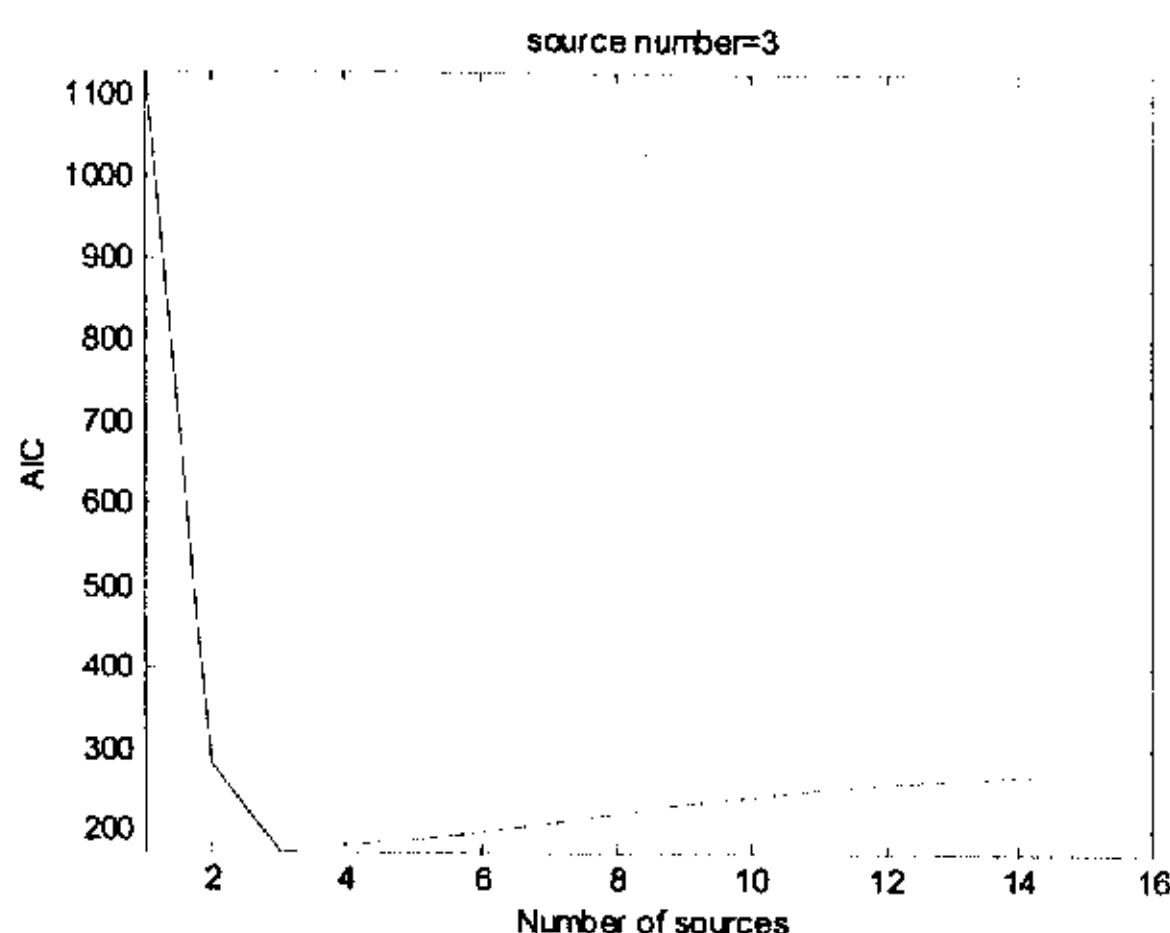


图 3-3 AIC 判阶曲线

为了便于比较,图 3-4 首先给出了常规的密集波束扫描结果,扫描步长为  $0.1^\circ$ ,图中只有一个明显的峰,根本无法分辨三个目标。

图 3-5 是 MUSIC 方法的空间角谱,图中的虚线、实线、点划线分别是 MUSIC 方法在无平滑、一次平滑(分成两个子阵)、两次平滑(分成三个子阵)条件下的结果,三条曲线都有三个峰,只不过经过平滑后的主峰更尖锐、旁瓣电平更低,具有更大的分辨潜力。这说明这三个目标具有一定的相干性,必要的平滑可望提高方位的分辨能力。有关同一个目标上多个亮点的相干性问题的讨论将在下一章进行。

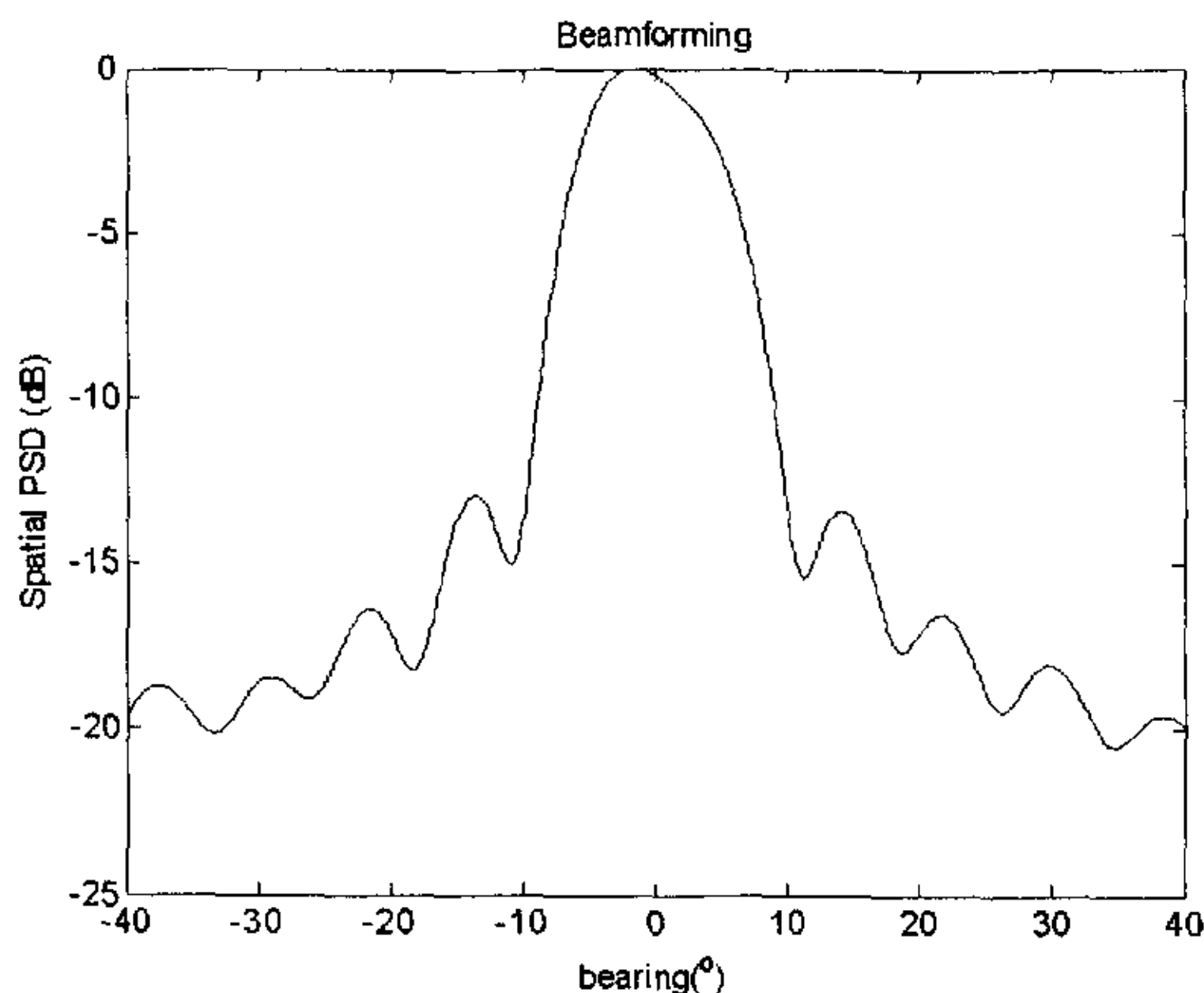


图 3-4 波束扫描法

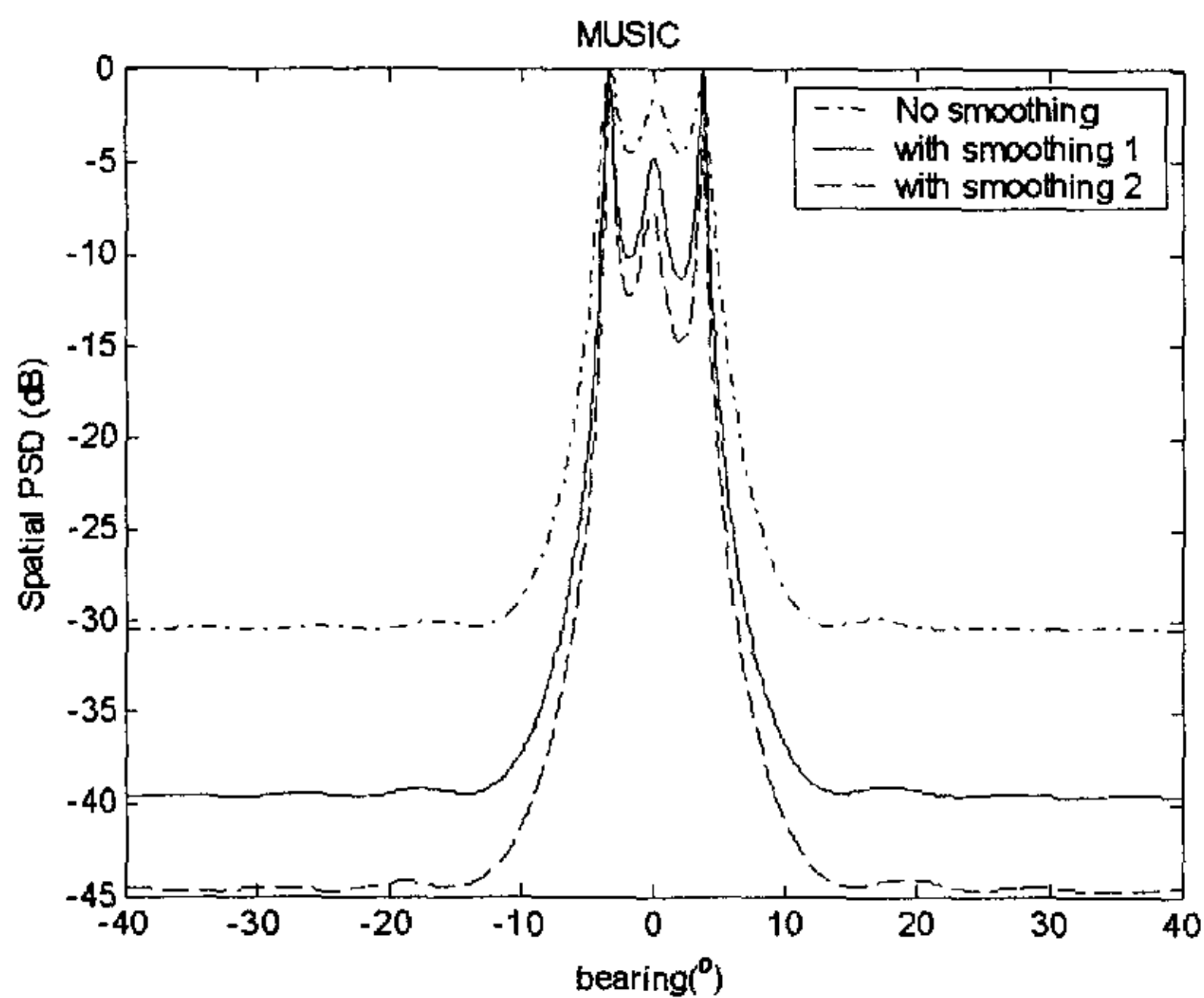


图 3-5 MUSIC 方法

图 3-6是最小模方法得到的空间角谱，图中的虚线、实线、点划线分别是最小模方法在无平滑、一次平滑、两次平滑条件下的结果，它们也都能估计出三个目标的方位，空间平滑也起到了一定的增强分辨力的效果。与 MUSIC 方法相比，最小模方法具有更尖锐的主峰，但旁瓣电平较高、起伏较大。

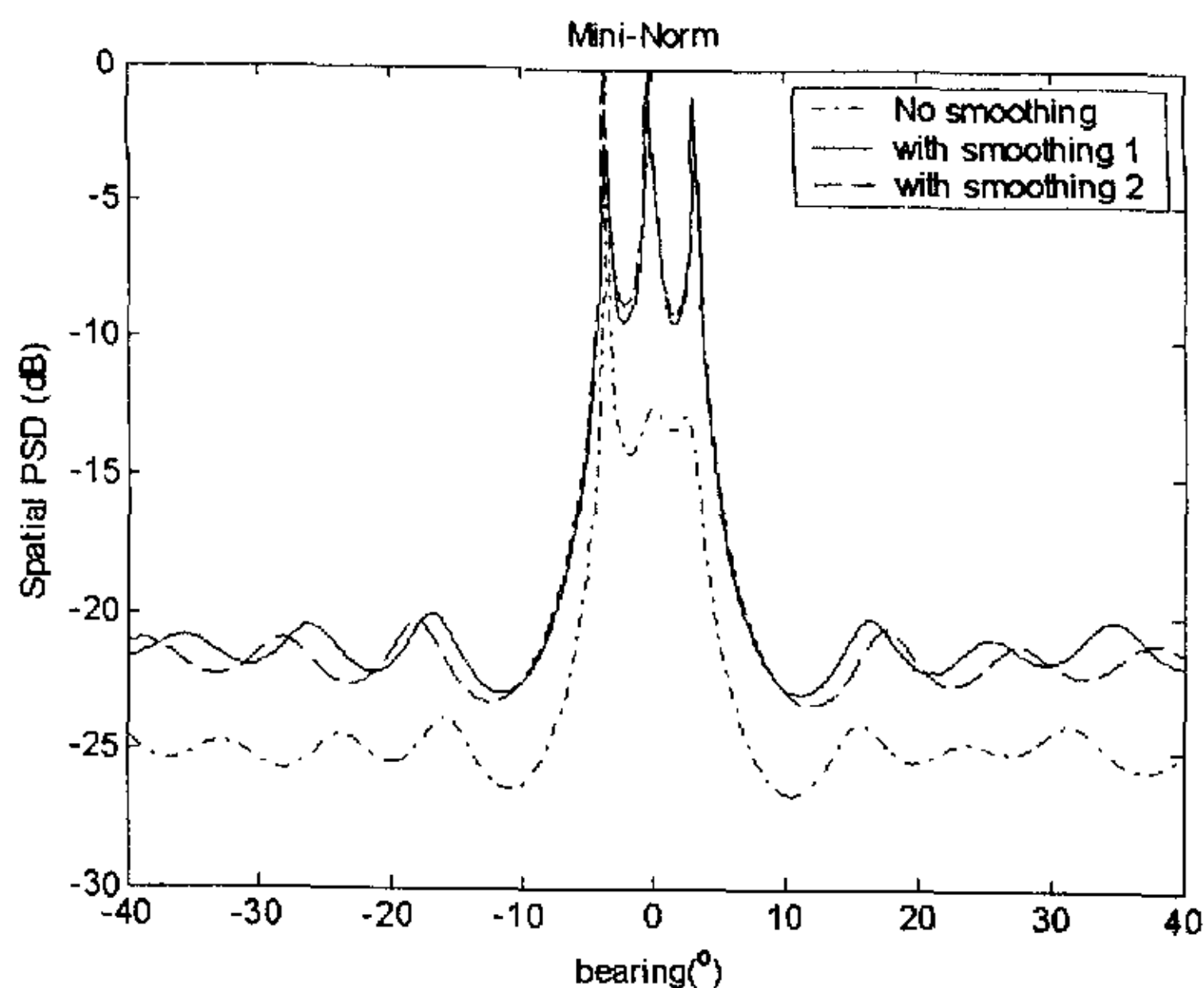


图 3-6 最小模方法

TLS-ESPRIT 方法不需要搜索空间角谱, 直接就可以得出方位估计, 如表 3-2 所示, 可以看到它对三个目标的方位作出了较为准确的估计。

表 3-2 TLS-ESPRIT 方法估计结果

	目标 1	目标 2	目标 3
真实方位( $^{\circ}$ )	-3.49	0	3.22
估计方位( $^{\circ}$ )	-3.76	0.48	3.50

从例子中可以看到, 对于同时包含方位和时延信息的一个多目标定位回波, 各目标之间存在一定的相关性, 虽然可以用普通的方位估计方法进行处理, 但要得到较为准确的估计应该考虑解相干处理。

## § 3.2 多目标时延估计方法

### § 3.2.1 时延估计理论概述

目标距离是鱼雷自导系统要获取的重要参数, 它是通过从主动回波中提取有关目标反射点到达接收点的时延信息, 进而解算出各点的距离。因此距离估计可归结为时延估计。在早期的鱼雷自导系统中, 目标距离往往只是用于设定鱼雷作战姿态(如变航深、变脉宽)的一个辅助参数, 对其估计精度要求不高。随着现代鱼雷对多目标定位跟踪和精确制导等新战技指标的提出, 对时延估计的要求也日益提高, 不仅要求高精度, 还要求高分辨。例如, 在远距离对水面舰艇编队进行定位时, 由于大脉宽的影响, 各目标舰回波将重叠; 在近距离分

析单个目标的亮点结构时，各亮点的时延差很小等。这些都要求时延参数估计应具有高分辨能力。

时延估计方法经过多年来的发展，已经构成较为完整的理论体系，表 3-3 给出了时延估计方法分类及性能特点<sup>[19]</sup>。

第一类是经典方法。主要包括匹配滤波法和互相关法，它们的时延分辨性能都受信号模糊度图的限制，故也把它们称作模糊度图方法。其最大优点是处理增益高，因为匹配滤波器是输出信噪比最大准则下的最佳处理机，适用于低 SNR 条件下的检测和估计。另一个优点是算法简单、计算量小，易于实现。这类方法的主要缺点是分辨率低。

第二类是解卷积方法。回波实质上是发射信号与信道冲击响应的卷积，而目标的时延信息就包含在信道冲击响应中。因此在已知发射信号和回波的情况下，通过反卷积运算，就可以得到信道的冲击响应。但是在回波观测中不可避免地会引入噪声，在噪声环境中无法得到精确的反卷积结果，只能得到在某种准则下的信道冲击响应的估计值。解卷积类方法包括最小平方反滤波、线性预测误差滤波、自适应格形滤波、频域反卷积等多种方法，其共同特点是时延分辨率较高，在高信噪比下最小分辨率可达数据的采样间隔<sup>[19]</sup>，但它对发射信号有所限制，要求发射信号是最小相位的。

表 3-3 时延估计方法分类及性能特点

方 法		最小分辨率	计算量	发射信号要求		信噪比 下限	处理方式
				先验信息	最小相位限制		
经典法	匹配滤波	带宽的倒数①	小	已知	无	低	实时
	互相关		小	已知	无	低	批处理 / 实时
解卷积	最小平方反滤波	数据采样间隔	小②	已知	有	中	实时
	线性预测误差滤波	同上	中	未知	有	中	批处理
	自适应格形滤波	同上	中	未知	有	中	实时
	频域反卷积	同上	中	已知	有	中	批处理
倒谱		③	大	已知/未知	有	高	批处理
时延频率估计		可小于数据采样间隔	较大	已知	有	较高	批处理
时延特征结构法		远小于数据采样间隔	大	已知	无	中	批处理

说明：①与发射信号波形有关，LFM 脉冲信号由于脉冲压缩现象可以得到较好的时延分辨率，CW 脉冲等小带宽信号的最小分辨率约为发射脉冲宽度。

②这里考虑了反滤波器参数可以在回波之前甚至在发射信号之前得到，实时处理部分只有 FIR 滤波。



③其分辨率介于经典法和解卷积法之间。

第三类方法是倒谱,它常常被用来处理卷积同态信号,也具有一定的反卷积效果。它的分辨率虽高于经典法,但对信噪比要求较高,也要求最小相位信号,而且倒谱峰的位置反映各反射点两两之间的相对时延差,在多目标情况下很难解算出各目标的绝对时延。由于这些限制,倒谱很少应用于多目标时延的估计。

第四类方法是时延频率估计,它首先通过频域反卷积得到信道的传递函数,再把传递函数看成是一个特殊的时间序列,对其进行“时延谱”分析,时延谱峰的位置就反映了目标的时延。如果引入高分辨谱分析方法,可以获得小于数据采样间隔的时延分辨率。由于算法中含有反卷积的步骤,也就要求采用最小相位信号,信噪比要求也较高。

第五类是时延特征结构法,它利用包含相同时延信息的多个独立回波样本构造相关矩阵,进行特征分解后依据信号子空间和噪声子空间的正交性来获得多目标的时延估计,类似于时域和空域的特征结构法,只不过采用的搜索矢量不同。常用的时延特征结构法有时延 MUSIC、时延最小模等。这类方法的优点是分辨率特别高,远小于数据采样间隔,特别适用于短数据稀疏采样的情况。而且它并不要求发射信号为最小相位信号,拓展了应用范围。

### § 3.2.2 多目标定位中的时延估计

与上一节的方位估计相类似,把多目标时延估计方法应用于多目标定位时,我们关心的是下面这些指标:

- (1) 估计精度。算法在给定条件下,多次估计结果的统计均方根误差。时延估计精度越高,在其基础上进行空间定位的精度也越高。
- (2) 时延分辨概率。算法在给定条件和分辨准则下,对多个源的时延能够成功分辨的概率。在其它参数估计性能一定的情况下,时延分辨概率越高,成功区分多个目标的概率也越高。
- (3) 时延分辨门限。算法在一定条件下,按照确定的判断准则所能够分辨的最小时延差。时延分辨门限越小,对密集多目标的定位能力越强。
- (4) 最低信噪比门限。算法在给定两目标源时延差的前提下,能够以一定的概率分辨两目标源时延的最低信噪比。
- (5) 实时性能。算法是否简便、运算量小,是否在代价适中的前提下能够在硬件系统中实现,并能够给出实时结果。

针对水下多目标定位的应用背景,考虑到自导系统中的发射信号包络往往不是最小相位的,权衡上述指标参数,我们选取下列两种有望用于水下多目标

定位的时延估计方法:

### 一、互相关法

互相关法通过计算回波与发射信号的互相关

$$C(\tau) = \sum s(t-\tau)x(t) \quad (3.15)$$

互相关函数峰值对应的时延就是反射点的时延估计。该方法算法简单,低信噪比性能好,不要求发射信号为最小相位,但其分辨性能受信号模糊度图的限制,分辨率低。例如对 CW 信号,其时延分辨率约为  $0.6T$ ,  $T$  为发射信号脉宽。欲改善分辨率,可采用宽带信号,如 LFM 信号,但同时会带来一些其它问题,如无法与其它参数估计器(如方位估计)共用回波。

### 二、时延 MUSIC 法

在远场条件下(阵列尺寸远小于目标距离),阵列的每一个阵元接收到的信号可以看作是包含相同时延信息的多个独立回波样本,因此对(2.2)式的数据矩阵在时间方向构造相关矩阵

$$R_t = X(t)X^H(t) = \sum_{i=1}^M x_i(t)x_i^H(t) \quad (3.16)$$

如果在距离门内对回波采样  $N$  点,则  $R_t$  是一个  $N \times N$  的矩阵,由于时域采样点数一般要大于阵元数  $M$ ,因此  $R_t$  一般是个非满秩矩阵。对  $R_t$  进行特征分解得到其特征值  $\lambda_i$ (设以降序排列,即  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M > \lambda_{M+1} = \dots = \lambda_N = 0$ )以及对应的特征矢量  $V_i$ 。假设目标数目  $p$  已知,时延 MUSIC 方法利用信号子空间  $\{V_i\}_{i=1,2,\dots,p}$  和噪声子空间  $\{V_j\}_{j=p+1,2,\dots,N}$  的正交性给出时延谱:

$$P(\tau) = \frac{s_-^H(\tau)s_-(\tau)}{\sum_{i=p+1}^N |s_-^H(\tau)V_i|^2} \quad (3.17)$$

其中的搜索矢量  $s_-(\tau) = s(t-\tau)$  是发射信号包络时延矢量。时延谱的谱峰位置就是多目标时延的估计。

#### § 3.2.3 时延估计仿真举例

这里的仿真条件与 § 3.1.3 方位估计仿真举例相同,对同一组数据用不同的方法分别进行时延估计。

图 3-7 首先给出了常规的互相关法得到的互相关曲线,图中勉强出现两个峰,无法分辨三个目标,只能得到两个目标的时延,这是因为时延间隔已经小于信号的时延模糊区间。

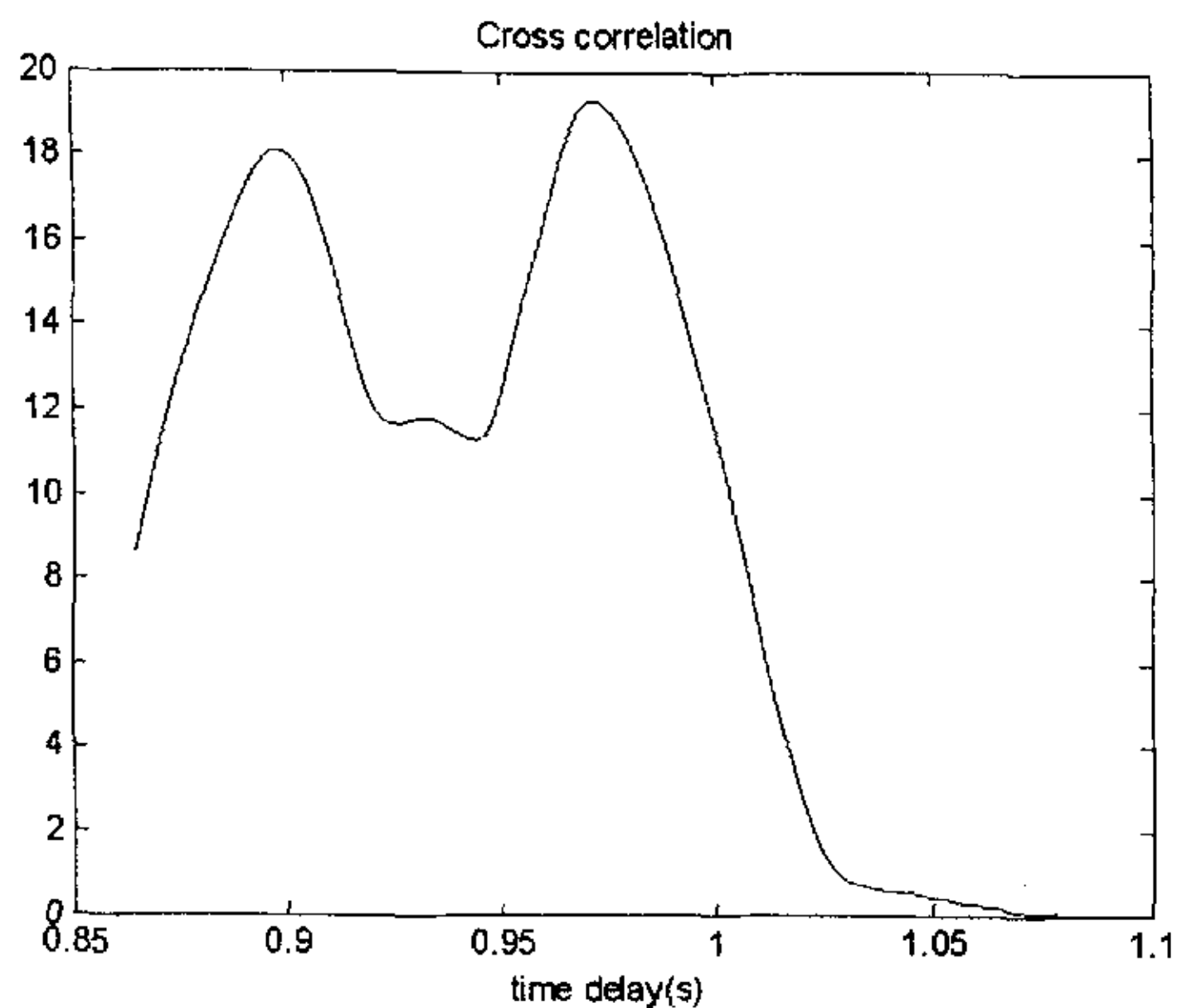


图 3-7 互相关曲线

图 3-8 是时延 MUSIC 方法给出的“时延谱”，图中三个峰的位置就是三个目标的时延估计，显然时延 MUSIC 方法的分辨率要比常规互相关法高。

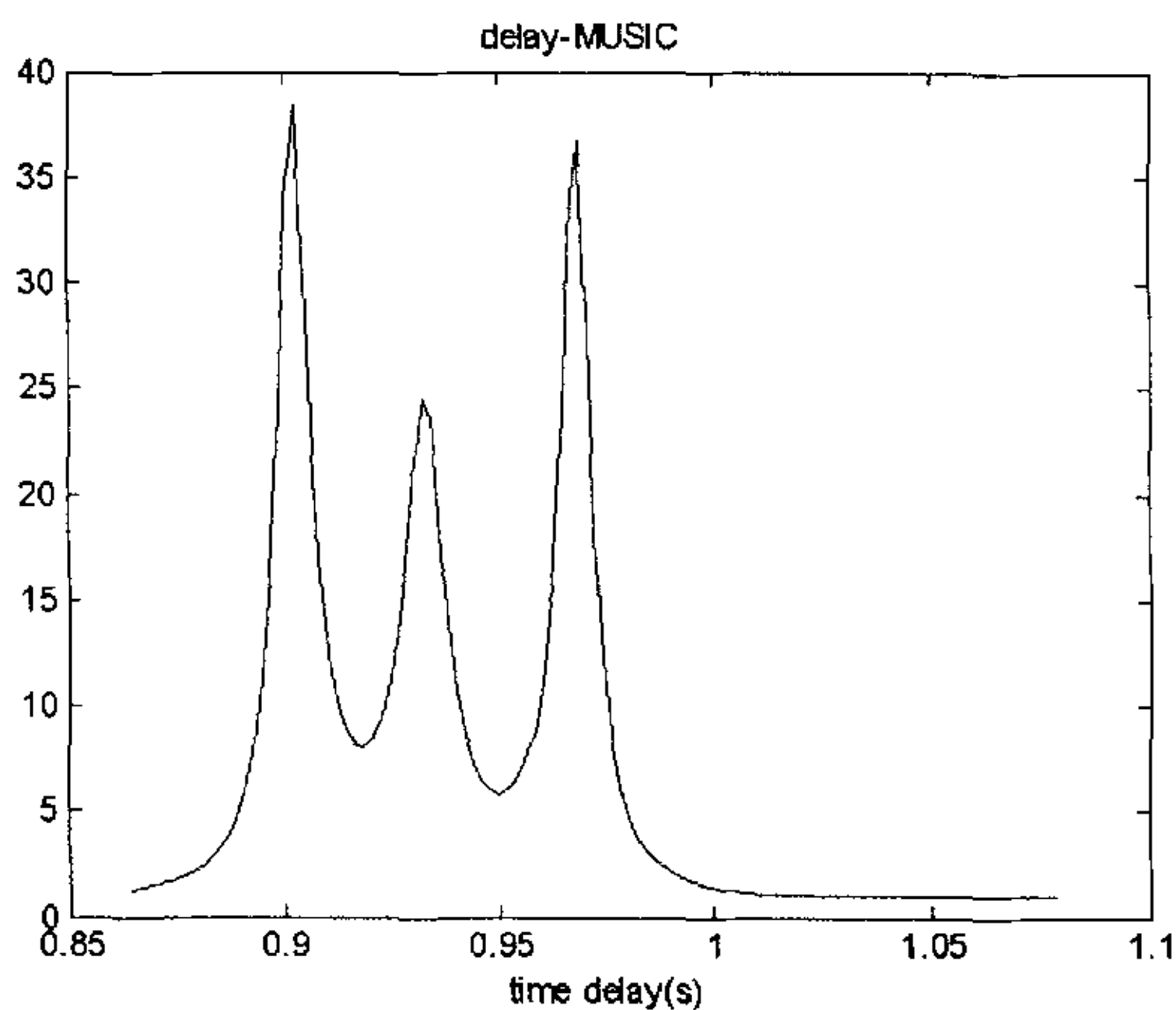


图 3-8 时延 MUSIC 方法

### § 3.3 方位和时延估计的配对算法

在分别获得各目标的时延和方位参数后，作为一个多目标定位问题并没有完成，还有一个参数配对的问题。所谓参数配对，就是确定哪一对时延和方位参数是属于同一个目标的。参数配对方法也不少，本文通过信号强度估计来进

行配对, 具有物理概念清晰、算法较简单的优点。

### § 3.3.1 基于强度估计的参数配对原理

暂且不考虑噪声, (2.2)式的回波复包络可表示为三个矩阵的乘积:

$$\tilde{\mathbf{X}}(\mathbf{t}) = \mathbf{S}(\mathbf{t})\Phi\mathbf{A}^T(\theta) \quad (3.18)$$

式中各矩阵的含义见第二章。如果各目标的时延都不相同, 则时延矩阵  $\mathbf{S}(\mathbf{t})$  是一个列满秩矩阵。如果各目标的方位都不相同, 则方向矩阵  $\mathbf{A}(\theta)$  也是一个列满秩矩阵。当目标的时延和方位参数分别得出后, 即可构造出  $\mathbf{S}(\mathbf{t})$  和  $\mathbf{A}(\theta)$ , 利用其列满秩的特性可进一步估计出多目标的复强度矩阵

$$\hat{\Phi} = [\mathbf{S}^H(\mathbf{t})\mathbf{S}(\mathbf{t})]^{-1}\mathbf{S}^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{X}}(\mathbf{t})\mathbf{A}^*(\theta)[\mathbf{A}^T(\theta)\mathbf{A}^*(\theta)]^{-1} \quad (3.19)$$

(3.18)式中的  $\Phi$  是一个对角阵, 但由于用两套完全独立的方法估计出的各目标的时延矢量和方位矢量在矩阵  $\mathbf{S}(\mathbf{t})$  和  $\mathbf{A}(\theta)$  中的排列顺序不同 (未配对), 得到的  $\hat{\Phi}$  往往不再是对角阵, 只是一个每行每列只有一个非零值的方阵。再考虑到回波受噪声的影响,  $\hat{\Phi}$  的每一行每一列都只有一个值显著大于其它值, 即经过行交换或列交换后可得到一个对角占优的矩阵。找出  $\hat{\Phi}$  中每一行最大的元素, 则每个最大元素所对应的时延和方位参数属于同一目标。

以上是在所估计的时延和方位参数均可分辨的情况下作出的参数配对, 然而在实际中可能会出现多目标的方位参数相同或时延参数相同、或两种估计方法能分辨出的目标数目不相等的情况。在这种情况下,  $\mathbf{S}^H(\mathbf{t})\mathbf{S}(\mathbf{t})$  和  $\mathbf{A}^T(\theta)\mathbf{A}^*(\theta)$  维数不相同, (3.19)式得到的矩阵不再是一个方阵, 找最大值时应该沿着分辨率高的那一维(矩阵的长度方向)展开。当方位分辨率较高时, 从  $\hat{\Phi}$  的每一列找最大值; 当时延分辨率较高时, 从  $\hat{\Phi}$  的每一行找最大值。

### § 3.3.2 配对算法仿真举例

我们把方位估计值和时延估计值都按从小到大的顺序排列, 由于真实值中小方位对应的是小时延、大方位对应的是大时延, 因此, 理论上用(3.19)式计算得到的矩阵应该是一个对角阵。

还是沿用 § 3.1.3 和 § 3.2.3 的仿真条件, 在不同的方位估计和时延估计方法的基础上用(3.19)式计算配对矩阵。

在两维都能够分辨出三个目标的情况下, 可以直接计算配对矩阵。在本例中, 时延估计方法只有时延 MUSIC 能分辨三个目标, 可分辨三个目标的方位估计方法有: MUSIC、最小模、TLS-ESPRIT。下表 3-4 给出了不同方位估计方法与时延 MUSIC 搭配进行多目标定位时的强度估计矩阵, 其中 MUSIC 和最小模估计过程中用了一次空间平滑。为了便于表格的排列, 表中的配对矩阵是

(3.19)式的转置。可以看出,无论哪一种方位估计方法与时延 MUSIC 搭配所得的配对矩阵都是一个对角占优的矩阵,说明配对是完全正确的。

表 3-4 两维都能分辨时的参数配对

时延 MUSIC(s) 方位估计(°)		0.902	0.930	0.968
MUSIC (一次平滑)	-3.2	<u>1.198</u>	0.025	0.080
	0.1	0.286	<u>0.988</u>	0.203
	4.0	0.108	0.061	<u>0.883</u>
最小模 (一次平滑)	-3.4	<u>1.121</u>	0.038	0.085
	0.2	0.178	<u>0.987</u>	0.235
	4.1	0.077	0.058	<u>0.858</u>
TLS-ESPRIT	-3.1	<u>1.213</u>	0.045	0.115
	0.2	0.311	<u>0.981</u>	0.310
	4.3	0.117	0.056	<u>0.816</u>

如果其中的一维能够分辨出三个目标而另一维只能分辨两个目标的情况下,如本例中时延估计采用常规互相关方法时只能分辨出两个目标的时延,估计值为 0.922、0.966 秒。则按(3.19)式计算出的配对矩阵不再是一个方阵,如下表 3-5所示。这时候的配对过程应该沿着能完全分辨的那一维进行配对矩阵的最大值搜索,在本例中是沿方位方向搜索,即在每行中找一个最大值。采用 MUSIC 方法时得到的配对结果是(-3.2, 0.922)、(0.1, 0.922)、(4.0, 0.966),与三个目标的真实配对是基本吻合的。如果方位只能分辨 2 个目标,而时延可分辨 3 个目标,则应在每列中找一个最大值。

表 3-5 时延只能分辨两目标时的参数配对

互相关法(s) 方位估计(°)		0.922	0.966
MUSIC (一次平滑)	-3.2	<u>1.121</u>	0.365
	0.1	<u>0.845</u>	0.253
	4.0	0.032	<u>0.855</u>
最小模 (一次平滑)	-3.4	<u>1.051</u>	0.352
	0.2	<u>0.821</u>	0.248
	4.1	0.003	<u>0.839</u>
TLS-ESPRIT	-3.1	<u>1.141</u>	0.406
	0.2	<u>0.850</u>	0.340
	4.3	0.041	<u>0.788</u>

### § 3.4 基于配对算法的多目标定位性能分析

由于多目标的位置随意性很大,不便于确定统计仿真的典型条件,因此我们把多目标定位技术应用于体积目标亮点结构的估计,改变目标的距离和敌舷



角就可以改变多目标之间的时延间隔和方位间隔,所得的统计分析结果对任意分布的多目标有同样的指导意义。

假设目标长度为 100 米,前、中、后等间隔分布了三个亮点(相当于三个目标处于一条直线上),用一个 16 阵元的均匀线列阵接收,发射信号包络为梯形包络,发射脉宽为 75ms。每个阵元输出在距离门内等间隔采样 100 点。在不同的信噪比和敌舷角等条件下,分别进行方位估计和时延估计,然后进行参数配对。

因为基于配对算法的多目标定位由方位估计、时延估计、参数配对等三个相对独立的环节组成,因此这种多目标定位的性能主要体现在三个环节各自的统计性能上。以便于考察方位估计、时延估计、参数配对的性能为出发点,设计以下 4 种典型的仿真条件,三个目标的真实参数详见表 3-6。

**条件一:**目标中心距离 420 米,敌舷角  $30^\circ$ ,三目标最小方位间隔为 0.49 个波束宽度,最小时延间隔为 1.32 个模糊区间。此时三目标的方位无法用常规的波束方法分辨,而时延则可以用经典的互相关法区分。

**条件二:**目标中心距离 420 米,敌舷角  $45^\circ$ ,三目标最小方位间隔为 0.71 个波束宽度,最小时延间隔为 1.05 个模糊区间。此时三目标的方位还是无法用常规的波束方法分辨,而时延刚好勉强可以用经典的互相关法区分。

**条件三:**目标中心距离 420 米,敌舷角  $60^\circ$ ,三目标最小方位间隔为 0.89 个波束宽度,最小时延间隔为 0.71 个模糊区间。此时三目标的方位和时延都无法用常规的波束方法和互相关法分辨。

**条件四:**目标中心距离 320 米,敌舷角  $75^\circ$ ,三目标最小方位间隔为 1.30 个波束宽度,最小时延间隔为 0.34 个模糊区间。此时三目标的方位理论上可用常规的波束方法分辨,而时延无法用经典的互相关法区分。

表 3-6 各仿真条件下的多目标真实参数

仿真条件	真实参数	目标 1	目标 2	目标 3
条件一	方位( $^\circ$ )	-3.797	0.000	3.089
	时延(秒)	0.503	0.560	0.619
条件二	方位( $^\circ$ )	-5.252	0.000	4.440
	时延(秒)	0.515	0.560	0.609
条件三	方位( $^\circ$ )	-6.256	0.000	5.558
	时延(秒)	0.530	0.560	0.596
条件四	方位( $^\circ$ )	-8.899	0.000	8.132
	时延(秒)	0.412	0.427	0.451

后续的统计性能仿真都是在上述某一确定条件下加不同噪声所进行的 100 次独立仿真所得的统计结果。

### § 3.4.1 多目标定位中的方位估计性能

首先应该对接收到的回波进行判阶, 因为我们这里对方位、时延估计的性能研究是在能够正确判阶的前提下进行的。利用数据矩阵奇异值分解所得的奇异值、依据 AIC 准则实现判阶, 能正确判出三个目标的概率随信噪比的变化情况见图 3-9。条件二、三在 0dB 开始就有 90% 以上的正确判阶概率, 而条件一、四要到 5dB 以上才能有较高的正确判阶概率。这是由于条件二、三中各目标的时延、方位参数都有较大差异, 起到了相互解相干的效果; 而条件一、四中各目标在其中一维参数上很接近, 使源的相干性增强, 判阶偏低。

考虑到各条件在 -5dB 时都无法正确判阶, 我们的统计性能仿真从 0dB 开始。方位估计性能体现于正确分辨概率和均方误差随信噪比的变化情况。当一种估计方法能给出 3 个估计值且各估计值与真值的偏差不超过半个波束宽度, 则被认为是正确分辨。

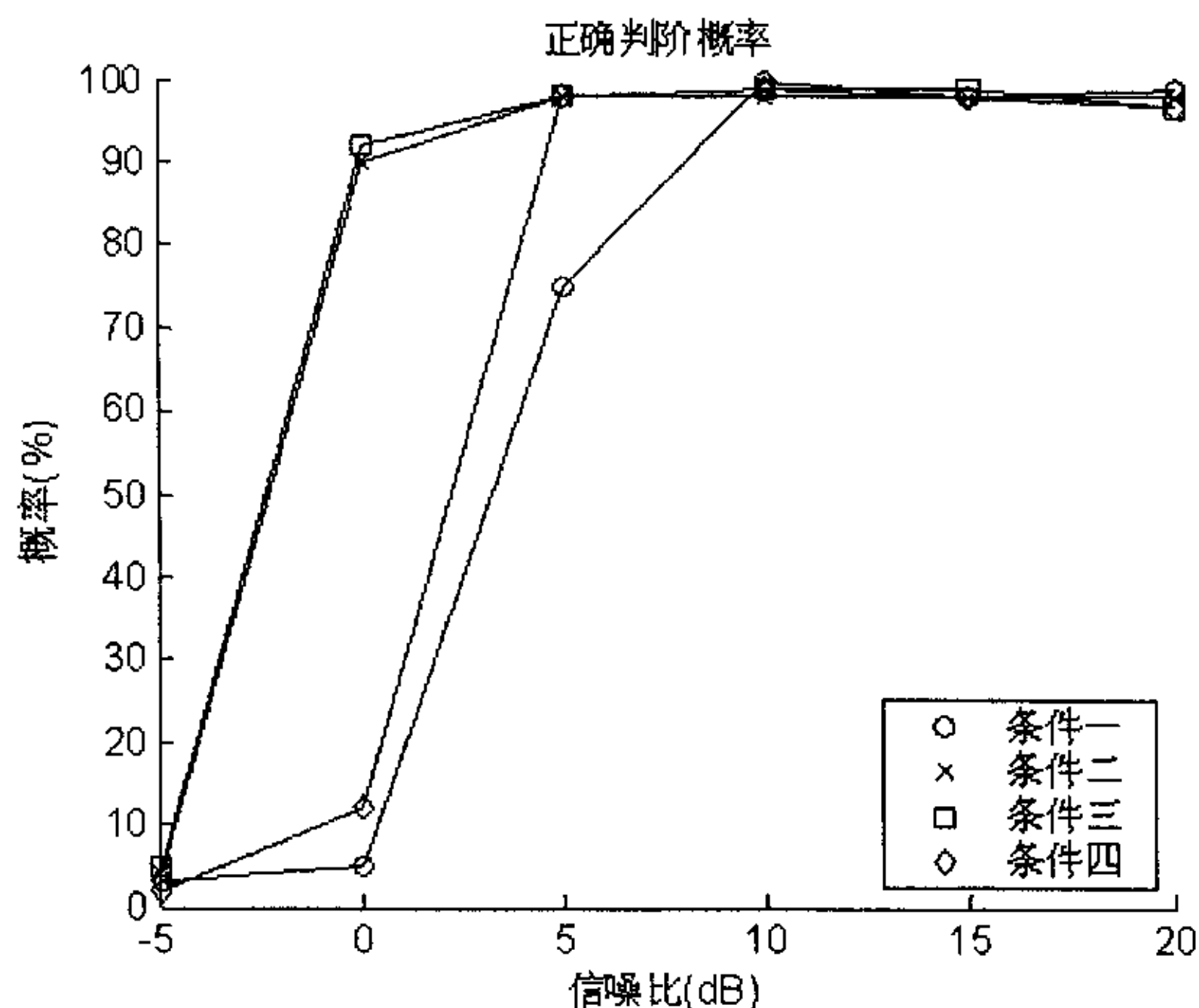


图 3-9 各统计条件下的正确判阶概率

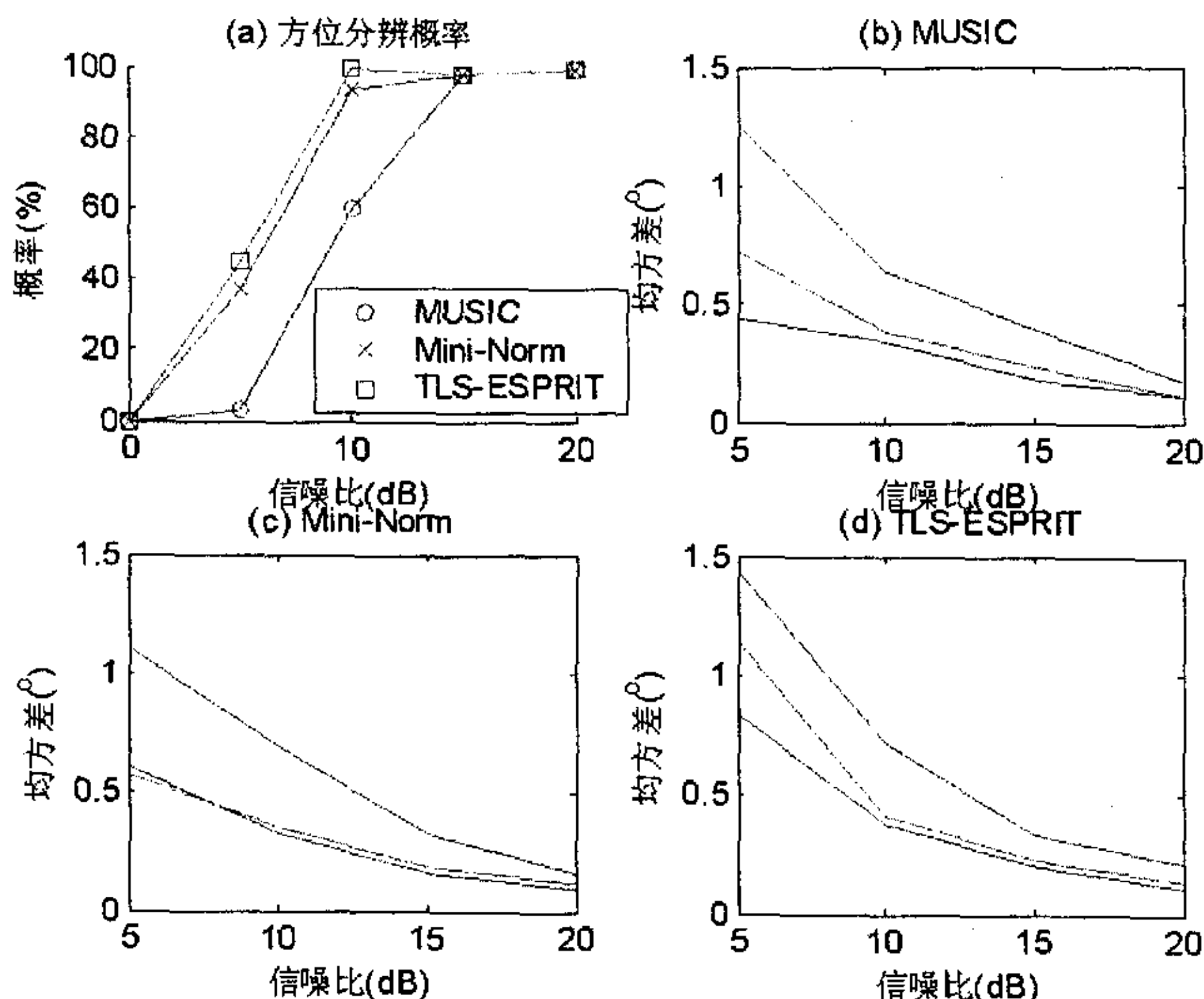


图 3-10 条件一的方位估计性能

条件一的方位估计性能见图 3-10, 由于此时方位间隔远小于波束宽度, 因此常规波束方法无法分辨, 在此没有对其统计性能进行考察。该图中图(a)是三种高分辨方法的正确分辨概率随信噪比变化的曲线, 0dB 时三种方法得出的估计值中都有一些偏离真值太远(超过半波束宽度), 导致正确分辨概率接近于零。从图(a)中可以看出 MUSIC 方法的分辨能力比最小模和 TLS-ESPRIT 差。图(b)、(c)、(d)分别是三种方法对三个目标方位估计的均方误差随信噪比的变化情况, 信噪比从能正确分辨的 5dB 开始统计。可以看到估计精度以 TLS-ESPRIT 最高, MUSIC 方法最差。

条件二的方位估计性能见图 3-11, 此时方位间隔还是小于波束宽度, 所以常规波束方法无法分辨, 在此没有对其统计性能进行考察。该图中图(a)是三种高分辨方法的正确分辨概率随信噪比变化的曲线。从中可以看出 MUSIC 方法的分辨能力最差, 最小模的分辨能力最好。图(b)、(c)、(d)分别是三种方法对三个目标方位估计的均方误差随信噪比的变化情况, 0dB 时 MUSIC 方法估计精度较差。最小模估计精度较好, 5dB 以上三种方法的估计精度相差不大。

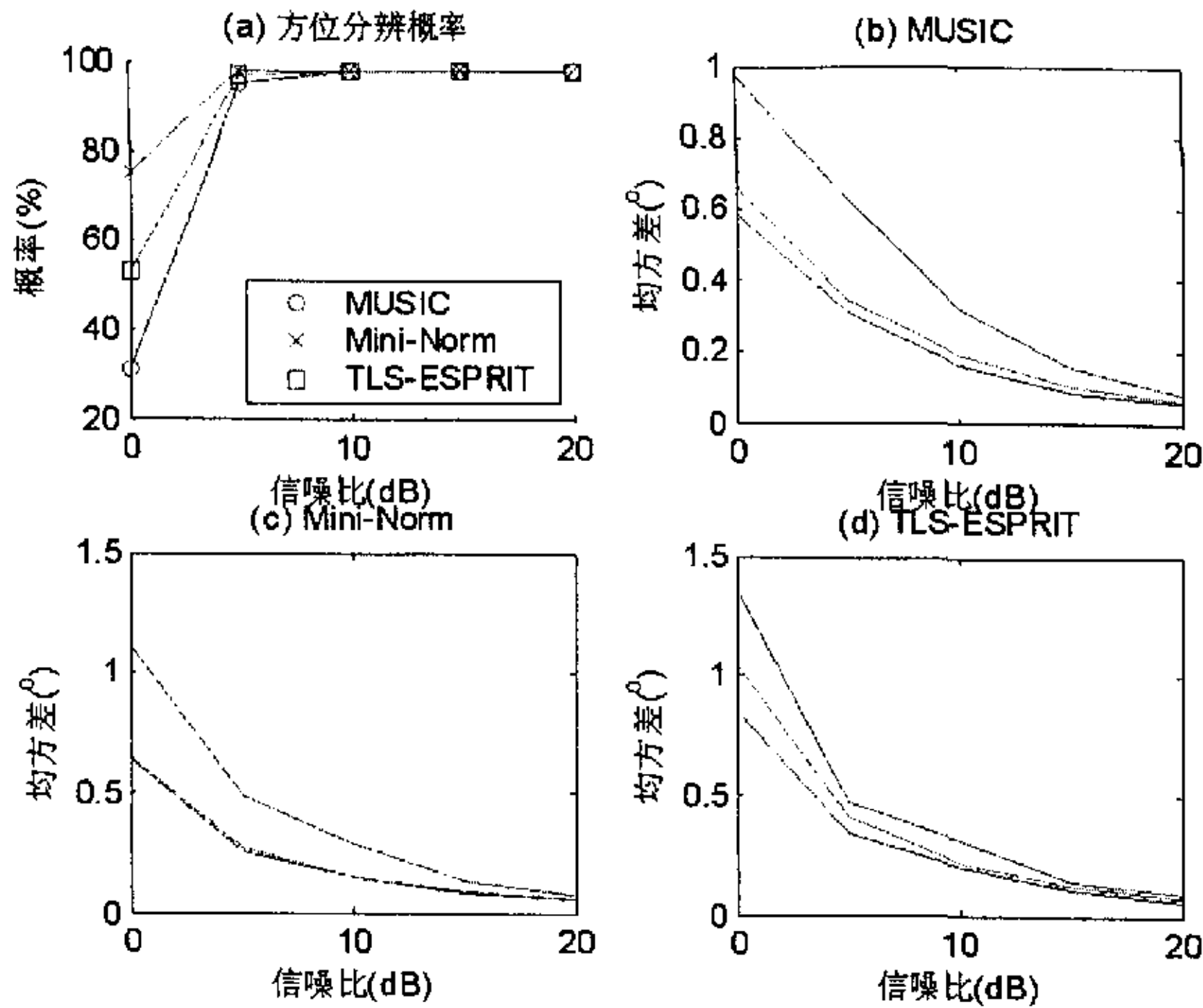


图 3-11 条件二的方位估计性能

条件三的方位估计性能见图 3-12，此时方位间隔略小于波束宽度，常规波束方法还是无法分辨，在此没有对其统计性能进行考察。该图中图(a)是三种高分辨方法的正确分辨概率随信噪比变化的曲线，从中可以看出 TLS-ESPRIT 在低信噪比下的正确分辨概率最低。图(b)、(c)、(d)分别是三种方法对三个目标方位估计的均方误差随信噪比的变化情况，0dB 时 TLS-ESPRIT 方法估计精度较差。最小模估计精度较好，5dB 以上三种方法的估计精度相差不大。

