



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109407055 B

(45) 授权公告日 2023.02.10

(21) 申请号 201811244021.2

(22) 申请日 2018.10.24

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109407055 A

(43) 申请公布日 2019.03.01

(73) 专利权人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市雁塔区太白南路2号

(72) 发明人 张娟 王凯吉 郭玉梅 张林让

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心
61205
专利代理师 王品华 张问芬

(51) Int. Cl.
G01S 7/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 108535698 A, 2018.09.14

CN 107918115 A, 2018.04.17

CN 107450046 A, 2017.12.08

US 2010215081 A1, 2010.08.26

JP 2013245949 A, 2013.12.09

JASON YU. MIMO Adaptive Beamforming for Nonseparable Mu Iti path Clutter Mitigation.《IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS》.2014, 第50卷(第4期),

唐俊林等.毫米波相阵多径信道中的迭代波束成形方法.《西安电子科技大学学报(自然科学版)》.2018, 第45卷(第4期),

审查员 孙礼召

权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

基于多径利用的波束形成方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于多径利用的波束形成方法,主要解决现有技术在低空多径环境中多径相干信号无法有效接收的问题。其实现步骤是:阵列雷达获取回波信号数据,并求接收信号协方差矩阵 R_{xx} ;对接收信号协方差矩阵进行Toeplitz协方差矩阵重构,得到新的协方差矩阵R;对重构后的协方差矩阵进行特征值分解得到噪声子空间 E_N ;根据噪声子空间形成空间谱函数 $S(\theta)$;根据空间谱函数,找出谱峰的峰值点所对应的角度,即为估计出目标的角度;将估计出的目标角度作为波束指向,得到波束形成。本发明方法由于利用估计得到的目标角度作为波束指向进行波束形成,有效利用多径相干信息,提高回波信号的信噪比,可用于对低空多径环境中多径相干信号的有效接收。



1. 一种基于多径利用的波束形成方法,包括如下:

(1) 阵列雷达接收信号,得到回波数据 X ,该回波数据 X 包括直达波信号、多径信号和噪声;

(2) 根据回波数据 X ,计算协方差矩阵 R_{xx} ;

(3) 对协方差矩阵 R_{xx} 进行Toeplitz矩阵重构,得到新的协方差矩阵 R ;

3a) 依次取出与协方差矩阵 R_{xx} 主对角线平行的对角线元素,计算其平均值 $r(-k)$:

$$r(-k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} R_{xx}(i, i+k),$$

其中, N 为阵元个数, $k=0,1,\dots,N-1$;

3b) 根据平均值 $r(-k)$,得到Toeplitz矩阵重构后的协方差矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \cdots & r(N-1) \\ r(-1) & r(0) & \cdots & r(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(-N+1) & r(-N+2) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}_{N \times N};$$

(4) 根据重构后的协方差矩阵 R ,计算波达方向 $\hat{\theta}$;

4a) 对重构协方差矩阵 R 进行特征值分解,得到噪声子空间 E_N :

$$R = E_S \Sigma_S E_S^H + E_N \Sigma_N E_N^H,$$

其中, $(\cdot)^H$ 为共轭转置运算, E_S 指信号子空间, Σ_S 指 R 的大特征值矩阵, Σ_N 指 R 的小特征值矩阵;

4b) 用搜索矢量 $a(\theta)$ 向噪声子空间 E_N 作投影,计算空间谱函数 $S(\theta)$:

$$S(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_N E_N^H a(\theta)},$$

其中, $a(\theta)$ 表示从 θ 方向到达的导向矢量;

4c) 从空间谱函数 $S(\theta)$ 中找出谱峰的峰值点所对应的角度,即为波达方向 $\hat{\theta}$;