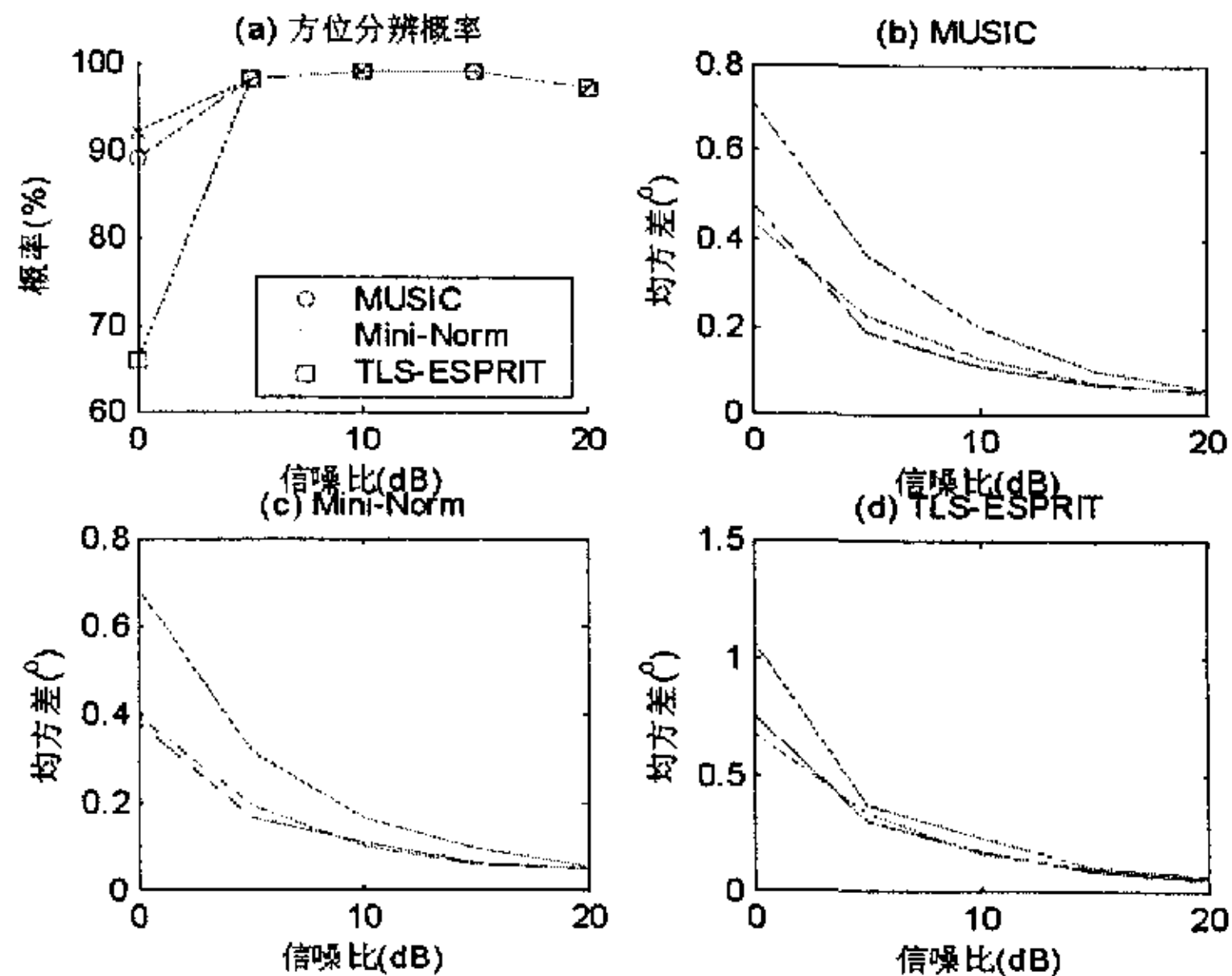


图 3-12 条件三的方位估计性能

条件四的方位估计性能见图 3-13, 此时方位间隔大于波束宽度, 但由于三个目标方位相差都不大, 常规波束方法还是无法完全分辨, 在 5dB 以上的高信噪比时也只能达到 66% 左右的正确分辨概率, 见图(a)。三种高分辨方法的正确分辨概率基本相同。图(b)、(c)、(d)分别是密集波束扫描、MUSIC、TLS-ESPRIT 方法对三个目标方位估计的均方误差随信噪比的变化情况, 常规波束扫描方法的估计精度明显较差。

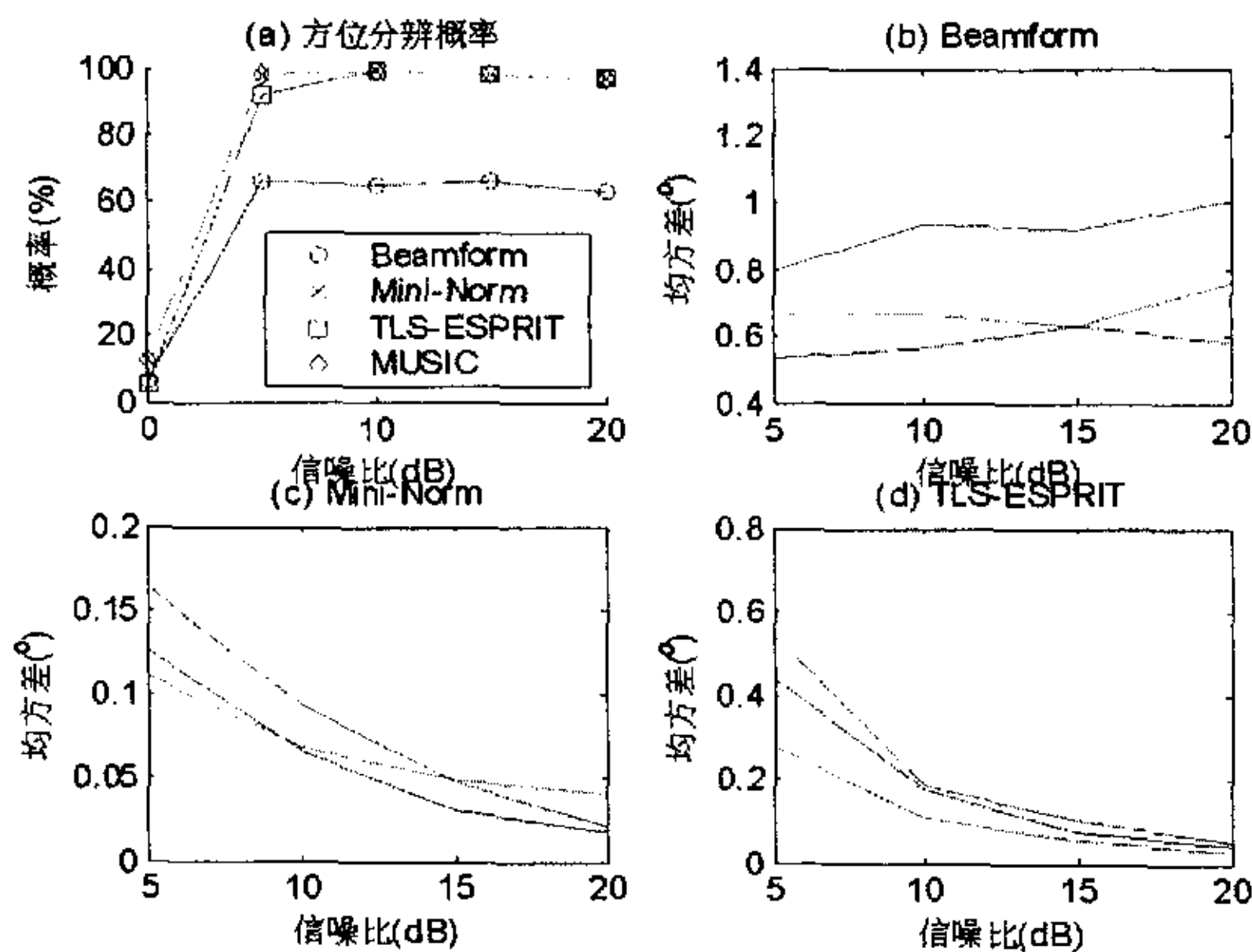


图 3-13 条件四的方位估计性能

### § 3.4.2 多目标定位中的时延估计性能

先来看看常规互相关法的性能。图 3-14(a)给出了互相关法在条件一、二、三情况下的正确分辨概率, 条件一、二的目标时延间隔大于信号的模糊区间, 高信噪比时完全能够分辨; 条件三的目标时延间隔小于信号的模糊区间, 信噪比 20dB 时分辨概率也只有 65%; 条件四的目标时延间隔远小于信号的模糊区间, 互相关法根本无法分辨, 故图中没有给出条件四的仿真结果。

图 3-14(b)、(c)、(d)分别给出了三种条件下互相关法估计三个目标时延的均方误差, 条件一、二在信噪比大于 5dB 时估计误差小于 0.1 秒, 条件一在 0dB 时的误差异常是由于其正确分辨概率低造成的。而条件三在高信噪比下的误差也在 0.2 秒以上。



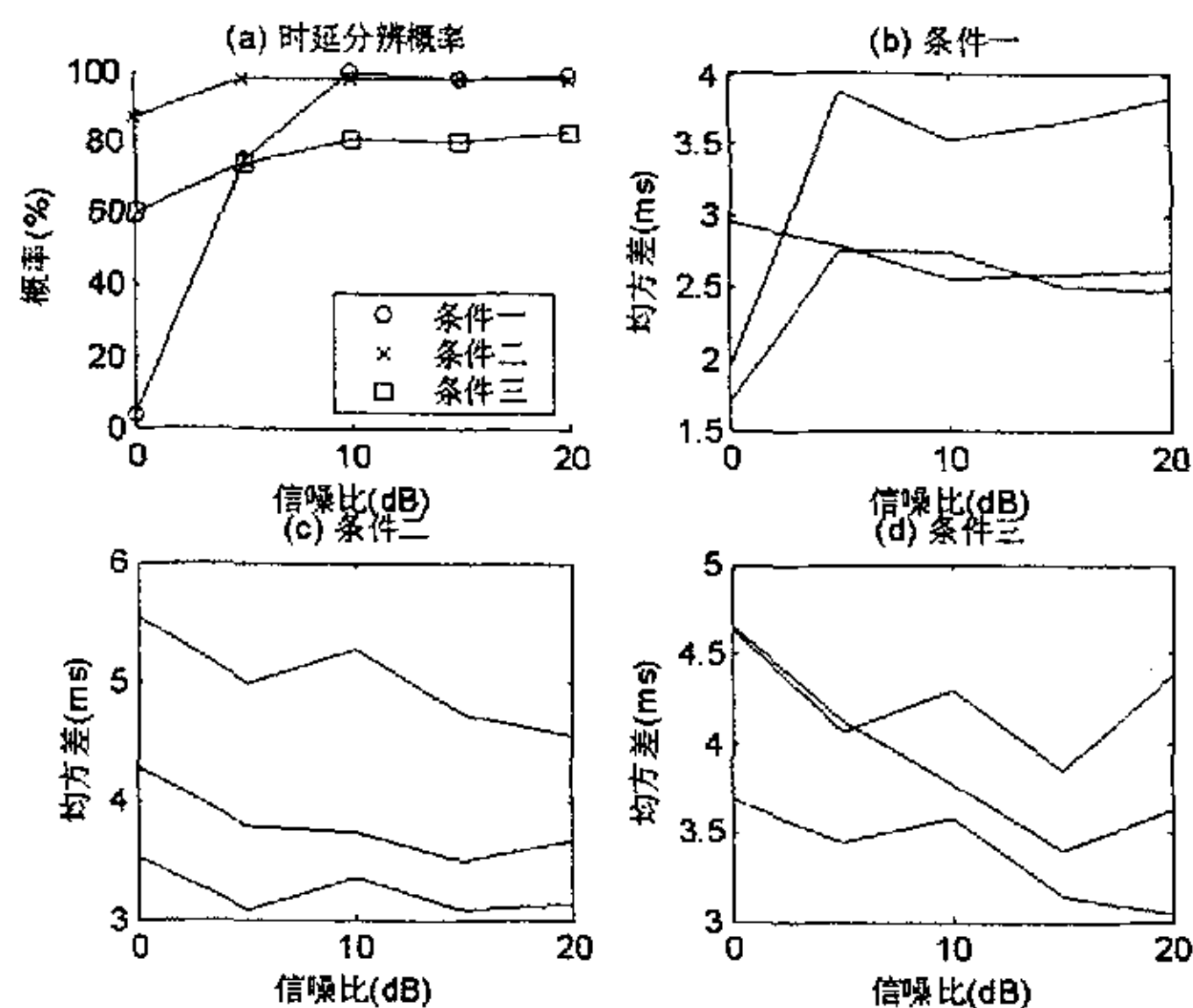


图 3-14 互相关法在各种条件下的时延估计性能

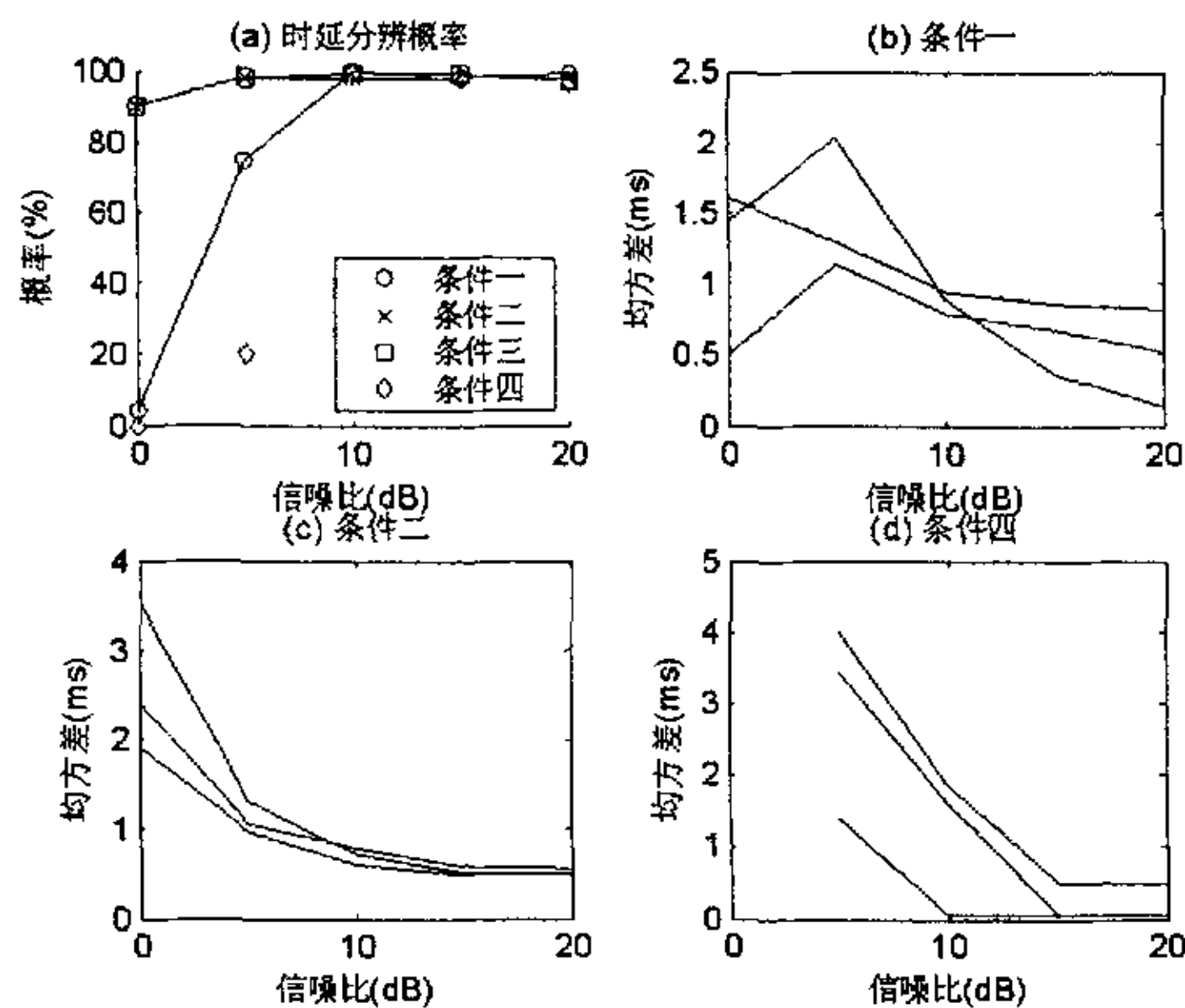


图 3-15 时延 MUSIC 方法在各种条件下的估计性能

图 3-15(a)给出了时延 MUSIC 方法在四种条件情况下的正确分辨概率。条件二、三的分辨概率较高，因为目标时延间隔较大，而且目标间较大的方位差也起到了解相干的效果；条件一的目标时延间隔虽然最大，但是此时目标间的方位差很小，目标之间的相干性增强，影响了基于特征分解的时延 MUSIC 分辨能力；条件四的目标时延间隔很小，给目标时延的分辨造成困难。

图 3-15(b)、(c)、(d)分别给出了条件一、二、四情况下时延 MUSIC 方法估计三个目标时延的均方误差。可以看到在信噪比在 8dB 以上时估计误差均小于 0.1 秒，估计精度与时延间隔的关系不大。

### § 3.4.3 多目标定位中的参数配对性能

用于描述参数配对性能的指标主要是正确配对概率，参数正确配对的基础是方位和时延参数同时正确分辨，因此正确配对概率不会超过方位正确分辨概率或时延正确分辨概率。图 3-16 给出了各种条件下参数配对的性能，每个子图中有三根曲线分别代表三种高分辨方位估计方法与时延 MUSIC 结合时的配对正确概率。

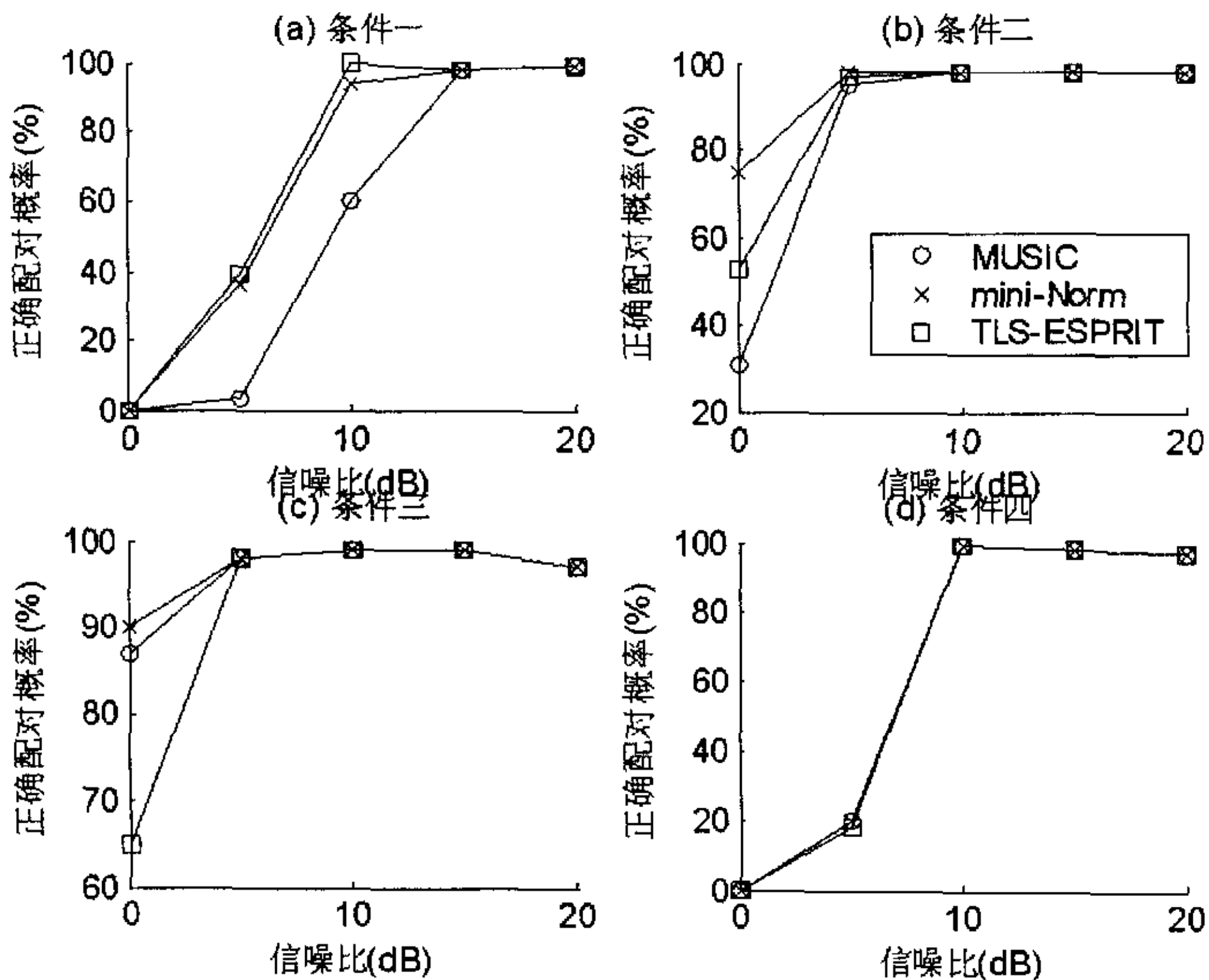


图 3-16 在各种条件下的参数配对性能

从图中可以看到，信噪比较高时配对效果跟方位估计方法没有太大关系，主要受两维参数分辨概率的影响，如图(a)中 MUSIC 方法在条件一下的配对效果明显劣于其它两种方位估计方法，就是由于在该条件下 MUSIC 的方位正确分辨概率较低(见图 3-10(a))。

而在四种条件下，条件二、三的配对效果好，条件一、四的配对效果差，这是由于时延 MUSIC 方法在四种条件情况下的正确分辨概率不一样，其原因见图 3-15(a)的分析。

### § 3.4.4 实用的多目标定位性能

上述多目标定位性能的研究都是认为把所有目标同时正确分辨出来才算

一次成功的定位，而在工程实现中，如果两个目标在方位和时延上都很接近，我们并不一定要求把它俩分辨开，允许把它俩作为一个整体来定位，只要这种“模糊”不影响其它目标的定位。

举例来说，如图 3-17 左图所示，假设有 A、B、C 三个目标，其中 A、B 两目标很难分辨。如果我们不能同时分辨三个目标，而只能得到 A'、C' 两个目标的定位结果，这样并不影响对整个态势的把握，我们称之为一次有效的多目标定位。相反，如果我们得到的是 A''、C'' 这两个目标的定位结果，则与实际的多目标分布相差很大，我们称之为一次无效的多目标定位。“实用的多目标定位性能”就是研究获得有效的多目标定位结果的能力。

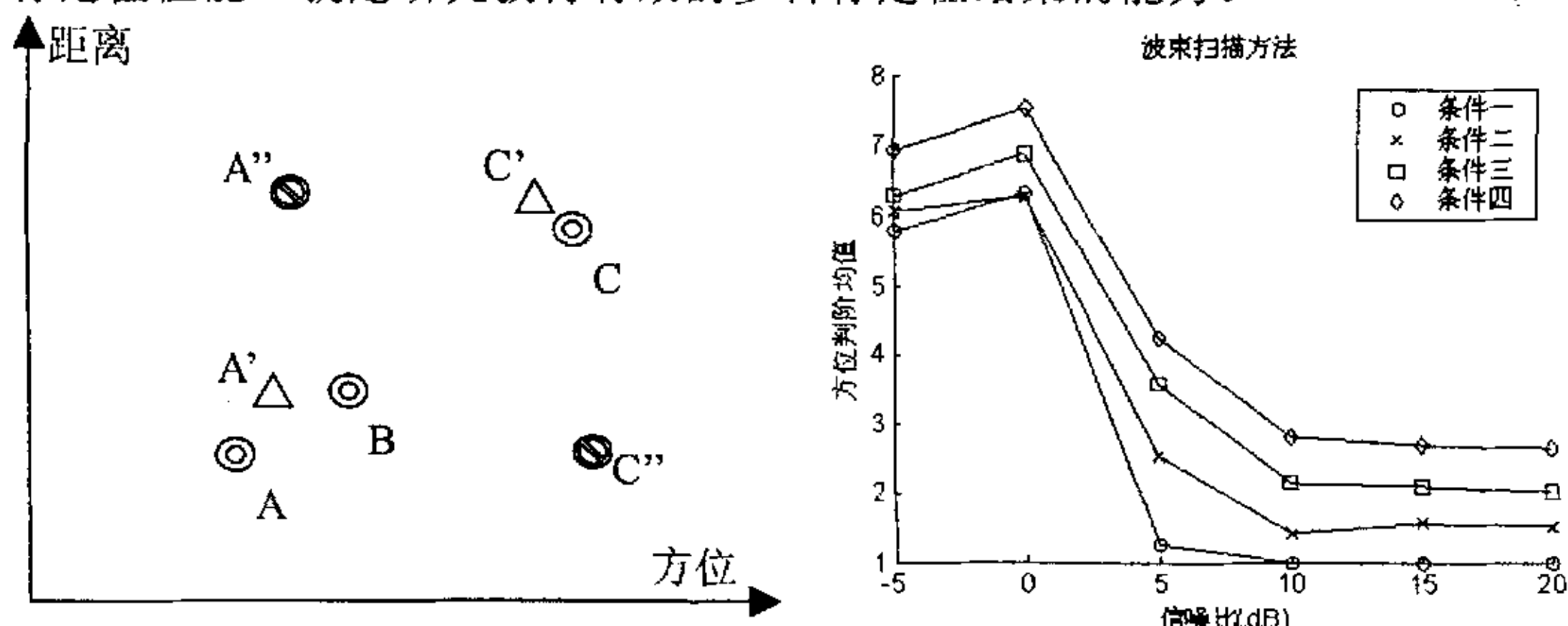


图 3-17 实用的多目标定位

这样一次有效的多目标定位结果用估计误差来判断其优劣是不合适的，因为它是对无法分辨的真实值的一个模糊估计。我们改用判阶均值和有效分辨概率这两个指标来描述其有效分辨能力。判阶均值反映了系统能分辨多少个目标，例如判阶均值为 2.5 时，判 3 个目标的概率与判 2 个目标的概率大致相同，都等于 50%。由于有效分辨允许方位分辨的目标数与时延分辨的目标数目不等，因此判阶应该在时延、方位两维上独立进行。方位有效分辨的界定是所得方位估计值与最近的真值之差不超过半个波束宽度，时延有效分辨的界定是所得时延估计值与最近的真值之差不超过半个模糊区间。

先来看看方位的有效分辨情况。三种高分辨方位估计方法都是基于特征分解的，可以用 AIC 准则利用特征值来判阶，而波束扫描方法的判阶依据是与最大峰高度相差不超过 10dB(考虑到旁瓣高度是 -13dB)的谱峰数目，这两种判阶方式不具有可比性。右图是波束扫描法的判阶均值，它在低信噪比下判阶均值大于 4，这是由于此时最大峰不明显，与其它谱峰相差不大，造成判阶异常。在高信噪比下，当目标方位间隔较大时(条件三、条件四)可以判出 2~3 个目标，而目标方位间隔较小时(条件一、条件二)判阶均值小于 2，无法分辨目标。图 3-18 给出了各种条件下三种高分辨方法的判阶均值。其中 MUSIC 和 Mini-Norm

的判阶都是基于同一个平滑后相关矩阵的特征值, 因此判阶结果完全一致。TLS-ESPRIT 的判阶是基于 TLS 构造矩阵的奇异值, 由于引入了最小二乘的步骤, 判阶结果在 0dB 以下的低信噪比情况下略优于 MUSIC 和 Mini-Norm。

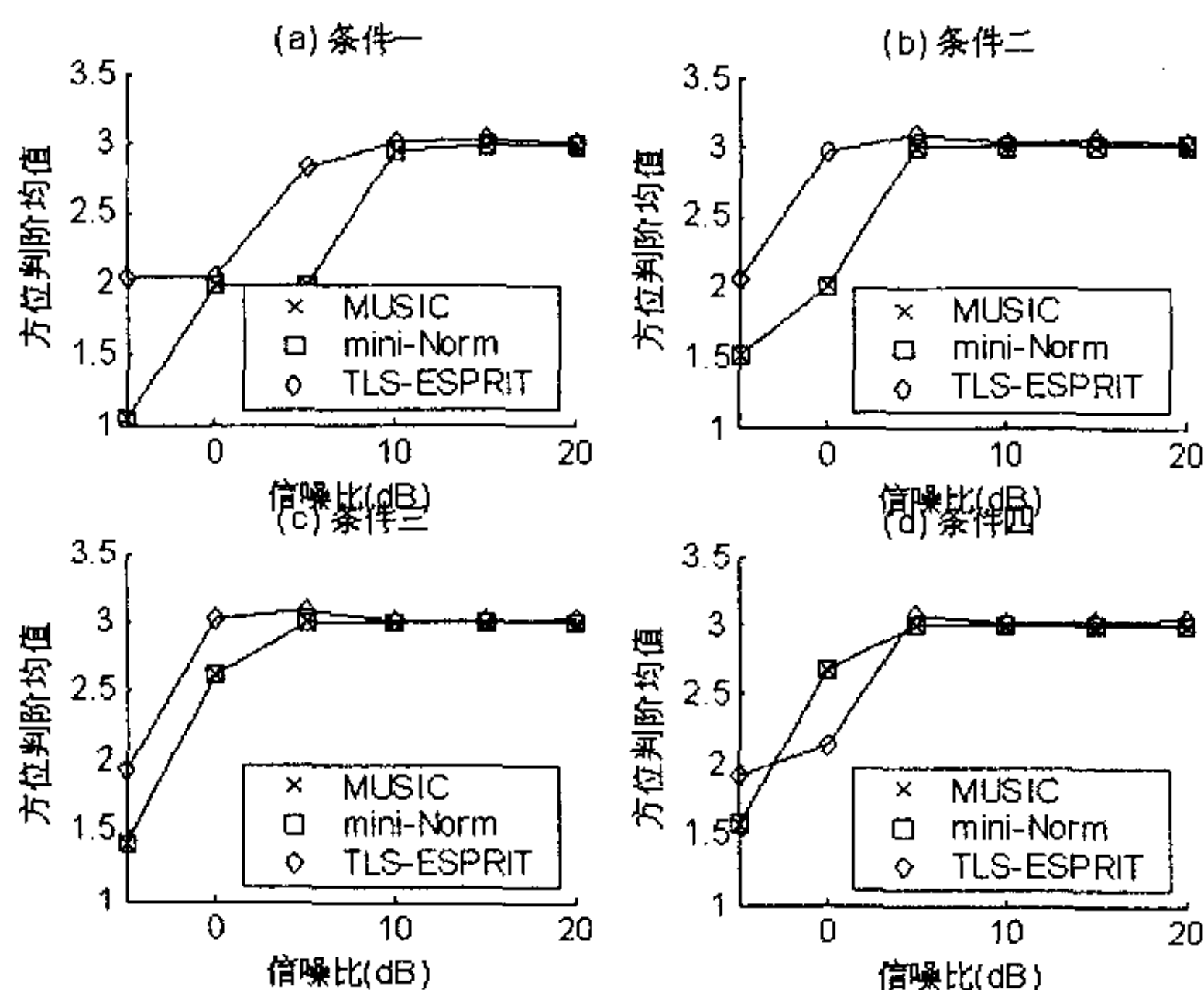


图 3-18 在各种条件下的方位判阶均值

各种条件下的目标方位有效分辨概率在图 3-19 中给出, 很明显, 波束扫描方法的有效分辨能力最差, 条件一时完全不能分辨, 条件二时 20dB 也只能分辨 50%, 条件三、四时信噪比大于 10dB 才能有效分辨。三种高分辨方法分辨性能相近, 只要 0dB 以上四种条件下都可以有效分辨。

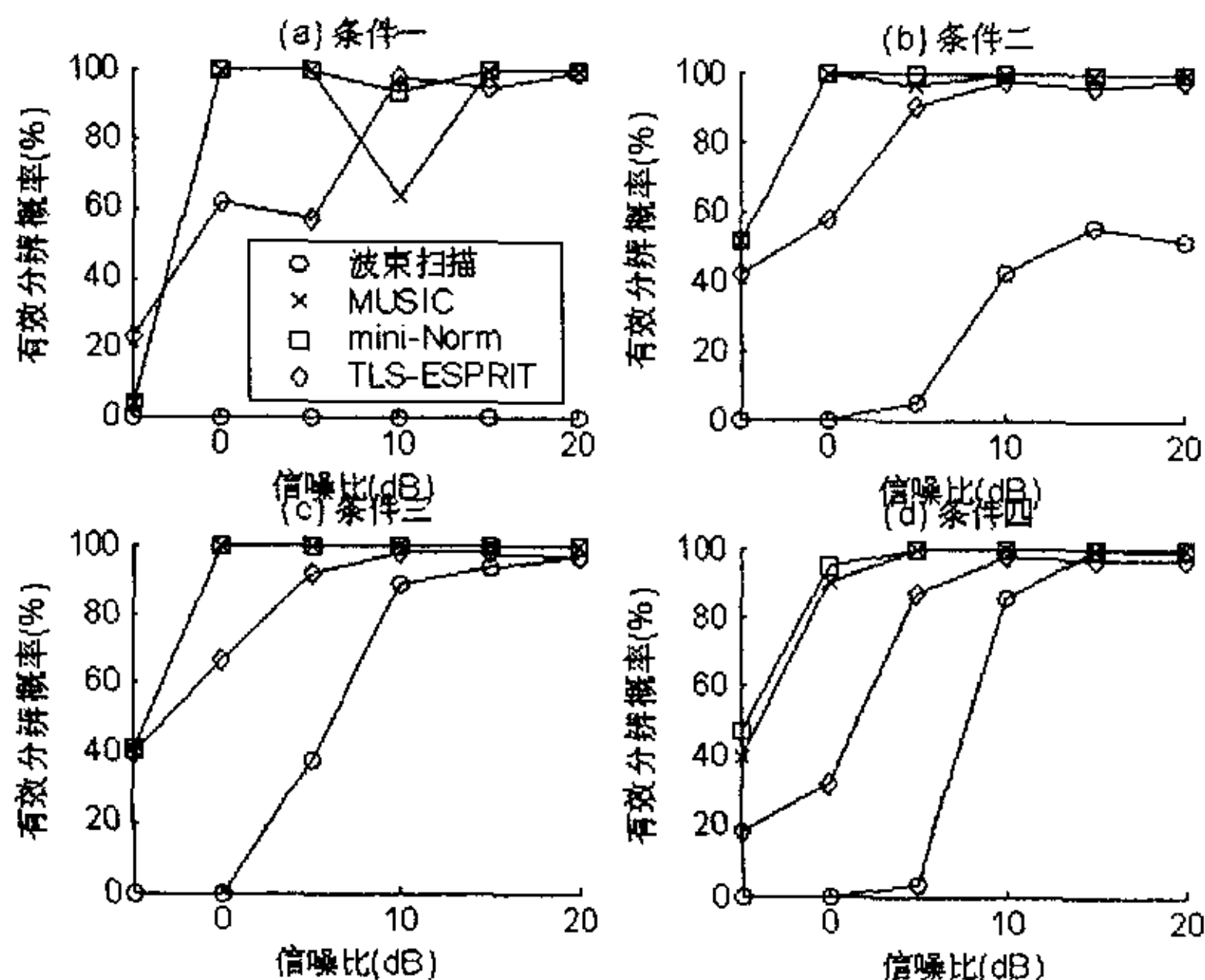


图 3-19 在各种条件下的方位有效分辨概率

再来看时延的有效分辨性能。图 3-20给出了各种条件下互相关法和时延 MUSIC 进行时延判阶的均值, 与前述波束扫描法方位估计的判阶准则类似, 互相关法判阶的依据是与最大峰高度相差不超过 10dB, 而时延 MUSIC 的判阶依据是数据矩阵的奇异值计算出的 AIC 曲线。我们发现当目标时延间隔较大时(条件一、二、三), 互相关法的低信噪比判阶性能远优于时延 MUSIC, 这说明后者的信噪比要求较高。当目标时延间隔较小时(条件四), 时延 MUSIC 的高分辨性能才表现出来。由于我们处理的是单次回波, 各源之间的相干性较强, 在方位分辨时可以通过空间平滑来解决, 而时延 MUSIC 中没有相应的时延平滑算法, 导致时延分辨能力受到影响。

图 3-21给出了各种条件下互相关法和时延 MUSIC 两种方法的有效时延分辨概率, 它所反映的问题与上一个图中判阶均值所表现的相同。当目标时延间隔较大时(条件一、二、三), 互相关法的低信噪比有效分辨能力优于时延 MUSIC, 当时延间隔较小时(条件四), 时延 MUSIC 的高分辨性能良好。

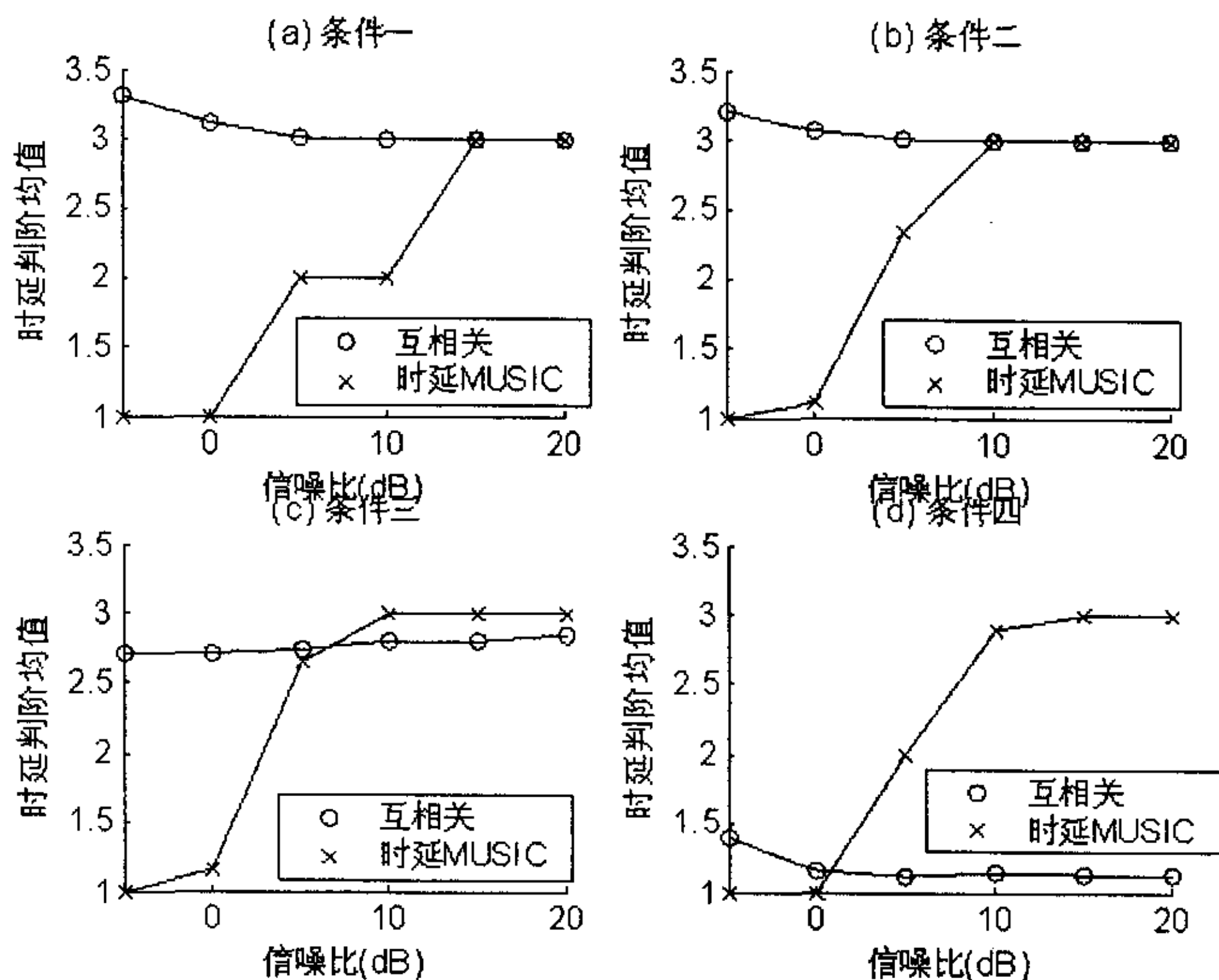


图 3-20 在各种条件下的时延判阶均值



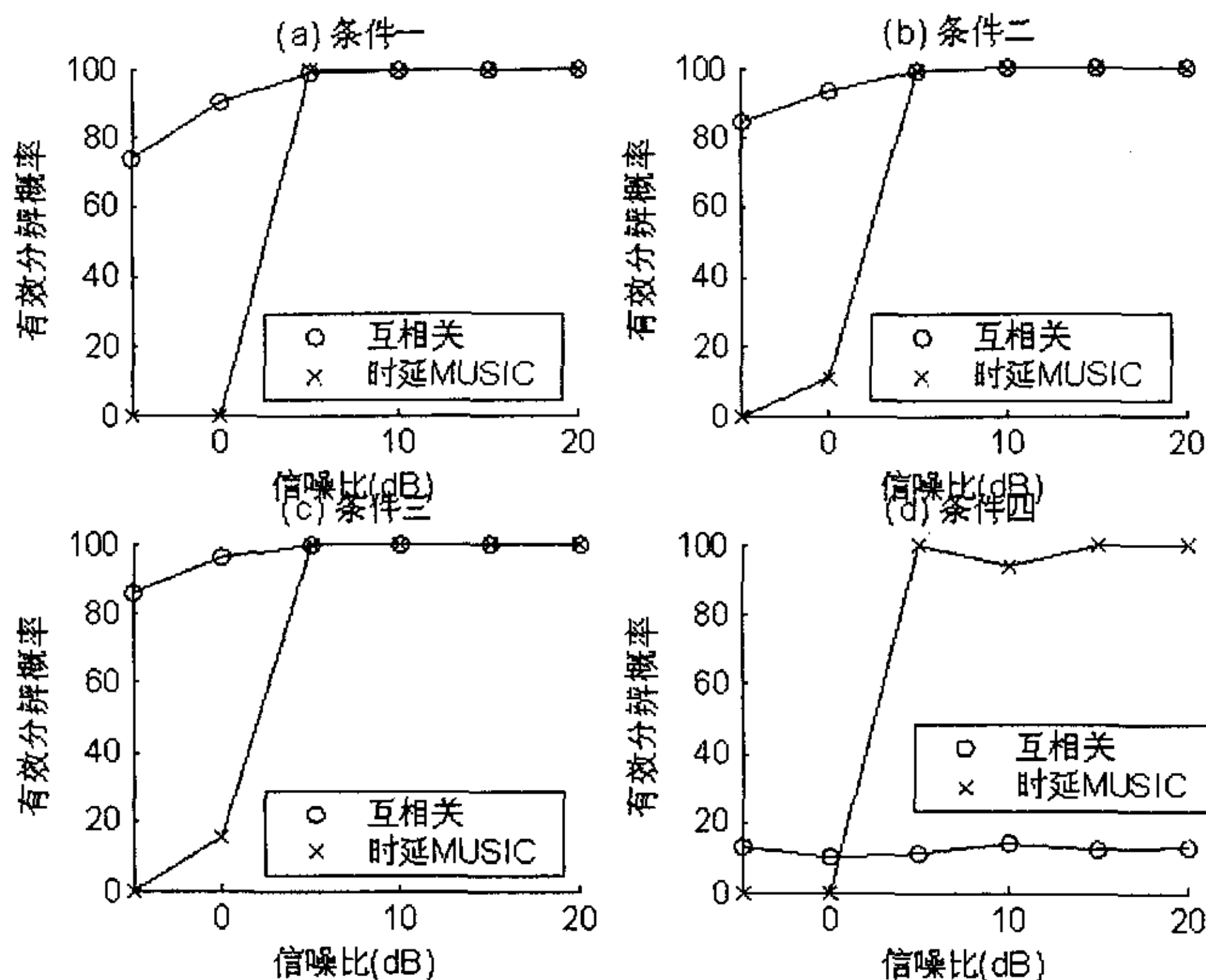


图 3-21 在各种条件下的时延有效分辨概率

从统计性能上看, 时延 MUSIC 方法要进入工程应用, 必须提高其低信噪比性能, 一种比较可行的技术路线是密集采样, 在形成时延相关矩阵中不仅使用空间的快拍、也使用时间上的快拍, 充分利用时间增益抑制噪声。

有效配对性能的研究是在时延和方位参数都能有效分辨的前提下进行的, 因此有效配对概率不会超过二维参数有效分辨概率的最小值。表 3-7给出了各种条件下方位和时延估计方法搭配时的有效配对概率。方位估计中三种高分辨方法的有效分辨性能相差不多, 这里选最小模方法作为代表。条件一中目标方位间隔很小, 波束扫描根本无法分辨(见图 3-19(a)), 故只有最小模方法参与配对仿真, 它与两种时延估计搭配后的配对效果都不错, 5dB 以上的信噪比就可以达到 94% 以上的有效配对概率。条件二中目标方位间隔还是较小, 导致波束扫描参与的配对效果较差, 最小模参与的配对效果比条件一时还要好。条件三中目标方位间隔接近于波束宽度, 波束扫描参与的配对效果有所增强。此时时延间隔较小, 互相关方法能分辨的目标数目下降, 见图 3-20(c), 但它的有效分辨概率仍较高, 因此它与最小模方法搭配后的有效配对概率还与条件二相当。条件四中目标方位间隔已经大于波束宽度, 波束扫描可以分辨三个目标, 但其估计方差很大, 见图 3-13(b), 因此它参与的配对效果还是不佳。在此条件下时延间隔很小, 互相关方法已不能有效分辨, 见图 3-21(d), 故表中没有列入。

表 3-7 有效配对概率

仿真条件	方位估计	SNR	-5dB	0dB	5dB	10dB	15dB	20dB
		时延估计						
条件一	最小模	互相关	3	91	99	94	100	100
		时延 MUSIC	0	0	100	94	100	100
条件二	波束扫描	互相关	0	0	5	43	56	52
		时延 MUSIC	0	0	4	43	56	52
	最小模	互相关	42	94	99	100	100	100
		时延 MUSIC	0	11	97	100	100	100
条件三	波束扫描	互相关	0	0	38	89	94	97
		时延 MUSIC	0	0	38	89	94	97
	最小模	互相关	30	96	100	100	100	100
		时延 MUSIC	0	15	100	100	100	100
条件四	波束扫描	时延 MUSIC	0	0	3	69	85	77
	最小模	时延 MUSIC	0	0	100	94	100	100

从最后的有效配对情况看, 在不小于 5dB 的较高信噪比情况下, 高分辨方位估计方法和高分辨时延估计方法相搭配在各种目标分布条件下都能取得良好的配对效果。在 0dB 以下的低信噪比情况下, 则应考虑用高分辨方位估计方法和互相关时延估计方法搭配进行多目标定位。

### § 3.4.5 不等强度对多目标定位的影响

前面研究的多目标定位都假设目标的强度是相等的, 而实际上多目标的回波强度往往不相等, 有必要考虑目标反射强度不等对多目标定位的影响。由于目标强度的分布随意性很大, 不便于设计统计条件, 我们假设三个目标的强度是个等比数列, 形如  $a:1:1/a$ , 这样只需要控制比例  $a$  就可以得到不同强度分布多目标, 信噪比按中等强度的目标来计算, 目标的强度差按最大和最小强度的比值来计算。例如设定  $a=1.4$ , 则强弱目标强度差为  $20\lg a^2 = 12\text{dB}$ 。

图 3-22 给出了不等强度时各种条件下的正确判出三个目标的概率, 图中的每一条曲线分别表示目标强度差为 3~12dB 的判阶结果。随着强度差的增大, 低信噪比下判阶效果普遍下降, 高信噪比的判阶性能受影响不大。

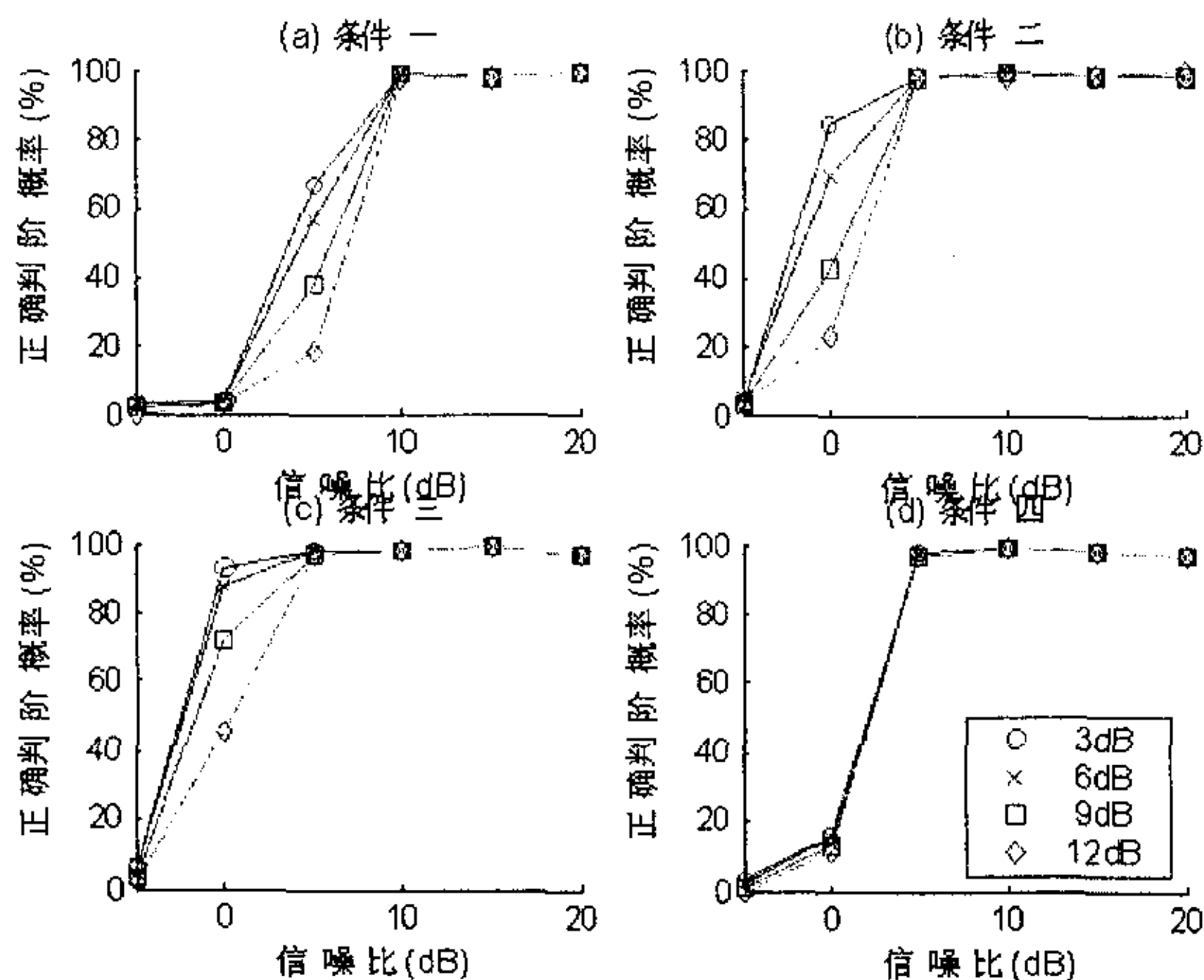


图 3-22 不等强度时的正确判阶概率

条件二下最小模方法估计目标方位的正确分辨概率随强度差及信噪比变化的情况见图 3-23, 显然随着强度差从 3dB 变化到 28dB, 正确分辨性能是逐渐下降的, 这一点从信噪比为 0dB 的截线中可以清楚地看到。从强度差为 28dB 的截线来看, 信噪比 10dB 时的分辨概率达到 80%, 此时弱目标的信噪比只有  $10-14=-4\text{dB}$ , 因此用高分辨方位估计方法时, 强目标的覆盖对弱目标的分辨影响不大, 适合于强干扰背景下的弱信号检测。

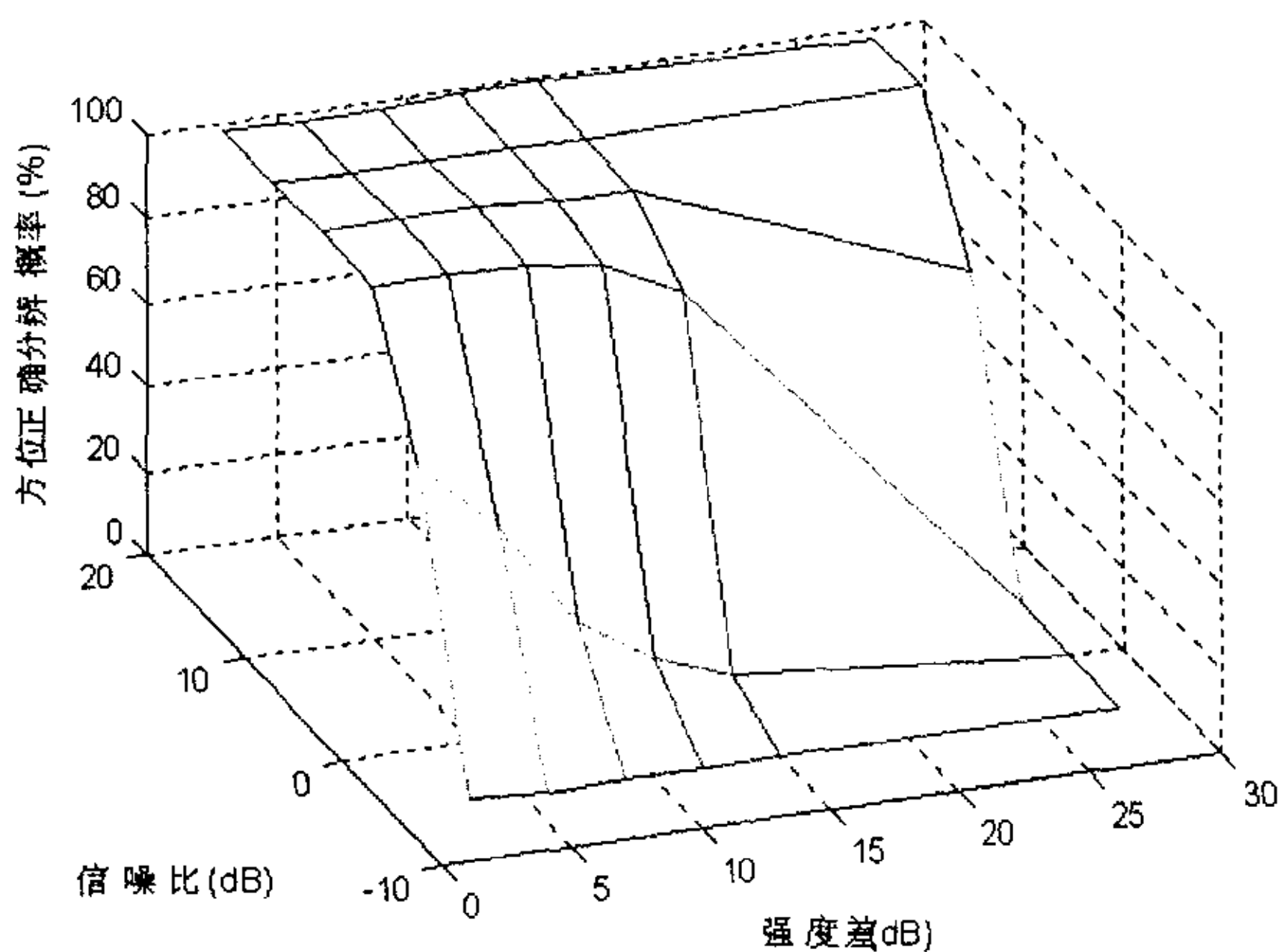


图 3-23 不等强度时最小模方位估计的正确分辨概率

常规的波束扫描方法估计不等强度多目标的性能就很差。条件四情况下，波束扫描法方位正确分辨性能随目标强度差的变化见图 3-24。当目标强度差大于波束旁瓣级时，分辨性能急剧下降，如图中强度差为 28dB 时，即使信噪比高达 20dB，正确分辨概率也为 0。这说明在目标强度差异较大的场合，不适合用常规的波束扫描法来估计方位。

用目标时延间隔最大的条件一来考察互相关法时延估计的正确分辨性能随目标强度差的变化情况，见图 3-25。从图中看到，这种方法受强度差的影响十分明显，当强弱目标相差 9dB 时，即使信噪比高达 20dB，正确分辨概率也低于 50%；当强弱目标相差 15dB 时，正确分辨概率低于 30%。显然，互相关法无法胜任不等强度目标的时延分辨要求。

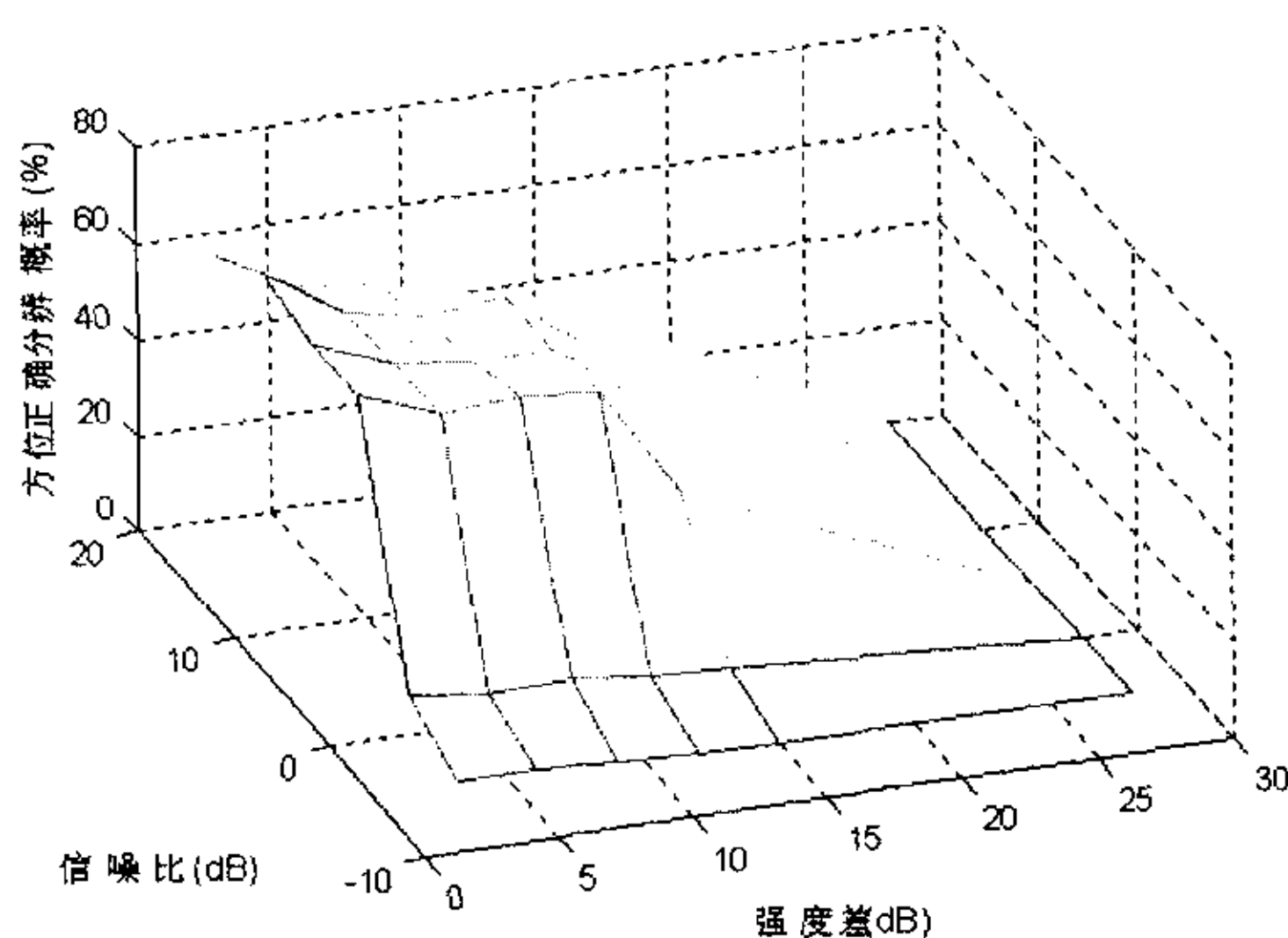


图 3-24 不等强度时波束扫描方位估计的正确分辨概率

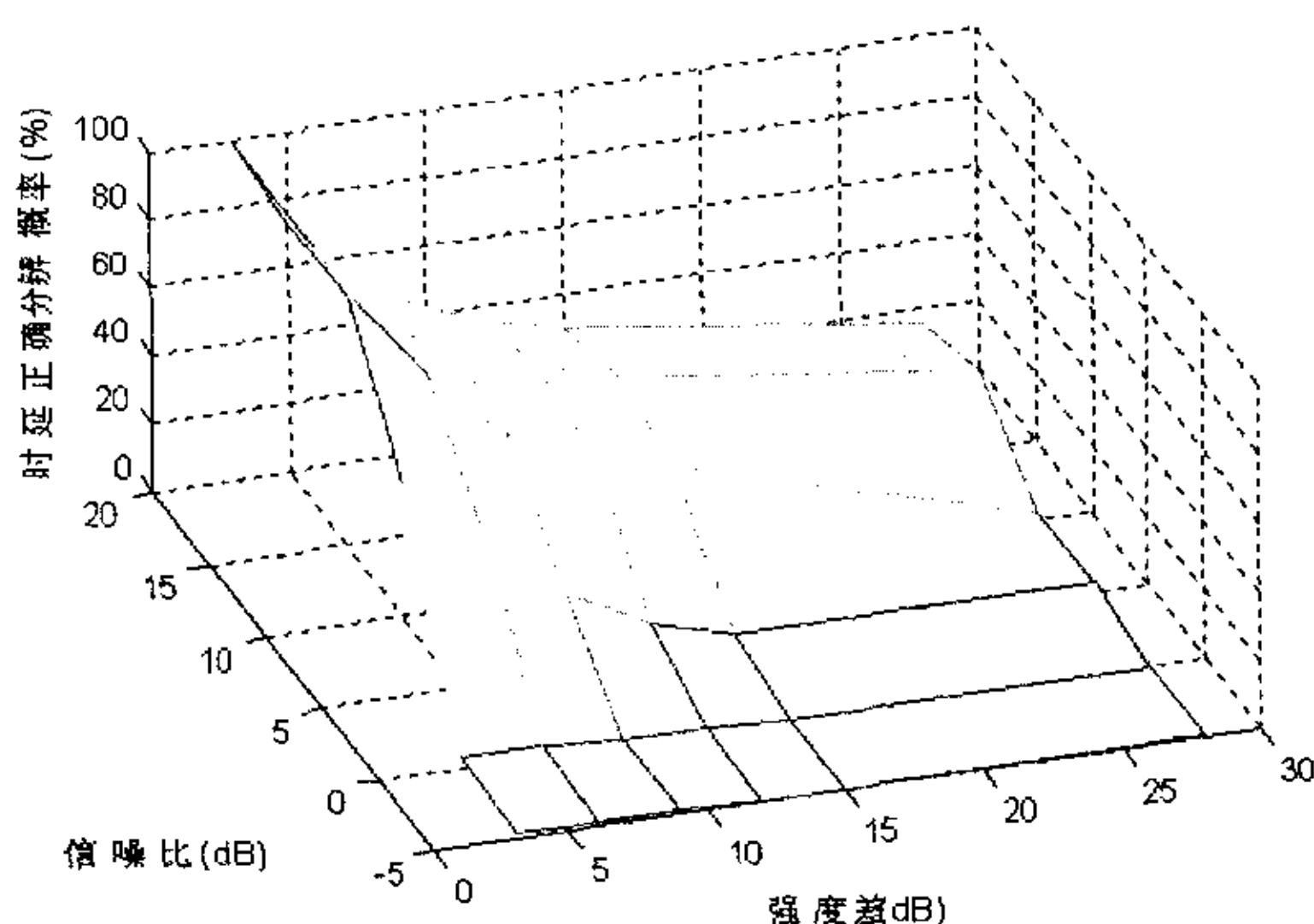


图 3-25 不等强度时互相关法时延估计的正确分辨概率

时延 MUSIC 方法可以克服互相关法的上述缺陷,用目标时延间隔最小的条件四来考察,时延 MUSIC 法时延估计的正确分辨性能随目标强度差的变化情况见图 3-26。从图中强度差为 15dB 的截线看,信噪比为 10dB 时的正确分辨概率超过 60%,此时弱目标的信噪比为  $10-7.5=2.5\text{dB}$ ;信噪比为 15dB(弱目标信噪比 7.5dB)时,正确分辨概率接近 100%。如果以弱目标的信噪比来计算,这一结果和等强度目标的时延分辨性能相当,见图 3-15(a)。因此时延 MUSIC 方法的分辨性能受目标强度差的影响不大,适合于信噪比较高时不等强度目标的时延分辨。

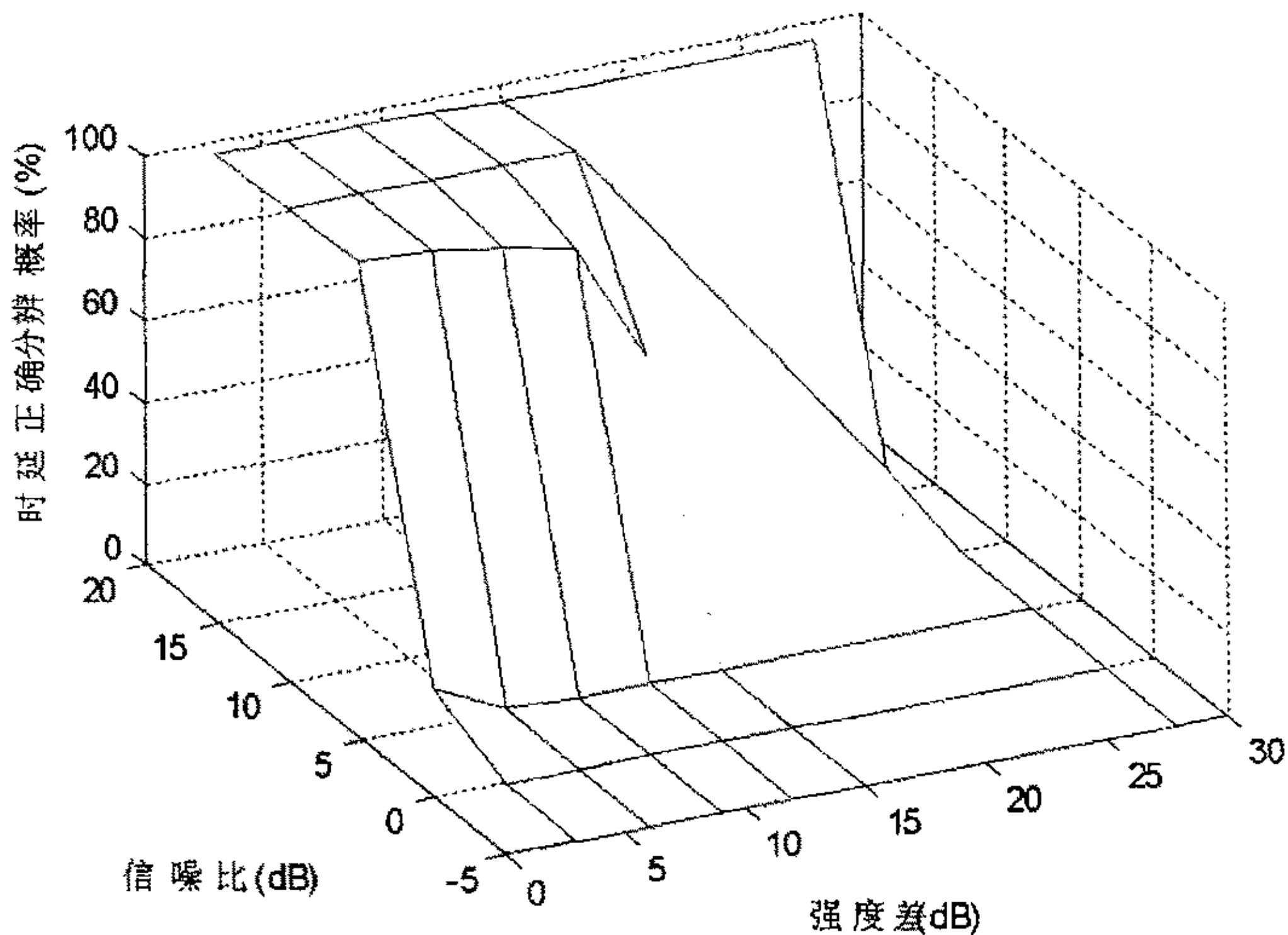


图 3-26 不等强度时时延 MUSIC 法的正确分辨概率

考虑到不等强度条件下,只有高分辨的方法仍具有足够高的分辨概率,我们选用最小模方位估计和时延 MUSIC 搭配进行配对性能的研究。图 3-27给出了 4 种条件下的正确配对概率。与图 3-16所示的等强度多目标参数配对效果相比,本图所表现的配对性能似乎稍差,且随着强度差的增大配对概率下降。但考虑到这里的信噪比是以中等强度目标计算的,强度差增大意味着弱目标的信噪比降低,如果以弱目标来计算信噪比,则两个图所表现的配对性能是相当的。这就表明,在不等强度情况下,用高分辨的方位估计方法和高分辨时延估计方法搭配的多目标定位效果良好,前提是弱目标的信噪比应大于时延 MUSIC 的信噪比门限,详见图 3-15。



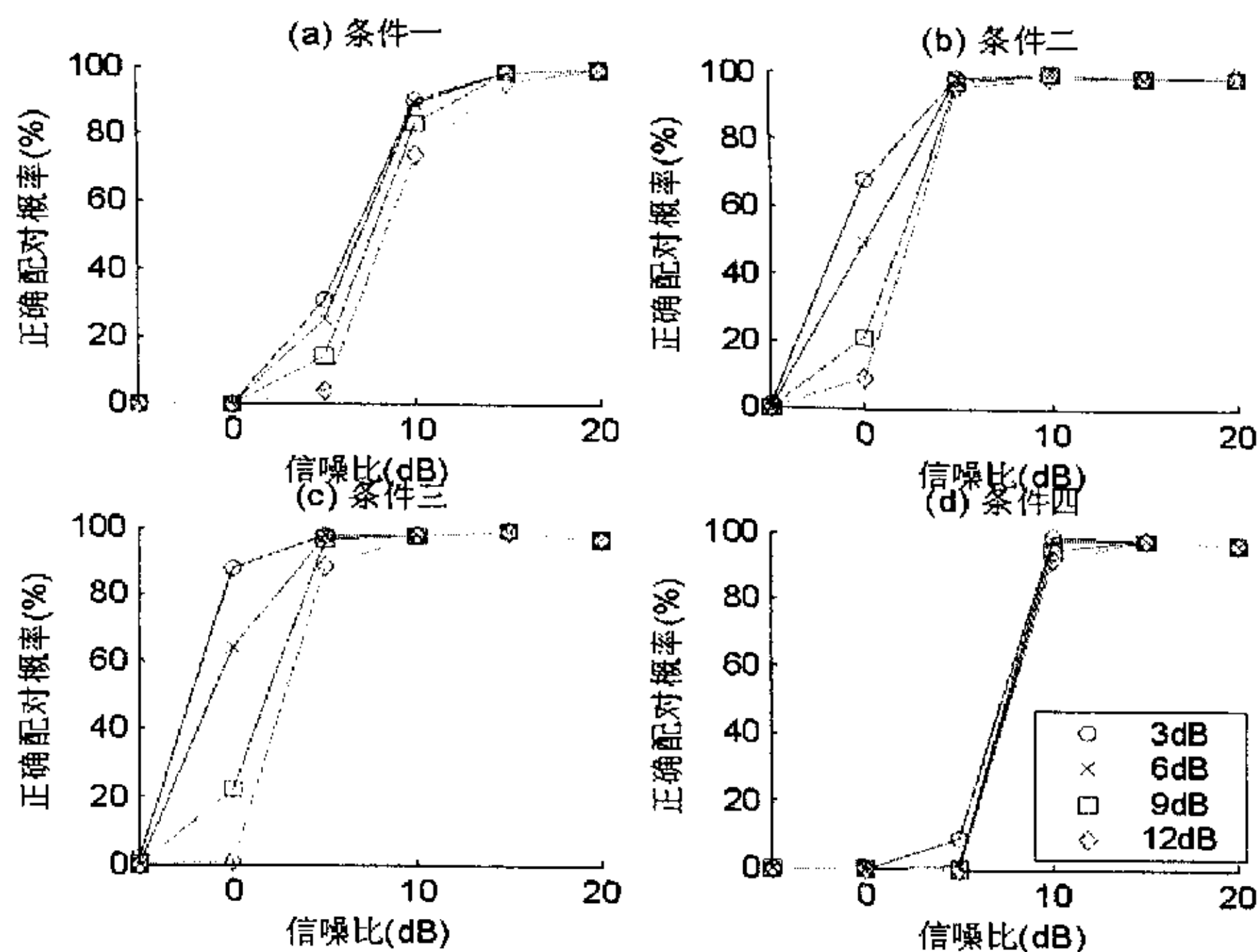


图 3-27 不等强度时的正确配对概率

### § 3.5 本章小结

本章全面研究了基于强度配对的多目标定位技术，它分为三个步骤：多目标方位估计、多目标时延估计、时延和方位参数的配对。本章首先介绍了有望用于多目标定位的几种方位估计方法和两种时延估计方法，以及强度配对算法。然后设计了四种典型的多目标分布条件，通过大量的计算机仿真给出了基于配对的多目标定位方法的性能，并对多目标定位的实用性能、不等强度目标的定位等问题进行了专门的讨论。

理论分析和仿真研究表明，用高分辨的方位估计方法和高分辨时延估计方法搭配的、基于强度配对的多目标定位在各种目标和环境条件下都有较好的定位效果。

### § 3.6 本章参考文献

- [1] Simon Haykin, "Advances in Spectral Analysis and Array Processing", Prentice-Hall, 1991
- [2] 刘树德, 罗景青, 张剑云, "空间谱估计及其应用", 中国科学技术大学出版社, 1997 年
- [3] 陈建峰, "水下高分辨定向关键技术研究", 西北工业大学博士论文, 1999 年

- [4] 张群飞, 谢一清, “分裂波束精确定向”, 水中兵器, 1995.3
- [5] S.M.Kay, “Modern Spectral Estimation”, Prentice-Hall, 1988
- [6] S.L.Marple, “Digital Spectral Analysis with Applications”, Prentice-Hall, 1987
- [7] R. O. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation, Proc. RADC Spectral Estimation Workshop, Griffiss AFBS, NY, 1979
- [8] R. Kumaresan, D. W. Tufts, Estimating the angles of arrival of multiple plane waves, IEEE Trans. on AES, vol.19, no.1, Jan. 1983, pp. 134-139
- [9] R.Roy, A.Paulraj and T.Kailath, “ESPRIT-A Subspace Rotation Approach to Estimation of Parameters of Cisoids in Noise”, IEEE Trans. on ASSP, Vol.34, No.10, Oct. 1986, pp.1340-1342
- [10] M. Viberg, B. Ottersten, “Sensor array processing based on subspace fitting”, IEEE Trans. on SP, vol.39, 1991, pp.1110-1120
- [11] J. L. Mather, “Beamforming pre-processing for high discrimination algorithms”, Poyal signals and Radar Establishment memorandum 4304, 1989
- [12] S. M. Kay, “Accurate frequency estimation at low signal-to-noise ratio”, IEEE Trans. on ASSP, Vol.32, No.3, 1984, pp.540-547
- [13] B. Barboy, A. Lomes, E. Perkalski, “Cell-averageing CFAR for multiple-target situations”, Proc. IEE vol.133, no.2, 1986, pp.176-186
- [14] R.A. Wagstaff, J.L. Berrou, “A fast and simple nonlinear technique for high resolution beamforming and spectral analysis”, JASA, Vol.75, No.4, 1984, pp.1133-1141
- [15] I. Zisking, M. Wax, “Maximum Likelihood Localization of Multiple Sources by Alternating Projection”, IEEE Trans. on ASSP, Vol.30, No.4, 1982
- [16] P. Stoica, K. C. Sharman, “Maximum Likelihood Methods for Direction-of-arrival Estimation”, IEEE Trans. on ASSP, Vol.38, No.7, 1990, pp.1132-1143
- [17] Li J, Stoica P. , “Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction”, IEEE Trans on Signal Processing, Vol.44, No.2, 1996, pp.281-2959
- [18] 陈建峰, “水下目标定向的高分辨技术研究”, 西北工业大学硕士论文, 1996 年
- [19] 张群飞, 黄建国, 谢一清, “时延估计的高分辨方法”, 《声学学报》, 第 20 卷第 3 期, 1995.5

## 第四章 无需配对的多目标定位技术

上一章所提的多目标定位技术需首先获得多目标的距离和方位两维参数的估计,再结合配对算法实现多目标定位。当信噪比较低、目标参数估计误差增大时,配对的准确率会下降。本章借鉴子空间旋转不变思路<sup>[11][12]</sup>,提出了 ESPRIT-CORR 方法<sup>[13]</sup>,可在单次回波内同时估计出多目标的时延和方位,并且不需要额外的配对算法,结合修正算法,可对强度相差 15dB 的多个目标进行高分辨定位,为水下多目标定位提供了一种新思路。

### § 4.1 方位、时延联合估计 ESPRIT-CORR 算法原理

#### § 4.1.1 原理

通常的 ESPRIT 方法在估计方位时用两个子阵形成下列两个相关矩阵

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{X}_1^H(t)\mathbf{X}_1(t) = \mathbf{A}_-^*(\theta)\tilde{\mathbf{S}}^H(t)\tilde{\mathbf{S}}(t)\mathbf{A}_-^T(\theta) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{X}_1^H(t)\mathbf{X}_2(t) = \mathbf{A}_-^*(\theta)\tilde{\mathbf{S}}^H(t)\tilde{\mathbf{S}}(t)\Phi\mathbf{A}_-^T(\theta) \quad (4.2)$$

显然它们满足

$$\mathbf{R}_0\mathbf{A}_-^*(\theta)\Phi = \mathbf{R}_1\mathbf{A}_-^*(\theta) \quad (4.3)$$

通过一次广义特征分解可求得  $\Phi$ , 进而得到目标方位估计。

从 ESPRIT 算法中可以得出其关键是形成两个相关矩阵,它们的广义特征值就是  $\Phi$ 。我们可以用另外的方法形成相关矩阵:

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{X}_1(t)\mathbf{X}_1^H(t) = \tilde{\mathbf{S}}(t)\mathbf{A}_-^T(\theta)\mathbf{A}_-^*(\theta)\tilde{\mathbf{S}}^H(t) \quad (4.4)$$

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{X}_1(t)\mathbf{X}_2^H(t) = \tilde{\mathbf{S}}(t)\mathbf{A}_-^T(\theta)\mathbf{A}_-^*(\theta)\Phi\tilde{\mathbf{S}}^H(t) \quad (4.5)$$

它们都是  $N \times N$  的不满秩矩阵,其秩为  $M$ ,但它们同样满足

$$\mathbf{Y}_0\tilde{\mathbf{S}}(t)\Phi^H = \mathbf{Y}_1\tilde{\mathbf{S}}(t) \quad (4.6)$$

因此对  $\mathbf{Y}_0, \mathbf{Y}_1$  作广义特征分解同样可以得到  $\Phi$  进行方位估计。(4.3) 式与 (4.6) 式不同的是前者的特征矢量是各信号源的方向矢量,后者的特征矢量则是各源的包络时延矢量。因此各源的时延信息  $\tau_i$  包含在 (4.6) 式的特征矢量内,  $p$  个主特征矢量分别对应  $p$  个源的包络时延矢量。

#### § 4.1.2 算法实现

在算法的具体实现上和常规的 ESPRIT 方法有所不同。因为  $\Phi$  是  $\mathbf{Y}_0$  和  $\mathbf{Y}_1$  中信号子空间的特征值,所以先对  $\mathbf{Y}_0$  进行特征分解

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{V}\mathbf{E}\mathbf{V}^H \quad (4.7)$$

其中  $\mathbf{V}$  的每一列为特征矢量

$\mathbf{E} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ ,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$  为降序排列的特征值

然后是目标数目的判定, 判阶的正误对于 ESPRIT 这一类高分辨方法的估计性能具有决定性的影响。可以引入很多判阶准则, 主要是利用特征值进行判阶, 如 AIC 和 MDL 准则<sup>[4]</sup>。有人利用一些先验知识对这两种准则进行修正<sup>[5][6]</sup>, 能取得更好的判阶效果。还有人利用特征矢量进行判阶<sup>[7]</sup>, 也取得了较好的效果。本文选用最经典的 AIC 准则, 其 AIC 曲线由下式给出:

$$AIC(p) = -\ln[LR(p)] + p(2M - p) \quad (4.8)$$

其中第一项为似然函数  $LR(p) = \frac{\left( \prod_{i=p+1}^M \lambda_i \right)^{M-p}}{\left( \frac{1}{M-p} \sum_{i=p+1}^M \lambda_i \right)^{M-p}}$ , 第二项是罚函数。使

AIC(p) 达到最小值的  $p$  就是目标数目。

然后用其主分量构造信号子空间的投影矩阵

$$\mathbf{Y}^\# = \sum_{i=1}^p \lambda_i^{-1} \mathbf{V}_i \mathbf{V}_i^H \quad (4.9)$$

将  $\mathbf{Y}_1$  在  $\mathbf{Y}_0$  的信号子空间上的投影  $\mathbf{Y}_1 \mathbf{Y}^\#$  进行特征分解

$$\mathbf{Y}_1 \mathbf{Y}^\# = \mathbf{U} \mathbf{E}_1 \mathbf{U}^H \quad (4.10)$$

由于投影  $\mathbf{Y}_1 \mathbf{Y}^\#$  不是一个满秩矩阵, 它的秩为目标数目  $p$ , 因此上式中特征值矩阵  $\mathbf{E}_1 = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$  只有三个为复数的非零值,  $\mathbf{U}$  的每一列  $\mathbf{U}_i$  为(4.6)式的广义特征矢量。

目标的空间角频率可由非零特征值  $\gamma_i$  的相角来估计, 即

$$\omega_i = \angle \gamma_i, i = 1, 2, \dots, p \quad (4.11)$$

而各目标对应的时延信息包含在非零特征矢量  $\mathbf{U}_i$  中, 求其与发射信号的互相关函数

$$\mathbf{r}_i(\tau) = \frac{1}{N} \mathbf{s}^T(t + \tau) \mathbf{U}_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (4.12)$$

从中找出最大值所对应的  $\tau$  即为目标的时延估计  $\hat{\tau}_i$ 。

由于特征值和特征矢量的对应关系, 方位参数和时延参数将自动得到匹配。如从单个参数的估计考虑, 在得到广义特征矢量后, 还可以用噪声子空间去估计时延<sup>[5]</sup>, 但所得的时延参数不能直接与方位参数匹配, 必须采用额外的配对算法。

### § 4.1.3 仿真举例

下面举例说明上述算法的实现步骤。

为了便于比较, 仿真条件与第二章、第三章的例子一致, 取发射波形为梯形包络调制的单频信号, 脉宽 75ms, 载频为 30KHz。有三个等强度的目标, 其真实参数见表 2-1。

设定一个合适的距离门(本例中约为 0.22 秒)使其包含三个目标的反射信号, 用一间距为半波长的 16 元均匀线列阵来接收, 在距离门内均匀正交采样 100 点(采样频率约为 455Hz), 得到一个  $100 \times 16$  的复数据矩阵, 此时单阵元的信噪比为 15dB。

将数据阵列分成两个子阵, 分别求其自相关矩阵和互相关矩阵。通过对自相关矩阵的特征分解, 用其特征值求出 AIC 曲线, 见图 4-1。从中可以清楚地看到曲线在  $p=3$  处达到最小, 故判定目标数目为 3。

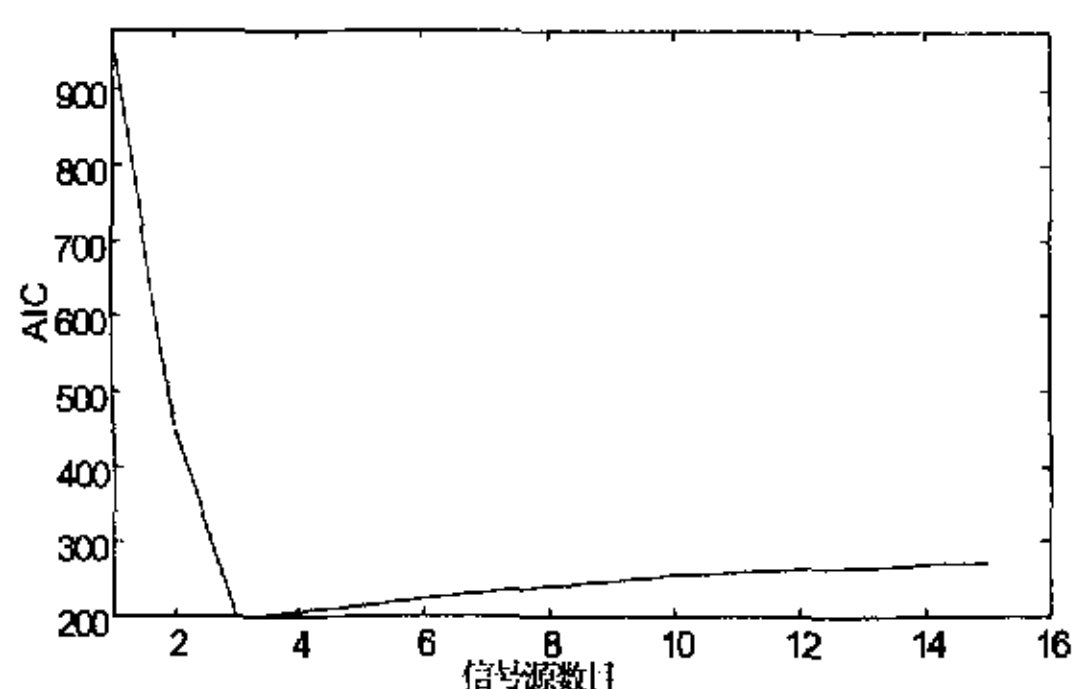


图 4-1 AIC 判阶曲线

再按(4.9)式和(4.10)式

求出广义特征值和广义特征矢量。用三个主特征值的相角可以得到三个目标的方位估计, 将三个主特征矢量分别与发射信号包络做互相关, 得到如图 4-2所示的三条曲线, 找出各曲线最大值所对应的位置即得三目标的时延估计。要提高时延估计精度, 可减小(4.12)中  $\tau$  的搜索步长, 进行局部细搜。两维参数依据特征值与特征矢量的关系自动配对, 最终的联合参数估计结果见表 4-1。从表中可见三目标参数都得到了良好的分辨和较为精确的估计, 并且时延和方位的配对也完全正确。

表 4-1 目标参数联合估计结果

	目标 1	目标 2	目标 3
时延(秒)	0.908	0.934	0.956
方位( $^{\circ}$ )	-3.82	-0.32	2.80



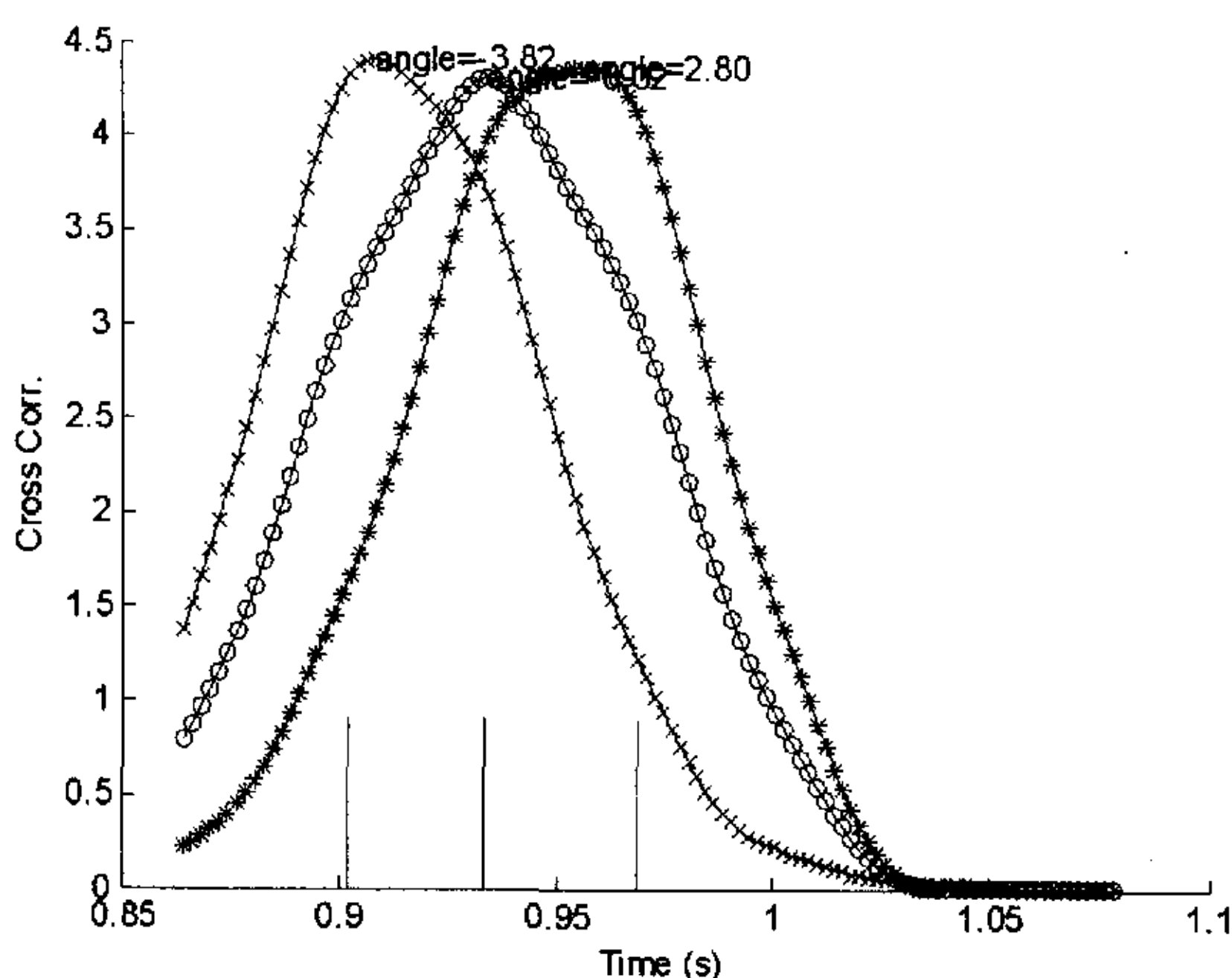


图 4-2 主特征矢量与发射信号的互相关函数

#### § 4.1.4 针对不等强度目标的算法修正

上述算法中的每个目标的时延估计是通过信号子空间中每个特征矢量与发射信号的互相关求最大值来获得的。这里隐含了一个假设：各目标的时延矢量在特征矢量中是分离的，即每个特征矢量中只包含一个目标的时延矢量。而实际上，由于各特征矢量之间是正交的，而不同时延的发射信号包络不是正交的，因此每个特征矢量不可能只包含一个时延矢量，而是多个时延矢量的线性组合。从图 4-2 中已经可以看到这一点，各条相关函数曲线在其它曲线的峰值处有明显的隆起，我们把这种现象称为泄漏，指的是每个时延矢量虽然把能量集中在某个特征矢量上，但还有部分能量“泄漏”到其它特征矢量中。

当各目标的强度相差不大时，这种泄漏不会影响我们用相关函数的最大值点位置去估计时延。但是，如果各目标强度有较大差别，大强度目标所对应的时延矢量在其它特征矢量中的泄漏可能超过该特征矢量中原有的强度较弱的矢量。举例来说，其它仿真条件不变，当三个目标的强度比为 2.5:1:0.4、信噪比为 20dB（相对于强度为 1 的目标）时，三个特征矢量与发射信号的互相关函数曲线见图 4-3(a)。图中各曲线的峰值都明显地偏向强度大的目标，利用这组曲线去估计时延将无法获得弱信号的时延（估计值为 0.900, 0.900, 0.936）。下一节的统计性能仿真中可以更清楚地说明这一点。

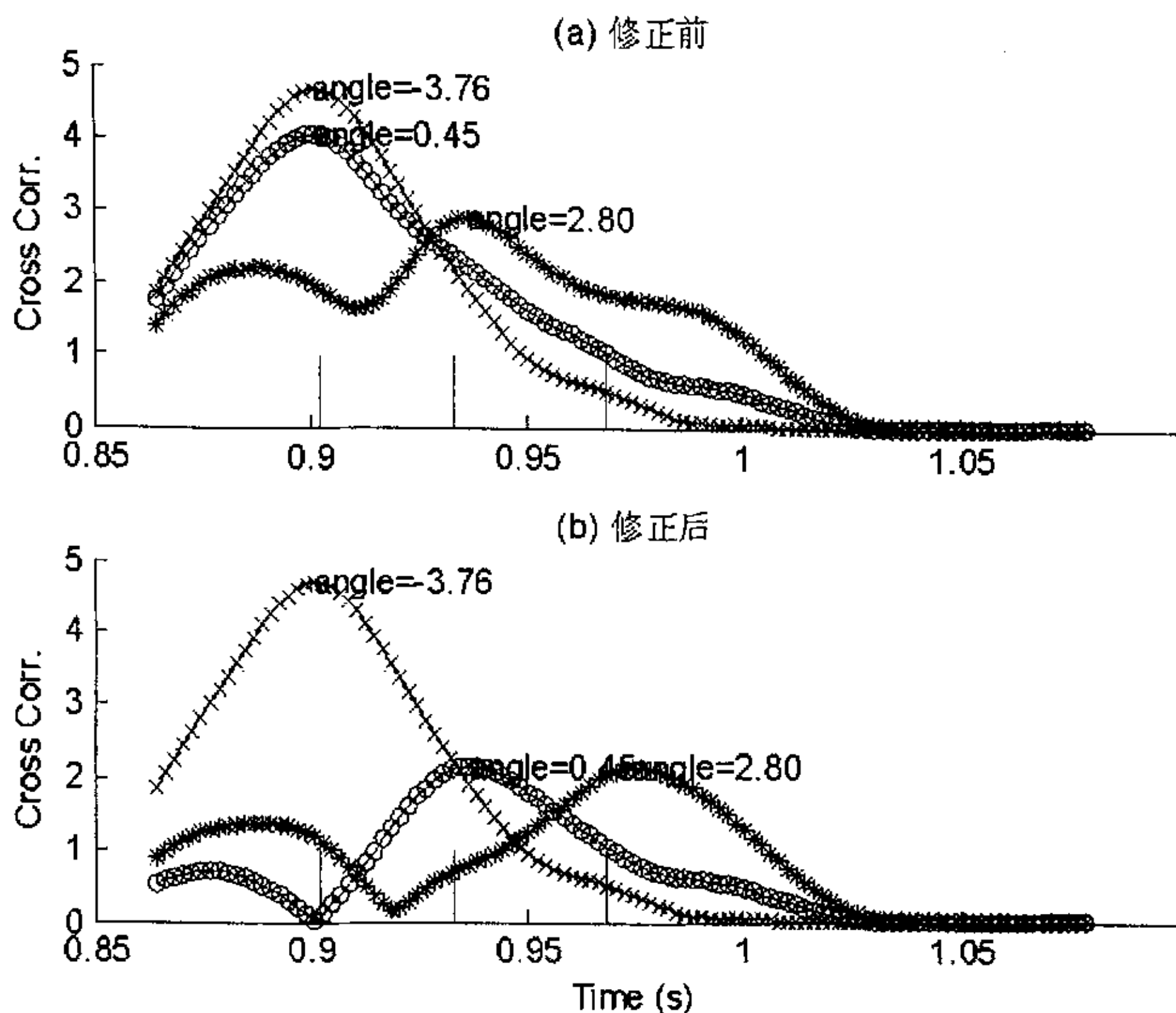


图 4-3 不等强度目标在修正前后的时延估计

为了保证在目标不等强度时能获得有效的时延估计, 本文提出了一种修正方法, 其思路是在代表弱目标的特征矢量中减去强目标的泄漏, 尽量使修正后的特征矢量只包含一个目标的时延矢量。假设  $U_1$ 、 $U_2$  分别为强弱目标对应的特征矢量, 由于强目标受弱目标泄漏的影响较小, 可用  $U_1$  直接求得强目标的时延估计  $\hat{\tau}_1$ , 然后在  $U_2$  中消去强目标的泄漏, 即令:

$$U_2 = U_2 - c \cdot s(t - \hat{\tau}_1) \quad (4.13)$$

式中的复常数  $c$  可由最小剩余功率约束来求得:

$$c = \arg[\min_c |U_2 - c \cdot s(t - \hat{\tau}_1)|^2] \quad (4.14)$$

记  $S_1 = s(t - \hat{\tau}_1)$ , 令剩余功率对  $c$  的实部和虚部的导数分别为零可以解得

$$c = \frac{U_2^H S_1}{S_1^H S_1} \quad (4.15)$$

如果存在三个以上的目标, 其特征矢量按功率降序排列分别为  $U_1, U_2, \dots, U_p$ , 则最强目标  $U_1$  不作修正, 其它特征矢量作如下修正:

$$U_i = U_i - \sum_{j=1}^{i-1} c_{ij} \cdot s(t - \hat{\tau}_j) \quad i = 2, 3, \dots, p \quad (4.16)$$

式中

$$c_{ij} = \arg[\min_{c_{ij}} \left| \mathbf{U}_i - \sum_{j=1}^{L-1} c_{ij} \cdot \mathbf{s}(t - \hat{t}_j) \right|^2] \quad (4.17)$$

令剩余功率对  $c_{ij}$  的实部和虚部的偏导数分别为零可以解得

$$c_{ij} = \frac{\mathbf{U}_i^H \mathbf{S}_j}{\mathbf{S}_j^H \mathbf{S}_j} \quad (4.18)$$

在与图 4-3(a) 相同的仿真条件下, 经过上述修正后的特征矢量与发射信号的互相关见图 4-3(b), 从图中可以清楚地看到各曲线的峰值分别出现在真值附近(估计值为 0.900, 0.936, 0.974), 说明上述修正算法确实能有效估计不等强度目标的时延, 下一节的统计仿真更能说明这一点。

## § 4.2 时延-方位联合估计方法的关键问题分析

### § 4.2.1 源的相干性

特征分解类方法要求各源是不相干的, 本文讨论的是在单次回波内完成方位时延估计, 如果不考虑各反射波的多普勒频移差和发射信号包络, 则从方位估计角度看, 通过时间连续采样得到的快拍之间是强相干的。

以两个同频率不同方向的纯信号为例来说明这一问题。设第一次快拍中两源对阵列输出的贡献分别为

$$\mathbf{x}_{11} = b_1 \{\exp(j\varphi_1), \exp[j(\omega_1 + \varphi_1)], \exp[j(2\omega_1 + \varphi_1)], \dots\} = b_1 \mathbf{x}_{11}^0 \quad (4.19)$$

$$\mathbf{x}_{12} = b_2 \{\exp(j\varphi_2), \exp[j(\omega_2 + \varphi_2)], \exp[j(2\omega_2 + \varphi_2)], \dots\} = b_2 \mathbf{x}_{12}^0$$

其中  $\omega_1 \neq \omega_2$  为两源的空间角频率,  $\varphi_1, \varphi_2$  为两源的初相位,  $b_1, b_2$  为两源的瞬时强度。不考虑噪声时的阵列输出为  $\mathbf{X}_1 = b_1 \mathbf{x}_{11}^0 + b_2 \mathbf{x}_{12}^0$ 。经过时间  $\Delta t$  后再取一次快拍, 此时两源对阵列输出的贡献分别为

$$\mathbf{x}_{21} = \exp(j\Delta\varphi_1) b_1 \mathbf{x}_{11}^0 \quad (4.20)$$

$$\mathbf{x}_{22} = \exp(j\Delta\varphi_2) b_2 \mathbf{x}_{12}^0$$

当两源的频率相同都为  $f_0$  时,  $\Delta\varphi_1 = 2\pi f_0 \Delta t = \Delta\varphi_2$ , 因此两次快拍存在下列关系

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{x}_{21} + \mathbf{x}_{22} = \exp(j2\pi f_0 \Delta t) (b_1 \mathbf{x}_{11}^0 + b_2 \mathbf{x}_{12}^0) = \exp(j2\pi f_0 \Delta t) \mathbf{X}_1$$

显然两次快拍  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$  是线性相关的。由这样的快拍形成的协方差矩阵的秩恒为 1。

要使  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$  线性无关有两种可能: 一是  $\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_2$ , 即两源的频率不同, 当两目标的多普勒频移有差异时满足这一条件, 但当两目标等速运动时(例如它们是同一目标上的两个反射点)该条件不满足; 二是使两次快拍中两源的瞬时强度发生不同的变化, 此时(17)式应改写为

$$\mathbf{x}_{21} = \exp(j\Delta\varphi_1) b_1 \mathbf{x}_{11}^0 \quad (4.21)$$

$$\mathbf{x}_{22} = \exp(j\Delta\varphi_2)b_2\mathbf{x}_{12}^0$$

当  $b_1'/b_1 \neq b_2'/b_2$  时, 即使  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$ ,  $\mathbf{X}_1$  与  $\mathbf{X}_2$  也线性无关。而要满足这一条件只需设计一实包络幅度随时间变化的发射信号, 且两次相邻快拍的间隔时间足以引起实包络有较大变化即可, 这样当两目标离接收点距离差足够大时,  $b_1'/b_1 \neq b_2'/b_2$  成立。也就是说, 考虑多目标的距离(时延)差, 通过设计合适的发射波形, 可以在单次回次内通过连续的时间采样获得不完全相干的快拍, 使多源的相干性减弱。

#### § 4.2.2 分辨力

由于估计方位的方法与常规 ESPRIT 方法相同, 本文所提方法的空间分辨能力可参阅有关文献<sup>[1]</sup>。

本文中估计时延参数是通过求特征矢量与原发射信号的互相关来获得的, 复本相关的时延分辨率取决于发射信号的模糊度函数, 不具备高分辨能力。但在本文所提方法中考虑时延差异后, 各源的相干性不强, 各时延参数在主特征矢量中是分离的。复本相关只是在估计单个时延参数, 并不要求它去分辨两时延。因此时延分辨力是由各源的非相干性来保证的, 而这一点已在前文讨论过了。

#### § 4.2.3 阵列误差

阵列误差包括阵元位置误差、通道幅度和相位误差、阵元指向性差异等因素, 它对特征子空间类方法的性能影响很大<sup>[9]</sup>, 本文所提的方法同样会受阵列误差的影响, 不过 ESPRIT 方法不同于其它特征结构法(如 MUSIC), 它不要求阵列流形符合一理想模型, 而只要求两子阵流形一致, 因此给阵列校正带来便利。例如, 在离线校正时不需要已知校正源的精确方位, 而只需在两子阵的首阵元相位对齐后直接比对两子阵相应阵元的相位即可完成离线校正。我们将在下一章中详细讨论高分辨方法对阵列误差的敏感性和阵列校正方法。

### § 4.3 时延-方位联合估计方法的统计性能仿真

时延-方位联合估计方法的统计性能也体现在方位估计、时延估计、参数配对的性能中, 为了便于跟前一章的基于配对的方法进行比较, 我们还沿用 § 3.4 设计的 4 种典型的仿真条件, 三个目标的真实参数也相同(见表 3-6)。

### § 4.3.1 等强度目标的联合估计性能

我们这里对方位-时延联合估计的性能研究也是在能够正确判阶的前提下进行的,因此首先应该对接收到的回波进行判阶。与前一章相同,直接利用数据矩阵奇异值分解所得的奇异值、依据 AIC 准则实现判阶,能正确判出三个目标的概率随信噪比的变化情况见下图 4-4,与前一章中的图 3-9 是完全相同的,分析从略。

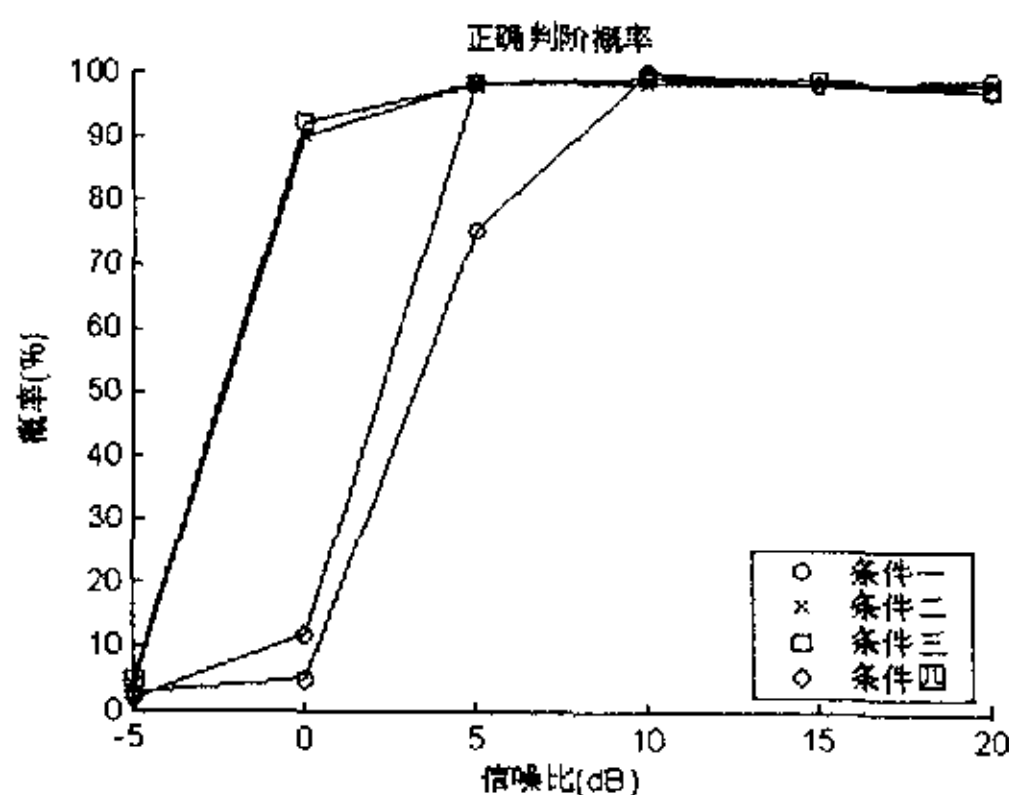


图 4-4 各种条件下的正确判阶概率

考虑到各条件在-5dB 时都无法正确判阶,统计性能仿真从 0dB 开始。方位估计性能体现于正确分辨概率和均方误差随信噪比的变化情况。当一种估计方法能给出 3 个估计值且各估计值与真值的偏差不超过半个波束宽度,则被认为是正确分辨。

各种条件下的方位估计正确分辨概率见图 4-5。图中条件一和条件四的分辨性能相对较差,前者是由于目标方位间隔很小增大了分辨难度,后者是目标时延间隔太小造成多目标的相干性增强。把该图与前一章中的有关曲线,图 3-10(a)~图 3-13(a),作比较可以看出,在各种条件下联合估计中的方位估计性能都与独立的 TLS-ESPRIT 方位估计方法相当。

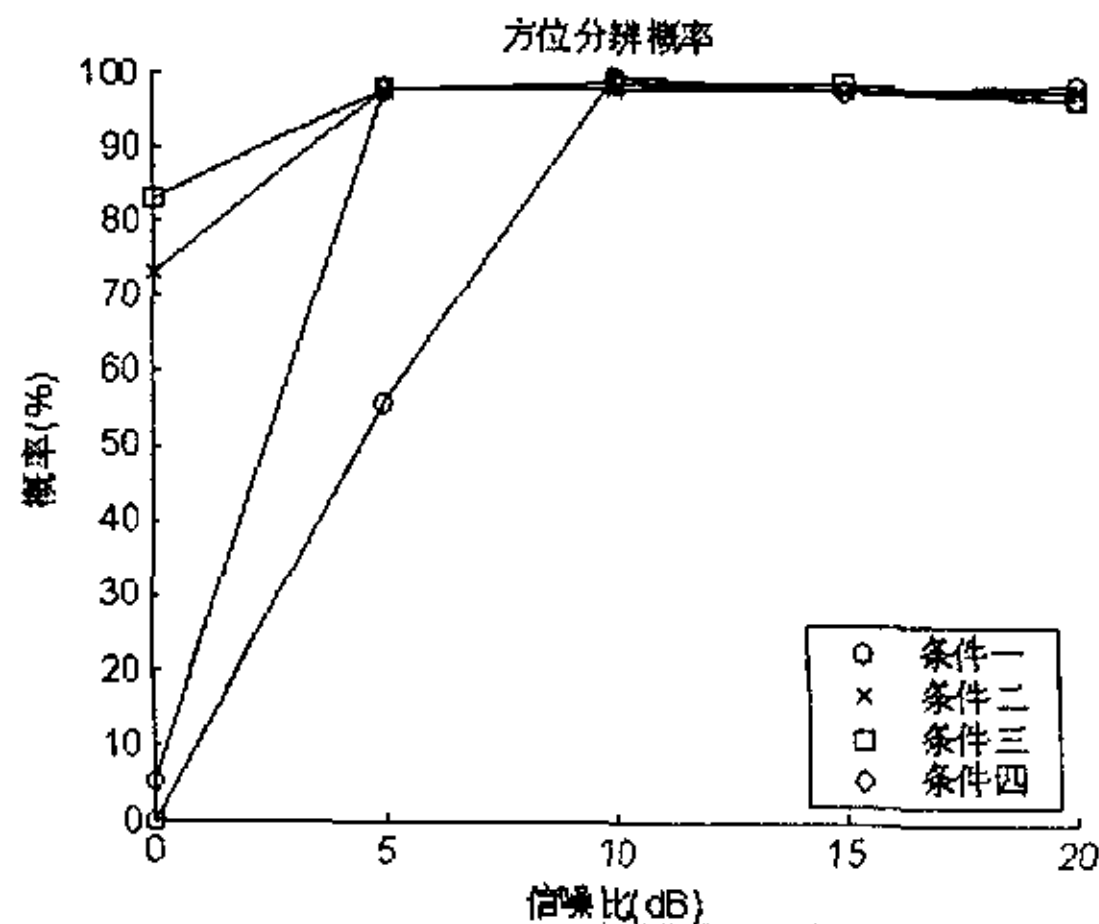


图 4-5 方位估计正确分辨概率



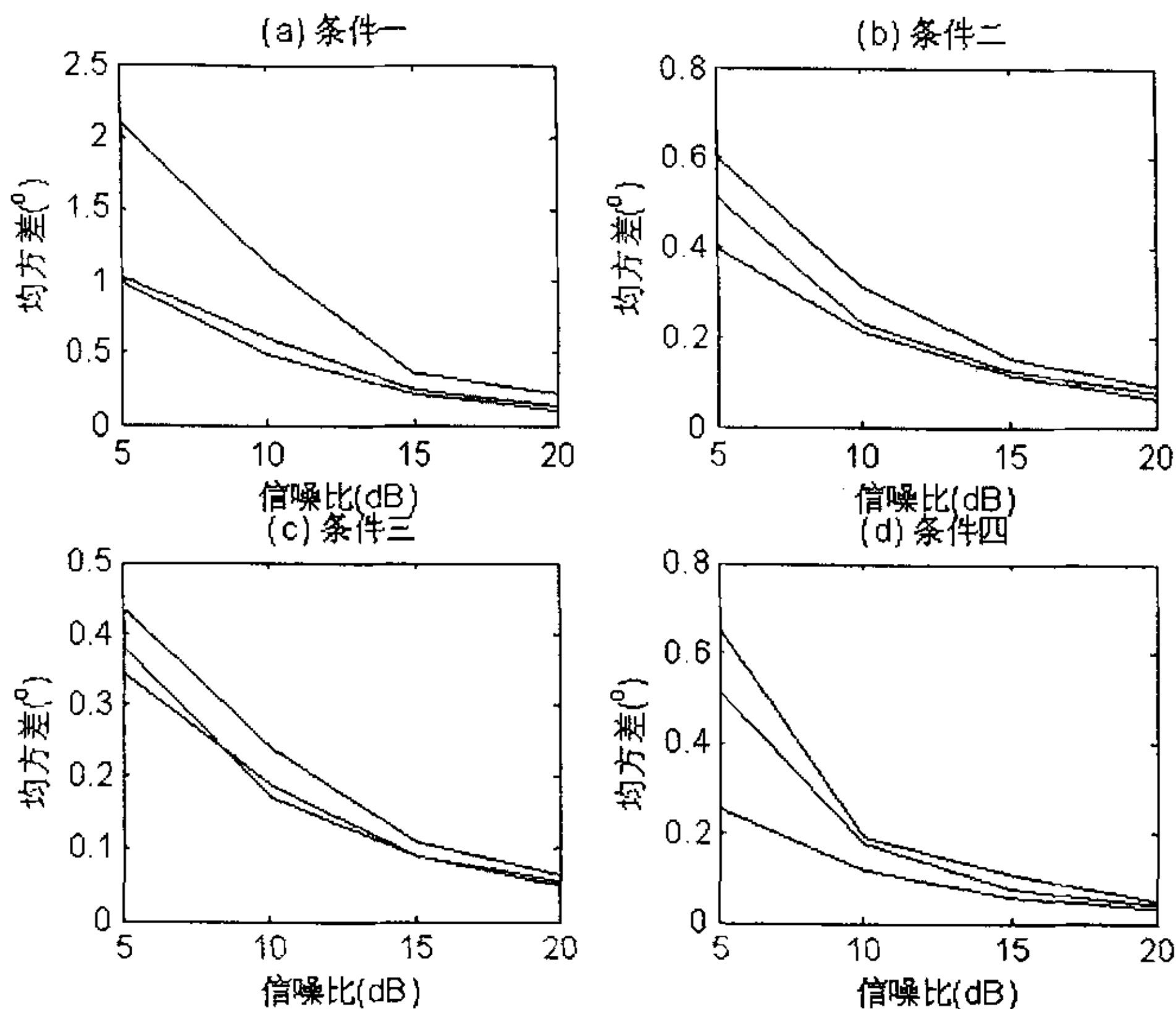


图 4-6 各种条件下的方位估计均方误差

各种条件下的方位估计精度随信噪比的变化情况见图 4-6。考虑到 0dB 时条件一和四的分辨概率接近于 0，估计精度曲线从 5dB 开始绘制。总的趋势是随着信噪比的提高，估计误差一致减小。图中除了分辨较为困难的条件一之外，其它条件下 5dB 时的方位估计均方误差都在  $0.5^\circ$  左右，能较好地满足水下定位的需要。

各种条件下的时延估计正确分辨概率见图 4-7。这里的时延正确分辨指的是 3 个估计值与真值的偏差不超过半个时延模糊区间。可以看到时延正确分辨概率的情况与方位正确分辨的情况类似，也是条件一和四较差，这是因为时延的分辨依赖于方位的分辨，如果方位(特征值)不能分辨，对应的特征矢量就会多个时延矢量的和，自然无法进行时延分辨。

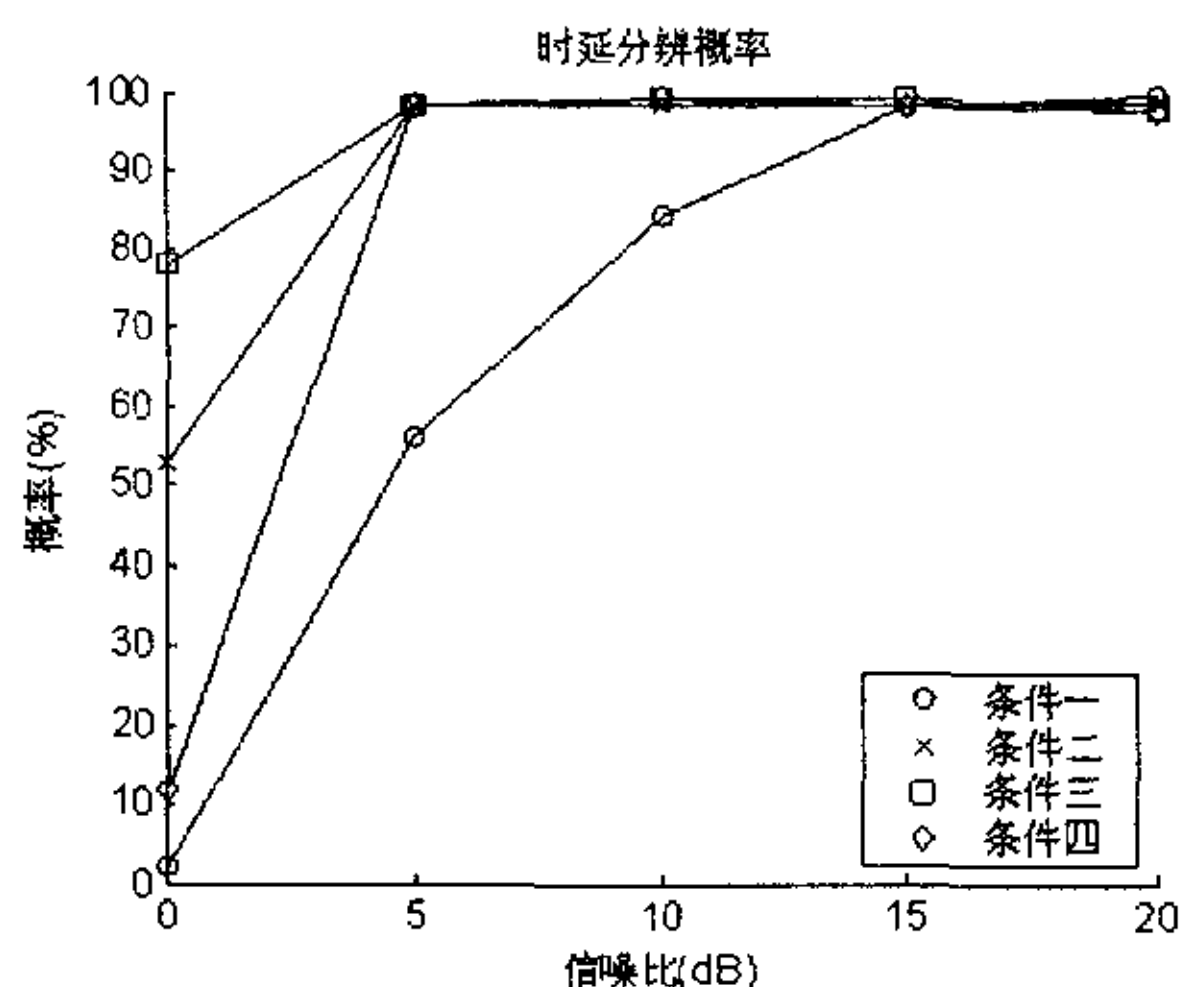


图 4-7 时延估计正确分辨概率

各种条件下的时延估计精度随信噪比的变化情况见图 4-8。从条件一到条件四，目标的时延间隔逐渐增大，分辨的难度降低，因此时延估计的均方误差逐渐减小。但有一个较为反常的现象，随着信噪比的提高，时延估计误差并没有显著减小的趋势，这可能是由于时延估计中求互相关函数的搜索步长不够细密造成的，在仿真实验中搜索步长设为 2ms。

虽然本章所提的时延-方位联合估计方法中不需要显式的配对算法，但其联合估计结果与实际目标参数的吻合程度也反映了一种配对性能。下图 4-9 给出了各种条件下的配对性能。除了条件一较差，其它条件下 5dB 以上的信噪比就可达到接近 100% 的正确配对概率，效果还是相当不错的。与前一章基于配对的方法相比(见图 3-16)，本章所提的时延-方位联合估计方法的配对性能在条件四明显占优，其它条件下则相当。

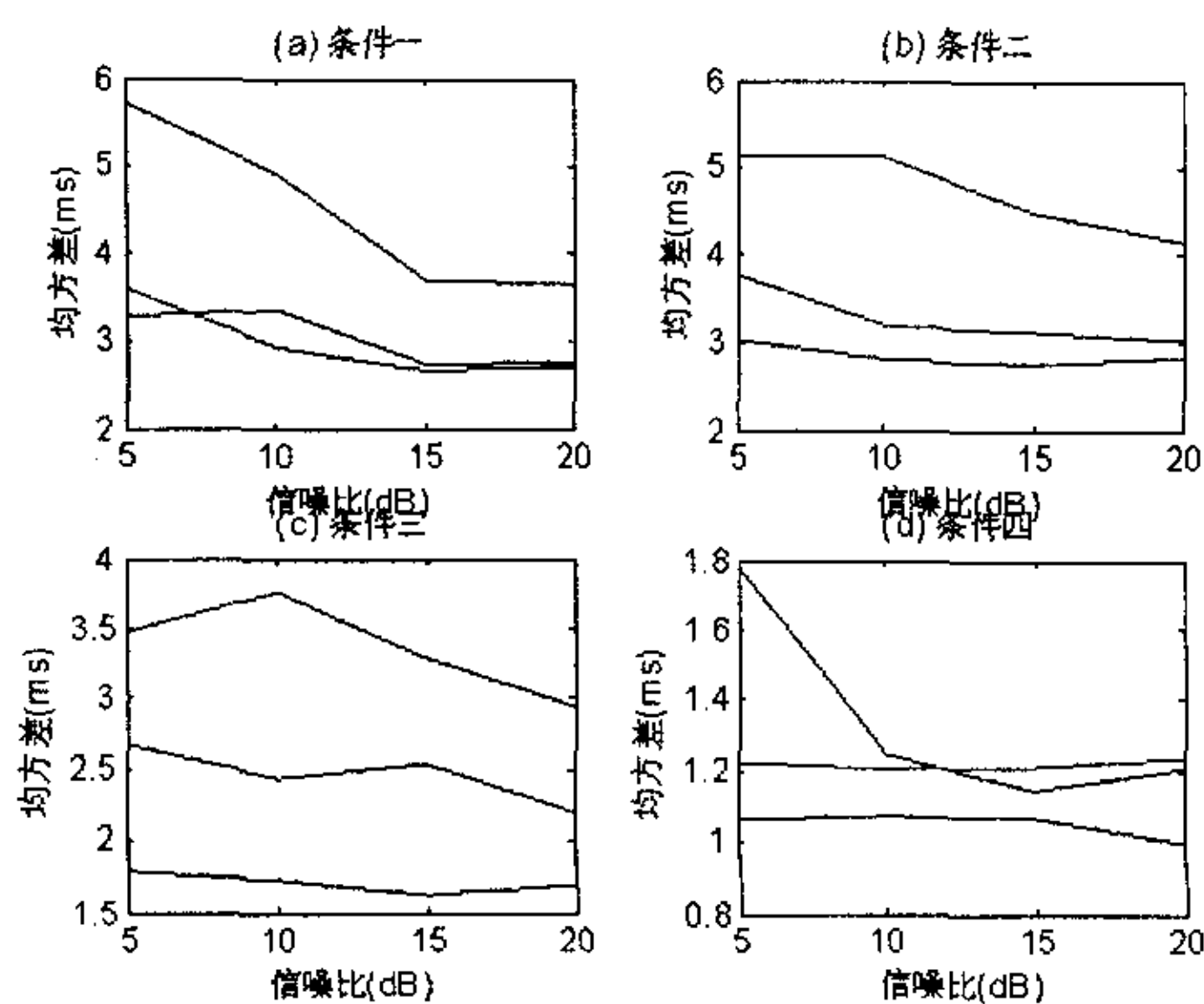


图 4-8 各种条件下的时延估计均方误差

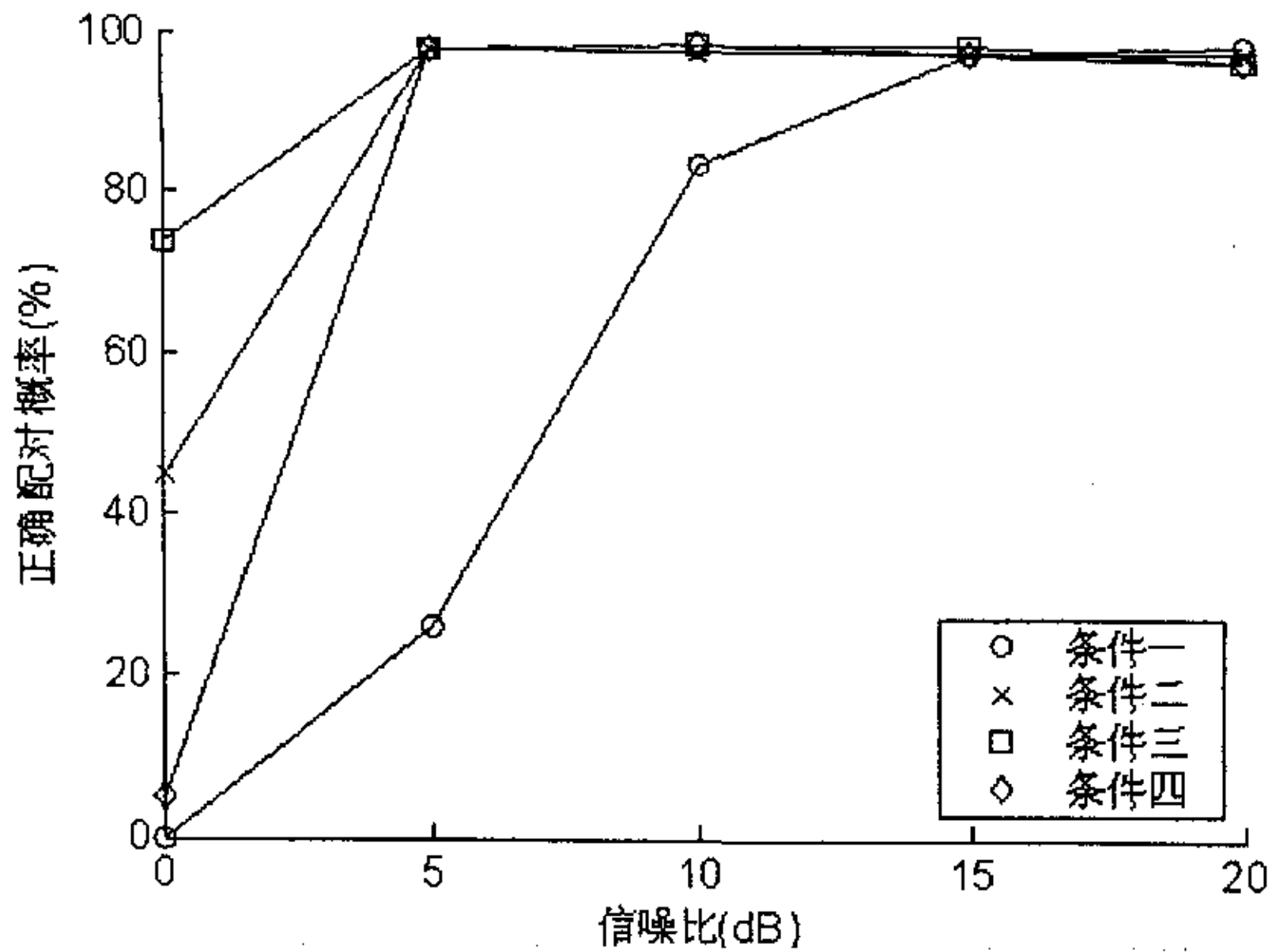


图 4-9 时延-方位联合估计的正确配对概率

#### § 4.3.2 不等强度目标修正算法的有效性验证

前文分析指出,当目标强度差异较大时,强目标的时延矢量会泄漏到若目标对应的特征矢量中,导致弱目标的时延估计受到严重干扰。以性能表现最好的条件三为例,假设三目标的强度为  $a:1:1/a$ ,当信噪比为 15dB 时(相对于中等强度目标),联合参数估计性能随强弱目标之间的强度差变化的情况见图 4-10。方位估计的分辨概率与目标的强度差关系不大。目标一的方位估计均方误差随强度差的增大而减小,是因为强度差的增大意味着强目标的信噪比增大。相反,弱目标的信噪比随强度差的增大而减小,其方位估计误差随之增大。中等强度目标的方位估计误差则基本不变,这说明目标强度差对方位估计影响不大。时延估计的性能却随着目标强度差的增大而急剧下降。时延分辨概率从强度差 8dB 左右开始下降,到 20dB 时已接近于 0。强目标 1 和弱目标 3 的性能变化趋势和原因与方位估计类似,但中等强度的目标 2 在有效信噪比不变的情况下随着强目标的增强估计误差增大,这说明强目标对弱目标的时延估计有遮蔽作用。

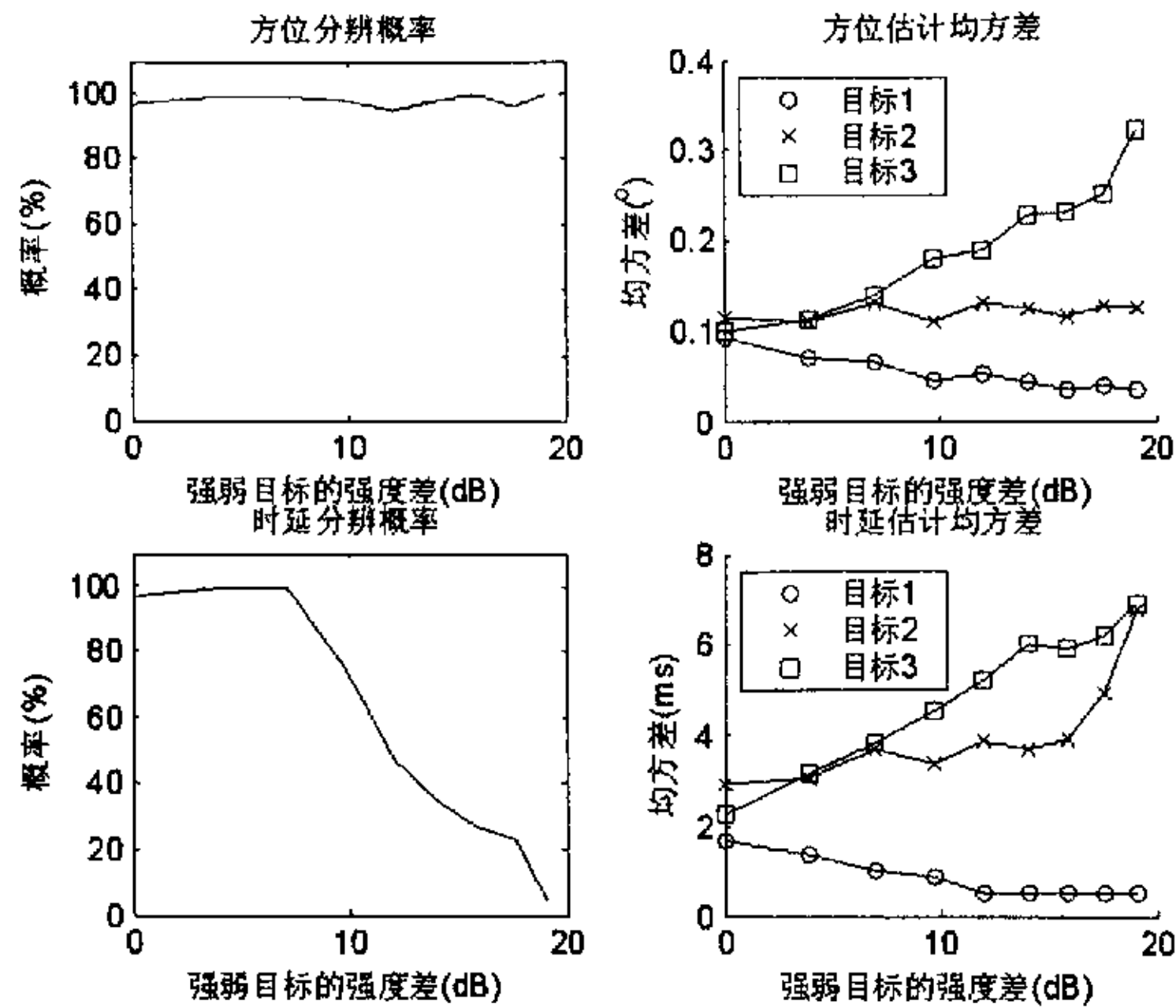


图 4-10 不加修正的时延-方位联合估计性能

我们提出的修正算法可以较好地解决不等强度的时延估计问题。保持相同的仿真条件，引入(4.16)和(4.18)式的修正算法，得到的时延-方位联合估计方法的统计性能见图 4-11。因为我们的修正只涉及时延估计过程，因此方位估计不受影响。时延估计性能则有大幅度的提高，在强弱目标强度差达到 20dB 时，时延正确分辨概率仍可达到 70%左右，中等强度目标的时延估计也不再随着强度差的变化而变化。应该说，这一修正算法是十分有效的。经过修正后，最终的参数配对性能也有显著的提高，见图 4-12。

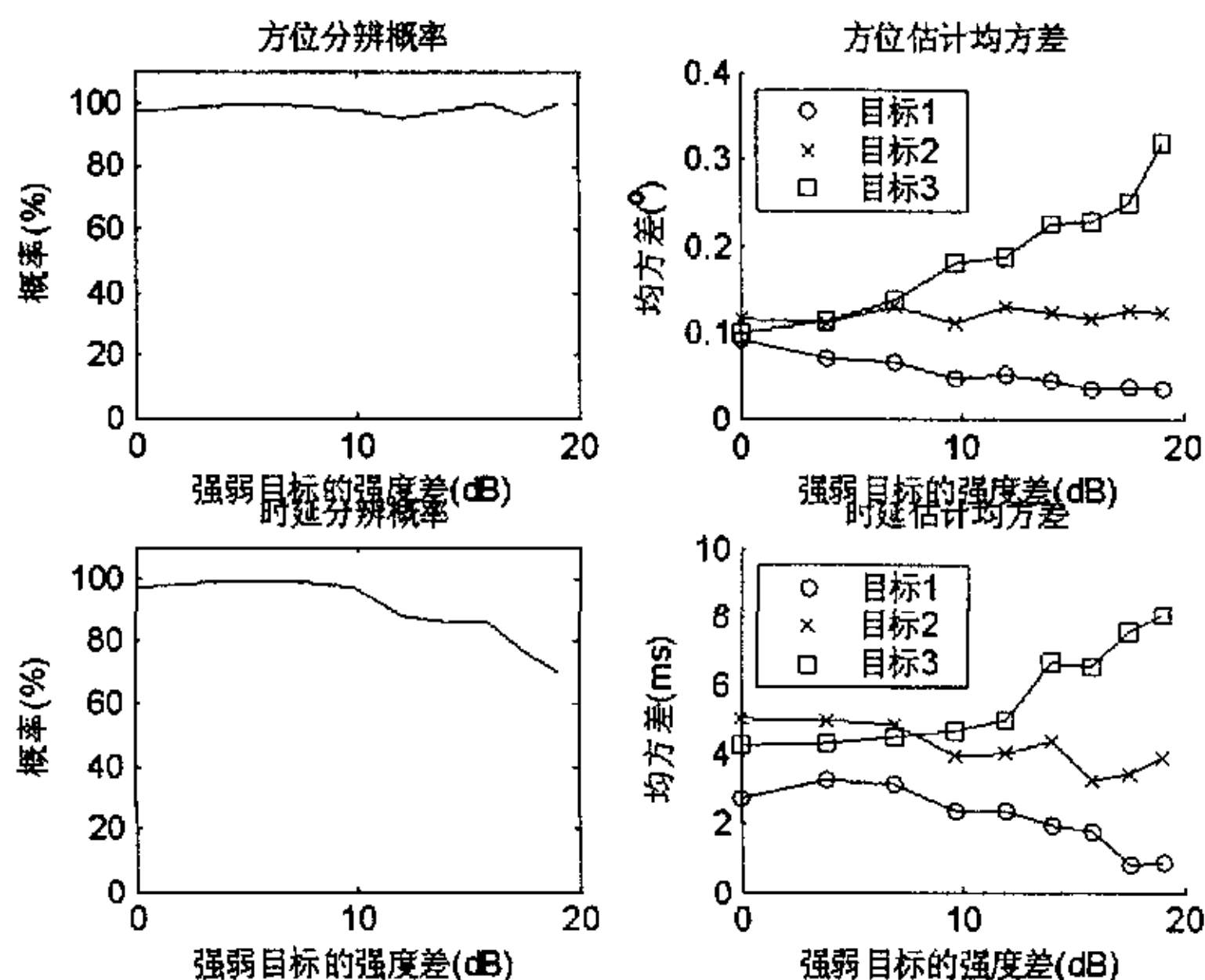


图 4-11 修正后的时延-方位联合估计性能

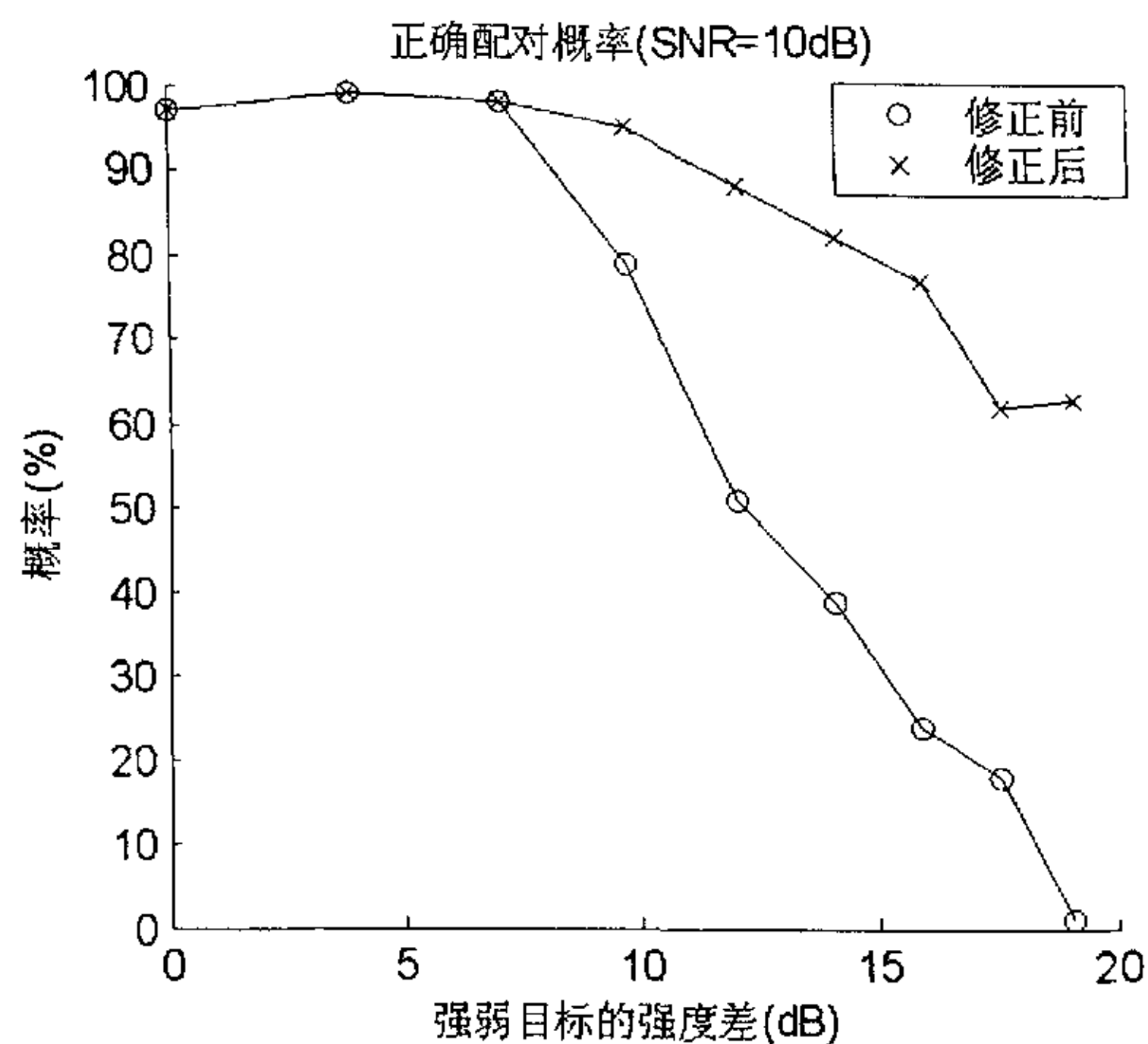


图 4-12 修正前后的参数配对性能比较

### § 4.3.3 修正后不等强度目标的联合估计性能

在经过了上述修正后，我们来考察一下时延-方位联合估计方法对不等强度多目标的统计性能。为了便于仿真中调整强度差，令三目标反射幅度之比为  $a:1:1/a$ ，这样只需变化  $a$  就可扫描强度差的整个变化域。在仿真中强弱目标的强度差从 0dB 步长 3dB 变化到 15dB，对每种条件作 100 次统计。给出了四种仿真条件下正确判阶概率随强度差的变化情况，每个小图中的三条曲线分别表示中等强度目标的信噪比为 10dB、5dB、0dB 的情况。高信噪比时正确判阶概率与强度差关系不大，如  $SNR=10dB$  的曲线。 $SNR=5dB$  时，除了目标方位间隔太近的条件一，其它条件的判阶性能仍不随强度差的增大而下降。 $SNR=0dB$  时，目标方位间隔太近的条件一和目标时延间隔太近的条件四判阶性能剧降；时延、方位间隔都不太小的条件二、三的判阶概率则随强度差的增大而下降，因为这时候弱目标的信噪比随强度差的增大低于正确判阶所需的最低信噪比门限。因此综合看来，多目标的正确判阶概率与强度差关系不大，主要受限于弱目标的信噪比。这一结论与前一章图 3-21 的分析是一致的，因为这两章的判阶都是基于数据矩阵的奇异值分解。

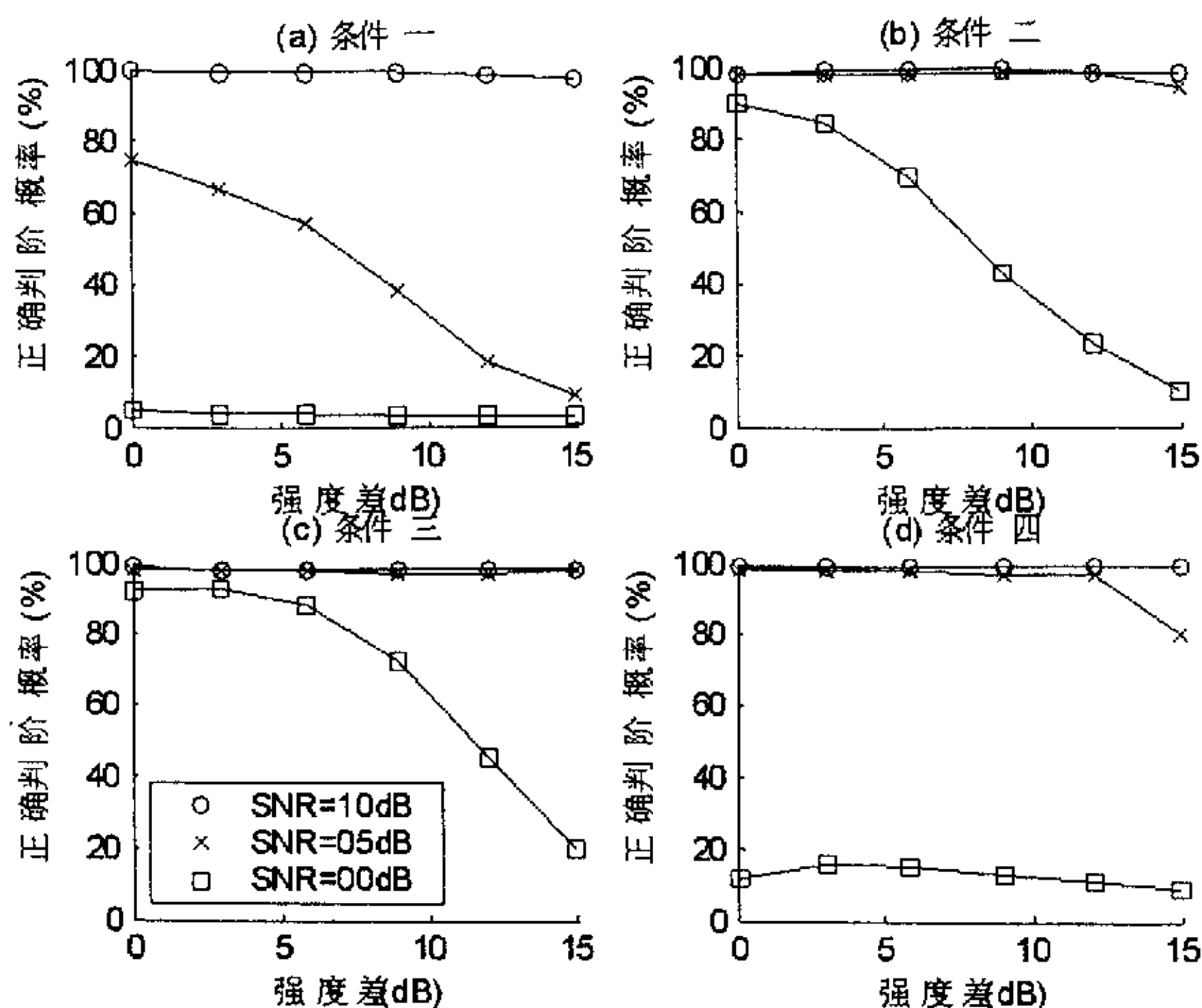


图 4-13 正确判阶概率随目标强度差的变化情况

我们选择正确判阶概率较高、方位间隔较小的条件二来考察方位估计性能。图 4-14给出了条件二下方位正确分辨概率随强度差及信噪比变化的情况。当信噪比足够高时( $\geq 5$ dB), 强度差从 0dB 变到 15dB, 方位分辨概率都在 80%以上。这说明时延-方位联合估计方法对目标强度差的容忍性良好。与前一章的方法相比(见图 3-22), 不等强度目标的方位估计性能相当。

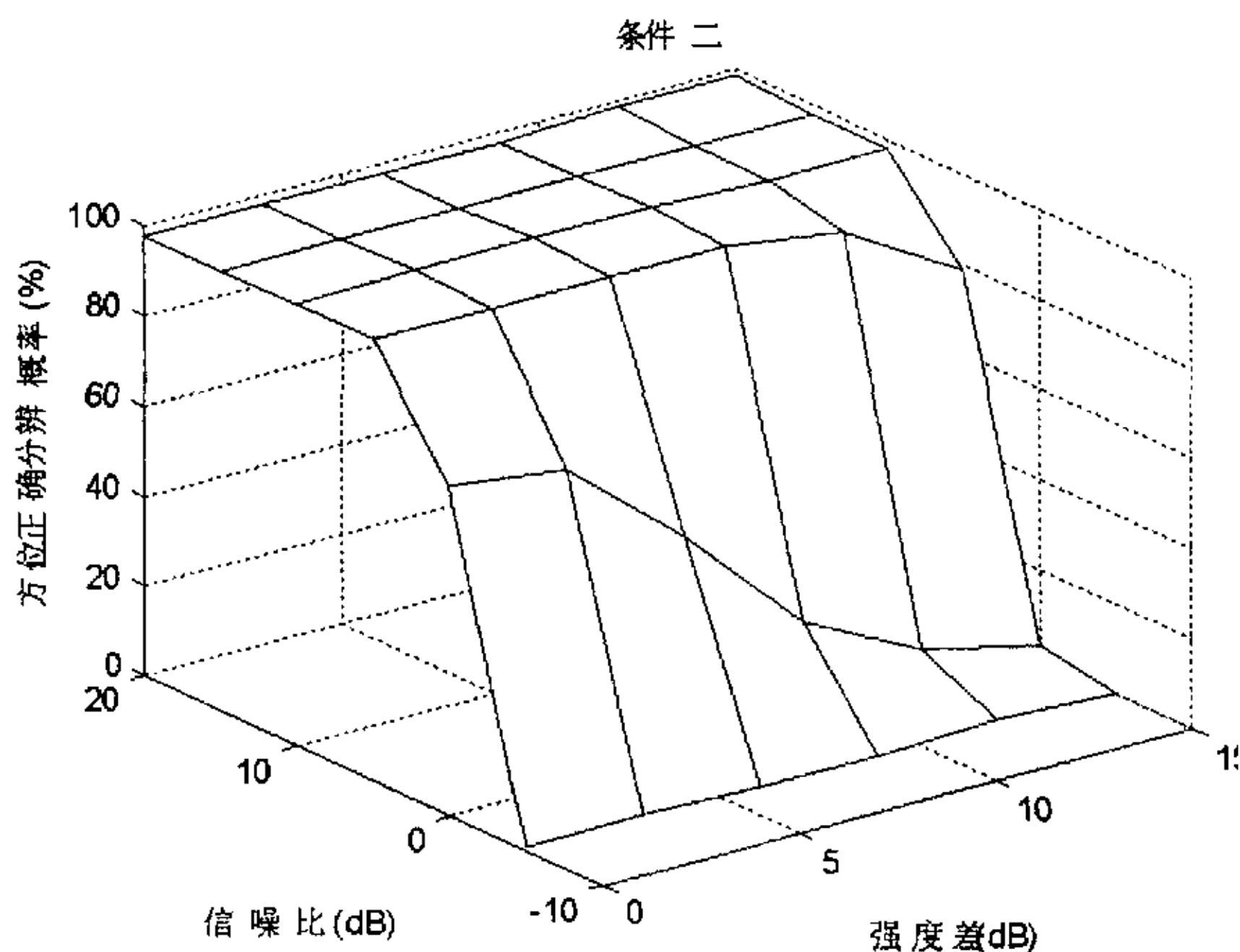


图 4-14 不等强度目标的方位正确分辨概率



采用了修正算法后,各种条件下不等强度目标的时延正确分辨概率见图4-15。条件一由于正确判阶概率的限制,在小于10dB的低信噪比情况下时延分辨概率很低;但是在大于等于10dB时,时延分辨概率都在90%以上,基本不受强度差的影响。条件二、三的时延正确分辨效果最好,只要不小于5dB的信噪比,时延分辨概率就不受强度差的影响,接近100%。条件四的情况却很糟糕,即使在20dB的高信噪比、强度差为0dB(等强度)时,时延正确分辨概率也只有81%。这是由于我们的修正算法相当于是一个时延域的陷波器,陷波的时延宽度不够窄,当多目标时延很近时,排除强目标的泄漏会把相邻的弱目标也滤除。值得考虑的改进方法有两种:一是找一种新的修正算法,它在排除强目标泄漏时对邻近目标的影响尽量小;而是对弱目标对应的特征矢量进行更高分辨率的时延估计,如解卷积,然后在时延参数域剔除强目标。

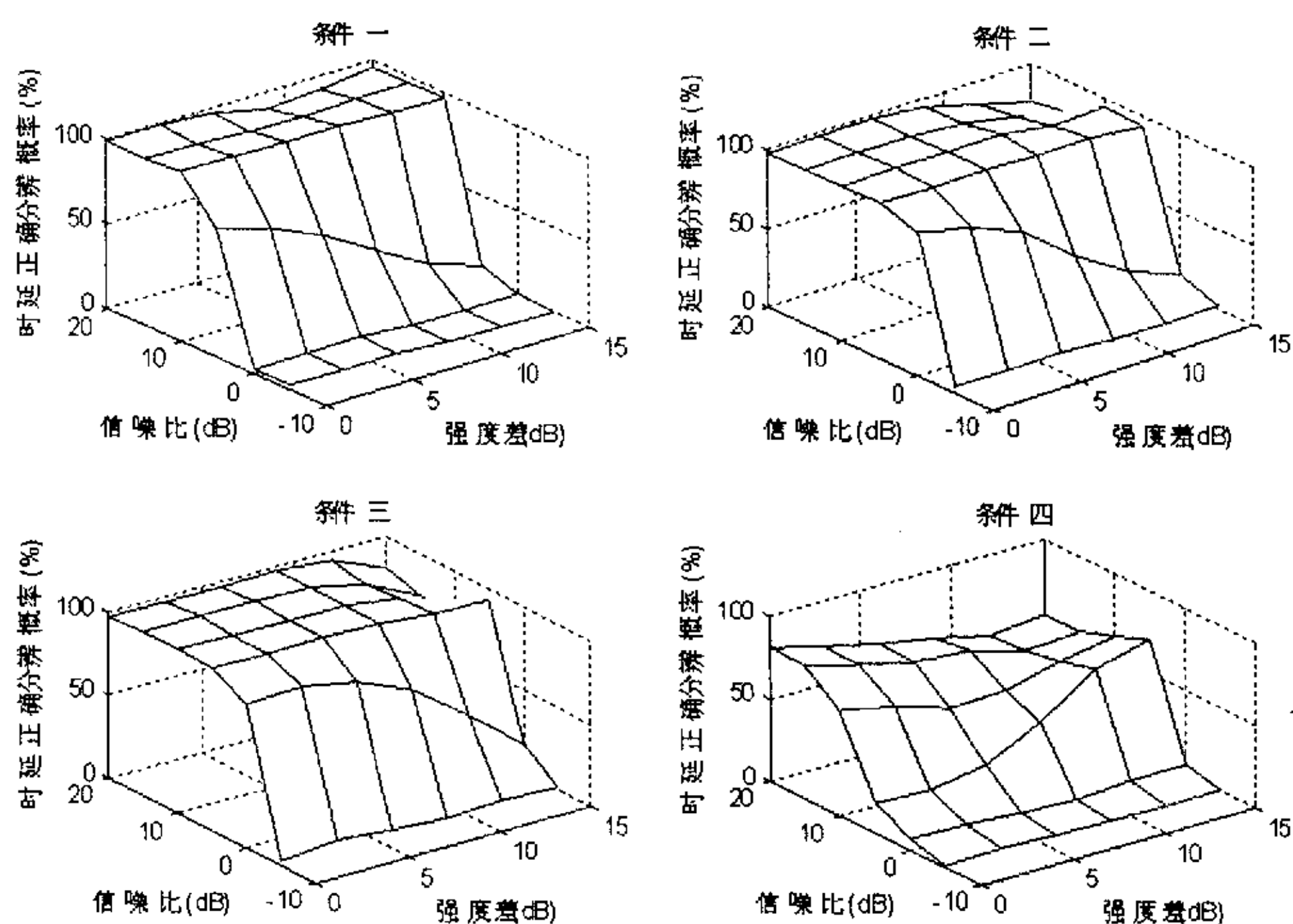


图 4-15 各种条件下不等强度目标的时延正确分辨概率

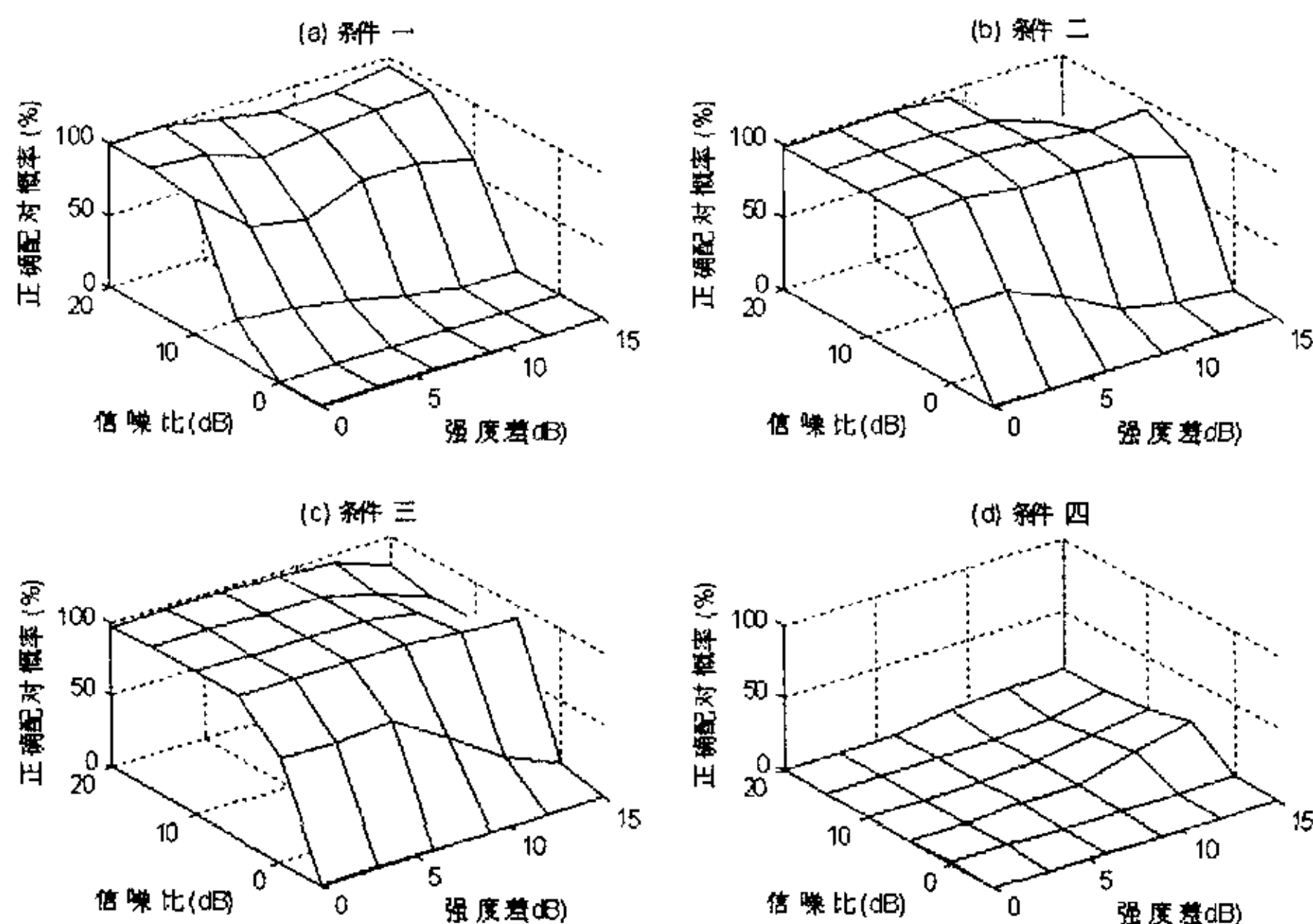


图 4-16 各种条件下不等强度目标的正确配对概率

配对能否正常进行的前提是参数的分辨和估计精度, 图 4-16 给出的修正后正确配对概率曲线也说明了这一点。条件一在信噪比大于等于 10dB 时, 时延分辨概率才能达到 90% 以上, 因此其配对正确率也只能是在 10dB 以上的高信噪比情况下才能达到 80% 以上。条件二、三の時延正确分辨效果最好, 最终的配对效果也最好, 只要不小于 5dB 的信噪比, 配对正确率就不受强度差的影响, 超过 90%。条件四の時延正确分辨概率很差, 导致配对正确率更差, 几乎在所有的信噪比和强度差条件下配对正确率都接近于 0, 甚至在等强度目标、高信噪比条件下也无法正确配对, 比修正前的性能(见图 4-9)还差。这说明图 4-15(d) 中勉强能分辨の時延参数估计误差也很大, 导致配对失效。

通过对上述统计仿真数据的分析, 我们可以得出结论: 修正算法在目标时延间隔不是太小(不小于 0.5 个模糊区间)的情况下是有效的, 经过修正后, 时延分辨能力、正确配对概率在强度差变化 15dB 时几乎都不受影响。但是目标时延间隔很小的情况下, 修正算法失效。

#### § 4.4 方位、频率、时延三维参数联合估计方法

前面的方位、时延联合中没有考虑目标的多普勒频移, 而实际上多个目标的径向速度往往不一致, 因此各目标多普勒为零的假设是不尽合理的。一旦引入多普勒频移(见式 2.1 的信号模型), 就不得不面对方位、频率、时延三维参数联合估计的问题。如果实际中存在多普勒频移而在多目标定位中把它作为频

移为零来处理, 还会对参数估计产生影响。

#### § 4.4.1 仿真举例

举一个仿真例子来说。为了便于比较, 仿真条件与第二章、第三章的例子一致, 取发射波形为梯形包络调制的单频信号, 脉宽 75ms, 载频为 30KHz。不同的是三个等强度目标具有非零的多普勒频移, 其真实参数在表 2-1 的基础上增加相应的频移参数, 见表 4-2。仿真中频移参数的选取大致是使速度相近的两个目标间的径向速度差为 1 节(在该频段上对应的频移约 20Hz)。

表 4-2 目标的三维真实参数

	时延(秒)	方位( $^{\circ}$ )	频移(Hz)
目标 1	0.902	-3.67	92.4
目标 2	0.933	0.00	138.5
目标 3	0.968	3.42	115.4

设定一个合适的距离门使其包含三个目标的反射信号, 用一间距为半波长的 16 元均匀线列阵来接收, 在距离门内均匀正交采样 100 点(采样频率约为 455Hz), 得到一个  $100 \times 16$  的复数据矩阵, 此时单阵元的信噪比为 15dB。

首先我们用常规的方法对三类参数分别进行一维估计, 估计结果见图 4-17。图(a)是各次快拍进行密集波束扫描后平均的结果, 显然无法分辨三个目标的方位; 图(b)是各个阵元输出信号进行功率谱估计后平均的结果, 三个目标的频移可以得到较好的分辨; 图(c)是各个阵元输出信号与发射信号计算互功率谱后平均的结果, 它也没能分辨出三个目标的时延。

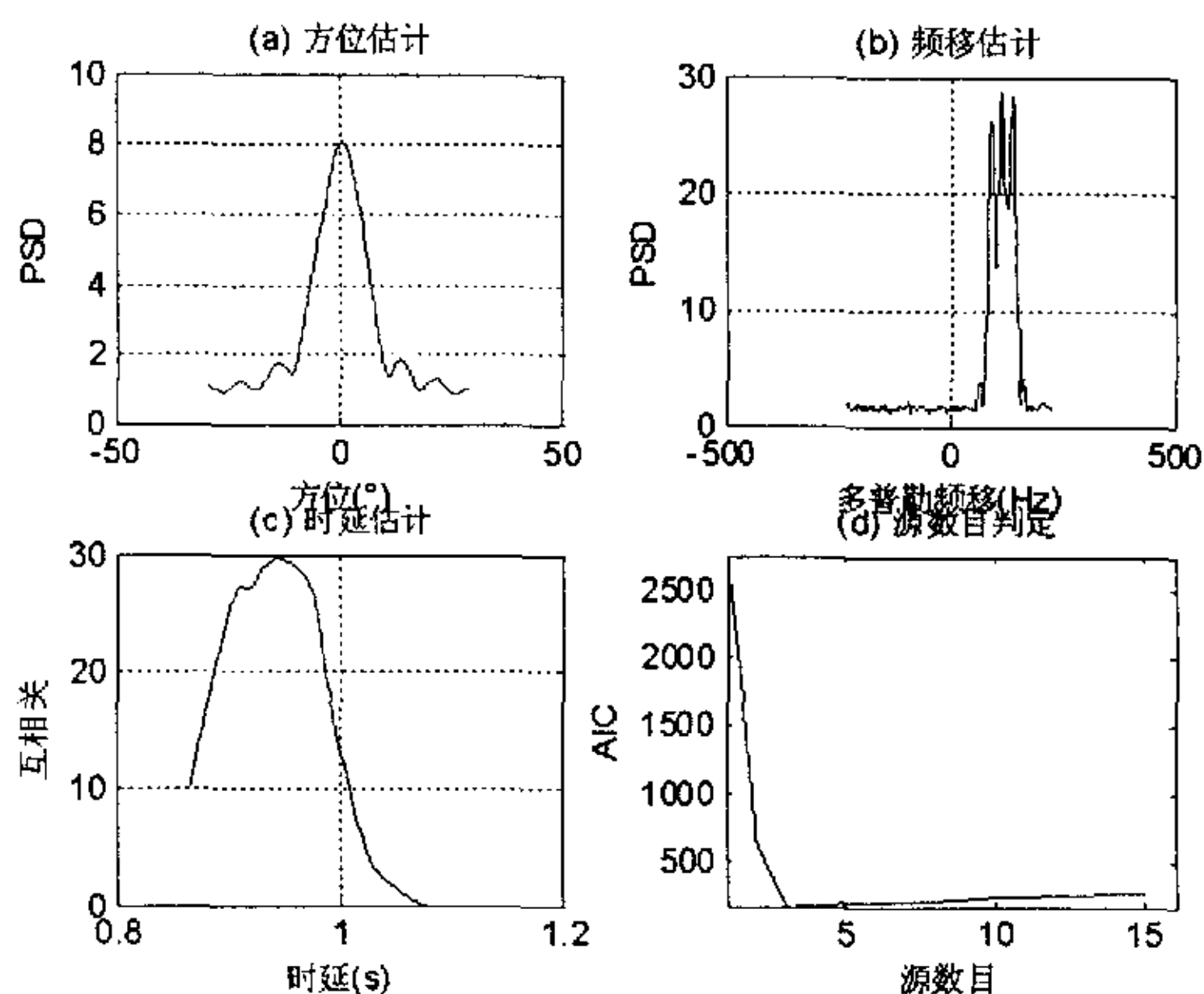


图 4-17 常规一维参数估计及 AIC 判阶

对这组带有频移信息的数据我们还是可以用 § 4.1.2 所提的方法进行判阶, 所得的 AIC 曲线见图 4-17(d), 也可以准确地判断出目标数目为 3。按式 4.9~式 4.11 可估计出目标方位为  $-3.95^\circ$ 、 $0.08^\circ$ 、 $3.46^\circ$ , 还是比较准确的。如果我们直接按式 4.12 去计算各特征矢量与发射信号的互相关, 得到的互相关曲线见图 4-18, 根本没有明显的峰值, 无法完成时延估计。

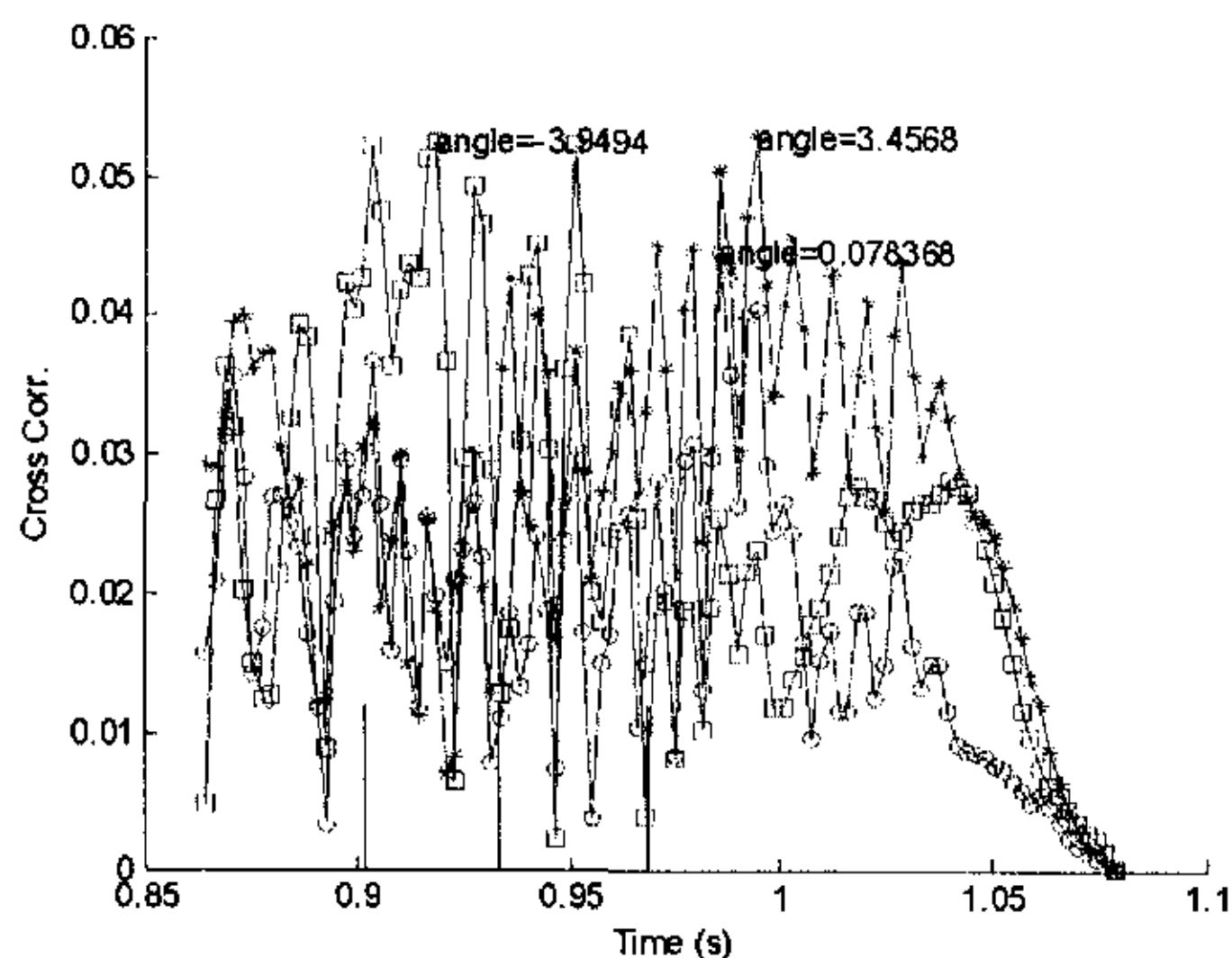


图 4-18 忽略频移直接进行时延估计的结果

分析时延估计失败的原因是由于式 2.1 中归一化回波包络时延频移矩阵  $\mathbf{S}'(\mathbf{t})$  中的  $f_{di} \neq 0$ 。一种可行的解决方法是首先估计出各目标的多普勒频移, 再对式 4.12 中的归一化回波包络时延矢量进行频移补偿, 即把该式改写为:

$$\mathbf{r}_i(\tau) = \frac{1}{N} \mathbf{s}^T(t + \tau) \exp(-j2\pi\hat{f}_{di}) \mathbf{U}_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (4.22)$$

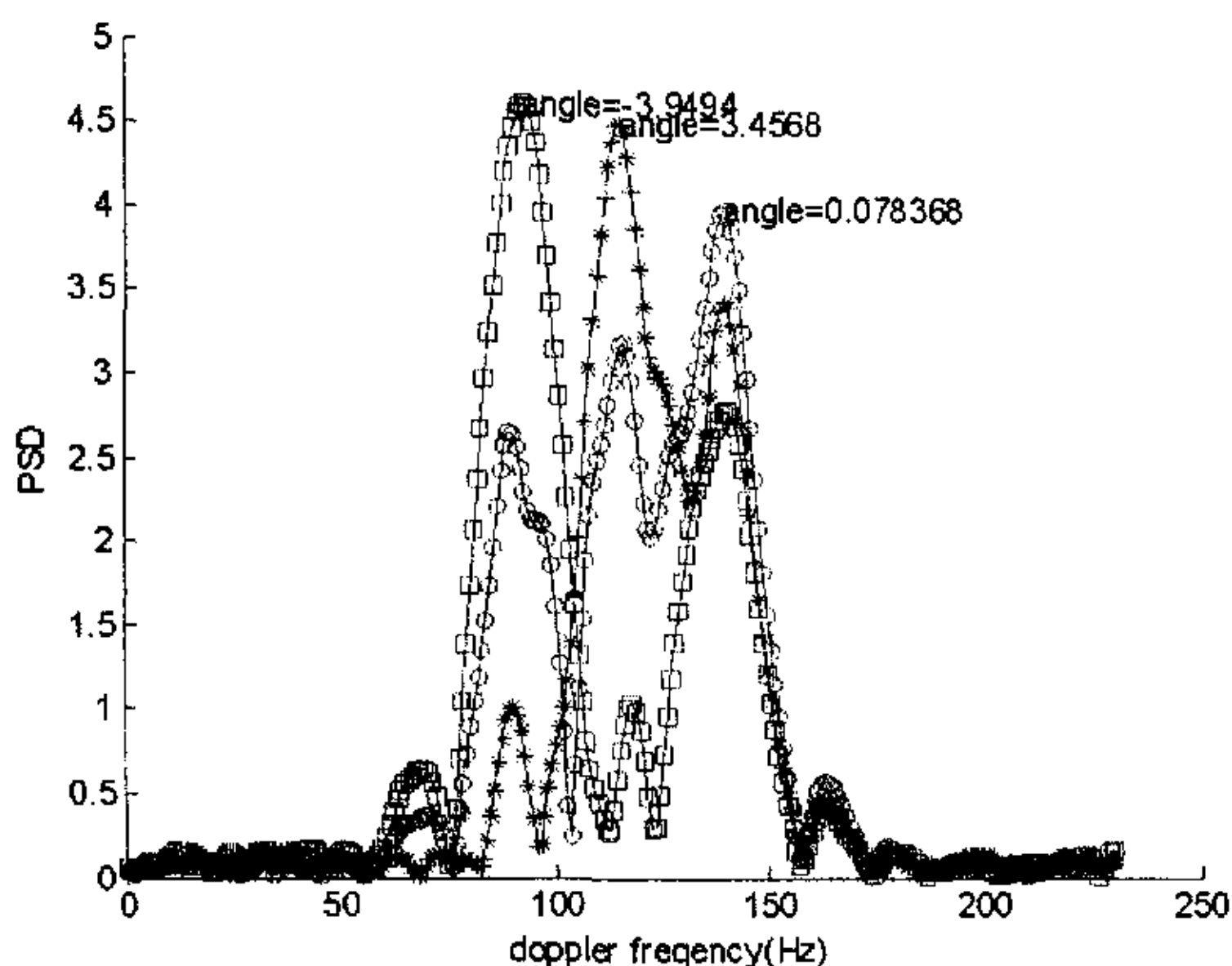


图 4-19 利用特征矢量进行频移估计

图 4-19是对式 4.10 得到的三个非零特征矢量分别进行频谱分析的结果,从各自的峰值位置可以估计出各目标的频移参数见表 4-3。再按式 4.22 计算补偿后的互相关曲线如图 4-20所示,每条曲线都有一个清晰的峰值,估计得到的时延参数见表 4-3。对比表 4-2的真实参数和表 4-3的估计参数,不仅具有较高的精度,配对结果也是正确的。

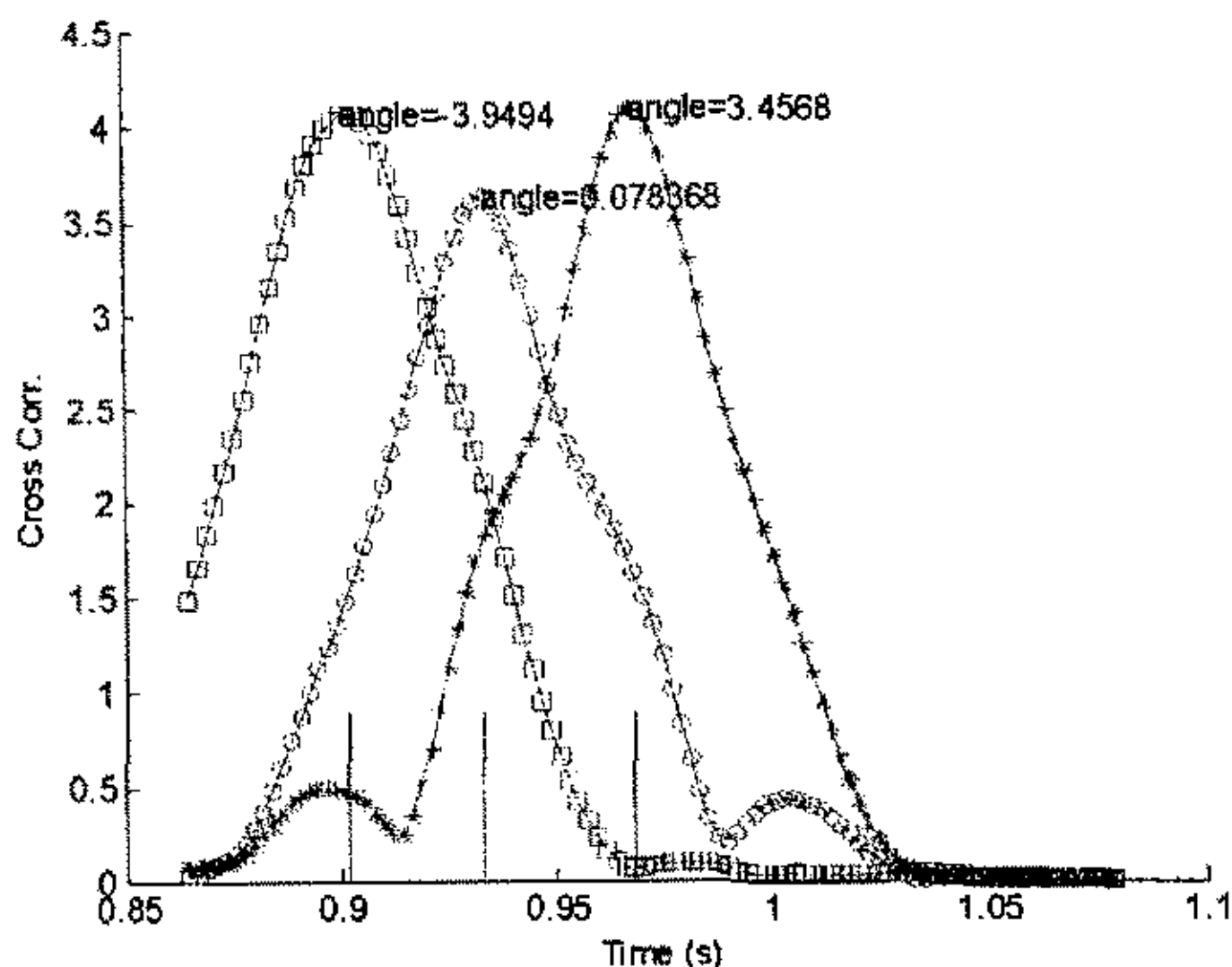


图 4-20 经过频移补偿后的时延估计结果

表 4-3 目标的三维参数估计

	时延 (秒)	方位( $^{\circ}$ )	频移(Hz)
目标 1	0.901	-3.95	92.9
目标 2	0.934	0.08	139.8
目标 3	0.968	3.46	115.4

#### § 4.4.2 统计性能分析

我们这里对方位、多普勒频移、时延的联合估计性能研究也是在能够正确判阶的前提下进行的,因此首先应该对接收到的回波进行判阶。与前一章相同,对表 3-6 所设定的四种典型条件,直接利用数据矩阵奇异值分解所得的奇异值、依据 AIC 准则进行判阶,能正确判出三个目标的概率随信噪比的变化情况见图 4-21左图,与没有多普勒频移的判阶结果(图 4-4)相比,四种条件中只有条件四的判阶性能有较大幅度的提高,0dB 时正确判阶概率从 10%提高到 90%。这是因为我们的判阶是基于空间协方差矩阵的特征值,在条件四中,目标方位间隔虽然超过波束宽度,但时延间隔很小,在无多普勒频差时源的相干性较强,不利于判阶。而考虑了多目标间的多普勒频差后就减弱了相干性,判阶性能自然会得到提高。条件一判阶性能较差的原因是方位间隔过小,造成分辨困难,源的相干性在无多普勒频差时就已经借助于目标间的大时延差而不强了,因此



增加多普勒频差对其判阶效果的改善不明显。

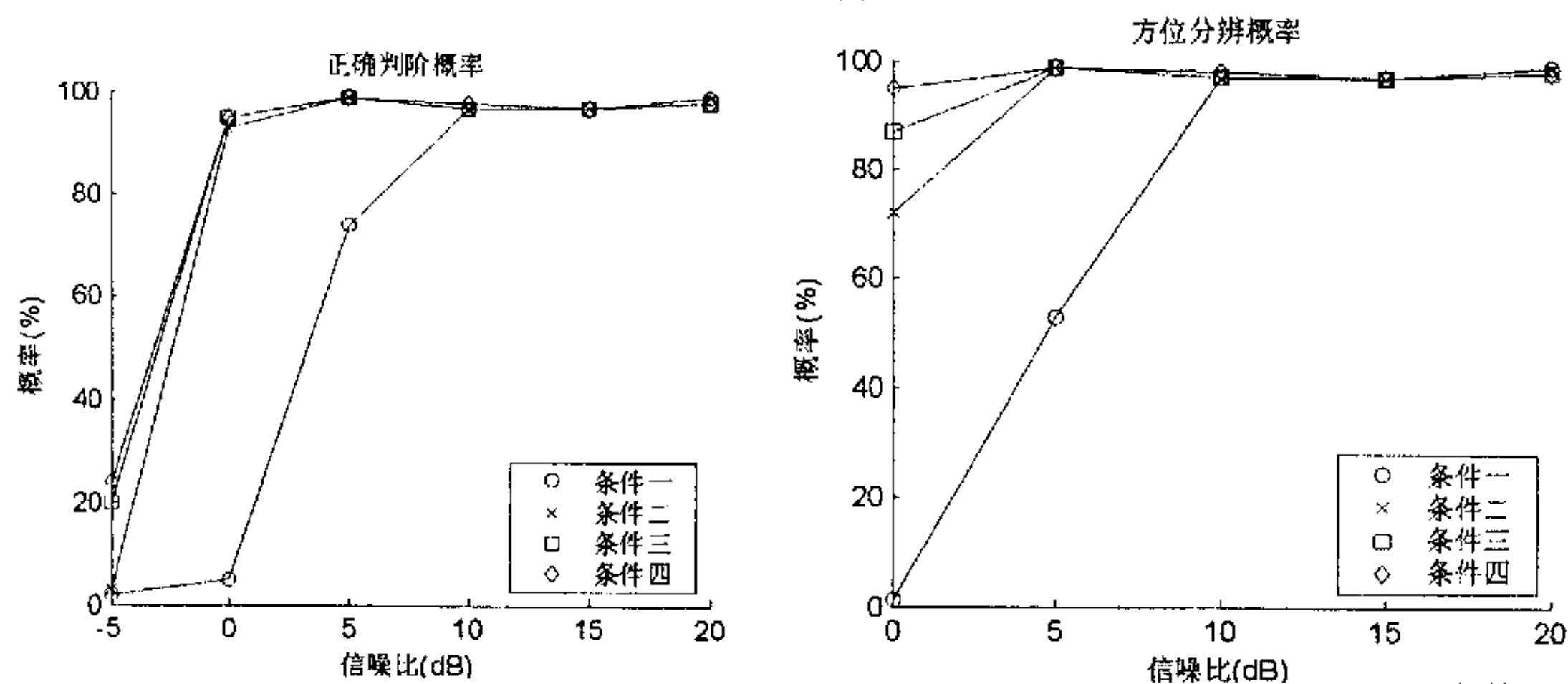


图 4-21 三维参数联合估计的判阶及方位分辨性能

考虑到各条件在-5dB 时都无法正确判阶,统计性能仿真从 0dB 开始。方位估计性能体现于正确分辨概率和均方误差随信噪比的变化情况。当一种估计方法能给出 3 个估计值且各估计值与真值的偏差不超过半个波束宽度,则被认为是正确分辨。各种条件下的方位估计正确分辨概率见图 4-21 右图。同样的,与没有多普勒频移的方位分辨结果(图 4-5)相比,条件四的方位分辨性能有较大幅度的提高,原因和判阶性能的改善是一样的,都是因为多普勒频差削弱了源的相干性。而条件一则由于目标方位间隔很小增大了分辨难度,导致分辨概率下降。图 4-22 进一步给出了各种条件下的方位估计精度与信噪比的关系,可以看到从条件一到条件四方位估计误差是递减的,这是因为从条件一到条件四目标的方位间隔是递增的,说明目标方位间隔越大估计精度越高。

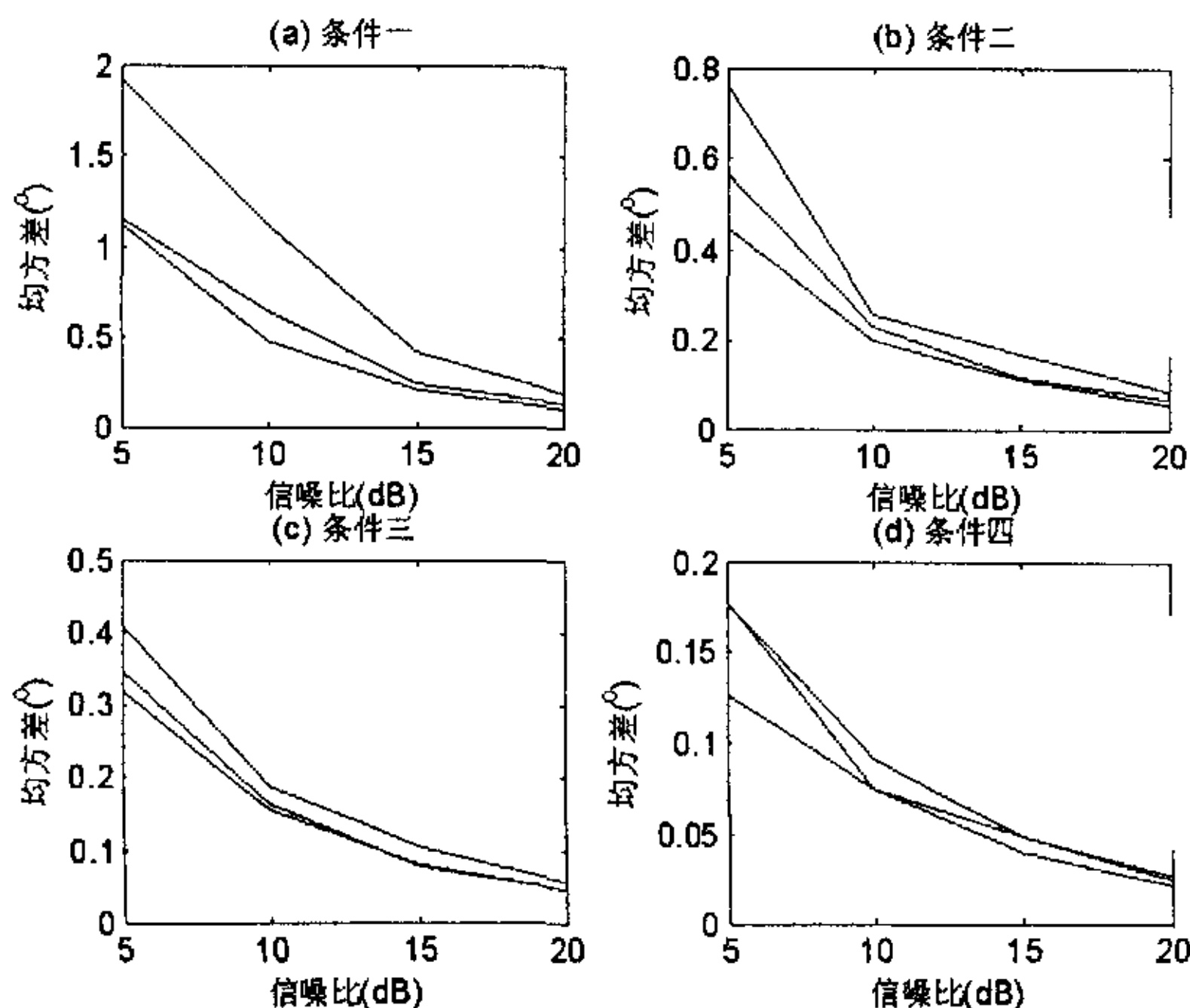


图 4-22 三维参数联合估计的方位估计精度



然后,利用对式 4.10 得到的三个非零特征矢量分别进行频谱分析可以估计出各目标的频移参数,图 4-23 左图给出了各种条件下频移的正确分辨概率。这里设定的正确分辨条件是估计值与真值相差不超过 20Hz(相当于相对速度 1 节的目标在 30KHz 的载波上产生的频移)。从图中看到,除了条件一,其它条件下的频移正确分辨概率在 0dB 时就可达到 90%以上。条件一性能不好的原因还是由于目标方位间隔太小造成的方位分辨困难,而频移的分辨是依赖于方位分辨的,只有在方位分辨后才能使三目标的包络在特征矢量中可分离。图 4-23 右图给出了方位参数和频移参数的配对性能,图 4-24 进一步给出了各种条件下频移估计的精度,这两个图中都反映了这样一个事实:从条件一到条件四,方位-频移正确配对概率逐渐提高,估计精度也依次提高。这是由于从条件一到条件四,目标方位间隔逐渐增大,方位分辨效果越来越好,使依赖于它的频移估计性能也越来越好。

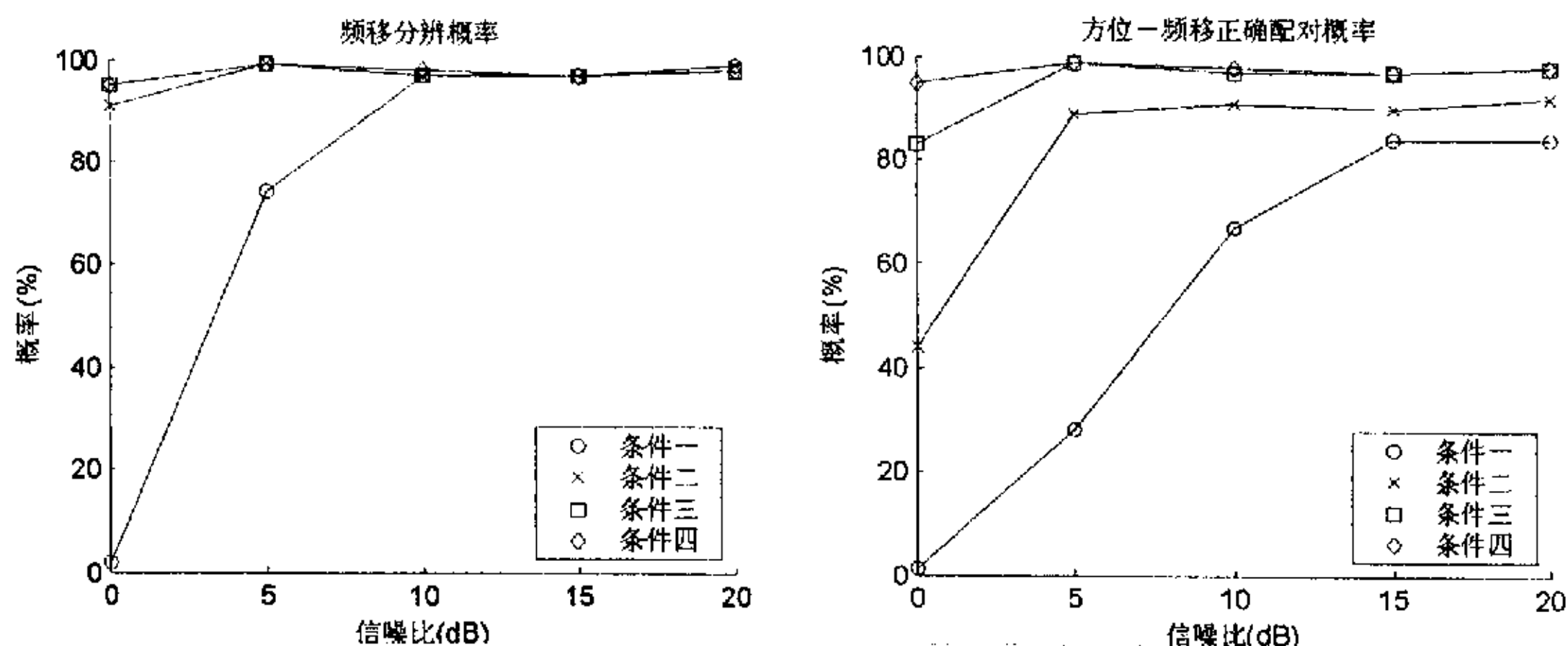


图 4-23 三维参数联合估计的频移分辨和配对

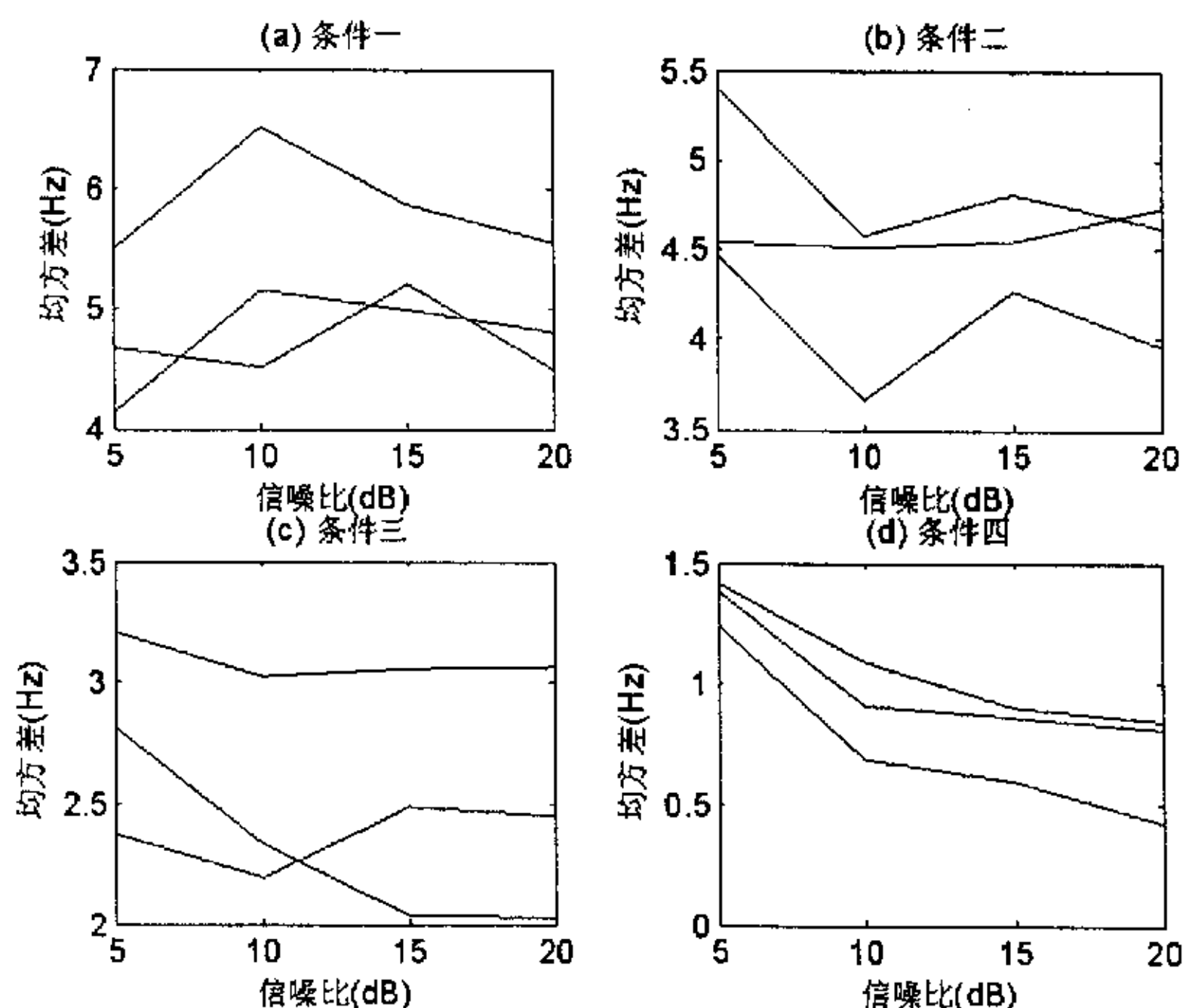


图 4-24 三维参数联合估计中的频移估计精度

再按式(4.22)对包络时延矢量进行频移补偿,再用互相关估计三目标的时延参数,在各种条件下的统计结果见图 4-25和图 4-26。图 4-25左图给出的时延正确分辨概率与无多普勒频差的结果(图 4-7)相比,其它条件性能都差不多,条件四的表现有大幅改善,原因在前面已经分析过了,是因为频差带来的解相干效果。这一点在图 4-25右图的方位一时延正确配对图中也反映出来了(与无频差的图 4-9相比)。图 4-26给出了各种条件下的时延估计精度,同频移估计精度的规律类似,从条件一到条件四,估计精度逐渐提高,原因也是由于时延参数的估计依赖于方位的分辨,而从条件一到条件四目标方位间隔逐渐增大,方位分辨效果逐渐增强。

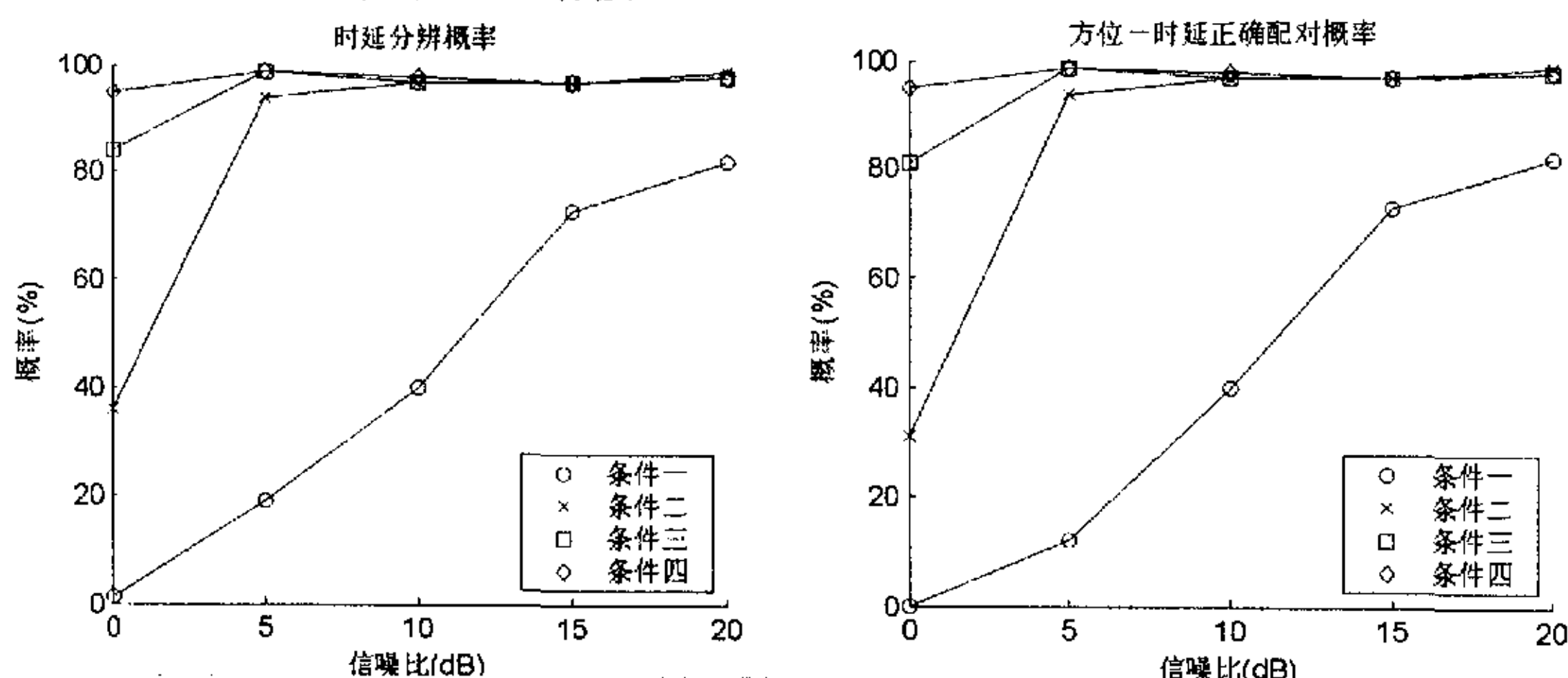


图 4-25 三维参数联合估计的时延分辨和配对

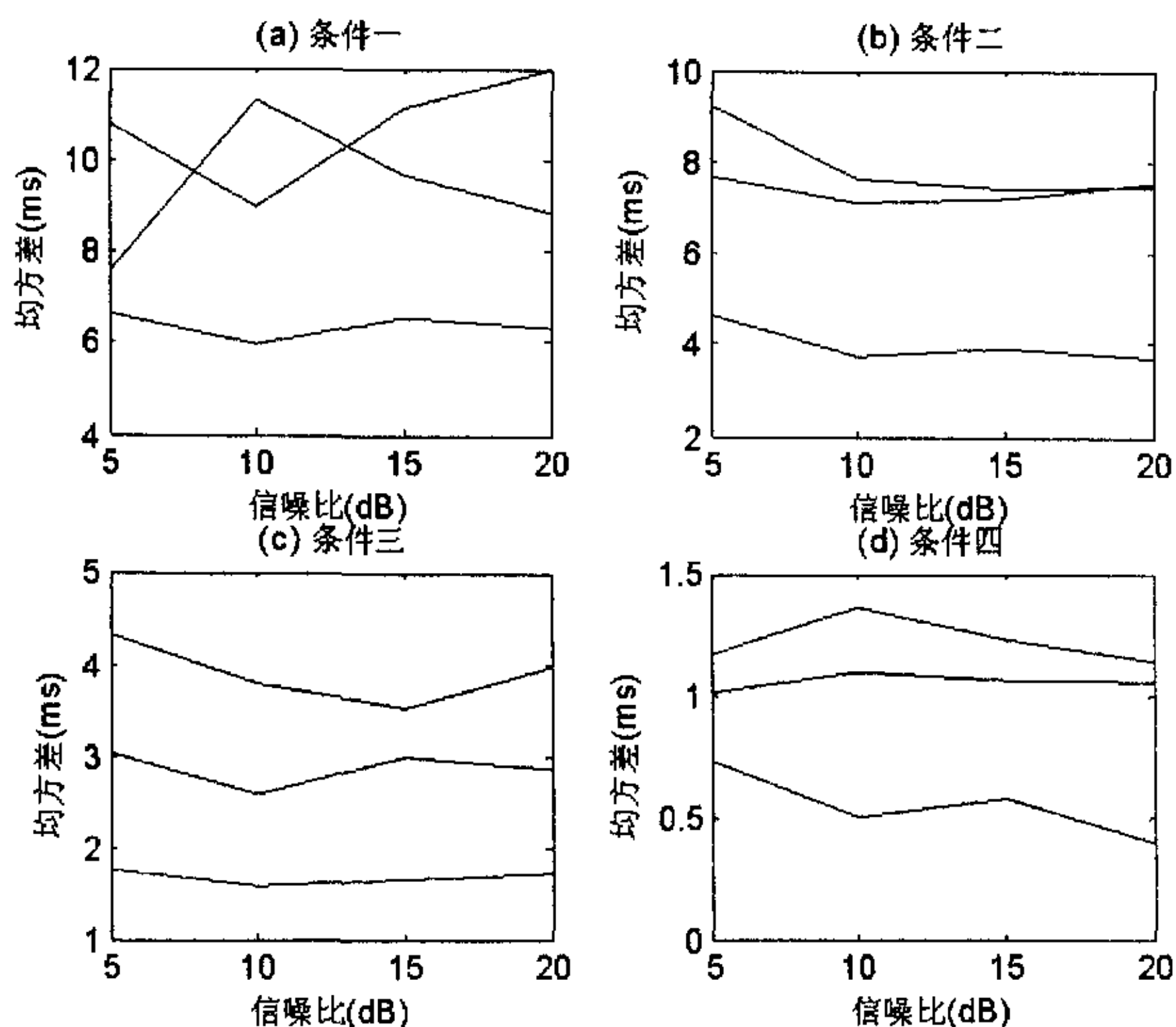


图 4-26 三维参数联合估计的时延估计精度

## § 4.5 本章小结

本章提出了一种时延—方位联合估计方法 ESPRIT-Corr, 它借鉴了旋转子空间不变的思想, 通过构造与常规 ESPRIT 不同的相关矩阵, 可以用广义特征值估计多目标的方位, 而用广义特征矢量估计多目标的时延(距离), 同时方位和时延参数可自动配对, 并且整个算法可在单次回波内完成。该方法采用大时宽窄带发射信号来保证方位高分辨, 同时利用信号在方位上的可分性来提高时延的分辨率, 从而可用同一发射波形兼顾方位和时延参数的高分辨, 基本解决了两者对发射信号要求的矛盾。计算机仿真结果表明, 对于三个等强度目标, 8dB 以上的信噪比即可得到较为满意的分辨、配对概率及估计精度, 方位分辨能力优于半个波束宽度、时延分辨能力达到 0.3 个模糊区间。

针对实际应用中普遍存在的不等强度目标源的问题, 本章提出了一种修正算法, 统计仿真表明, 它在目标时延间隔不是太小的情况下是有效的。

实际应用中多目标往往存在多普勒频移, 本章在上述基础上进一步提出了多目标方位、频移、时延三维参数的联合估计方法, 具体实现方法是利用广义特征矢量进行谱分析得到多普勒频移估计, 再对时延包络矢量进行频率补偿后通过互相关估计出时延。统计仿真结果表明, 在目标方位间隔不是太小的情况下可以获得满意的三维参数估计结果, 分辨概率、配对效果比方位—时延二维参数联合估计的还要好。

## § 4.6 本章参考文献

- [1] R.Roy, A.Paulraj and T.Kailath, "ESPRIT-A Subspace Rotation Approach to Estimation of Parameters of Cisoids in Noise", IEEE Trans. Vol. ASSP-34, Oct. 1986, pp.1340-1342
- [2] 廖桂生, 保铮, “未知阵列流形条件下波达方向—多普勒频率盲估计技术”, 电子科学学刊, 第19卷第2期, 1997年3月
- [3] 张群飞, 黄建国, 保铮, “用子空间旋转不变法同时估计水下多目标的距离和方位”, 声学学报, 第24卷第4期, 1999年7月, pp.400-406
- [4] M. Wax and T. Kailath, “Detection of signals by information theoretic criteria”, IEEE Trans. on ASSP, vol.33, No.2, 1985, Feb., pp.387-392
- [5] Petar Djuric, “A Model Selection Rule for sinusoids in White Gaussian Noise”, IEEE Trans. on SP, vol.44, No.7, 1996, July, pp.1744-1751
- [6] 刘建华, 彭应宁, 田立生, 李淳, “阵列测向中基于投影分解的信源数目后判断”, 清华大学学报(自然科学版), 第39卷第1期, 1999, 1, pp.22-25
- [7] Harry Lee, Fu Li, “An Eigenvector Technique for Detecting the Number of

- Emitters in a Cluster", IEEE Trans. on SP, vol.42, No.9, 1994, Sep., pp.2380-2388
- [8] Zhang Qunfei, Xie Yiqing, Huang Jianguo, "High Resolution Methods For Delay Estimation", CHINESE JOURNAL OF ACOUSTICS, Vol.14, No.1, Jan. 1995
- [9] B.Friedlander, "A Sensitivity Analysis of the MUSIC Algorithm", IEEE Trans. on ASSP, Vol.38, No.10, Oct. 1990, pp.1740-1751
- [10] 王建英, 陈天麒, "用 L 阵实现频率、二维到达角和极化的联合估计", 电波科学学报, 第 16 卷第 1 期, 2001 年 3 月, p.30-33
- [11] Yung-Yi Wang, Jiunn-Tsair Chen & Wen-Hsien Fang, "Joint Estimation of the DOA and Delay Based on the TST-ESPRIT in a Wireless Channel", 2001 IEEE Third Workshop on Signal Processing Advances, March 2001
- [12] 杨正权, 李思敏, "基于三维立体线阵的全方位 DOA 估计方法", 通信学报, 第 22 卷第 4 期, 2001, 4, p.8-12
- [13] 金梁, 殷勤业, 蒋伯峰, "宽带谱相关时空 DOA 矩阵方法", 通信学报, 2001 年 07 期, 2001 年 7 月
- [14] 徐友根, 刘志文, "空间相干源信号频率和波达方向的同时估计方法", 电子学报, 2001 年第 9 期, 2001 年 9 月, pp.1179-1183
- [15] Leila N. Atallah, Sylvie Marcos, "TIME DELAY AND DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION OF MULTIPLE USERS IN SLOW FADING CHANNELS", ICASSP'2002, , 2002

## 第五章 多目标定位水池实验研究

在前面几章的多目标定位理论和仿真中都假设接收波形与发射波形完全相似,只相差一个时延。而在实际环境中,一个理想的波形通过有限带宽、通带不完全平坦的发射系统发射出去,经过信道(冲击响应不可能是 $\delta(t-\tau)$ 的理想形式)的传播,被目标反射后再经过一次信道传播,最后被有限带宽、通带不完全平坦的接收系统所接收。显然,接收波形是畸变了的发射波形,这种失配会导致时延估计的误差和分辨能力的下降。要解决这一问题可以从四个方面入手:

- (1) 设计合理的波形使其通过发射、接收系统后的畸变尽量小,例如选用梯形、钟形等谐波成分小的包络;
- (2) 发射、接收系统传递函数的幅频特性在通带内尽可能平坦,相频特性在通带内为线性;
- (3) 通过自适应均衡等措施补偿信道对波形的畸变,这就要求对水声信道的特性进行深入的分析<sup>[1]</sup>,有针对性地采取有效的措施;
- (4) 选用对波形畸变不太敏感的时延估计方法。

阵列信号处理中往往假设阵列流形是准确已知的,而在实际环境中,不可避免地存在阵元特性不一致、机械安装误差、阵元间耦合、预处理通道不一致等与理想阵列有出入的现象,统称为阵列误差。阵列误差的存在,对常规波束形成的影响主要是旁瓣级抬高、主瓣展宽,而对高分辨定向方法的影响更为严重,不仅使分辨性能急剧下降,而且估计误差也随之大增<sup>[2]</sup>。

要将高分辨阵列处理技术应用于工程实践时必须解决阵列误差的问题,近十年来,国内外就此开展了仿真和实验研究,提出了相应的解决方案。这些方案大致可分为三类:

- (1) 离线阵列校准方法。它事先对阵列误差进行测量和估计,在阵列信号处理前对阵列误差作出补偿<sup>[28]-[32]</sup>。其特点是简单易行、运算量小。
- (2) 在线自校正方法。它用迭代的方法使某种代价函数最小来同时求得阵列误差和目标方位<sup>[33]-[38]</sup>,它的特点是对阵列的适应性好,但算法复杂、运算量大。
- (3) 稳健的阵列信号处理方法。这类方法对阵列误差不太敏感,直接处理带有阵列误差的数据即可获得较高的分辨率<sup>[39]-[44]</sup>,但它并没有消除阵列误差,其分辨率和估计精度会有所下降。

多目标定位涉及目标时延、方位的两维参数估计,在工程应用中会同时受

到波形畸变和阵列误差的影响。解决的方法也应通过理论分析、仿真研究、实验研究这三个步骤,鉴于理论、仿真研究方面的工作已经有较多的进展,目前迫切需要突破的是实验研究。本章的重点就是针对水下多目标定位的应用背景,结合我校“水下信息与控制”国家重点实验室的软硬件条件,开展多目标定位的水池实验研究。考虑到消声水池自身的局限性,实验中无法获得水声信道对波形的影响,因此实验数据分析中不包括信道均衡方面的内容。通过一系列的水池实验,力图揭示实际阵列误差对多目标定位的影响,寻求有良好应用前景的阵列校准方法。

## § 5.1 水池实验系统及实验方法

### § 5.1.1 多目标定位水池实验系统简介

以消声水池为中心,我们建立了一个水下多目标定位实验系统,详见图 5-1。全系统包括多目标信号源、多通道噪声源、多通道功率放大器、多目标模拟基阵、接收基阵、消声水池、主控计算机、放大滤波器、数据采集系统、数据处理计算机等 10 个仪器设备。

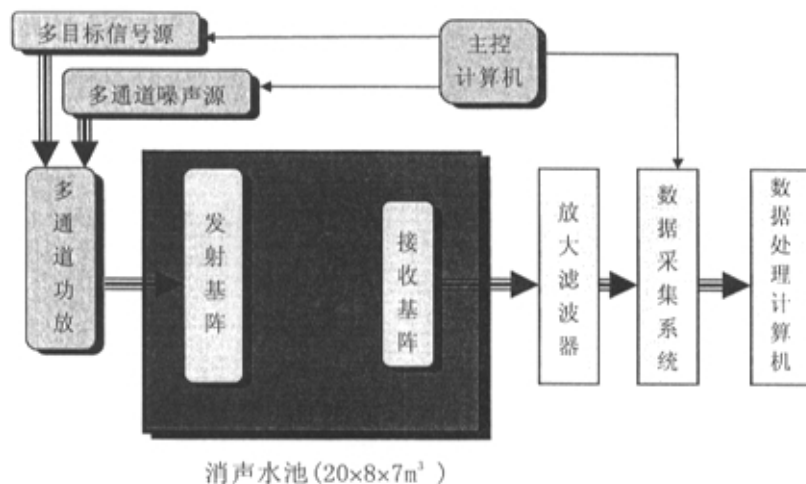


图 5-1 多目标定位水池实验系统框图

多目标信号源是我们自研的设备,最多可模拟 4 个目标的回波。目标的方位通过多路开关在 16 个发射阵元间切换来模拟;目标的距离通过波形的时延来模拟;目标的速度通过波形的频率来模拟;目标的回波强度可以在 0~40dB 内调节。信号源的有三种工作方式:连续波、周期性重复脉冲、外同步触发的脉冲。



多通道噪声源也是自研设备，它利用二极管的热噪声放大后输出 24 路统计独立的高斯白噪声，噪声幅度可由上位计算机控制，动态范围 60dB。

多通道功率放大器共计 24 路，每一路带一个二输入加法器，可以混合放大信号和噪声，固定增益 20dB。

多目标模拟基阵是一个 6 米长的线列阵，布放了 16 个阵元，各阵元的位置可以 5cm 的步长任意安装。实验时，每个阵元相当于一个辐射源，通过计算机控制将多目标信号加到不同的换能器阵元，以模拟所需的多个目标。

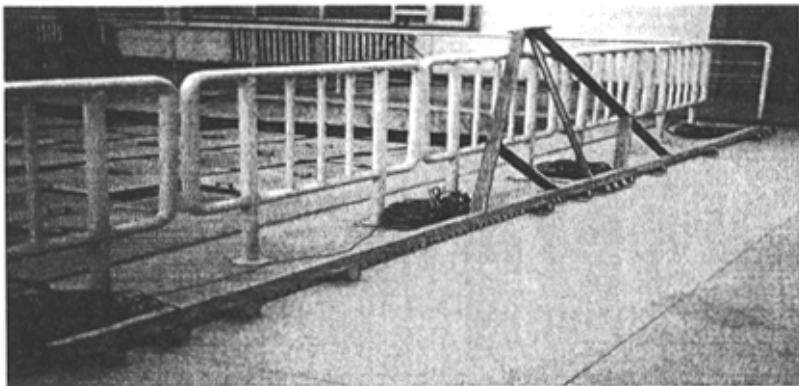


图 5-2 多目标模拟基阵

信号接收基阵是一个平面阵，我们取其中最长的一行 14 个阵元构成均匀线列阵，阵元间距为 2.5cm。

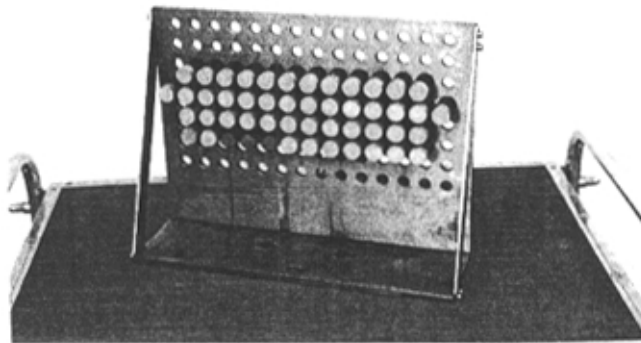


图 5-3 接收基阵

消声水池的尺寸是  $20\text{m} \times 8\text{m} \times 7\text{m}$ ，它的六个面都有吸声材料，用于模拟开阔的海洋环境。水池上安装了两台可在水平面上自由移动的行车，每个行车上有一个可以升降、旋转的吊杆，分别用来布放发射基阵和接收基阵。

主控计算机协调整个多目标定位实验系统, 主要控制三个设备: 控制多目标信号源的各项参数, 如时延、频率、通道等; 控制噪声源的强度; 送一个同步信号给采集系统, 在发射信号的同时启动数据采集。

放大滤波器是一台英国 Kemo 公司滤波器, 完成模拟信号预处理系统, 共 64 个通道, 每个通道可以任意设置高通、低通、带通滤波器, 增益-20~70dB 可调。

数据采集系统是美国 Preston 公司的 Presys 4000, 32 通道同步采样, 每通道最高采样率 200KHz, 每通道独立缓存 1MB。

数据处理计算机通过 SCSI 接口设定采集系统的参数, 如采样频率、通道数、采样数据点数, 并把采集到的数据保存到计算机磁盘中。

实验前把收发基阵分别固定到两个行车上, 两车行进到相距 15m 左右, 控制升降杆让收发基阵处于水下同一深度(2~3m)。把仪器设备按图 5-1连接好, 主控计算机根据实验设计将模拟各目标回波所需的参数传递给信号源, 把噪声源的输出强度也调整到设定值, 然后发一个同步脉冲给信号源和采集系统, 信号源开始发射信号, 采集系统也开始采集。

### § 5.1.2 水池实验中的方位定标

在水下定位实验中, 为了考察定位中方位和时延估计的精度, 需要已知辐射源(目标)方位、时延参数的真值。

时延参数真值由信号源外触发响应时间、采集系统外触发响应时间、信号源各通道间的相对时延差、声波在水池中的传播时间等因素确定, 前三者的误差都在 10us 以内, 收发基阵间的距离测量误差不超过 15cm, 即声波在水中的传播时间测量误差小于 100us, 因此时延参数的真值能以 0.1ms 的精度给出, 满足考核时延估计精度的要求。

方位参数真值有两种获取方法: 一是几何定标。如图 5-4所示, 让收发基阵平行放置且两者的中心连线垂直于基阵面, 在此条件下通过测量发射换能器到阵中心的横向距离  $x_1$  和收发基阵间的垂直距离  $y$  就可以解算出发射源相对于接收阵平面的方位角  $\theta_1 = \arctg(x_1 / y)$ 。但这一计算的前提——两基阵面平行很难精确实现, 它要靠目测和吊杆转盘的角度读数来调整, 由于存在转盘齿轮啮合误差、基阵与吊杆的安装误差、声学阵面和机械阵面的不一致性等因素, 致使最终的平行度误差会超过  $1^\circ$ , 即几何定标的方位真值误差大于  $1^\circ$ , 不能满足考核方位估计精度的要求。二是声学定标。以某种大家普遍接受的声学定位方法来分别测量各发射源相对于接收基阵声学阵面的方位角, 定标精度可以达到  $0.1^\circ$  的数量级。

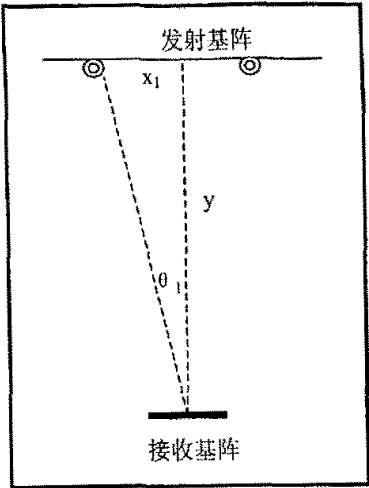


图 5-4 方位定标示意图

实验中，行车的位置、放大滤波器的设置见下表 5-1。16 个发射换能器在发射基阵架上的安装位置见表 5-2，相邻安装孔位之间的间隔是 5cm，表中给出了几何解算所得的方位定标结果。用发射基阵中的一个换能器发射 30KHz 的单频连续波或脉冲波(脉宽 10ms，周期 50ms)，接收阵列的输出经过放大滤波后以 122880Hz 频率采样获得一组数据。轮流用发射基阵中的各个换能器作为发射源，分别获取相应的数据，用于标定发射源的方位。

表 5-1 实验设备状态记录

航车 1 位置(m)	17.43	滤波器通带(KHz)	30KHz, 1/3 倍频程
航车 2 位置(m)	2.64	放大器增益(dB)	48dB
航车间距离(m)	14.79		
收发阵间距离(m)	≈14.75 (考虑换能器面与升降杆不在一个垂面上)		

注：30KHz、1/3 倍频程相当于 26.7~33.7KHz。

我们选最常用的密集波束扫描法来测量单个发射源的方位。把采得的每一组数据在时间上等分成 20 段，对每一段进行密集波束扫描法方位估计，方位扫描步长为 0.1°，再求 20 个估计值的均值和方差，所得结果见下表 5-2。

表 5-2 方位定标

发射换能器序号	换能器安装孔位	发射源方位(°)		
		几何关系解算 <sup>①</sup>	波束扫描值	
			均值	标准差
1	-59	14.0	14.7	0.00
2	-55	13.2	14.0	0.00
3	-50	12.2	13.1	0.00
4	-41	10.5	11.2	0.00

5	-14	5.2	5.8	0.00
6	-6	3.7	4.1	0.00
7	-2	2.9	3.2	0.00
8	0	2.5	2.8	0.00
9	2	2.1	2.4	0.00
10	4	1.8	2.0	0.00
11	13	0.0 <sup>②</sup>	0.0	0.00
12	31	-3.5	-3.6	0.00
13	50	-7.2	-7.6	0.00
14	53	-7.8	-8.2	0.00
15	56	-8.4	-8.9	0.00
16	59	-8.9	-9.5	0.00

注：①发射阵相邻阵元相对于接收阵的方位差 $=\arctg(0.05\text{m}/14.75\text{m})=0.194^\circ$

②由于水池测量困难，绝对数值不可得，此处假设 $0^\circ$ 与波束扫描值相等。

从表中可以看出，发射换能器从7号变到8号，发射源的方位只变化了 $0.4^\circ$ ，声学定标方法就可以准确地表现出来。20次声学定标都得到相同的结果(标准差为0)说明整个实验系统稳定可靠，随机扰动误差很小。由于水池尺寸的限制，收发基阵间的距离与接收基阵的尺寸相比不够大，远场条件不能严格满足，使声学定标的方位绝对值比几何定标的略大一些。考虑到后续的多目标定位实验也是工作在这种非完全远场条件下，因此采用声学定标结果作为目标方位真值还可以部分排除近场实验对方位估计性能研究的影响。

## § 5.2 几种阵列误差抑制方法

如本章开始所述，抑制阵列误差的方法有三大类，其中第二类为在线自校正方法，它运算量大且存在迭代能否收敛的问题，在工程中应用尚有距离，本文不作深入研究。本文就第一、第三类方法中有较为实用的三种方法进行了水池实验研究。

### § 5.2.1 离线阵列校准技术

所有的阵列处理算法都是在计算阵列接收信号与阵列流形之间的相关性，确定接收信号与哪几个方向矢量匹配得最好。例如密集波束扫描是用各个方向矢量去扫描阵列输出快拍所得的平均结果，MUSIC是用各个方向矢量去试探阵列输出相关矩阵的噪声子空间。

阵列误差对方位估计的影响在于使计算中使用的阵列流形 $\{a(\theta)\}$ 与实际阵列流形 $\{a'(\theta)\} = \{a(\theta) + \delta(\theta)\}$ 有差别，两者之间的差就是阵列误差，它包含阵元(含电路通道)幅度和相位误差、阵元间耦合、阵元安装位置误差等因素。

5	-14	5.2	5.8	0.00
6	-6	3.7	4.1	0.00
7	-2	2.9	3.2	0.00
8	0	2.5	2.8	0.00
9	2	2.1	2.4	0.00
10	4	1.8	2.0	0.00
11	13	0.0 <sup>②</sup>	0.0	0.00
12	31	-3.5	-3.6	0.00
13	50	-7.2	-7.6	0.00
14	53	-7.8	-8.2	0.00
15	56	-8.4	-8.9	0.00
16	59	-8.9	-9.5	0.00

注：①发射阵相邻阵元相对于接收阵的方位差= $\arctg(0.05\text{m}/14.75\text{m})=0.194^\circ$

②由于水池测量困难，绝对数值不可得，此处假设  $0^\circ$  与波束扫描值相等。

从表中可以看出，发射换能器从 7 号变到 8 号，发射源的方位只变化了  $0.4^\circ$ ，声学定标方法就可以准确地表现出来。20 次声学定标都得到相同的结果(标准差为 0)说明整个实验系统稳定可靠，随机扰动误差很小。由于水池尺寸的限制，收发基阵间的距离与接收基阵的尺寸相比不够大，远场条件不能严格满足，使声学定标的方位绝对值比几何定标的略大一些。考虑到后续的多目标定位实验也是工作在这种非完全远场条件下，因此采用声学定标结果作为目标方位真值还可以部分排除近场实验对方位估计性能研究的影响。

## § 5.2 几种阵列误差抑制方法

如本章开始所述，抑制阵列误差的方法有三大类，其中第二类为在线自校正方法，它运算量大且存在迭代能否收敛的问题，在工程应用中尚有距离，本文不作深入研究。本文就第一、第三类方法中有较为实用的三种方法进行了水池实验研究。

### § 5.2.1 离线阵列校准技术

所有的阵列处理算法都是在计算阵列接收信号与阵列流形之间的相关性，确定接收信号与哪几个方向矢量匹配得最好。例如密集波束扫描是用各个方向矢量去扫描阵列输出快拍所得的平均结果，MUSIC 是用各个方向矢量去试探阵列输出相关矩阵的噪声子空间。

阵列误差对方位估计的影响在于使计算中使用的阵列流形  $\{a(\theta)\}$  与实际阵列流形  $\{a'(\theta)\} = \{a(\theta) + \delta(\theta)\}$  有差别，两者之间的差就是阵列误差，它包含阵元(含电路通道)幅度和相位误差、阵元间耦合、阵元安装位置误差等因素。

离线阵列校准技术的设计思想是用一系列已知方位的声源去激励接收阵列,测得阵列在这些方向上的方向矢量 $\{a'(\theta_1), a'(\theta_2), \dots, a'(\theta_N)\}$ ,然后通过一定的内插算法获得整个阵列的实际流形。在阵列信号处理中使用测得的实际阵列流形就可以有效地抑制阵列误差。

在已知方位设置一个声源后,测量阵列在该方向上的归一化响应即可得到方向矢量。最常用的方法是主分量法:用阵列输出信号形成协方差矩阵,再进行特征分解,取最大特征值对应的特征矢量,并以第一个阵元为参考归一化后就是当前声源所在方位的方向矢量。

以方位定标的实验数据为例,16个发射换能器分别发射,通过解算可以获得16个方向的实测方向矢量,以表5-2中声学定标的值作为这16个方位的真值。用实测方向矢量通过线性内插可得到发射源所在区间内任意方向的方向矢量,再用内插得到的方向矢量对8号换能器发射时的接收信号进行密集波束扫描,结果见图5-5左图中的虚线,图中实线为用理想阵列流形进行波束扫描的结果。也可以对实测方向矢量与理想矢量的误差进行线性内插,这样内插后波束扫描的结果见图5-5右图的虚线。两个图中都可以看到,离线校准后的虚线结果在主瓣起伏、零点深度等方面反而不如校准前的波束扫描结果,这主要是由于实测方向矢量太少、发射源方位定标精度不够、线性内插误差大等原因造成的。

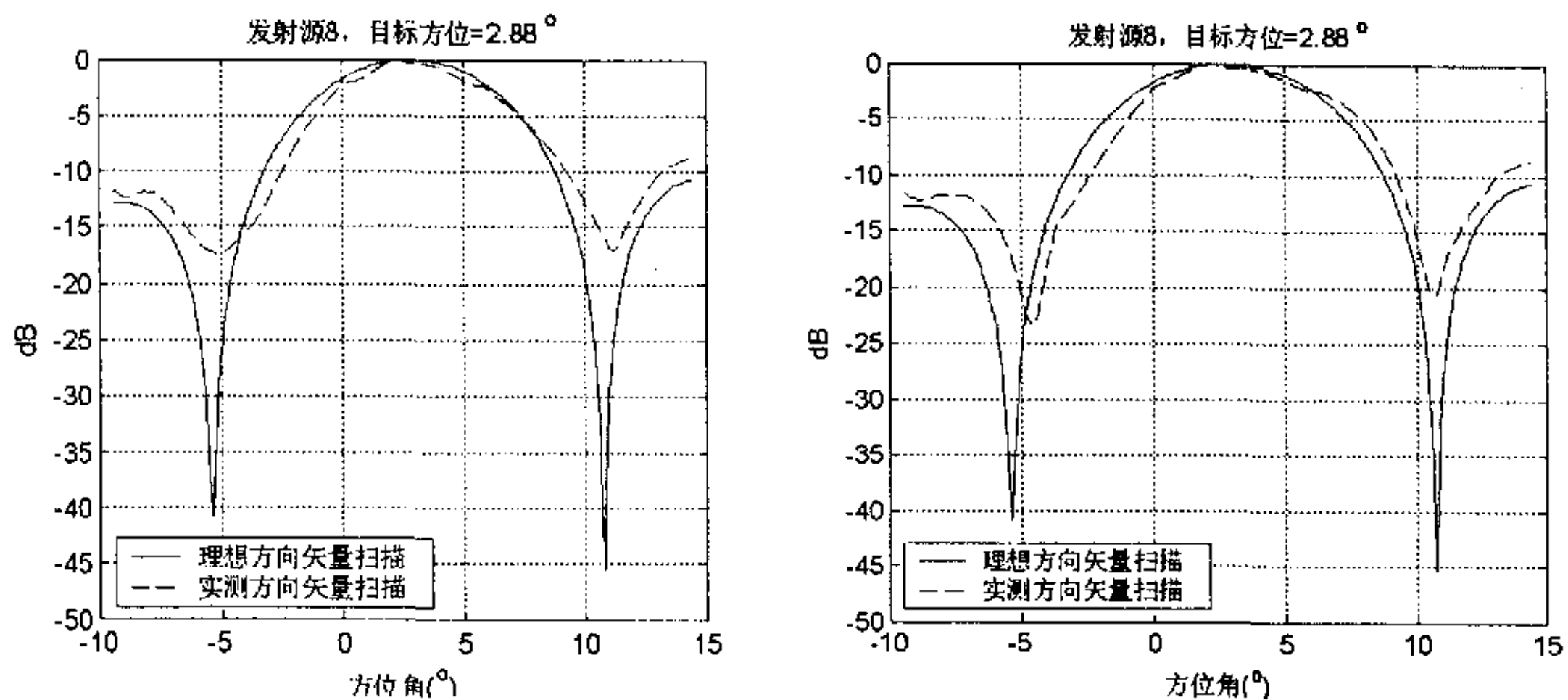


图 5-5 离线阵列校准

鉴于离线直接测量方向矢量在工程实用中需要精确地标定校准源的方位,实施较为困难。为了便于操作,我们对离线校准方法进行适当的简化。由前述的分析可知,阵列误差主要包括三个来源:阵元(通道)幅度误差,阵元相位误差,阵元位置误差。前两种误差与水听器的电声特性有关,在水听器空间指向性的主瓣内可认为与目标方位无关,因此容易测量和修正,尤其是幅度误差,甚至可以在高信噪比条件下在线校准。而相位误差与工作频率关系较为密切,



且与位置误差有耦合,测量难度加大。本着先易后难的原则,先校准幅度,再校准相位,最后考虑校准位置误差。

我们先来看看经过幅度校准前后方位估计的性能变化。这里的幅度校准是在获得数据后求各个水听器通道的标准差(交流有效幅度),再依据这一标准差对各通道进行归一化来实现的。以一组双源方位估计的实验数据为例,12、15号发射换能器发射两个非相干单频正弦波,方位间隔约为波束宽度的  $2/3$ 。校准前各阵元的幅度见下表 5-3。图 5-6左图给出了幅度校准前后 MUSIC 方法的估计结果,可以看出幅度校准前空间角谱谱峰不明显,幅度校准后出现两个明显的谱峰,位置也与真实值一致。图 5-6右图给出了幅度校准前后最小模方法的估计结果,同样可以看出校准前后的主峰及旁瓣的差异。这一方面说明阵元幅度误差对方位估计性能的影响,另一方面也表明本文所提的幅度误差校准方法是有效的。

表 5-3 校准前各阵元的输出幅度

阵元序号	1	2	3	4	5	6	7
输出幅度 (伏)	2.2	4.1	3.3	2.7	2.6	2.7	1.5
阵元序号	8	9	10	11	12	13	14
输出幅度 (伏)	2.9	3.3	3.3	3.3	3.4	3.3	2.4

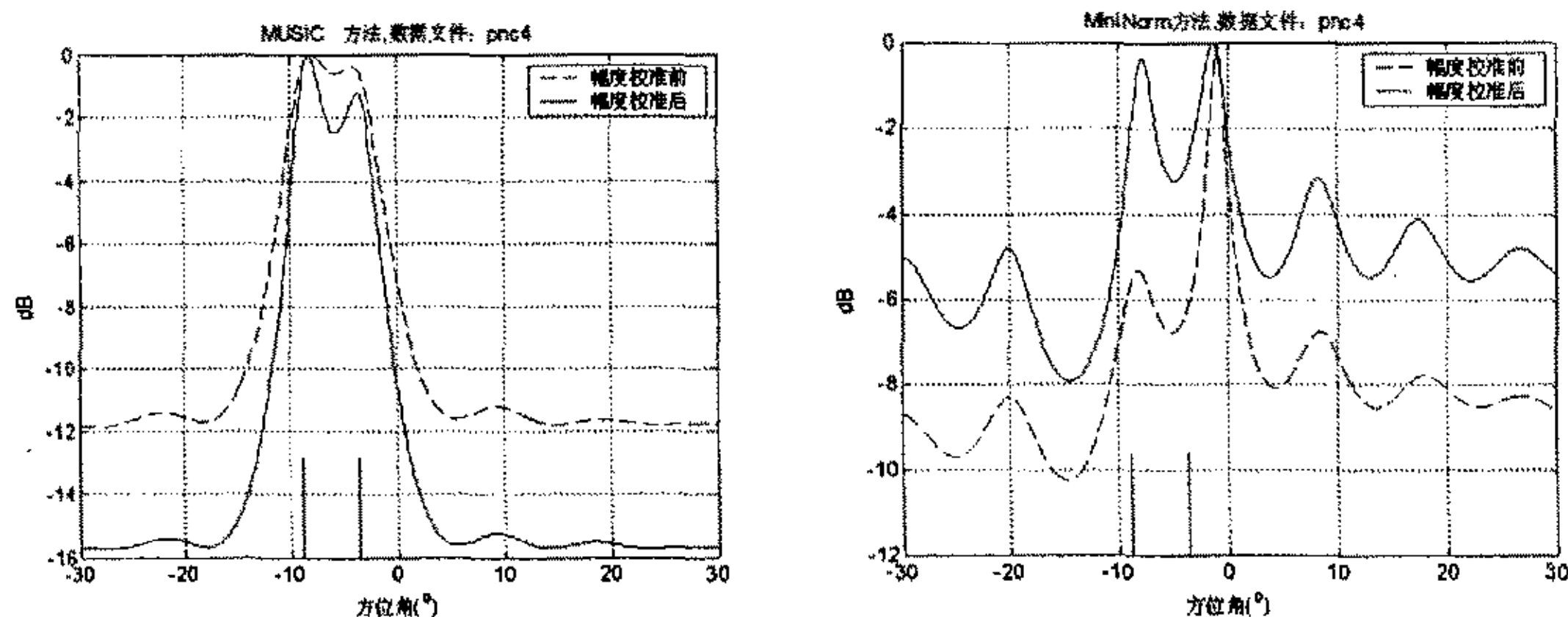


图 5-6 幅度校准前后的双源方位估计

由于幅度校准无需事先准备,简便易行,因此我们在处理实验数据时往往第一步就进行幅度校准,在其基础上再做其它的稳健处理或校准。

### § 5.2.2 空间平滑

空间平滑方法的提出最初是为了解决相干源的方位估计问题,它把一个均

匀线列阵分成若干个子阵, 如下图 5-7 所示:

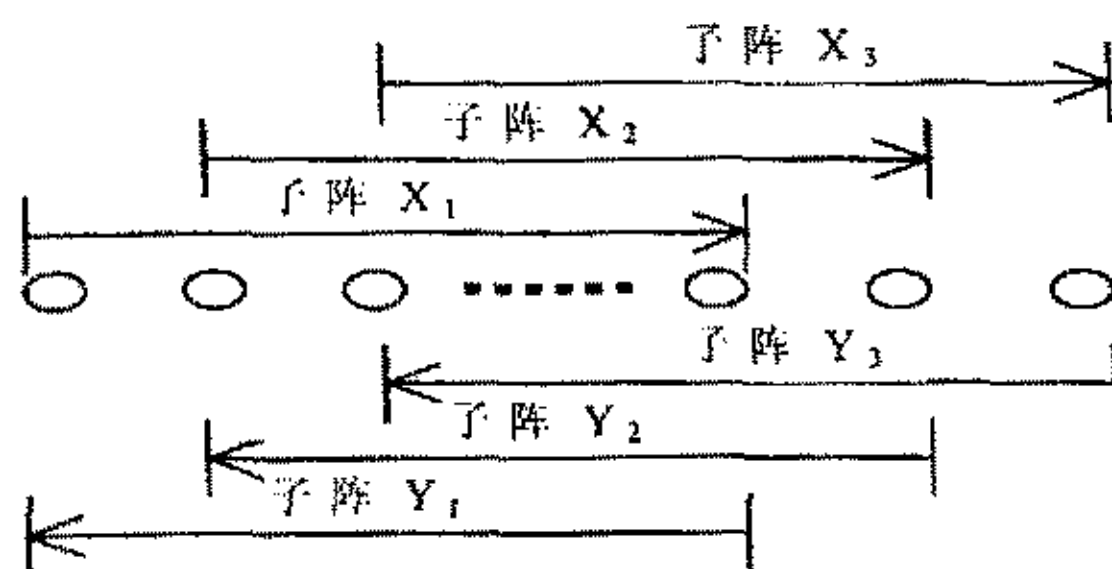


图 5-7 空间平滑中的子阵分割

每个子阵分别形成空间协方差矩阵

$$\mathbf{R}_i = \tilde{\mathbf{X}}_i^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{X}}_i(\mathbf{t}), \quad i=1,2,\dots,k \quad (5.1)$$

再把这些协方差矩阵进行平均构成前向平滑后的空间协方差矩阵

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{R}_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{X}}_i^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{X}}_i(\mathbf{t}) \quad (5.2)$$

当子阵数目不小于相干源数目时, 平滑后的空间协方差矩阵的信号子空间不会降秩, 从而使各种基于特征分解的方法, 如 MUSIC、最小模等, 可以处理相干源。空间平滑需付出的代价是阵列孔径的缩小, 为了减小阵列孔径的损失, 还可以在上述前向平滑的基础上再增加后向平滑, 见图 5-7 下半部分。把各子阵的阵元反向排列取共扼, 各自形成协方差矩阵

$$\mathbf{R}'_i = \tilde{\mathbf{Y}}_i^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{Y}}_i(\mathbf{t}), \quad i=1,2,\dots,k \quad (5.3)$$

把这些协方差矩阵加在一起构成后向平滑协方差矩阵

$$\bar{\mathbf{R}}' = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{R}'_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{Y}}_i^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{Y}}_i(\mathbf{t}) \quad (5.4)$$

再把(5.2)式和(5.4)式加起来就构成了前后向平滑协方差矩阵, 它可以在相干源数目一定的情况下用更少的子阵数, 也就减小了阵列孔径的损失。

空间平滑的实质是协方差矩阵的平均, 考虑到(2.2)式的阵列信号模型, (5.2)式的前向平滑相关矩阵可以写作

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{X}}_i^H(\mathbf{t})\tilde{\mathbf{X}}_i(\mathbf{t}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{A}_i(\theta) [\Phi^H \mathbf{S}^H(\mathbf{t}) \mathbf{S}(\mathbf{t}) \Phi] \mathbf{A}_i^H(\theta) \quad (5.5)$$

中间一项反映的是各个声源的强度及相干性, 对于等强度非相干源,  $E[\Phi^H \mathbf{S}^H(\mathbf{t}) \mathbf{S}(\mathbf{t}) \Phi] = c_s \cdot \mathbf{I}$  是个对角阵, 此时上式可以表示为

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{c_s}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{A}_i(\theta) \mathbf{A}_i^H(\theta) \quad (5.6)$$

为了便于后续的讨论, 假设只有一个目标, 但阵列存在误差, 即  $\mathbf{A}_i(\theta) = \mathbf{a}_i(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)$ 。其中  $\mathbf{a}_i(\theta_1)$  是第  $i$  个子阵的理想方向矢量, 图 5-7 所得各子阵的理想方向矢量之间只相差一个整体相移  $\exp[2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_1]$ , 因此各理想方

向矢量的并矢矩阵相等。 $\delta_i(\theta_1)$  是实际方向矢量与理想方向矢量的差, 一般认为是一个零均值的随机矢量。这样上式可写成

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{R}} &= \frac{c_s}{k} \sum_{i=1}^k [\mathbf{a}_i(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)][\mathbf{a}_i^H(\theta_1) + \delta_i^H(\theta_1)] \\ &= \frac{c_s}{k} \sum_{i=1}^k [\mathbf{a}_i(\theta_1)\mathbf{a}_i^H(\theta_1) + \mathbf{a}_i(\theta_1)\delta_i^H(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)\mathbf{a}_i^H(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)\delta_i^H(\theta_1)] \\ &= c_s \mathbf{a}_1(\theta_1)\mathbf{a}_1^H(\theta_1) + \frac{c_s}{k} \sum_{i=1}^k [\mathbf{a}_i(\theta_1)\delta_i^H(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)\mathbf{a}_i^H(\theta_1)] + \frac{c_s}{k} \sum_{i=1}^k [\delta_i(\theta_1)\delta_i^H(\theta_1)]\end{aligned}\quad (5.7)$$

式中第一项是理想方向矢量的并矢, 不受子阵数目  $k$  的影响。由于误差矢量与理想方向矢量无关, 第二项中参与求和的每一项都是零均值的矩阵, 随着  $k$  的增大, 整个和的绝对值会减小( $K$  很大时趋向于 0)。第三项中参与求和的是各子阵误差矢量的并矢, 该并矢矩阵的对角线反映了各阵元的误差功率, 非对角线元素反映了各阵元误差之间的相关性, 由于各阵元之间的误差可认为互不相关, 因此这些非对角线元素随着  $k$  的增大趋向于 0, 整个求和式随着  $k$  的增大趋向于对角阵。总之, 空间平滑的结果是使相关矩阵受阵列误差的影响减小了。

为便于比较, 仍以图 5-6 的实验数据为例, 图 5-8 左图给出了空间平滑前后 MUSIC 方法的角谱图, 可以看到经过平滑后, 谱峰更尖锐、背景更低, 说明空间平滑对抑制阵列误差效果明显。图 5-8 右图是最小模方法在空间平滑前后的角谱, 也表明了这一效果。图中“无平滑”的曲线是整个 14 元线列阵直接形成一个相关矩阵的结果; “一次平滑”的曲线是分成两个 13 元的子阵进行前后向平滑的结果; “二次平滑”的曲线是分成三个 12 元的子阵进行前后向平滑的结果。可以看到随着平滑次数的增加(子阵数的增加), 即(5.7)式中  $k$  的增大, 阵列误差抑制效果越好。当然, 子阵数越多, 子阵的孔径越小, 方位估计的方差会增大。

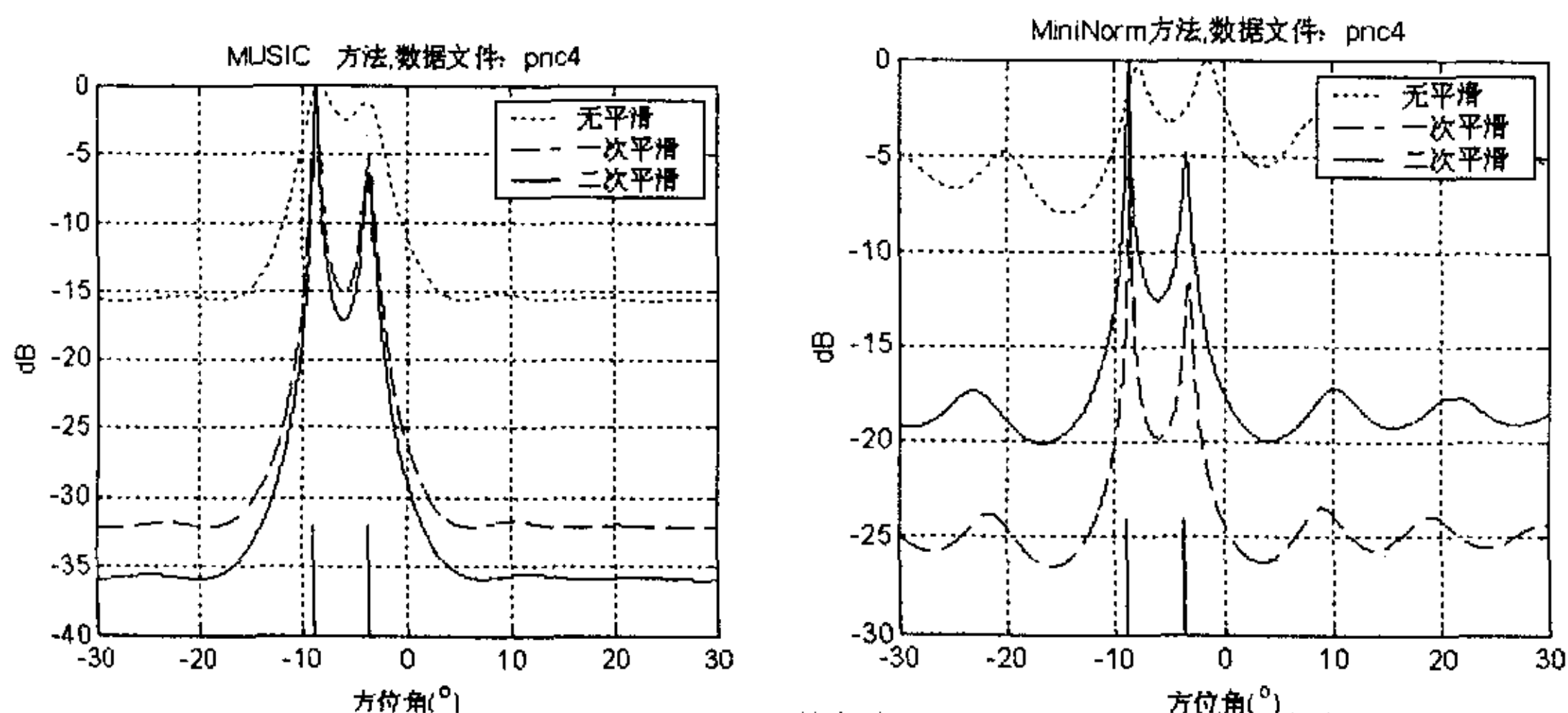


图 5-8 空间平滑前后的双源方位估计

阵列误差带来的一个直接影响是分辨能力的下降, 反过来, 我们也可以用方位

分辨门限来近似地描述各种方法对阵列误差的抑制效果。图 5-9 给出了不同方位间隔时 MUSIC 方法的分辨情况。左图中两个非相干源的方位间隔是  $4^\circ$ ，约为波束宽度的一半，一次空间平滑就可以较好地分辨两个源。当方位间隔进一步缩小到  $3^\circ$ ，约为波束宽度的 0.4 时，一次平滑已经不能分辨，二次平滑分辨也很勉强。因此实验所用的阵列经空间平滑处理后 MUSIC 方法的方位分辨门限约为 0.4 个波束宽度。

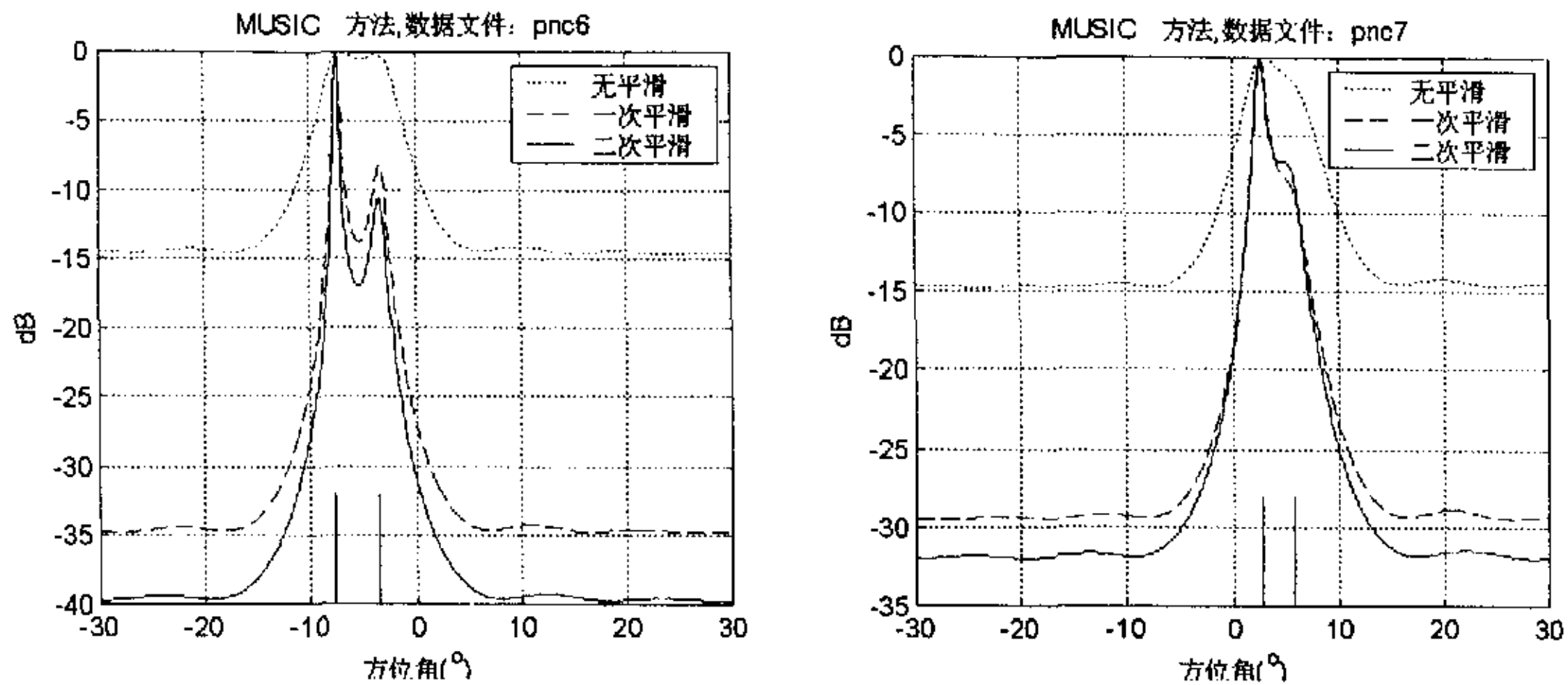


图 5-9 空间平滑后的方位分辨能力

### § 5.2.3 均匀线列阵的 Toeplitz 化

在基于特征分解的对时间序列进行现代谱分析时构造的自相关矩阵具有 Toeplitz 特性<sup>[3]</sup>，即矩阵中同一对角线元素均相等。阵列处理中如果采用均匀线列阵，在特定条件下其空间自相关矩阵也会具有 Toeplitz 特性。假设发射信号为矩形包络，有两个等强度的目标，把快拍之间的延时折算到相位上，暂时忽略噪声，则(2.2)式一次快拍的复包络可简化为

$$\tilde{\mathbf{X}}(t_n) = \mathbf{S}(t_n) \Phi \mathbf{A}^T(\theta) = \exp(j\psi_1) \mathbf{a}^T(\theta_1) + \exp(j\psi_2) \mathbf{a}^T(\theta_2) \quad (5.8)$$

式中  $\psi_1, \psi_2$  是两个  $[0, 2\pi)$  均匀分布的随机数，表示该次快拍中第一个阵元的相角。用这样的快拍矢量构造的空间自相关矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = E[\tilde{\mathbf{X}}^H(t_n) \tilde{\mathbf{X}}(t_n)] &= \mathbf{a}^*(\theta_1) \mathbf{a}^T(\theta_1) + \mathbf{a}^*(\theta_2) \mathbf{a}^T(\theta_2) \\ &+ E[\exp(j\psi_2 - j\psi_1)] \mathbf{a}^*(\theta_1) \mathbf{a}^T(\theta_2) + E[\exp(j\psi_1 - j\psi_2)] \mathbf{a}^*(\theta_2) \mathbf{a}^T(\theta_1) \end{aligned} \quad (5.9)$$

当两个目标源不相干时， $\psi_1, \psi_2$  相互独立，考虑到相位的卷绕性，两者之差也在  $[0, 2\pi)$  上均匀分布，因此  $E[\exp(j\psi_2 - j\psi_1)] = 0$ 。而均匀线列阵方向矢量的并矢  $\mathbf{a}^*(\theta) \mathbf{a}^T(\theta)$  具有 Toeplitz 特性，因此在这种条件下，(5.9)式的空间自相关矩阵也具有 Toeplitz 性。

由于阵列误差的存在，非相干源的空间自相关矩阵也将不具有 Toeplitz 性。如果对有误差的均匀线列阵的相关矩阵进行强制 Toeplitz 化处理，可望部分消



除阵列误差的影响。

简便起见, 我们来分析单目标条件下 Toeplitz 化对阵列误差的抑制效果。同上一节类似, 记实际阵列方向矢量为  $\mathbf{A}(\theta) = \mathbf{a}(\theta_1) + \delta(\theta_1)$ , 它是理想方向矢量与误差矢量之和。则令(5.7)式中的  $k=1$  即可得到空间自相关矩阵

$$\bar{\mathbf{R}} = c_s [\mathbf{a}(\theta_1) + \delta(\theta_1)] [\mathbf{a}^H(\theta_1) + \delta^H(\theta_1)] \quad (5.10)$$

对于  $M$  元的均匀线列阵,  $\bar{\mathbf{R}}$  是一个  $M \times M$  的方阵, 它的每一个元素为

$$R_{ij} = c_s [a_i(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)] [a_j^*(\theta_1) + \delta_j^*(\theta_1)] \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5.11)$$

把主对角线记作第 0 条对角线, 与它相邻的上三角对角线记作第 1 条对角线, 与它相邻的下三角对角线记作第 -1 条对角线, 则第  $m$  条对角线上的元素为

$$R_{m,i} = c_s [a_i(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)] [a_{i+m}^*(\theta_1) + \delta_{i+m}^*(\theta_1)] \quad m = -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M-1, \quad i = 1, 2, \dots, M-|m| \quad (5.12)$$

Toeplitz 化就是使同一对角线上的元素都等于该对角线所有元素的平均值, Toeplitz 化后第  $m$  条对角线上的元素变为

$$R'_{m,i} = \sum_{i=1}^{M-|m|} R_{m,i} = \frac{c_s}{M-|m|} \sum_{i=1}^{M-|m|} [a_i(\theta_1) + \delta_i(\theta_1)] [a_{i+m}^*(\theta_1) + \delta_{i+m}^*(\theta_1)] \quad (5.13)$$

$$R'_{m,i} = c_s \{a_i(\theta_1) a_{i+m}^*(\theta_1) + \frac{1}{M-|m|} \sum_{i=1}^{M-|m|} [a_i(\theta_1) \delta_{i+m}^*(\theta_1) + \delta_i(\theta_1) a_{i+m}^*(\theta_1) + \delta_i(\theta_1) \delta_{i+m}^*(\theta_1)]\} \quad m = -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M-1, \quad i = 1, 2, \dots, M-|m| \quad (5.14)$$

由于均匀线列阵在理想情况下具有 Toeplitz 性, 因此 Toeplitz 化对上式中理想方向矢量之间的乘积项没有影响。由于各阵元误差相互独立且为零均值, 误差矢量与理想方向矢量也互不相关, 因此与阵列误差有关的项随平均次数而减小。所以 Toeplitz 化具有抑制阵列误差的效果。从(5.14)式还可以看出, 越靠近主对角线,  $m$  越小, 同一对角线上参与平均的元素越多, 阵列误差抑制效果会越好, 相应的  $R'_{m,i}$  就越接近于理想值。实际处理中, 我们往往把(5.13)式中的归一化因子  $\frac{1}{M-|m|}$  去掉, 这相当于对参与平均的项数较多、误差影响较小的对角线进行了加重, 可以进一步发挥 Toeplitz 化抑制阵列误差的效果。

取一组实验数据进行验证, 数据中包含两个等强度的非相干源, 方位在  $2.5^\circ$ 、 $5.2^\circ$ , 方位间隔约为 0.4 个波束宽度。下图 5-10 给出了 MUSIC 方法和最小模方法在 Toeplitz 化前后的角谱图, 可以看出, 经过 Toeplitz 化后两种方法都能清晰地分辨出两个目标。与图 5-9 相比, Toeplitz 化的分辨性能明显比空间平滑要好, 这是因为两个子阵的一次空间平滑相关矩阵中只有两个误差(同一对角线上相邻元素)参与平均, 而 Toeplitz 化矩阵的第  $m$  条对角线有  $M-|m|$  个独立零均值的误差参与平均, 参与平均的误差项越多, 抑制阵列误差的效果就

越好。

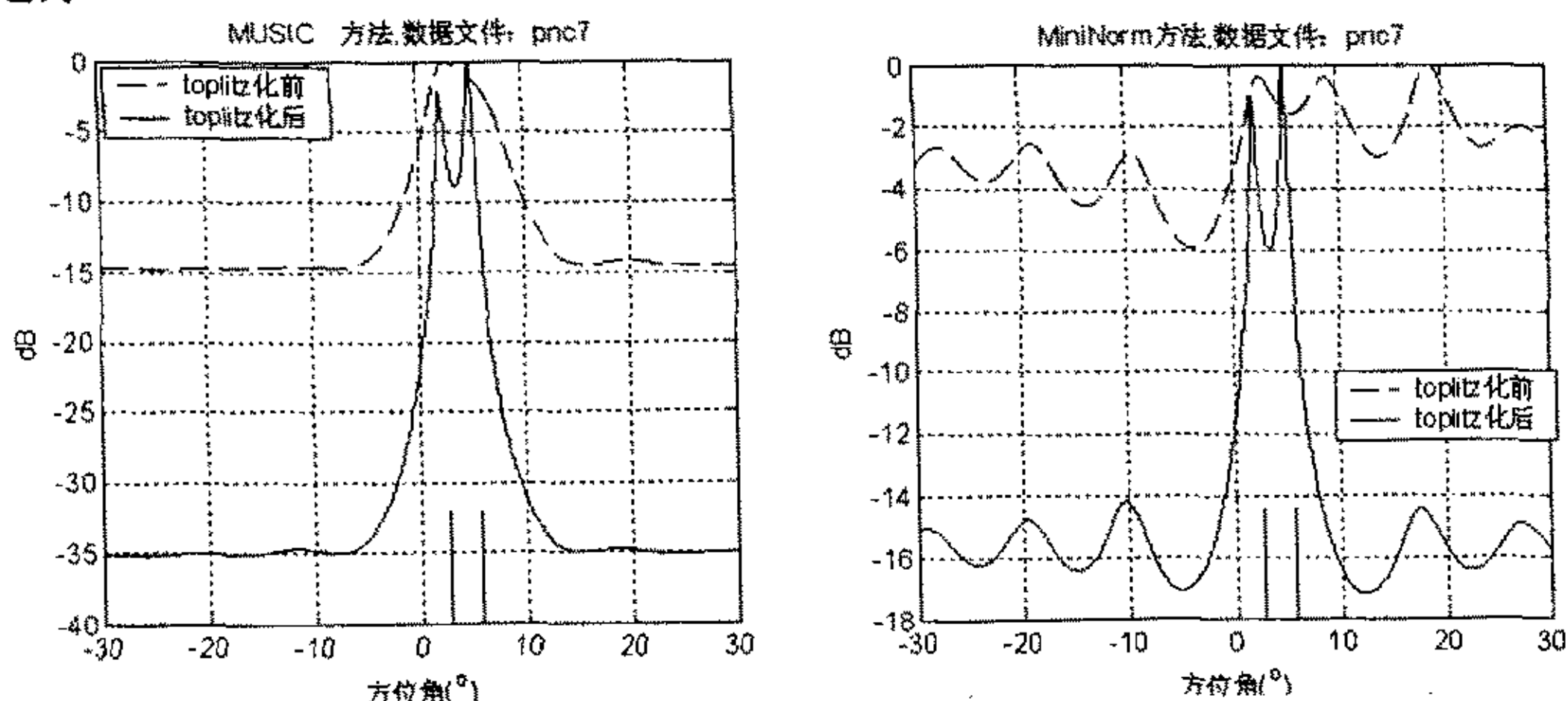


图 5-10 Toeplitz 化前后的双源方位估计

再取一组实验数据，两目标的方位间隔进一步减小到  $1/3$  个波束宽度，方位真实值为  $3.2^\circ$ 、 $5.8^\circ$ 。Toeplitz 化之后的方位估计结果见下图 5-11，两种方法基本能分辨出两个目标，MUSIC 方法的估计值为  $2.1^\circ$ 、 $4.9^\circ$ ，最小模方法的估计值为  $1.7^\circ$ 、 $5.0^\circ$ ，估计精度尚可，但有一些偏差。因此 Toeplitz 化方法处理实验数据的方位分辨门限约为波束宽度的  $1/3$ 。

Toeplitz 化方法还可以改进的是各条对角线的加权系数的设置，本文用了三角形的权系数，还可用钟形、余弦形权系数，不同的权系数对 Toeplitz 化的效果会有一些影响。

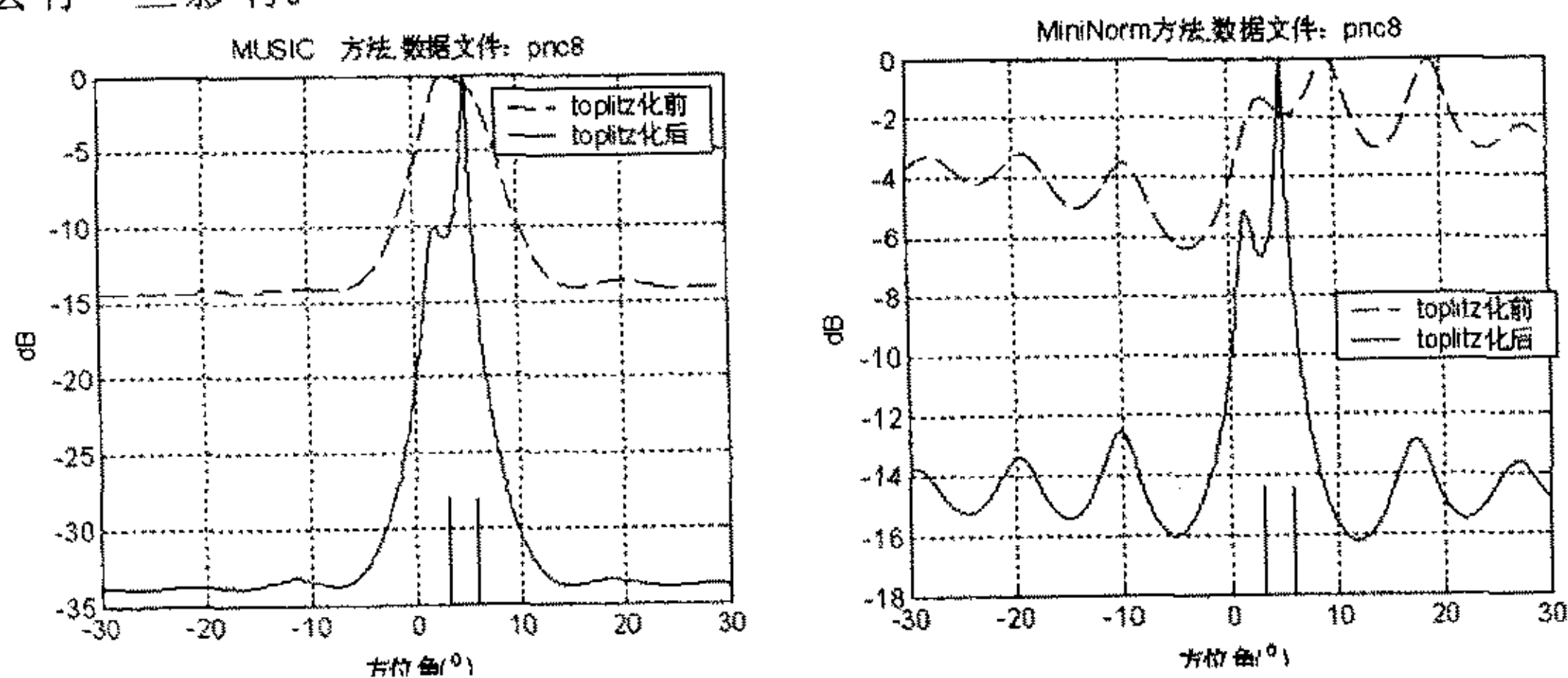


图 5-11 Toeplitz 化后的方位分辨能力

#### § 5.2.4 波束域阵列处理

现代阵列信号处理方法大都是基于比相的，即利用各个接受通道的相位差异来定向，因此它一般要求直接对阵元输出信号作处理。现代阵列信号处理方法的优点是对多目标的分辨能力强、“旁瓣”低，缺点是信噪比要求较高、对



阵列误差较为敏感、存在相干源的问题。传统的模拟系统中往往采用多波束体制，预形成若干个波束，检波后获得各波束输出的幅度信息，通过比较幅度信息来定向。它简单易行、具有较高的空间增益、稳健性强，但分辨率低，尤其是对不等强度目标。

波束域方法的设计思想就是要综合现代信号处理和常规多波束的优点，具体做法是：在波束形成后、检波前，利用各波束输出的相位差及幅度信息，采用现代阵列信号处理方法。因此波束域方法既获得了波束形成的空间增益，又具有现代阵列信号处理方法的高分辨性能。

波束域方法最初的提出是为了改造现有的多波束系统<sup>[4]</sup>和减小现代阵列信号处理方法在处理大阵列时的运算量<sup>[5]-[7]</sup>，后来大家发现波束域方法可以提供额外的信噪比，提高对信噪比要求较高的现代阵列信号处理方法的估计性能<sup>[8][9]</sup>。近年来，波束域方法已经成为阵列信号处理领域的研究热点之一，其性能特点得到了较为深入的研究<sup>[10][11]</sup>。

本文关心的是波束域方法在容忍阵列误差方面的稳健性。我们先来分析一下波束域方法抑制阵列误差的机理。在  $\theta_{01}, \theta_{02}, \dots, \theta_{0K}$  方向形成  $K$  个波束，这些波束主极大方向的选取原则是覆盖目标可能出现的区域且足够密集(相邻波束相交电平不超过 3dB)，不一定要求等间隔。每个波束的输出为

$$\mathbf{y}_i(t) = \mathbf{X}(t)\mathbf{a}^*(\theta_{0i}), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (5.15)$$

所有波束输出构成一个数据矩阵

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t)[\mathbf{a}^*(\theta_{01}), \mathbf{a}^*(\theta_{02}), \dots, \mathbf{a}^*(\theta_{0K})] = \mathbf{X}(t)\mathbf{T} \quad (5.16)$$

式中的  $\mathbf{T} = [\mathbf{a}^*(\theta_{01}), \mathbf{a}^*(\theta_{02}), \dots, \mathbf{a}^*(\theta_{0K})]$  是  $M \times K$  的波束预形成变换矩阵，经过变换后，阵元域的数据矩阵  $\mathbf{X}(t)$  就变换到波束域的数据矩阵  $\mathbf{Y}(t)$ ，可以把这个矩阵看作是  $K$  个有指向性的虚拟阵元输出的数据矩阵。与阵元域类似，我们可以构造波束域的空间自相关矩阵

$$\mathbf{R}_Y = \mathbf{Y}^H(t)\mathbf{Y}(t) = \mathbf{T}^H\mathbf{X}^H(t)\mathbf{X}(t)\mathbf{T} \quad (5.17)$$

忽略噪声，上式可写作

$$\mathbf{R}_Y = \mathbf{T}^H\mathbf{A}^*(\theta)\Phi\mathbf{S}^H(t)\mathbf{S}(t)\Phi\mathbf{A}^T(\theta)\mathbf{T} \quad (5.18)$$

比照阵元域的 MUSIC 方法，我们对  $\mathbf{R}_Y$  进行特征分解，得到噪声子空间  $\mathbf{V}_N = [\mathbf{v}_{p+1}, \mathbf{v}_{p+2}, \dots, \mathbf{v}_K]$ ，波束域的音乐角谱定义为

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{T}^H\mathbf{V}_N\mathbf{V}_N^H\mathbf{T}\mathbf{a}(\theta)} \quad (5.19)$$

与阵元域的音乐角谱相比，波束域中只是把原搜索矢量用波束预形成变换矩阵作了变换。

以最简单的单目标情况分析波束域方法对阵列误差的抑制能力。阵列误差体现在阵元输出数据矩阵  $\mathbf{X}(t)$  中，考虑阵列误差后(5.18)式变为

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_y &= \mathbf{T}^H [\mathbf{a}^*(\theta_1) + \delta^*(\theta_1)] \Phi \mathbf{S}^H(t) \mathbf{S}(t) \Phi [\mathbf{a}^T(\theta_1) + \delta^T(\theta_1)] \mathbf{T} \\ &= c_s \mathbf{T}^H [\mathbf{a}^*(\theta_1) + \delta^*(\theta_1)] [\mathbf{a}^T(\theta_1) + \delta^T(\theta_1)] \mathbf{T}\end{aligned}\quad (5.20)$$

其中与阵列误差有关的项为

$$\delta^T(\theta_1) \mathbf{T} = \frac{1}{M} [\delta^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{01}), \delta^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{02}), \dots, \delta^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{0K})] \quad (5.21)$$

把式中的每一个元素写成标量运算的形式

$$\delta^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{0i}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \delta_m(\theta_1) a_m^*(\theta_{0i}), \quad i=1,2,\dots,K \quad (5.22)$$

它是各个阵元的误差加权求和，所加的权系数是特定方向的方向矢量，与误差矢量无关，再考虑阵列误差的零均值特性，上述和式会趋向于零。而理想方向矢量经过波束形成变换矩阵后可写作

$$\mathbf{a}^T(\theta_1) \mathbf{T} = \frac{1}{M} [\mathbf{a}^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{01}), \mathbf{a}^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{02}), \dots, \mathbf{a}^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{0K})] \quad (5.23)$$

由于波束足够密集且覆盖目标可能出现的方向，因此上式中必然存在一个  $\theta_{0i} \rightarrow \theta_1$ ，使得

$$\mathbf{a}^T(\theta_1) \mathbf{a}^*(\theta_{0i}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_m(\theta_1) a_m^*(\theta_{0i}) \approx 1 \quad (5.24)$$

所以，(5.20)式的波束域相关矩阵中，理想方向矢量经过波束形成变换后会得到同相叠加而趋向于 1，阵列误差经过变换后会趋向于 0，从而取得抑制阵列误差的效果。

取一组实验数据 pnc6 进行验证，数据中包含两个等强度的非相干源，方位在  $-7.6^\circ$ 、 $-3.6^\circ$ ，方位间隔约为半个波束宽度。以  $4^\circ$  的间隔在  $-10^\circ \sim 15^\circ$  之间均匀预形成 6 个波束，对各波束输出进行波束域处理，下图 5-12 给出了波束域 MUSIC 方法和波束域最小模方法的角谱图，并与阵元域进行了比较。可以看出，阵元域不能分辨的两个目标在波束域都能清晰分辨。波束域 MUSIC 的估计值是  $-7.2^\circ$ ， $-3.9^\circ$ ；波束域最小模的估计值是  $-7.2^\circ$ ， $-3.2^\circ$ 。

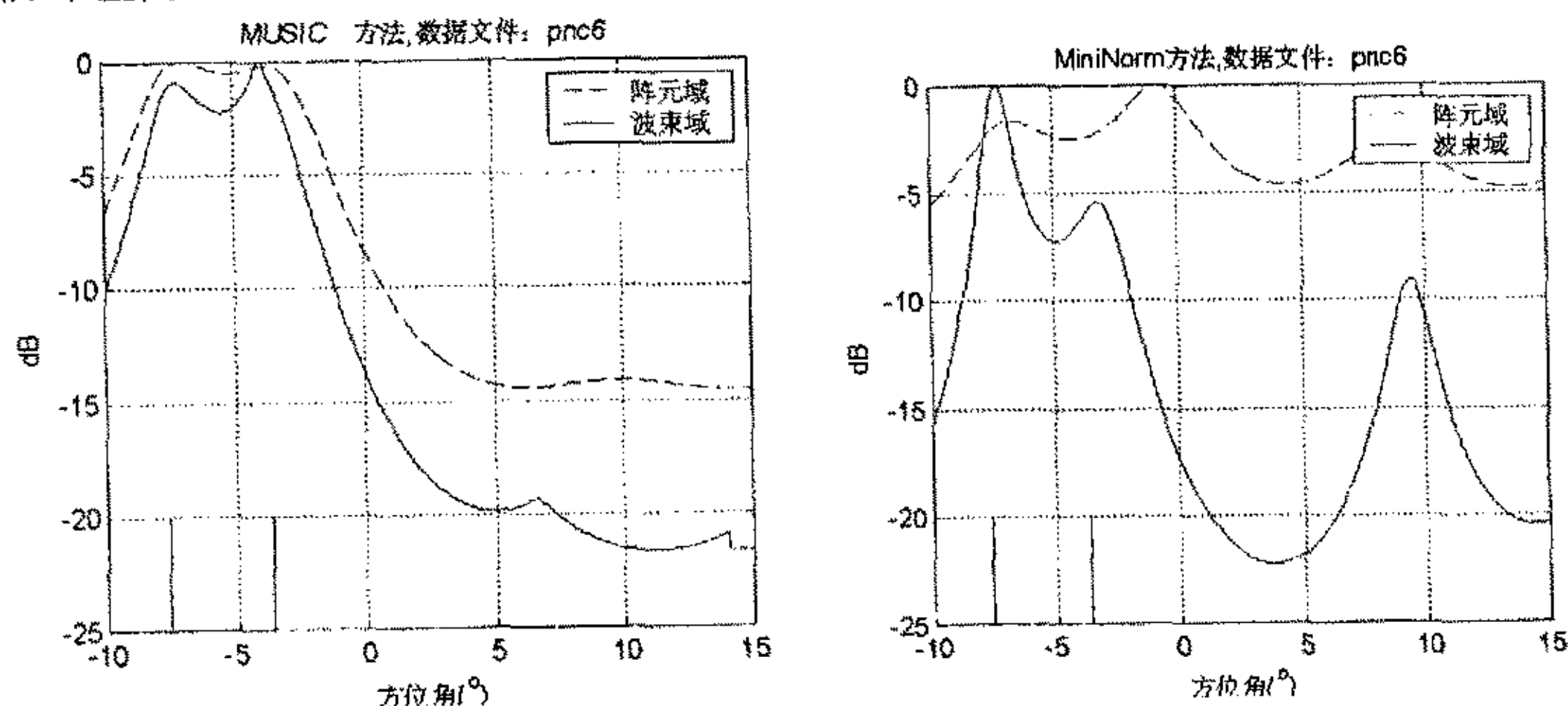


图 5-12 阵元域和波束域的双源方位估计

再进一步减小两目标的方位间隔，到 0.4、1/3 个波束宽度，方位真实值分

别为  $2.8^\circ$ 、 $5.8^\circ$  和  $3.2^\circ$ 、 $5.8^\circ$ 。波束域 MUSIC 方法的方位估计结果见下图 5-13，两种条件下都能分辨出两个目标，估计值分别为  $2.5^\circ$ 、 $6.2^\circ$  和  $2.4^\circ$ 、 $6.1^\circ$ 。因此波束域 MUSIC 方法处理实验数据的方位分辨门限也可达到波束宽度的  $1/3$ 。

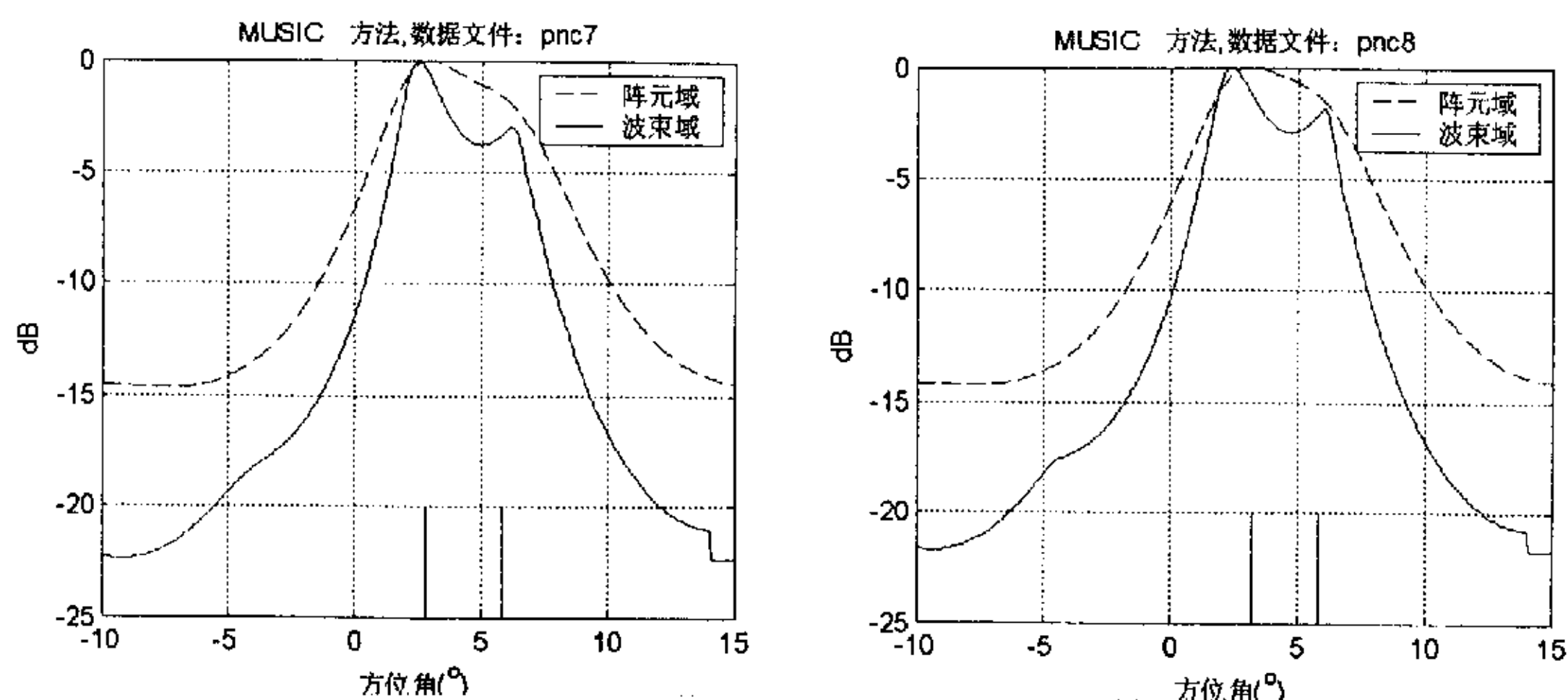


图 5-13 波束域的方位估计的分辨能力

前面提到的空间平滑或 Torplitz 化方法都只能用于均匀线列阵，而波束域方法可以用于任意结构的阵列，适用性更广。

### § 5.3 基于配对的多目标定位水池实验

第三章中我们讨论了基于强度配对的多目标定位技术，并进行了计算机仿真研究。本节我们针对这一技术开展了水池实验研究。除非特别说明，实验中各个发射源的频率都为 30KHz，信号包络为脉宽 50ms 的梯形包络。下面按目标源的数目不同分别介绍实验数据处理过程和结果。

#### § 5.3.1 双目标定位实验

先举一个例子来说明实验数据的处理过程。两个目标的方位为  $5.9^\circ$ 、 $9.8^\circ$ ，时延为 9.6ms、34.6ms。用一个 14 元的均匀线列阵来接收，下图 5-14 左图给出了第 1、2 号阵元的输出波形。对所有通道进行解调并降采样后得到复包络的实部和虚部见图 5-14 右图。

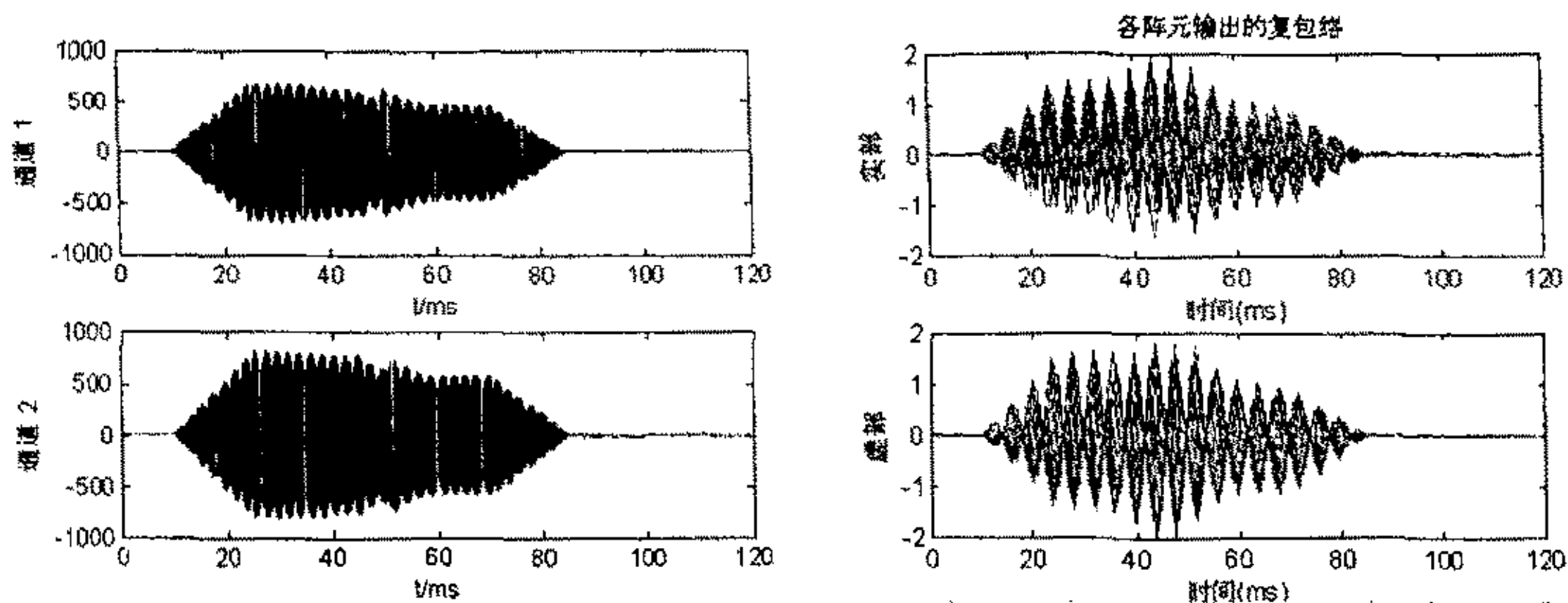


图 5-14 双目标定位实验的时间波形

用这些复包络形成空间自相关矩阵，特征分解后得到特征值，再依据 AIC 准则来判定目标源的数目。右图是 AIC 曲线，在源数目=2 处有一个显著的极小值，准确地判断出数据中有两个目标。

选用 Torplitz 化最小模方法进行方位估计，得到的角谱图见图 5-16 左图，可以清晰地分辨出两个目标，方位估计值为  $5.8^\circ$ 、 $8.6^\circ$ 。选用时延 MUSIC 方法进行时延估计，得到的时延谱见图 5-16 右图，也能分辨出两个目标，时延估计值为 10ms、34ms。

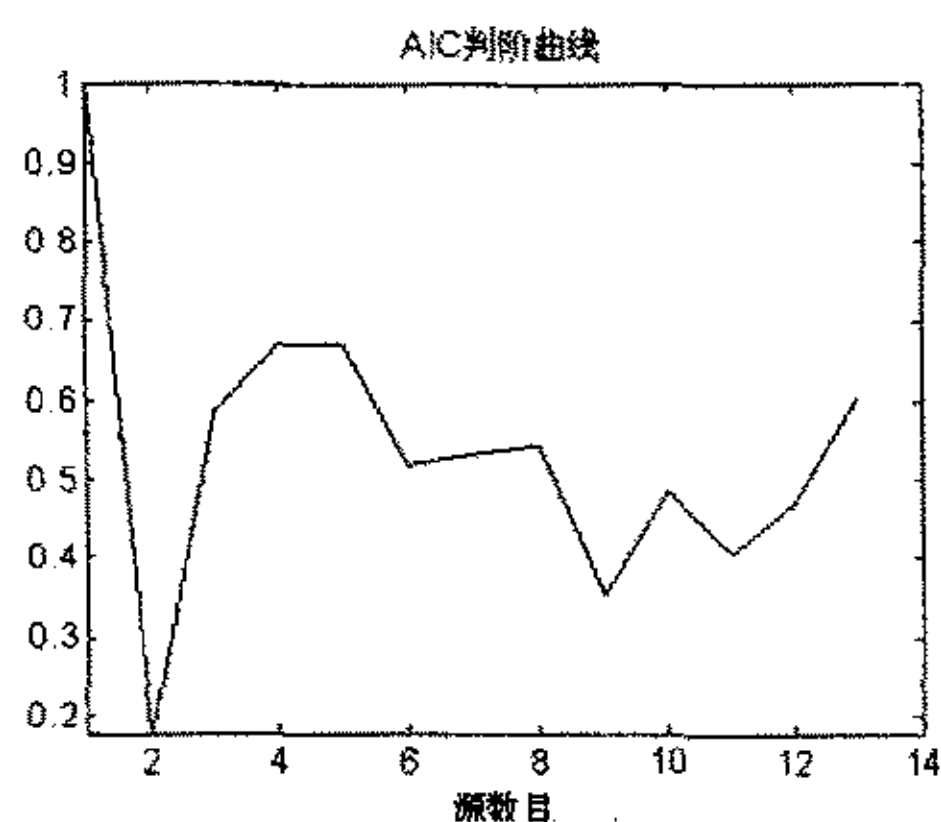


图 15 双目标实验 AIC 判阶曲线

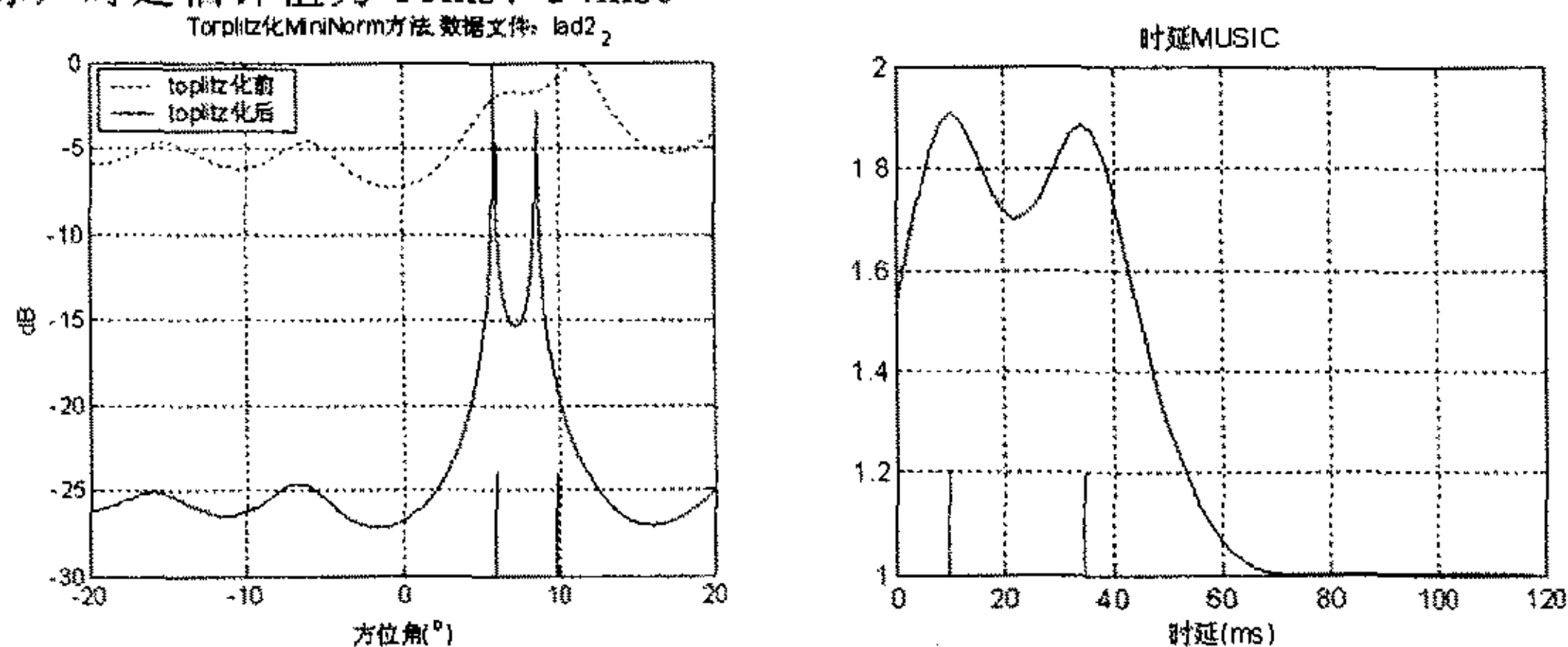


图 5-16 双目标定位实验的参数估计

把得到的方位和时延估计值代入到(3.19)式，估计出多目标的强度矩阵

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.259 & 0.230 \\ 0.151 & 0.231 \end{bmatrix}$$

针对本例中二维参数都能准确分辨的情况，我们采用以下步骤来确定匹配的强



度值：先找出矩阵中的最大元素作为第一个匹配值，再把该元素所在的行与列全部赋 0，再找出矩阵中的最大元素作为第二个匹配值，依此类推，直到找出所有的匹配值。这种查找步骤可以确保二维参数能够一一配对。最终的配对结果是：目标一为  $5.8^\circ$ 、10ms，目标二为  $8.6^\circ$ 、34ms，配对正确。

我们设计了一系列时延间隔和方位间隔不同的实验，对实验数据按上述方法进行处理，得到的多目标定位结果见表 5-4。大部分情况下都能准确估计出两个目标的时延和方位参数且配对正确，但在时延差为  $1/6$  脉冲宽度时的参数估计精度很差，配对结果也错误。如果用方位真值参与配对则能得到正确的配对结果，因此定位错误的主要原因是方位估计的失效。而方位估计的失效是由时延差减小造成源的相干性增强造成的。如果我们用不同频率的非相干源进行实验， $1/6$  脉冲宽度时准确分辨  $1/2$  波束宽度的两个目标就没有问题，这说明相干源对阵列误差更敏感，需要更精确的阵列校准措施。需要指出的是，如果目标的频率差异较大，时延 MUSIC 算法中的时延搜索矢量需要按不同频率分别构建，即不得不面临时延-频率联合估计的问题。

表 5-4 时延估计在  $1/6$  脉冲宽度情况下均不能准确地估计两个目标的时延参数，而在仿真中  $1/12$  脉冲宽度在高信噪比下也能准确分辨，这说明实验中存在着各种系统误差引起的波形畸变，要想得到较高的时延分辨率，这种波形畸变必须得到校正。遗憾的是我们事先对此估计不足，没有设计这方面的实验。

表 5-4 基于配对的双目标定位实验

方位差 (波束宽度)	时延差 (脉宽)	真实值		估计值		定位 结果
		方位( $^\circ$ )	时延(ms)	方位( $^\circ$ )	时延(ms)	
1/2	1/3	5.9, 9.8	9.6, 26.3	5.9, 8.1	10.0, 26.0	√
	1/2		9.6, 34.6	5.8, 8.6	10.0, 34.0	√
	3/4		9.6, 47.1	5.6, 9.1	10.0, 48.0	√
	1/6		26.3, 34.6	5.0, 7.6	32.0, 28.0	×
3/4	1/6	5.9, -0.5	26.3, 34.6	0.6, 4.9	32.0, 28.0	×
	1/2		9.6, 34.6	-0.3, 5.7	34.0, 10.0	√
	3/4		9.6, 47.1	-0.5, 5.9	46.0, 10.0	√
	1/3		9.6, 26.3	-0.1, 5.4	26.0, 10.0	√
1/3	1/3	-3.0, -0.5	9.6, 26.3	-2.2, 0.4	10.0, 26.0	√
	1/2		9.6, 34.6	-2.6, -0.2	10.0, 34.0	√
	3/4		9.6, 47.1	-3.1, -0.3	10.0, 48.0	√
	1/6		26.3, 34.6	-2.0, 12.6	28.0, 34.0	×

### § 5.3.2 三目标定位实验

我们也设计了几组三目标的水池定位实验，三个目标的方位基本上都在一个波束宽度内，三个目标的最大时延间隔不超过脉冲宽度的  $3/4$ 。

举参数间隔最大的一组为例，三个目标的方位为  $0^\circ$ 、 $5.9^\circ$ 、 $9.8^\circ$ ，时延为  $9.6\text{ms}$ 、 $34.6\text{ms}$ 、 $47.1\text{ms}$ 。AIC 判阶能准确地判出 3 个目标，Torplitz 化最小模方法给出的角谱图见图 5-18左图，

从图中看到，只能较好地分辨出两个目标，第 3 个目标的估计值偏离真值很远，三目标方位估计值为  $1.3^\circ$ 、 $6.7^\circ$ 、 $12.1^\circ$ 。时延 MUSIC 估计出的时延谱见图 5-18右图，它十分勉强地分辨出三个目标，具体时延估计值为  $18\text{ms}$ 、 $26\text{ms}$ 、 $48\text{ms}$ 。估计出的强度配对矩阵为

<span style="border: 1px solid black;">1.159</span>	1.053	0.248
0.571	<span style="border: 1px solid black;">0.649</span>	0.188
0.294	0.386	<span style="border: 1px solid black;">0.128</span>

最终的配对结果是  $(1.3^\circ, 18\text{ms})$ 、 $(6.7^\circ, 26\text{ms})$ 、 $(12.1^\circ, 48\text{ms})$ ，大致得到一个可用的定位结果，但定位精度较差。

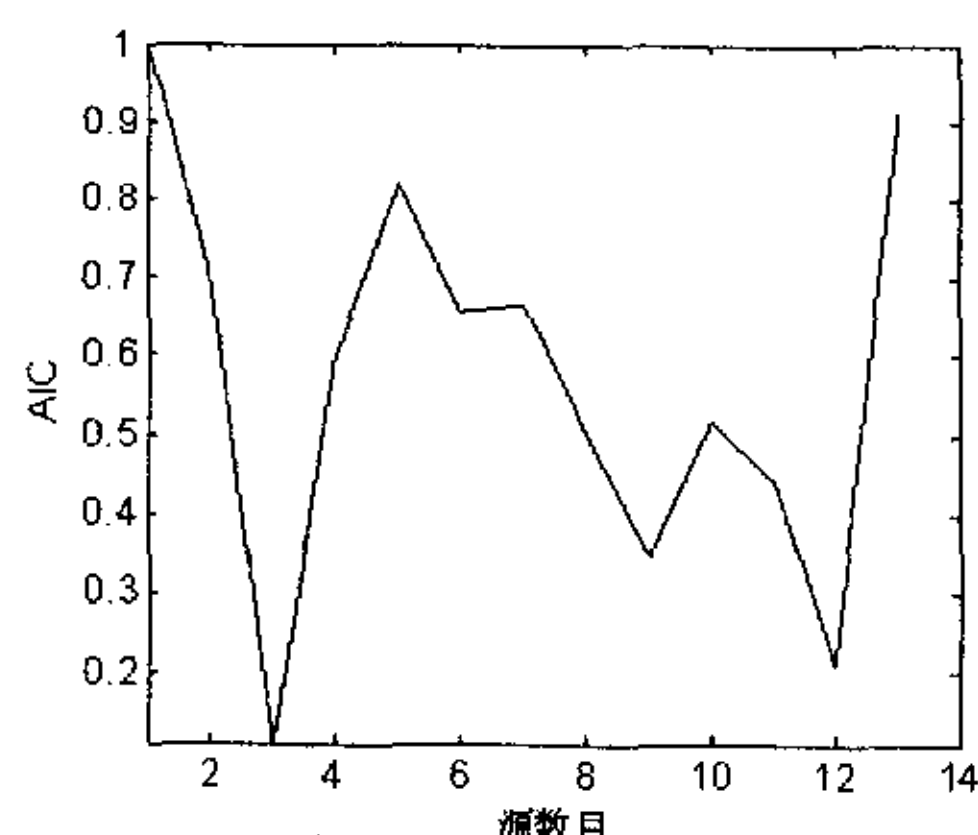


图17 三目标实验 AIC 判阶曲线

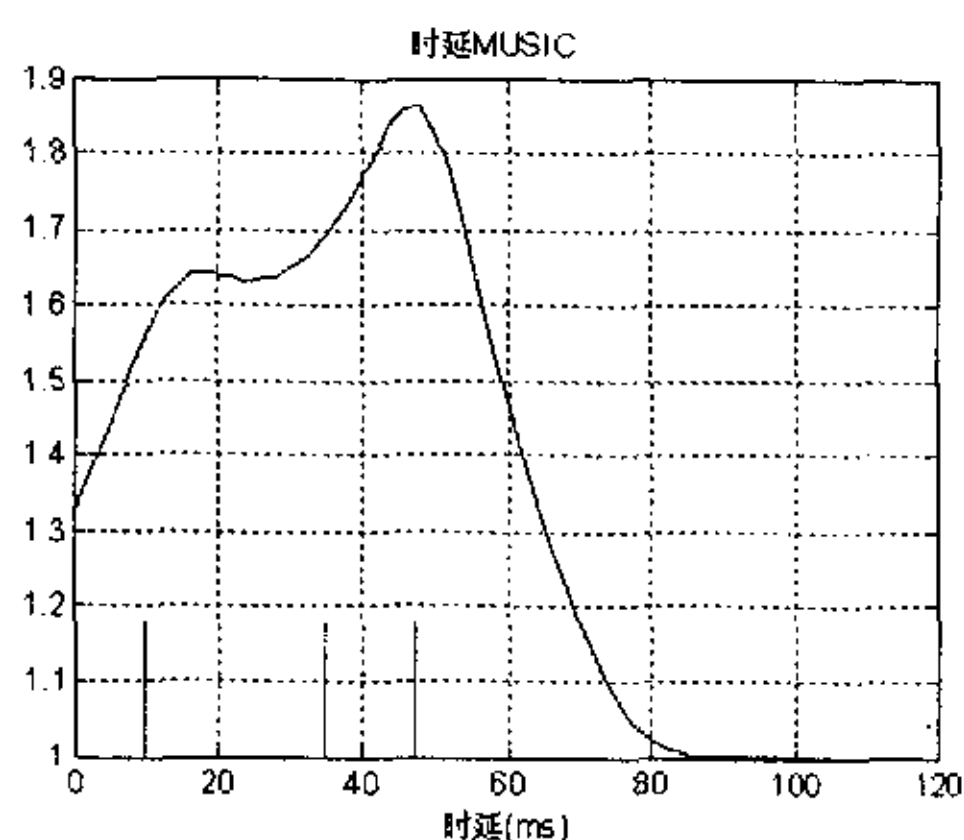
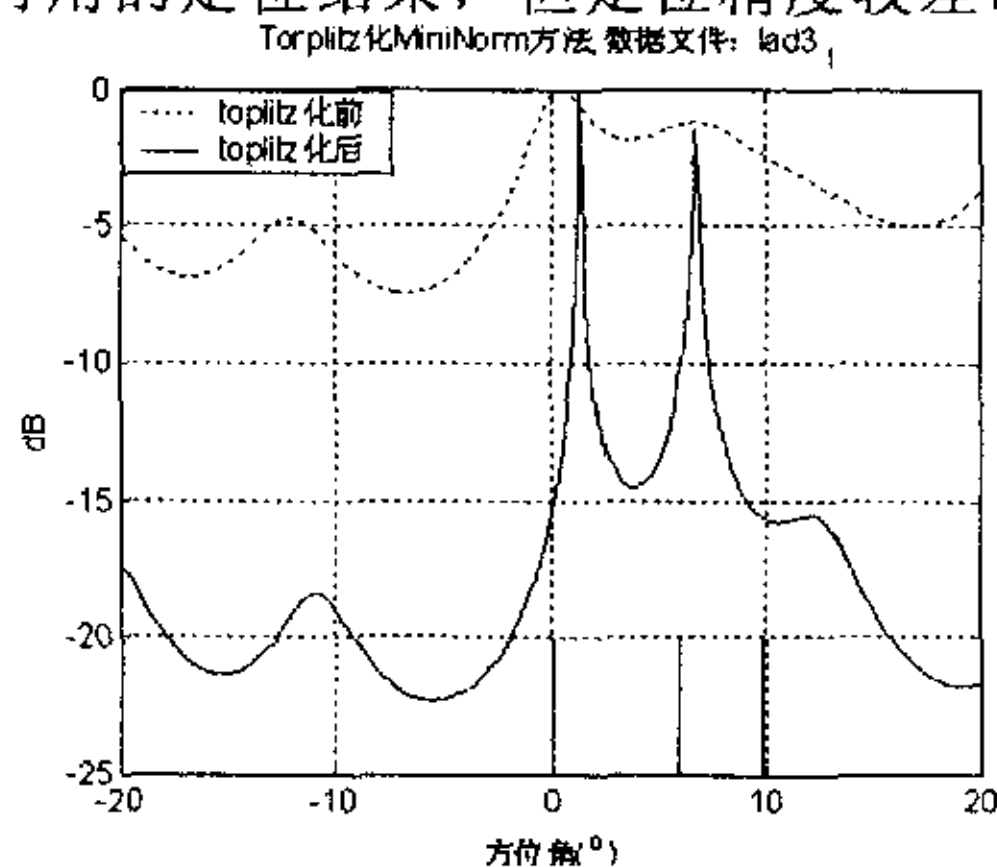


图 5-18 三目标定位实验的参数估计

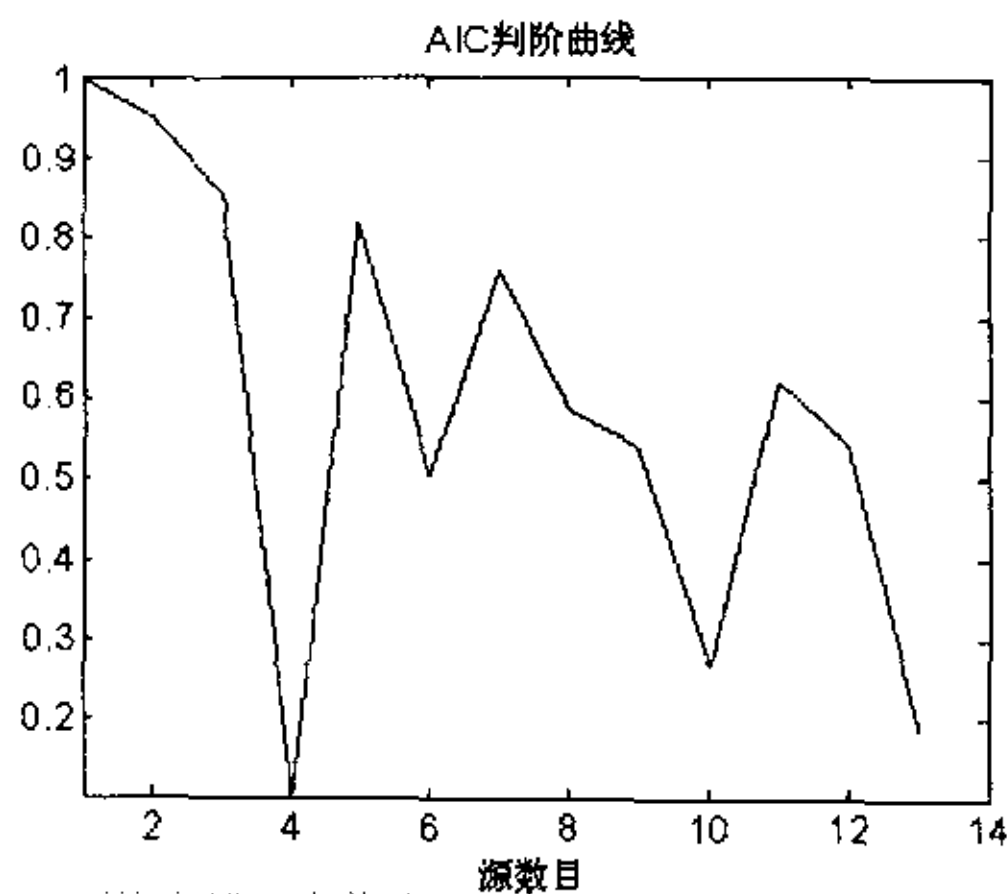
另外三组实验的方位和时延间隔更小，以至于根本无法得到有效的定位结果。这说明在水池实验中用本文所提的基于配对的算法是很难对方位处于一个波束内、时延处于一个脉宽内的三个目标进行有效定位。本次三目标定位实验的条件设计得太苛刻了，下次实验应考虑放宽。



### § 5.3.3 四目标定位实验

我们设计了两组四目标的水池定位实验,具体参数见表 5-5。补充说明一下,目标 4 的载波频率为 30.2KHz,其它三个目标的频率为 30KHz。两组实验中四个目标的时延参数配置相同,最大时延间隔不超过脉冲宽度的  $3/4$ 。实验一中只有两个目标方位同时落在一个波束宽度内,实验二中则有三个目标方位同时落在一个波束宽度内。

以实验一为例,通过谱分析估计出信号的中心频率,再进行幅度解调得到信号的复包络。用空间自相关矩阵的特征值、依据 AIC 判阶准则判断出有 4 个目标,判阶曲线见右图。Torplitz 化最小模方法给出的角谱图见图 5-19左图,从图中看到,四个目标方位均能很好地分辨出来,具体方位估计值见表 5-5。



时延 MUSIC 估计出的时延谱见图 5-19右图,它只能十分勉强地分辨出三个目标。具体时延估计值为 12ms、36ms、48ms、110ms。其中 110ms 是一个明显的虚假估计值,我们可以通过在时延谱上设定一个门限,剔除低于门限的极值来排除虚假估计。把前三个时延估计值送去进行强度配对,得到的配对矩阵为

0.143	0.074	0.530	0.168
0.256	0.578	0.209	0.299
0.441	0.201	0.135	0.138

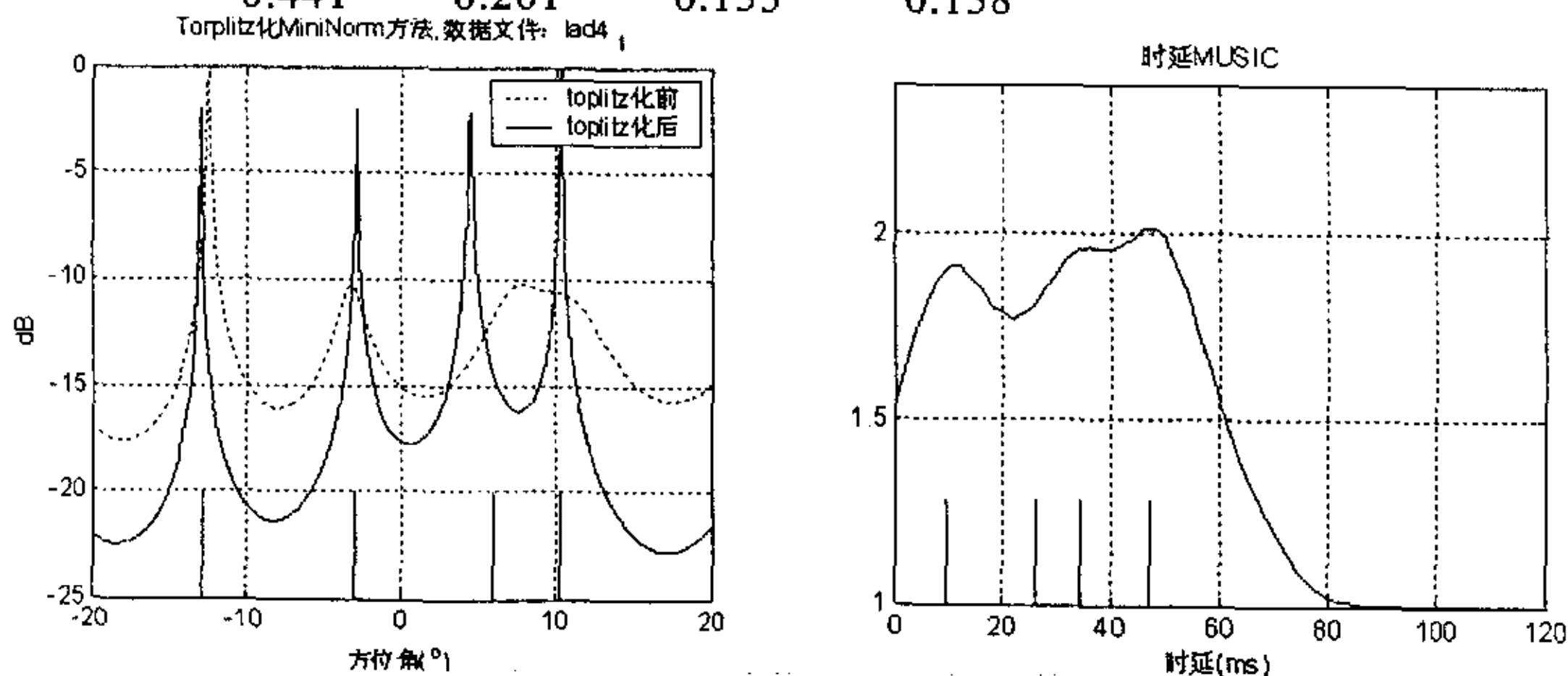


图 5-19 四目标定位实验的参数估计

表 5-5 基于配对的四目标定位实验

实验序号	目标序号	真实值				估计值			
		1	2	3	4	1	2	3	4
实验一	方位	10.3	5.9	-3.0	-12.8	10.3	4.5	-2.9	-12.9
	时延	9.6	34.6	47.1	26.3	36.0	48.0	36.0	12.0
实验二	方位	10.3	5.9	-3.0	0.0	11.2	6.1	-3.2	0.6
	时延	9.6	34.6	47.1	26.3	36.0	12.0	12.0	12.0

最终的配对结果见表 5-5。我们发现两个实验的配对结果都完全错乱了。这是什么原因造成的呢？最可疑的是参数估计的精度。我们把四个目标的真实方位值和真实时延值按正确的对应顺序代入强度估计公式，得到强度估计矩阵为

0.115	0.055	0.137	0.418
0.999	0.480	0.578	0.193
0.447	0.649	0.038	0.093
0.710	0.307	0.151	0.234

它并不是我们所期望的一个对角占优矩阵，配对结果

方位( $^{\circ}$ )	10.3	5.9	-3.0	-12.8
时延(ms)	34.6	47.1	26.3	9.6

也是完全错误的。这说明问题出在配对算法上。仔细观察强度估计公式(3.19)，它是建立在数据矩阵  $X$  上的， $X$  包含了阵列误差和波形畸变，而式中的方向矢量是利用方位参数依据理想阵列流形重构的、时延矢量是利用时延参数依据发射信号实包络重构的。可以想见，理想的阵列流形和发射信号包络是很难匹配的，或者说，此时得到的强度估计矩阵受到各种系统误差的扰动，矩阵中匹配强度和非匹配强度的差别缩小了。这一点在前述双目标定位实验中的强度估计矩阵也可以看出来，虽然当时并没有影响最终配对结果，但那是因为只有两个目标，只有两种可能的配对结果。在四目标的定位中，可能的配对结果多达  $4!=24$  种，此时对误差的敏感程度也就显得特别突出了。

通过多目标定位实验，我们发现基于强度配对的定位方法虽然在仿真中表现出良好的定位准确性，但是它对阵列误差较为敏感，需要研究必要的误差抑制措施提高配对算法的稳健性。还有一个思路是寻找其它的对系统误差不太敏感的配对算法。

## § 5.4 无需配对的多目标定位水池实验

由第四章的理论分析和仿真表明, ESPRIT-Corr 方法是一种无需配对的方位-时延联合估计方法, 具有良好的多目标定位性能。下面我们就用这种方法对前述的多目标定位水池实验数据进行处理, 以考察它在实际系统中的表现。

由于 ESPRIT-Corr 方法更加依赖于正确的判阶, 一旦判阶错误, 在后续的处理中将很难有校正的可能, 因此我们在这里采用了判阶准确性更高的增量 AIC 判阶方法<sup>[12]</sup>。

### § 5.4.1 双目标定位实验

为了便于比较我们还采用 § 5.3.1 双目标定位实验的例子来说明 ESPRIT-Corr 方法的数据处理过程。两个目标的方位为  $5.9^\circ$ 、 $9.8^\circ$ , 时延为 9.6ms、34.6ms。回波波形见图 5-14左图, 经解调并降采样后得到的各通道复包络见图 5-14右图。对阵列输出的复包络矩阵进行奇异值分解, 用奇异值去计算增量 AIC 曲线, 如下图 5-20左图所示。图中的曲线在源数目为 2 时达到最小值, 正确地判断出两个目标。将阵列分成两个子阵, 根据公式(4.7)~(4.11)计算两子阵的广义特征分解, 从广义特征值可以直接得到目标的方位估计:  $4.6^\circ$ 、 $10.9^\circ$ 。对信号子空间的广义特征矢量和发射信号包络做互相关, 得到两条相关曲线如图 5-20右图所示, 从其峰值位置得到时延估计 13.1ms、25.1ms。根据特征值和特征矢量之间的对应关系自动完成了配对, 即( $4.6^\circ$ , 13.1ms)、( $10.9^\circ$ , 25.1ms)。从结果看, 配对是基本正确的, 但第二个目标的时延估计偏差较大, 由第四章的分析可知, 这是由于“泄漏”引起的, 可以通过(4.13)式的修正算法加以改善。

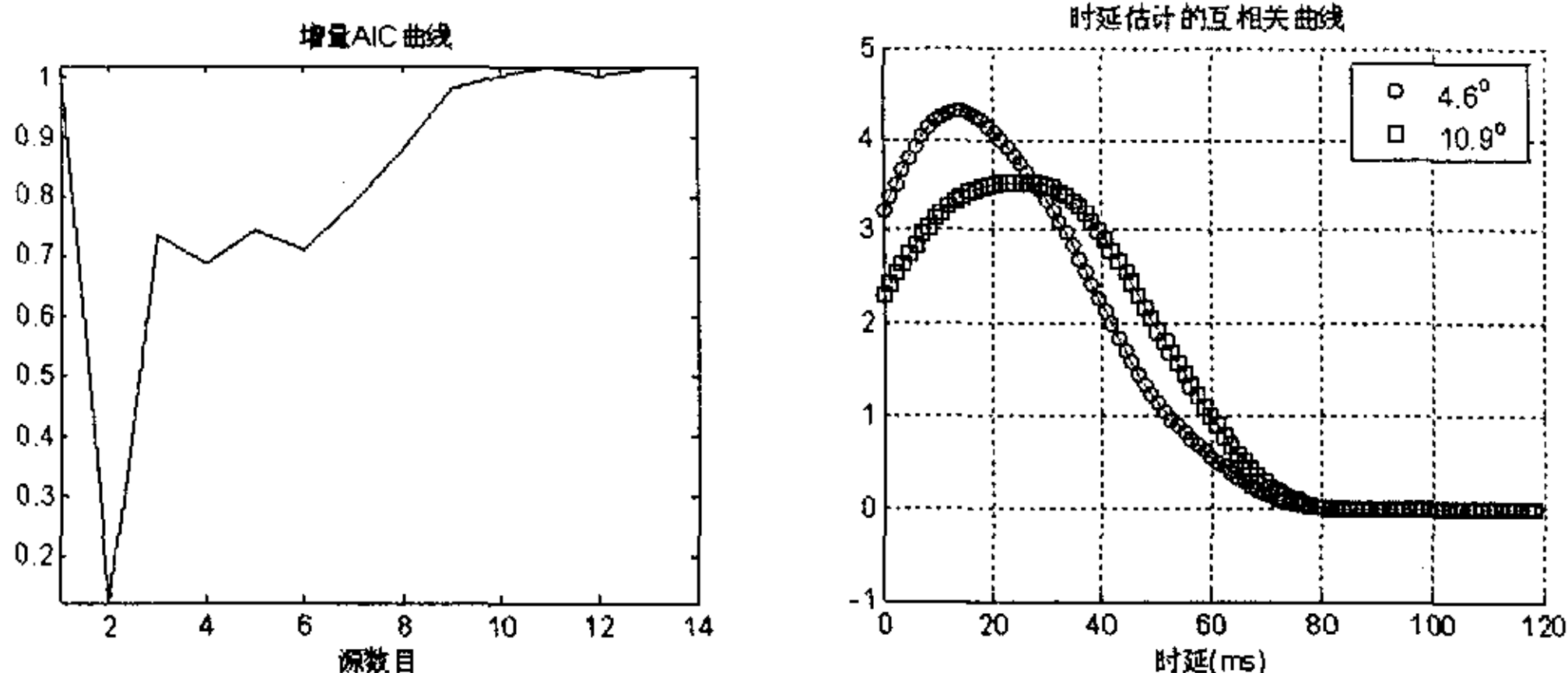


图 5-20 无需配对的双目标定位实验

我们选不同的方位间隔、时延间隔、包络形式进行了一系列的双目标定位实验,

用上述数据处理步骤进行处理,得到的结果分列在下面三个表格中。

表 5-6 双目标方位间隔为 1/2 波束宽度时的联合估计结果

时延 间隔	信号包络		目标 1		目标 2	
			方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)	方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)
1/6		真实值	5.9	26.2	9.8	34.6
	矩形(无频差)	估计值	4.5	27.5	10.8	29.9
	梯形(无频差)		4.4	28.7	10.7	31.1
	梯形(有频差)		4.6	27.5	10.7	31.1
1/3		真实值	5.9	9.6	9.8	26.2
	矩形(无频差)	估计值	4.6	10.8	10.8	27.5
	梯形(无频差)		4.5	13.1	10.8	19.1
	梯形(有频差)		4.6	10.8	10.7	18.0
1/2		真实值	5.9	9.6	9.8	34.6
	矩形(无频差)	估计值	4.6	10.8	10.8	35.9
	梯形(无频差)		4.6	13.1	10.9	25.1
	梯形(有频差)		4.6	10.8	10.6	22.7
3/4		真实值	5.9	9.6	9.8	47.1
	矩形(无频差)	估计值	4.6	10.8	10.8	47.8
	梯形(无频差)		4.6	10.8	10.8	45.4
	梯形(有频差)		4.6	10.8	10.6	44.2

表 5-7 双目标方位间隔为 3/4 波束宽度时的联合估计结果

时延 间隔	信号包络		目标 1		目标 2	
			方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)	方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)
1/6		真实值	5.9	26.2	-0.5	34.6
	矩形(无频差)	估计值	6.1	27.5	-1.3	35.9
	梯形(无频差)		6.0	28.9	-1.7	34.7
	梯形(有频差)		6.1	27.5	-0.8	34.7
1/3		真实值	5.9	9.6	-0.5	26.2
	矩形(无频差)	估计值	6.1	10.6	-1.3	27.5
	梯形(无频差)		6.0	13.1	-1.4	26.3
	梯形(有频差)		6.1	11.9	-0.8	26.3
1/2		真实值	5.9	9.6	-0.5	34.6
	矩形(无频差)	估计值	6.1	10.8	-1.3	35.8
	梯形(无频差)		6.1	13.1	-1.4	34.7
	梯形(有频差)		6.1	12.0	-0.8	34.7
3/4		真实值	5.9	9.6	-0.5	47.1
	矩形(无频差)	估计值	6.1	10.8	-1.4	47.8
	梯形(无频差)		6.1	10.8	-1.4	47.8
	梯形(有频差)		6.1	10.8	-0.8	47.8

表 5-8 双目标方位间隔为 1/3 波束宽度时的联合估计结果

时延 间隔	信号包络		目标 1		目标 2	
			方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)	方位( $^{\circ}$ )	时延(ms)
1/6		真实值	-3.0	34.6	-0.5	26.2
	矩形(无频差)	估计值	-5.5	35.8	0.4	27.5
	梯形(无频差)		-5.4	32.3	0.4	29.9
	梯形(有频差)		-5.0	32.3	0.9	28.7
1/3		真实值	-3.0	34.6	-0.5	9.6
	矩形(无频差)	估计值	-5.5	27.5	0.4	10.8
	梯形(无频差)		-5.4	21.5	0.4	15.5
	梯形(有频差)		-4.9	22.7	0.9	14.3
1/2		真实值	-3.0	34.6	-0.5	9.6
	矩形(无频差)	估计值	-5.4	35.8	0.4	10.8
	梯形(无频差)		-5.4	28.7	0.4	16.7
	梯形(有频差)		-5.0	29.9	0.9	15.5
3/4		真实值	-3.0	34.6	-0.5	9.6
	矩形(无频差)	估计值	-5.5	47.8	0.4	10.8
	梯形(无频差)		-5.5	45.4	0.4	13.1
	梯形(有频差)		-5.0	45.7	0.3	12.8

从表 5-6~表 5-8 的水池实验数据处理结果可以看到, 本文所提的 ESPRIT-CORR 联合估计方法, 在各种条件下均能较好地完成双目标的方位和时延联合估计, 高信噪比下对双目标的正确配对概率为 100%。时延估计的误差大多在两毫秒以内, 极个别的情况由于“泄漏”的原因造成一个目标的时延估计偏差大于 5ms。在两目标方位间隔为 1/2 波束宽度时, 方位估计误差小于  $1.5^{\circ}$ ; 在两目标方位间隔为 3/4 波束宽度时, 方位估计误差小于  $1^{\circ}$ ; 在两目标方位间隔为 1/3 波束宽度时, 方位估计误差小于  $2.5^{\circ}$ 。在数据处理过程中我们只对阵列数据进行了简单的幅度校准, ESPRIT 方法就可以基本达到 1/3 波束宽度的分辨能力, 这说明 ESPRIT 方法借助于计算两子阵的整体相位差, 起到了一种阵列误差平均作用, 具有较好的稳健性。

与基于配对的定位方法相比, 联合估计方法在时延间隔为 1/6 脉宽的时候都能较为准确地分辨两目标的时延, 这是因为联合估计方法中时延的分辨能力依赖于方位的分辨, 只要目标方位能够分辨, 目标时延就得到自然的分离。而基于配对的定位方法中, 时延、方位的估计完全独立, 方位的分辨无助于时延的分辨, 从而导致时延 MUSIC 方法孤军奋战、受系统误差所限不能分辨 1/6 脉宽的两个时延(见表 5-4)。

从表 5-6~表 5-8 的水池实验数据处理结果中可以初步总结出各种因素对联合估计性能的大致影响:

- ① 目标方位间隔。目标方位间隔越小, 方位估计精度越差, 但对时延估计精度的影响不大(在方位正确分辨的前提下);
- ② 包络形式。包络形式对时延估计能力的影响不大。



- ③ 载波频差。载波频差反映的是目标间的多普勒频移差异，它对联合估计性能的影响也不大。

### § 5.4.2 三目标定位实验

再来看看三目标的定位实验，举的例子也与 § 5.3.2 的相同，三个目标的真实方位为  $0^\circ$ 、 $5.9^\circ$ 、 $9.8^\circ$ ，真实时延为 9.6ms、34.6ms、47.1ms。图 5-21 左图给出了增量 AIC 曲线，准确地指示出 3 个目标。ESPRIT 方法估计的目标方位为  $-3.0^\circ$ 、 $5.7^\circ$ 、 $11.9^\circ$ 。特征矢量和发射信号包络的互相关曲线如图 5-21 右图所示，图中的曲线已经经过了防“泄漏”的修正，三条曲线的最大值位置就是三目标的时延估计，依次为 10.8ms、35.9ms、56.2ms。定位结果基本正确，但定位精度稍差。

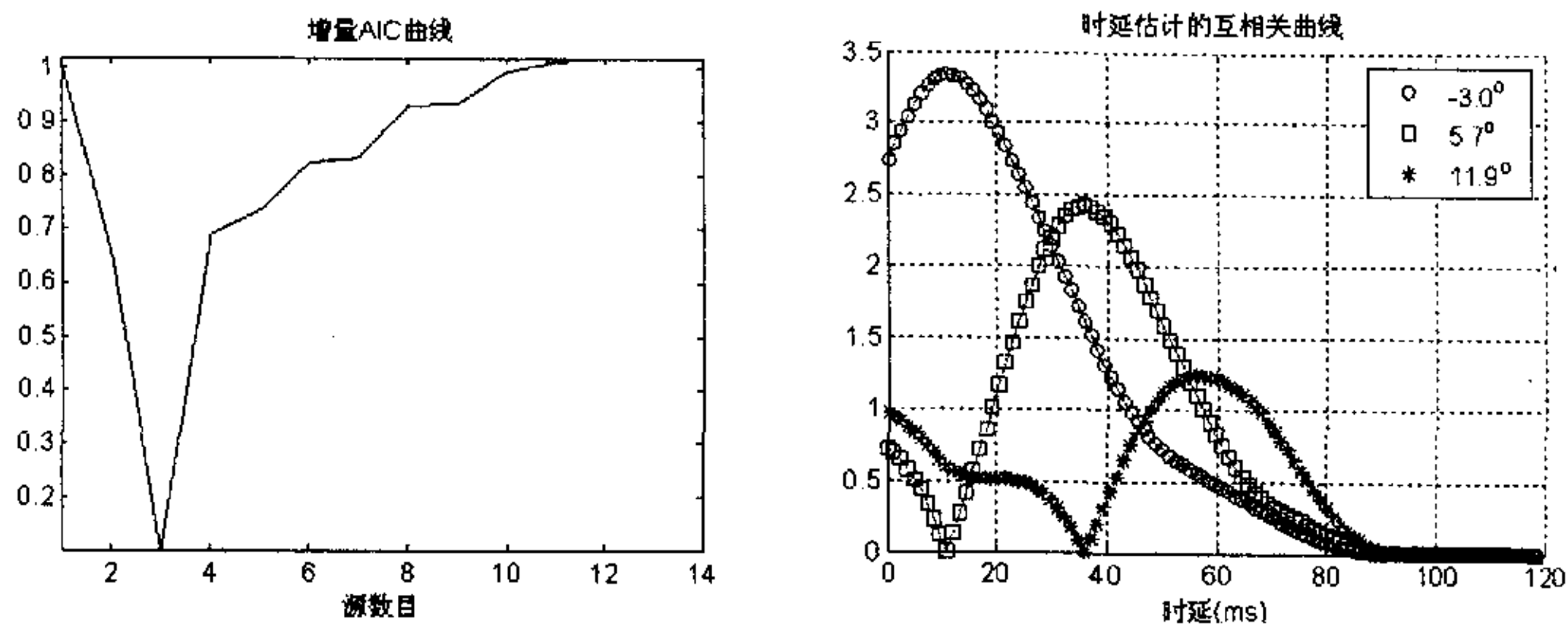


图 5-21 三目标联合参数估计

共设计了四组实验，相邻目标方位间隔都不超过一个波束宽度，所有目标的时延参数都落在一个脉冲宽度内。用上述方法处理所有实验数据，得到的参数联合估计结果见表 5-9。从表中可以看出，本文所提的 ESPRIT-Corr 方法在水池实验中可对方位处于一个波束内、时延处于一个脉宽内的三个目标进行基本可用的定位。所有的方位估计结果都较为稳健，只是在相邻方位间隔达到  $1/4$  波束宽度的实验三、实验四中，方位偏差超过  $4^\circ$ ，从而导致时延估计的偏差大增，不过最后的定位结果还是勉强可以接受的。

表 5-9 三目标定位的参数联合估计

实验序号	时延(脉宽)	信号包络		目标 1		目标 2		目标 3	
				方位( $^\circ$ )	时延(ms)	方位( $^\circ$ )	时延(ms)	方位( $^\circ$ )	时延(ms)
一	0, 1/2, 3/4		真实值	0.0	9.6	5.9	34.6	9.8	47.1
		矩形(无频差)	估计值	-3.5	10.8	5.0	35.8	12.1	47.8
		梯形(无频差)		-3.0	10.8	5.7	35.9	11.9	56.2
		梯形(有频差)		-3.0	9.6	5.4	33.5	12.4	39.4
二	1/3, 1/2, 3/4		真实值	0.0	26.2	5.9	34.6	9.8	47.1
		矩形(无频差)	估计值	-3.5	27.5	5.1	35.8	12.2	35.8
		梯形(无频差)		-3.5	26.3	5.1	32.3	12.2	34.7



		梯形(有频差)		-3.0	26.3	5.4	33.5	12.4	39.4
三	0, 1/2, 3/4		真实值	5.9	9.6	9.8	34.6	11.7	47.1
		矩形(无频差)	估计值	3.0	10.8	9.8	22.7	15.9	47.8
		梯形(无频差)		2.8	12.0	9.7	16.7	15.8	50.2
		梯形(有频差)		1.7	10.8	9.8	41.8	15.4	45.4
四	1/3, 1/2, 3/4		真实值	5.9	26.2	9.8	34.6	11.7	47.1
		矩形(无频差)	估计值	2.5	27.5	9.8	27.5	16.2	47.8
		梯形(无频差)		2.2	27.5	9.6	27.5	15.9	51.4
		梯形(有频差)		1.7	27.5	9.8	39.4	15.4	45.4

### § 5.4.3 四目标定位实验

我们设计了两组四目标的水池定位实验，具体参数见表 5-10。补充说明一下，目标 4 的载波频率为 30.2KHz，其它三个目标的频率为 30KHz。两组实验中四个目标的时延参数配置相同，最大时延间隔不超过脉冲宽度的 3/4。实验一中只有两个目标方位同时落在一个波束宽度内，实验二中则有三个目标方位同时落在一个波束宽度内。

仍以实验一中梯形包络发射信号为例，先对回波进行正交解调得到信号的复包络。用空间自相关矩阵的特征值计算增量 AIC 曲线，见图 5-22 左图，准确地判断出有 4 个目标。ESPRIT 方法估计的目标方位为  $11.4^\circ$ 、 $4.8^\circ$ 、 $-4.3^\circ$ 、 $-13.6^\circ$ 。特征矢量和发射信号包络的互相关曲线如图 5-22 右图所示，四条曲线的最大值位置就是四目标的时延估计，依次为 8.4ms、35.8ms、46.6ms、27.5ms。定位结果正确，定位精度也相当高，方位误差不超过  $1.3^\circ$ ，时延误差不超过 1.3ms。因为此时只有两个相邻目标的方位间隔小于一个波束宽度，比较容易分辨。

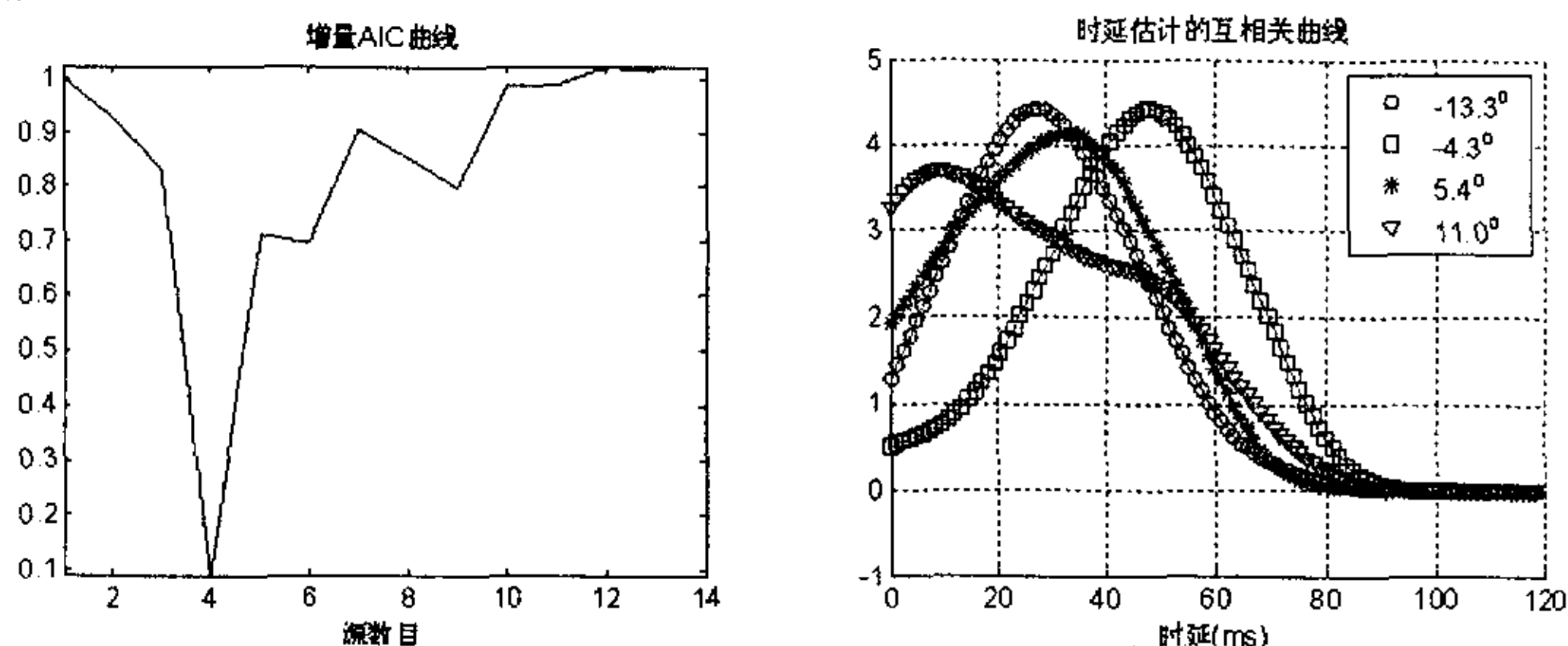


图 5-22 四目标联合参数估计

表 5-10 四目标定位实验的联合参数估计结果

实验 序号	目标及参数		真实值	估计值			
				矩形包络	误差	梯形包络	误差
实验一	目标 1	方位( $^{\circ}$ )	10.3	11.2	1.1	11.4	1.1
		时延(ms)	9.6	10.8	1.2	8.4	1.2
	目标 2	方位( $^{\circ}$ )	5.9	4.8	1.1	4.8	1.1
		时延(ms)	34.6	35.8	1.3	35.8	1.3
	目标 3	方位( $^{\circ}$ )	-3.0	-4.3	1.3	-4.3	1.3
		时延(ms)	47.1	47.8	0.7	46.6	0.5
	目标 4	方位( $^{\circ}$ )	-12.8	-13.6	0.8	-13.6	0.8
		时延(ms)	26.2	27.5	1.2	27.5	1.2
实验二	目标 1	方位( $^{\circ}$ )	10.3	13.6	3.3	13.8	3.5
		时延(ms)	9.6	13.6	4.0	13.1	3.5
	目标 2	方位( $^{\circ}$ )	5.9	7.3	1.4	7.2	1.3
		时延(ms)	34.6	52.6	18.0	35.8	1.2
	目标 3	方位( $^{\circ}$ )	-3.0	-12.7	9.7	-13.4	10.4
		时延(ms)	47.1	64.5	17.4	45.4	1.7
	目标 4	方位( $^{\circ}$ )	0.0	-1.1	1.1	-1.3	1.3
		时延(ms)	26.2	52.6	26.4	37.0	10.8

对实验二也进行同样的处理,得到的联合参数结果见表 5-10。目标三的方位估计误差达到  $10^{\circ}$ ,进而导致时延估计误差也超过 10ms。这是由于所有相邻目标的方位间隔均小于波束宽度,四个目标的方位间隔用波束宽度来衡量的话,大致是 0.6、0.8、0.4,方位分辨困难,估计精度下降。

### § 5.5 无需配对的多目标三参数联合估计水池实验

由第四章的理论分析和仿真表明,ESPRIT-Corr 方法还能够实现方位、频率、时延三维参数联合估计,完成具有不同径向速度的多目标定位。下面我们就用这种方法对前述的多目标定位水池实验数据进行处理,以考察它在实际系统中的表现。

由于 ESPRIT-Corr 方法更加依赖于正确的判阶,一旦判阶错误,在后续的处理中将很难有校正的可能,因此我们在这里采用了判阶准确性更高的增量 AIC 判阶方法<sup>[12]</sup>。

#### § 5.5.1 双目标三参数联合估计实验

我们先举个例子来说明 ESPRIT-Corr 方法实现三维参数联合估计的数据处理过程。两个目标的方位为  $-3.6^{\circ}$ 、 $2.8^{\circ}$ ,频率为 29.9KHz、30.0KHz,相对时延为 0ms、6.7ms。发射信号为脉宽 20ms、周期 120ms 的脉冲串,其实包络为一正弦包络,如图 5-23 左图所示。用一个 14 元均匀线列阵接收。从接收到的回波信号中取一个完整的脉冲进行频谱搬移(以 29KHz 为中心频率的幅度

解调, 这里中心频率的选取原则是使解调后频率都为正频率, 且在降采样后不会混叠。), 然后取其复包络并降采样后得到的各通道复包络见图 5-24, 采样频率为 3413Hz, 共采了 103 点。对阵列输出的复包络矩阵进行奇异值分解, 用奇异值去计算增量 AIC 曲线, 如下图 5-23 右图所示。图中的曲线在源数目为 2 时达到最小值, 正确地判断出两个目标。将阵列分成两个子阵, 根据公式 (4.7)~(4.11) 计算两子阵的广义特征分解, 从广义特征值可以直接得到目标的方位估计:  $-3.1^{\circ}$ 、 $3.3^{\circ}$ 。

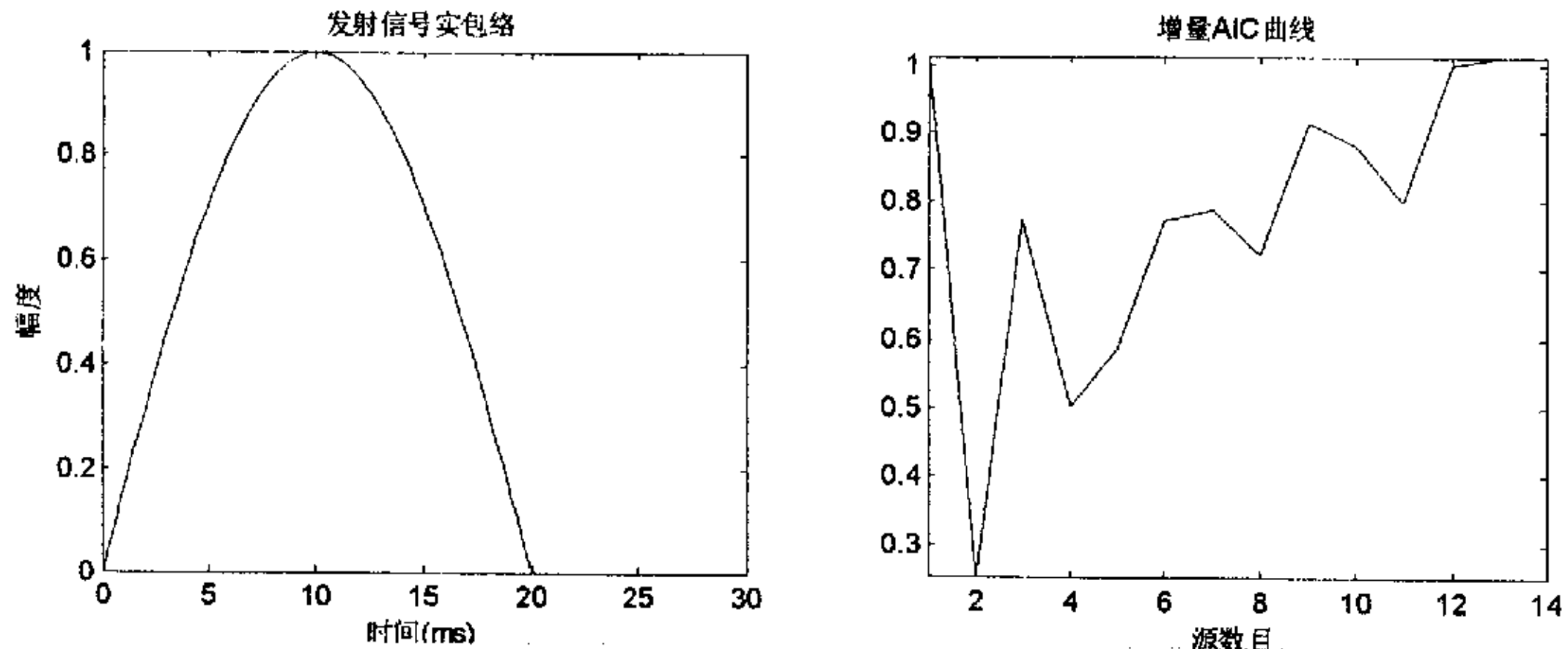


图 5-23 三维参数联合估计实验中的发射信号包络及判阶

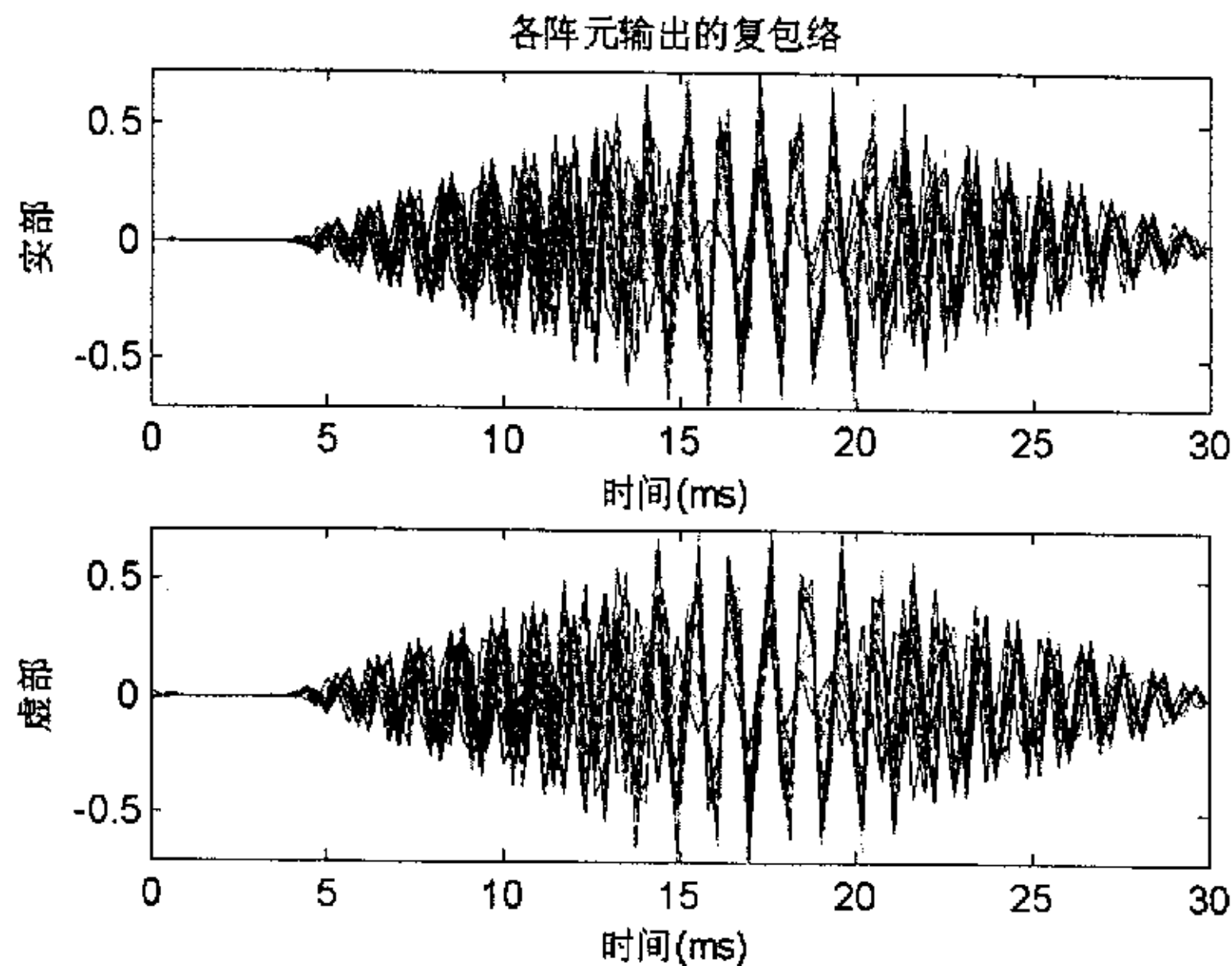


图 5-24 三维参数联合估计实验中的回波复包络

对信号子空间的广义特征矢量分别计算功率谱(为了抑制旁瓣泄漏, 加了与特征矢量长度相等的汉宁窗), 如图 5-25 左图所示, 两条每条曲线功率谱的峰值位置分别在 900Hz 和 1000Hz 处, 再加上频谱搬移量 29KHz 就可以得到两目标的频率估计: 29.9KHz、30.0KHz, 估计结果还是相当准确的。再按(4.22)式对归一化回波包络时延矢量进行频移补偿后与信号子空间的广义特征矢量做互

相关, 得到两条相关曲线如图 5-25 右图所示, 从其峰值位置得到时延估计 4.0ms、11.0ms。由于实验中没有采用同步采样方式, 脉冲起点无法标定, 因此我们对时延估计值以最小时延值为计时零点, 得到两目标的时延估计值为 0.0ms、7.0ms, 和真实值十分接近。从结果看, 三维参数配对也是正确的。

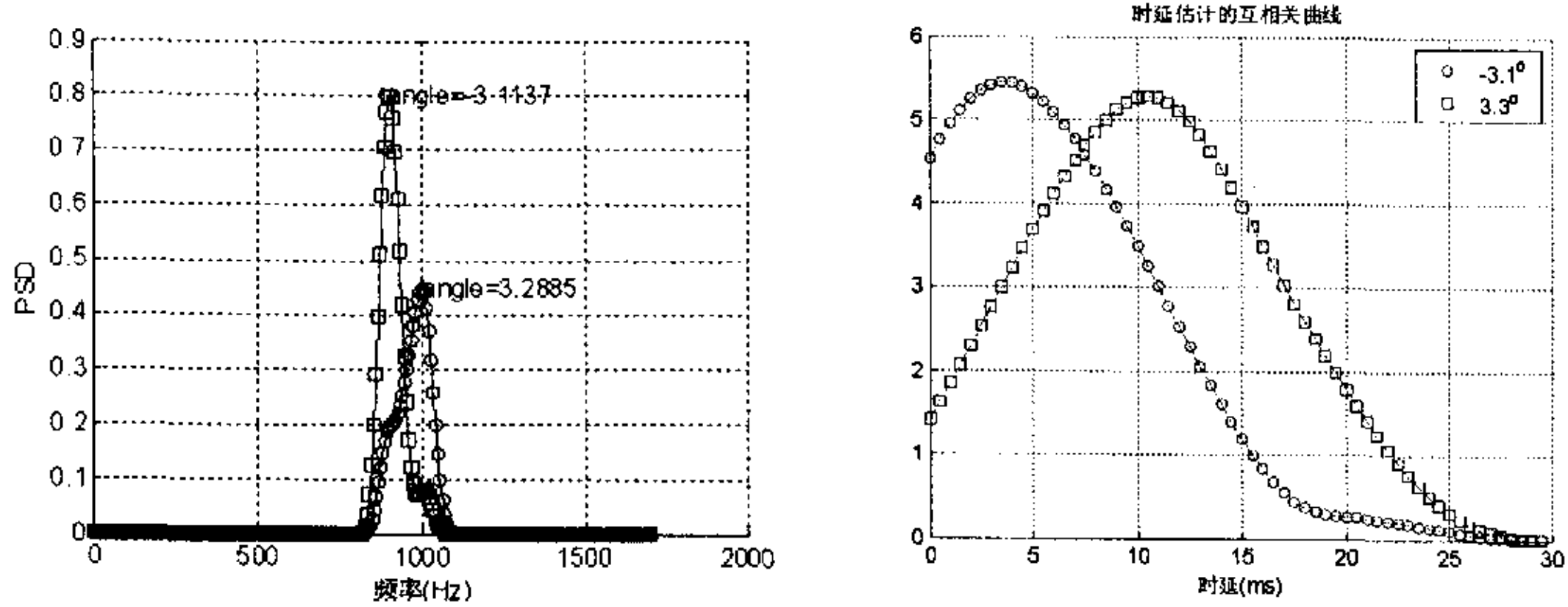


图 5-25 三维参数联合估计实验中的频率和时延估计

我们选不同的方位间隔、时延间隔进行了一系列的双目标三参数联合估计实验, 用上述数据处理步骤进行处理, 得到的结果见表 5-11。

表 5-11 双目标三参数联合估计水池实验结果

方位 间隔	时延 (脉宽)	真实值			估计值		
		方位 (°)	频率 (KHz)	时延 (ms)	方位(°)	频率 (KHz)	时延 (ms)
3/4 束宽	1/3	-3.6 2.8	29.9 30.0	0.0, 6.7	-3.1, 3.3	29.9, 30.0	0.0, 7.0
	1/4			0.0, 5.0	-3.1, 3.3	29.9, 30.0	0.0, 5.0
	1/8			0.0, 2.5	-3.2, 3.3	29.9, 30.0	0.0, 2.5
	1/12			1.7, 0.0	-3.2, 3.3	29.9, 30.0	2.0, 0.0
1/2 束宽	1/3	-3.6 -7.6	29.9 30.0	0.0, 6.7	-7.5, -1.9	29.9, 29.9	0.0, 0.5
	1/4			0.0, 5.0	-7.5, -2.0	29.9, 29.9	0.0, 1.0
	1/8			0.0, 2.5	-7.5, -2.0	29.9, 29.9	0.0, 0.0
	1/12			1.7, 0.0	-7.5, -2.0	30.0, 29.9	0.0, 1.0

从表 5-11 的水池实验数据处理结果可以看到, 当目标方位间隔较大时, 如 3/4 波束宽度, 本文所提的 ESPRIT-CORR 三维参数联合估计方法能较好地完成双目标的方位、频率和时延联合估计, 对双目标三维参数的配对也正确。但是当目标方位间隔较小时 (不大于 1/2 波束宽度), 方位估计精度下降, 频率参数不能分辨, 这说明此时频率在特征矢量中的分离度不够, 频率间的“泄漏”造成两个特征矢量的频谱峰值都指向某一个目标的频率。图 5-26 给出了方位间隔为 1/2 波束宽度、时延间隔为 1/4 脉冲宽度时的特征矢量功率谱估计, 可以比较清楚地看到泄漏带来的后果。而频率分辨的失败又导致时延估计中频率补

偿的误差,使时延参数也无法分辨。

再比较表 5-6 无频差的结果和表 5-11 中相同条件的结果,当目标间没有频率差时方位间隔  $1/2$  束宽条件下,可以分辨时延间隔为  $1/6$  脉宽的两目标,这说明频率能否准确补偿对时延分辨影响很大,应该下功夫提高频率的正确分辨能力。

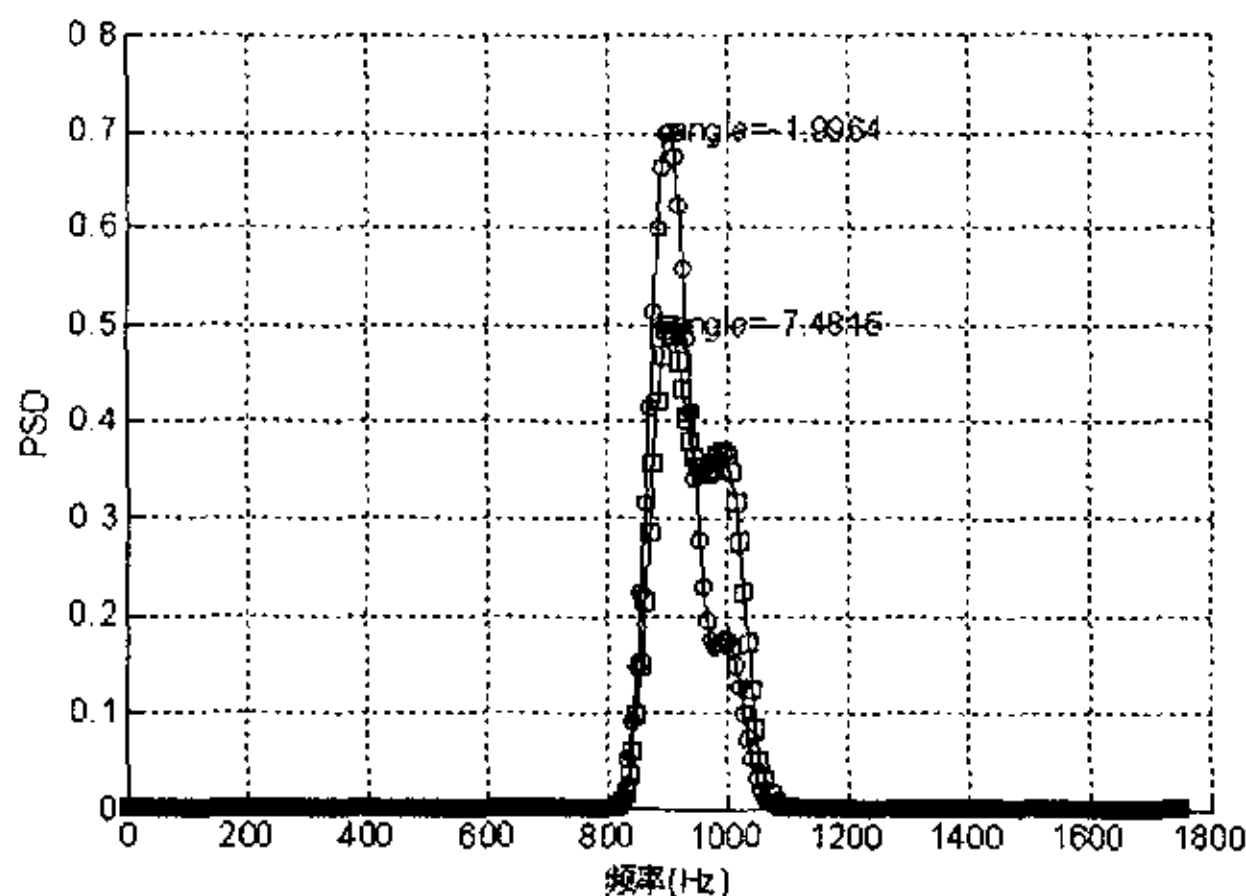


图 5-26 三维参数联合估计中功率谱估计的泄漏

而在 § 4.4 的计算机仿真中方位间隔  $1/2$  波束宽度的三个目标都能进行三维参数联合估计,频谱泄漏导致频率不能分辨的问题并不严重。我们分析这主要是阵列误差的影响,由于三维参数联合估计水池实验数据处理中只是对各阵元的幅度误差进行了校正,阵元位置、通道相位等其它误差导致方位估计精度下降、频率在特征矢量中的分离度下降。因此今后应该进一步研究 ESPRIT-Corr 方法的阵列校正算法,这才是治本之道。

### § 5.5.2 三目标三参数联合估计实验

我们用一个例子来说明三目标三参数联合估计实验的数据处理过程,三个目标的真实方位为  $2.0^\circ$ 、 $-3.6^\circ$ 、 $-7.6^\circ$ ,相邻目标间的方位间隔约为  $2/3$ 、 $1/2$  个波束宽度。对应的频率分别为 29.9、30.0、30.1 KHz。对应的时延分别为 0、5.0、2.5 ms,相邻目标间的时延间隔约为  $1/4$ 、 $1/8$  个脉冲宽度。用增量 AIC 判阶准则可以准确地指示出 3 个目标。ESPRIT 方法估计的目标方位为  $5.0^\circ$ 、 $-1.8^\circ$ 、 $-8.6^\circ$ 。特征矢量的功率谱图见图 5-27 左图,三条曲线的峰值就是目标的频率估计: 29.9、30.0、30.1 KHz。特征矢量和发射信号包络的互相关曲线如图 5-27 右图所示,三条曲线的最大值位置就是三目标的时延估计: 10.8、35.9、56.2 ms。联合估计的结果基本准确,配对也正确,只是方位估计精度稍差。

改变目标参数,我们共设计了三组实验,相邻目标方位间隔都不超过一个波束宽度,所有目标的时延参数都落在一个脉冲宽度内。用上述方法处理所有实验数据,得到的参数联合估计结果见表 5-12。从表中可以看出,当相邻目标



方位间隔不小于  $1/2$  波束宽度时, 本文所提的 ESPRIT-Corr 联合参数估计方法在水池实验中可对三个目标的方位、频率、时延进行较为准确的联合估计。当相邻目标方位间隔小于  $1/2$  波束宽度时, 联合参数估计失效, 配对情况也很混乱。究其原因, 如前述双目标联合参数估计实验一样, 第一步的方位估计误差偏大, 导致各目标的频率和时延信息在特征矢量中分离度下降。

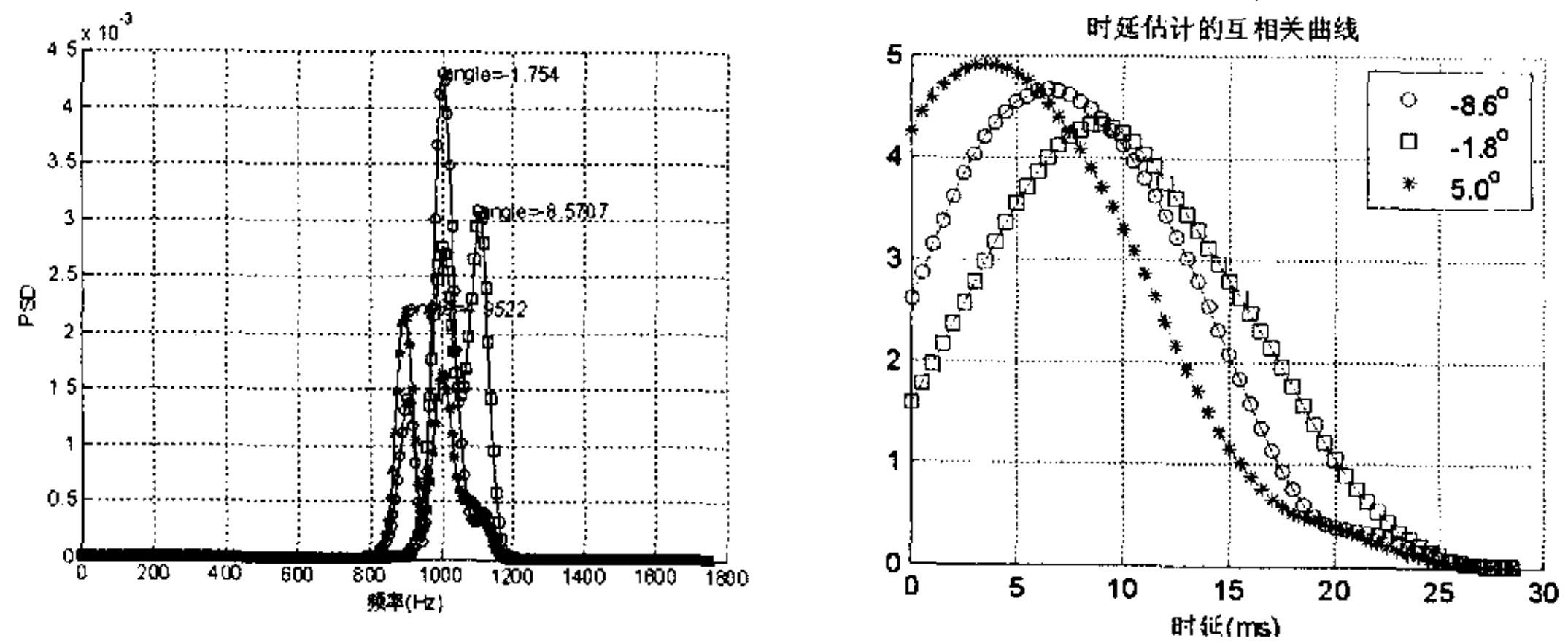


图 5-27 三目标三参数联合估计

表 5-12 三目标三参数联合估计水池实验结果

方位 间隔 (束宽)	时延 (脉宽)	目标真实参数			目标估计参数		
		方位 (°)	频率 (KHz)	时延 (ms)	方位 (°)	频率 (KHz)	时延 (ms)
2/3 1/2	1/4			0.0	5.0	29.9	0.0
	1/8	2.0	29.9	5.0	-1.8	30.0	5.5
		-3.6	30.0	2.5	-8.6	30.1	3.0
	1/4	-7.6	30.1	0.0	4.8	29.9	0.0
	1/3			5.0	-1.6	30.0	3.0
				6.7	-8.5	30.1	4.5
1/2	1/4	-3.6	29.9	0.0	1.9	30.0	1.5
1/4	1/8	-7.6	30.0	5.0	-5.8	30.0	0.5
		-9.6	30.1	2.5	-11.1	30.0	0.0

### § 5.5.3 四目标三参数联合估计实验

我们在设计四目标实验时只考虑了多目标定位的需要, 目标频率没有差别都设为 29.9KHz, 因此这次四目标实验不够典型, 应在今后的实验中改进设计。我们共设计了不同参数配置的两个实验, 具体参数见表 5-13。实验一中相邻两个目标的最小方位间隔为  $2/3$  波束宽度, 实验二中相邻两个目标的最小方位间隔为  $1/2$  波束宽度。

两个实验中增量 AIC 判阶的结果均为 4。实验一的频率估计曲线见图 5-28 左图, 图 5-28 右图给出了时延估计所依据的互相关曲线。两个实验的详细估计



结果见表 5-13。从表中看出, 当目标方位间隔不是太小时(实验一), 联合参数估计和配对结果都较好; 而当目标方位间隔较小时(实验二), 方位估计偏差很大, 时延分辨失败, 更谈不上正确配对了。

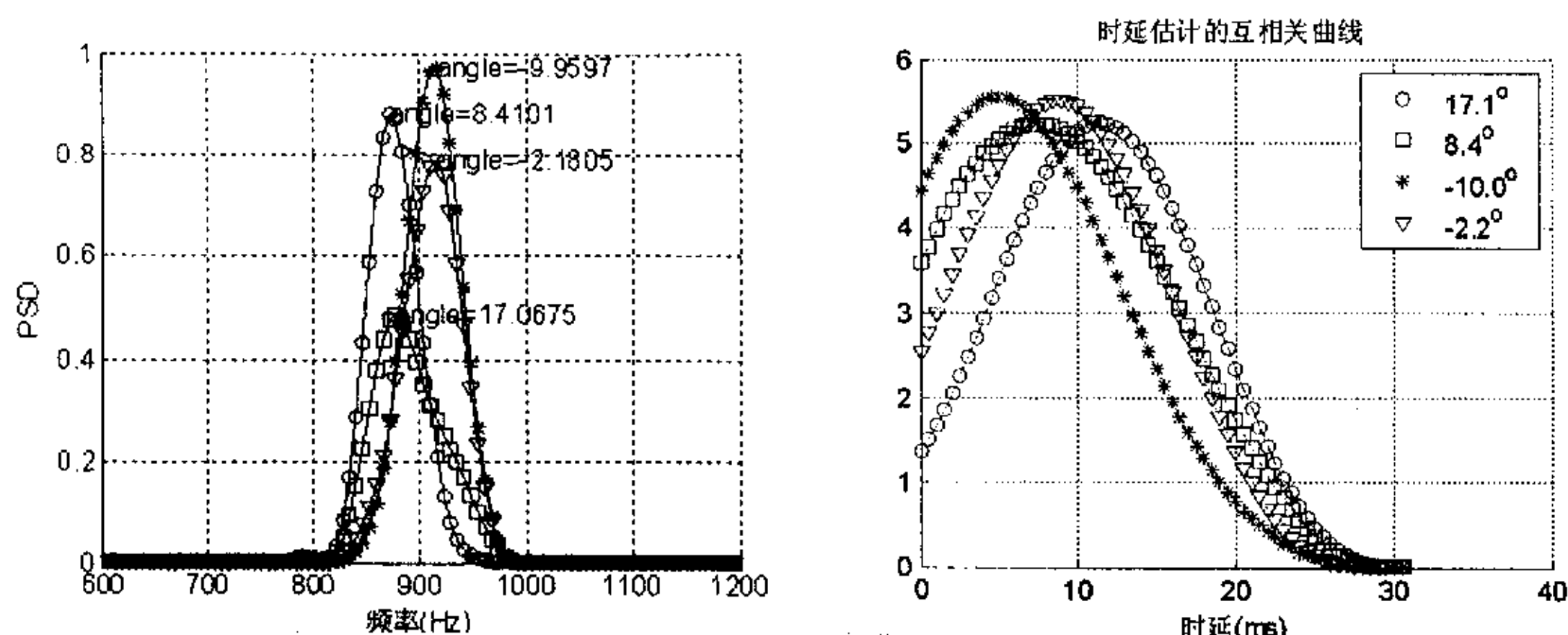


图 5-28 四目标三参数联合参数估计

表 5-13 四目标三参数联合估计水池实验结果

方位 间隔 (束宽)	时延 (脉宽)	目标真实参数			目标估计参数		
		方位 (°)	频率 (KHz)	时延 (ms)	方位 (°)	频率 (KHz)	时延 (ms)
2/3 1.25 1.25	1/8	-8.2	29.9	0.0	-9.96	29.92	0.00
		-3.6			-2.18	29.92	4.00
		5.8			8.41	29.87	2.50
		14.6			17.07	29.88	6.50
2/3 4/5 1/2	1/12	-8.2	29.9	2.5	-13.67	29.89	0.00
		-3.6	29.9	6.7	-4.15	29.92	4.00
		5.8			6.11	29.90	6.00
		2.0			13.09	29.88	4.50

## § 5.6 本章小结

本章首先指出了实验研究在多目标定位走向工程应用中的重要性, 并概括了多目标定位实验研究的具体研究内容。然后介绍了我们依托国家重点实验室构建的一套多目标定位水池实验系统, 它可以同时模拟 4 个目标的方位、距离、径向速度等参数, 为多目标定位实验的开展提供了良好的条件。接着对实验研究中的一个主要问题——阵列误差抑制进行了探讨, 分析了几种常见的误差抑制方法的作用机理, 并用水池实验数据验证了理论分析的正确性。

本章的重点是对两大类多目标定位方法进行了深入的实验研究。基于配对的多目标定位方法将二维参数分开独立进行, 好处是可以吸收采用各种方位和时延估计新方法, 缺点是必须要二维参数同时准确分辨才能实现多目标定位。

通过对实验数据的分析,我们发现强度配对算法对系统误差较为敏感,特别是在目标数目较多时尤为明显。实验中,双目标的配对尚可,三目标、四目标则很难实现有效的配对。

作者提出的 ESPRIT-Corr 定位方法无需配对,它利用两子阵的广义特征值估计方位,对应的广义特征矢量可估计时延。实验数据分析结果表明,这种方法的方位分辨率很高,可以达到  $1/3$  波束宽度以上,借助于方位分辨的时延分辨能力也表现出色。实验中,这种联合估计方法不仅可以准确地定位两个目标,而且在三目标、四目标情况下也能得到有效的定位结果,表现出良好的工程引用前景。

作者进一步把 ESPRIT-Corr 方法推广到方位、频率、时延三维参数联合估计,并进行了双目标、三目标、四目标的三维参数联合估计水池实验。实验数据分析结果表明,当目标方位间隔不太小时(大于半波束宽度),这种方法可以较好地实现多目标三维参数的联合估计。

## § 5.7 本章参考文献

- [1] 范敏毅,“水声信道的仿真与应用研究”,哈尔滨工程大学博士论文,2000.1
- [2] B.Friedlander,“A Sensitivity Analysis of the MUSIC Algorithm”,IEEE Trans. on ASSP, Vol.38, No.10, Oct. 1990, pp.1740-1751
- [3] 黄建国,武延祥,杨世兴译,《现代谱估计》,科学出版社,1994.5
- [4] J. T. Mayhan, L. Niro,“Spatial Spectral Estimation Using Multiple Beam Antennas”,IEEE Trans. on AP, vol.35, No.8, Aug. 1987
- [5] X. L. Xu, K. Buckley,“Reduced-dimension Beamspace Broadband Source Localization: Preprocessor Design and Evaluation”,Proc. IEEE ASSP 4th Workshop Spectrum Estimation Modeling, Aug. 1988, pp.22-27
- [6] B. Van Veen, B. Williams,“Structured Covariance Matrices and Dimensionality Reduction in Array Processing”,Proc. IEEE 4th Workshop Spectrum Estimation Modeling, Aug. 1988, pp.168-171
- [7] K. M. Buckley, X. Xu,“Spatial-Spectrum Estimation in a Location Sector”,IEEE Trans. on ASSP, Vol.38, No.11, Nov. 1990
- [8] M. D. Zoltowski, et al.,“Beamspace Root-MUSIC”,IEEE Trans. on SP, Vol.41, No.1, Jan. 1993
- [9] G. Xu, et al.,“Beamspace ESPRIT”,IEEE Trans. on SP, Vol.42, No.2, Feb. 1994, pp.349-355

- 
- [10]Fu Li, H. Liu, "Statistical Analysis of Beam-Space Estimation for Direction-of-Arrival", IEEE Trans. on SP, Vol.42, No.3, March 1994
- [11]杨益新, "目标方位估计的波束域高分辨算法研究", 西北工业大学硕士论文, 1999 年
- [12]王琨, 黄建国, "白噪声中正弦信号数目的估计", 西北工业大学学报, 第 14 卷第 2 期, 1996 年 5 月, pp. 304-308
- [13]陈建峰, 黄建国, "阵列误差校正的综合校正补偿法", 声学学报, 第 23 卷第 6 期, 1998.11
- [14]俞靖, 鲍明, "用 MUSIC 法确定声源频率和方位时误差的校正方法", 南京航空航天大学学报, 第 30 卷第 6 期, 1998.12, pp.680-684

## 全文总结

由于水下对抗技术和对抗装备的普遍应用, 自导鱼雷对多目标定位能力的需求十分迫切。自导系统具有多目标定位能力后可以在三个方面大幅度提升鱼雷的攻击效果: 远程时可优选攻击目标, 选择高价值、高威胁度的目标进行攻击; 中程时可同时锁定目标和诱饵, 一旦发现跟踪错误立刻转入对下一个目标的跟踪, 避免再搜索; 近程时确定目标的亮点结构, 可用于真假目标的识别和目标要害部位的判定。

多目标定位及跟踪技术在雷达中早已得到应用, 主要是靠雷达的高分辨能力将多个目标回波在距离或方位上分离来实现的。但把多目标定位引入水下目标探测, 尤其是水下武器的导引系统会遇到一些特殊的问题。一方面, 由于阵列尺寸受到载体体积的限制、工作频率的提高(波长的减小)受到海水吸声特性的制约, 鱼雷自导系统的定向精度和分辨能力有限。另一方面, 自导系统为了提高目标检测能力, 往往采用长脉冲进行时间积累以获得时间增益, 而系统的带宽受到换能器工艺的限制很难扩展, 因此自导系统的距离分辨率也不高。因而自导系统面临的是方位落在一个波束宽度内、距离小于信号的时延模糊区间的多个目标, 针对多目标回波在方位和距离上都无法分离的难题, 本文主要在以下方面进行了创新性的研究:

- ◇ 基于参数配对算法的多目标定位技术。阵列信号处理的发展使多目标方位高分辨技术基本成熟, 多目标时延估计的高分辨问题也有很多的研究成果, 作者在利用多目标方位、时延参数独立分辨的基础上, 提出了一种强度配对算法, 通过估计不同参数组合情况下的目标强度把方位和时延参数对应起来。它的优点是可以借用方位、时延一维参数估计的各种方法, 不仅能解决多目标定位问题, 还可提供目标的强度信息。针对可能出现的两维参数分辨出的目标数目不等(参数兼并)的情况, 作者提出了相应的配对策略, 仿真结果表明, 它可以帮助我们在参数估计分辨率有限的条件下获得有效、可用的多目标定位结果。
- ◇ 无需配对的多目标定位技术。提出了一种时延-方位联合估计方法 ESPRIT-Corr, 它借鉴了旋转子空间不变的思想, 通过构造与常规 ESPRIT 不同的相关矩阵, 用广义特征值估计多目标的方位, 而用广义特征矢量估计多目标的时延(距离), 同时方位和时延参数可自动配对, 并且整个算法可在单次回波内完成。计算机仿真结果验证了所提方法的有效性。另外还针对实际应用中普遍存在的不等强度目标源的问题, 提出了一种修正算法。
- ◇ 无需配对的多目标三维参数联合估计技术。把 ESPRIT-Corr 推广到方位、频率、时延三维参数联合估计, 在用广义特征值估计出多目标方位后, 用广义特征矢

量的功率谱估计出多目标的频率,再对时延搜索矢量进行频率补偿后估计多目标的时延(距离),同时方位、频率和时延这三维参数可自动完成配对。

- ◇ 多目标定位水池实验系统。作者依托“水下信息与控制”国家重点实验室在国内率先构建了一套多目标定位水池实验系统,它包括多目标信号源、噪声源、多通道功率放大器、多目标模拟基阵、接收基阵、消声水池、主控计算机、放大滤波器、数据采集系统、数据处理计算机等 10 个仪器设备,可以同时模拟 4 个目标的方位、距离、径向速度等参数,为多目标定位实验的开展提供了良好的条件。
- ◇ 阵列误差校正。实验研究中的一个主要问题是阵列误差的抑制,作者分析了阵列误差的构成因素和基本特性,对空间平滑、Torplitz 化、波束域等几种阵列预处理方法在抑制阵列误差方面的物理机理进行了理论分析,指出它们的实质都是对零均值阵列误差的一种平均。通过对不同方位间隔的双目标水池定向实验验证了这些方法的稳健性,并获得了各方法在实际阵列信号处理中的实用分辨门限。
- ◇ 多目标定位实验研究。对两大类多目标定位方法进行了深入的实验研究。针对自导系统的应用背景,设计了不同目标数目、不同方位间隔、不同时延间隔、不同发射信号包络的一系列多目标定位实验,用作者所提的两类定位方法对实验数据进行了处理。基于配对的多目标定位方法在双目标定位实验中取得了较好的结果,但由于配对算法对系统误差的敏感性,在三目标、四目标定位实验中表现欠佳。基于参数联合估计的多目标定位方法在不同目标数目、不同信号包络的定位实验中都有较好的表现,但其时延估计中的“泄漏”现象也是一个不容回避的问题。
- ◇ 多目标三维参数联合估计实验研究。针对推广后的 ESPRIT-Corr 方法开展了双目标、三目标、四目标的三维参数联合估计水池实验。实验数据分析结果表明,当目标方位间隔不太小时(大于半波束宽度),这种方法可以较好地实现多目标方位、频率和时延参数的联合估计。

本文取得了一批水下多目标定位理论和实验研究成果,使多目标定位技术在水下武器探测系统工程应用方面迈出了一大步。第一阶段的实验结果指明了水下多目标定位技术的良好应用前景,但也暴露出一些需要正视的问题。下一阶段的研究工作应在以下几个方向展开:

- ESPRIT-Corr 方法的时延泄漏判断及修正。无需配对的方位一时延联合估计各方面的表现都较好,但其时延估计中存在“泄漏”现象,使时延估计值相互靠近。作者提出的修正算法在“泄漏”明显的情况下效果良好,但在“泄漏”不明显时会使估计相互排斥。应该寻找一种准则来判断是否存在泄漏、有无必要



修正。

- 波形畸变的校正研究。多目标定位在工程应用中面临的阵列误差问题已经在本文进行了理论和实验研究。多目标定位同时还面临波形畸变的问题，同样应该得到重视。波形畸变由收发系统传递函数和水声信道两部分构成，前者可以在水池实验系统中得到体现，后者则需建立信道模型进行仿真。
- 不等强度多目标的定位实验。目标间的强度差异对两类多目标定位方法都有影响，本文在理论和仿真中均已指明并提出了一些应对方案。下一步因开展这方面的实验研究，切实解决这一问题。
- 环境噪声模拟。本文的多目标定位实验中原计划采用多路直射噪声源来模拟环境，但发现其空间特性不理想，因此本文的定位实验数据都只有阵列误差而没有可控的环境噪声。下一步考虑用一个绕射噪声源来模拟环境噪声，开展不同信噪比条件下的多目标定位实验研究。
- 阵列误差测量和校准的基础性实验研究。实验中对接收阵列的标校还不够仔细，下一次实验前应该在可能的工作频段上对各阵元的幅频、相频特性和空间指向性进行细致的标定，对阵列中各阵元的位置误差、水池实验中的非远场误差等进行测量，在这过程中研究具有普遍指导意义的水下阵列误差测量和标校技术。



## 致 谢

作为一名跨校在职攻读博士学位的青年教师,从1995年9月入学以来,我的相当一部分精力花在了教学和科研的工作岗位上,致使自己的博士学位论文一拖再拖,实在愧对老师和所有关心我的亲朋好友。今天,论文终于成稿了,在享受七年来少有的轻松惬意的时候,我内心里对那些在此期间指导过我的老师、帮助过我的同学同事、关心过我的亲戚朋友充满了感激之情。

首先,衷心感谢我的导师、中国科学院院士保铮教授。保老师以扎实的专业知识、敏捷的思维和对问题深刻的洞察力,为我及时把握研究方向。保老师不仅言传身教,教给了我科学知识和发现问题、解决问题的方法,更重要的是他以及他带领的学术团队所展示的正直、严谨、实事求是、积极进取、忘我工作的学术氛围深深地感染了我,使我懂得应该怎样做人、怎样做学问,令我终身受益。

感谢雷达信号处理实验室的吴顺君教授、张守宏教授、焦李成教授、廖桂生教授、张林让副教授等教师给予的指导和帮助。

感谢卢光跃博士、廖学军博士、张军英教授、郑义明博士、邢孟道博士、姜正林博士等同学,与他们的日常交流和学术讨论使我受益匪浅。

特别感谢我所在课题组的学术带头人黄建国教授和谢一清教授,十几年来,他们不仅在信号处理、鱼雷自导等主攻领域给予我许多指导,还带领我积极开拓计算机仿真、水下通信等新的研究方向,使我的科研能力得到更全面的培养。另外还要感谢我所在教研室的李志舜教授、陈航教授、刘东启教授、冯西安副教授,在我遇到困难而灰心的时候,是他们的信任和鼓励使我信心倍增。

感谢课题组的陈建峰博士、秦洪峰博士、刘科伟硕士、孙毅硕士、王宇硕士、雷开卓工程师、马菊婷工程师和硕士生孙静、伍晶,感谢他们在学术探讨、水池实验等方面的支持。

最后感谢我的父母,感谢他们的养育之恩,他们的期盼是我永恒的动力。感谢岳父岳母和妻子徐力群在生活上无怨无悔的支持。还要对女儿张恠雯说声抱歉,长到两岁半了,我都没有带你去过一次公园,爸爸以后会加倍地爱你。

## 作者在攻读博士期间取得的成果

### 科研获奖

- “自导高分辨技术研究”，1997 年中国船舶工业总公司科技进步二等奖，第三完成人
- “目标与干扰特征数据的获取、存储和处理”，1997 年中国船舶工业总公司科技进步二等奖，第六完成人
- “武器系统数学仿真及方法研究”，2002 年国防科技进步三等奖，第二完成人

### 教学获奖

- 1999 年指导本科生参加全国电子设计大赛，获全国一等奖

### 论文发表

- [1] 张群飞，谢一清，“分裂波束精确定向”，水中兵器，95 年第 4 期，1995 年 10 月，pp.49-54
- [2] 张群飞，谢一清，黄建国，“目标尺度估计”，水中兵器，96 年第 4 期，1996 年 10 月，pp.30-36
- [3] Qunfei Zhang, Jianguo Huang, and Zhen Bao, "Simultaneous Estimation of Time-delay and DOA for Underwater Multitarget by Using Extended ESPRIT", CHINESE JOURNAL OF ACOUSTICS, Vol.18, No.1, March 1999, pp.29-36
- [4] Qunfei Zhang, Jianguo Huang, "Joint Estimation of DOA and Time-Delay in Underwater Localization", Inter. Conf. On ASSP, Phoenix, USA, May 1999 (EIP99084746503,ISTP)
- [5] 张群飞，黄建国，保铮，“用子空间旋转不变法同时估计水下多目标的距离和方位”，声学学报，第 24 卷第 4 期，1999 年 7 月，pp.400-406
- [6] 张群飞，谢一清，黄建国，“高分辨水下多目标定位新方法”，水中兵器，2000 年第 2 期，2000 年 6 月
- [7] 张群飞，“多目标定位水池实验研究”，鱼雷技术，第 40 期，2002 年 12 月，pp.43-46
- [8] 陈建峰，黄建国，张群飞，“高分辨阵列处理图形软件系统的研制”，舰船设备与技术，97 年第 1 期，1997 年 1 月，pp.9-17
- [9] 陈建峰，黄建国，张群飞，“基于波束输出的高分辨定向方法及性能分析”，电子科学学刊，第 21 卷第 5 期，1999 年 9 月，pp.600-605

- [10] 陈建峰, 黄建国, 张群飞, “一种宽容的宽带加权聚焦定向算法”, 声学学报, 第 25 卷第 1 期, 2000 年 1 月, pp.16-20 (EIP00095311086)
- [11] 仪晓可, 黄建国, 张群飞, “基于四阶类量的三次相位耦合特性分析”, 船舶工程, 2000 年第 3 期, 2000 年 6 月, pp.52-54
- [12] 黄建国, 仪晓可, 张群飞, “水下目标辐射噪声的子波变换和高阶统计量联合分析”, 系统仿真学报, 第 13 卷第 2 期, 2001 年 3 月, pp.175-177
- [13] 秦洪峰, 黄建国, 张群飞, “基于子空间类法的阵列幅相误差校正方法”, 计算机工程与应用, 第 37 卷第 19 期, 2001 年 10 月, pp.55-57
- [14] 秦洪峰, 黄建国, 张群飞, “阵列幅相误差条件下的目标方位估计”, 应用声学, 第 21 卷第 3 期, 2002 年 5 月, pp.6-10
- [15] 马雯, 黄建国, 张群飞, “用时延编码实现远程水声通信”, 电讯技术, 第 42 卷第 4 期, 2002 年 8 月, pp.70-72
- [16] 王新晓, 黄建国, 张群飞, “水下自主航行器导引系统集成化软件设计”, 计算机工程与应用, 2002 年
- [17] Hongfeng QIN, Jianguo HUANG, Qunfei ZHANG, "EXPERIMENTAL STUDY ON THE SUBSPACE ALGORITHMS FOR HIGH-RESOLUTION DIRECTION-OF-ARRIVAL ESTIMATION", 2002 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Beijing, Oct. 2002, pp.923-926
- [18] Qin Hongfeng, Huang Jianguo, Zhang Qunfei, "SIMULATION STUDY ON HIGH-RESOLUTION DIRECTION-OF-ARRIVAL ESTIMATION", Asian Simulation Conference / The 5th International Conference on System Simulation and Scientific Computing (ICSC2002), Shanghai, Nov. 2002, pp.791-794
- [19] X.A. Feng, J.G. Huang, Q.F. Zhang, "COHERENT SIGNAL-SUBSPACE FOCUSING TO FREQUENCY-DEPENDENT MODELING FOR DOA ESTIMATION OF WIDE-BAND SOURCES", Proc. of IEEE TENCON'02, Beijing, Oct. 2002, pp.909-912
- [20] 张静远, 金裕红, 张群飞, 刘卫东, “宽带距离-伸缩声成像实验研究”, 鱼雷技术, 第 40 期, 2002 年 12 月, pp.47-50