(5) 将步骤(4)中估计出的波达方向 $\hat{\theta}$ 作为波束指向,得到波束形成 y :

$$y = W^H X = a(\hat{\theta})^H X,$$

其中, W 为加权向量, $a(\hat{\theta})$ 表示从 $\hat{\theta}$ 方向到达的导向矢量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中(1)中接收阵列得到的回波数据 X ,表示如下:

$$X = [a(\theta_t) + \Gamma a(\theta_r) \exp(-j\varphi)] S + P$$

其中, Γ 为地面或着海面的反射系数,其取值在水平极化和平坦地、海面条件下为 $\Gamma = -1$, $a(\theta_t)$ 、 $a(\theta_r)$ 分别为直达波方向和多径波方向的导向矢量, φ 为直达波与多径波的延迟相位, S 为载波信号, P 为高斯白噪声。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中步骤(2)中得到的协方差矩阵 R_{xx} ,表示如下:

$$R_{xx} = E[XX^H]$$

其中, $E[\cdot]$ 为取均值运算。

基于多径利用的波束形成方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达技术领域,特别涉及一种波束形成方法,可用于对低空多径环境中多径相干信号有效接收。

背景技术

[0002] 雷达在进行低空探测时,回波信号中不仅包含直达波信号,还包括多径波信号。在多径效应的影响下,直达波和多径波互为相干源信号,多径相干干扰会对期望信号,导致信噪比急剧下降,传统波束形成算法性能将快速下降甚至失效,多径效应严重影响着低仰角目标的探测性能。为解决此问题,多径干扰波束形成算法得到广泛地研究,目前,根据对多径干扰的处理方式不同,可分为多径干扰抑制波束形成算法和多径信号接收波束形成算法。

[0003] 所述多径干扰抑制波束形成算法,主要是通过解相干处理或线性约束实现期望信号的有效接收。其中,典型的解相干处理算法是空间平滑算法,该算法可以有效地实现解相干处理,但是牺牲了阵列的有效孔径,且稳健性较差。

[0004] 所述多径信号接收波束形成算法,是对多径信号联合接收,目的是为充分利用多径信号信息。通过在期望信号和多径干扰来向附近施加最差性能约束实现多径信号的联合接收,且具有较好的稳健性,但该算法需估计多径干扰来向,且存在当输入信噪比增加时性能下降、输出信多噪比低的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的是针对上述现有方法的不足,提出一种雷达在低空多径环境下基于多径利用的波束形成的方法,以有效利用多径信息进行波束形成,提高回波信号的信多噪比。

[0006] 为实现上述目的,本发明的技术方案包括如下:

[0007] (1) 阵列雷达接收信号,得到回波数据X,该回波数据X包括直达波信号、多径信号和噪声;

[0008] (2) 根据回波数据X,计算协方差矩阵 R_{xx} ;

[0009] (3) 对协方差矩阵 R_{xx} 进行Toeplitz矩阵重构,得到新的协方差矩阵R;

[0010] 3a) 依次取出与协方差矩阵 R_{xx} 主对角线平行的对角线元素,计算其平均值 $r(-k)$:

$$[0011] \quad r(-k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} R_{xx}(i, i+k),$$

[0012] 其中,N为阵元个数, $k=0,1,\dots,N-1$;

[0013] 3b) 根据平均值 $r(-k)$,得到Toeplitz矩阵重构后的协方差矩阵R;

$$[0014] \quad R = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \cdots & r(N-1) \\ r(-1) & r(0) & \cdots & r(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(-N+1) & r(-N+2) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}_{N \times N};$$

[0015] (4) 根据重构后的协方差矩阵R, 计算波达方向 $\hat{\theta}$;

[0016] 4a) 对重构协方差矩阵R进行特征值分解, 得到噪声子空间 E_N ;

$$[0017] \quad R = E_S \Sigma_S E_S^H + E_N \Sigma_N E_N^H,$$

[0018] 其中, $(\cdot)^H$ 为共轭转置运算, E_S 指信号子空间, Σ_S 指R的大特征值组成的对角阵, Σ_N 指R的小特征值组成的对角阵;

[0019] 4b) 用搜索矢量 $a(\theta)$ 向噪声子空间 E_N 作投影, 计算空间谱函数 $S(\theta)$;

$$[0020] \quad S(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_N E_N^H a(\theta)},$$

[0021] 其中, $a(\theta)$ 表示从 θ 方向到达的导向矢量;

[0022] 4c) 从空间谱函数 $S(\theta)$ 中找出谱峰的峰值点所对应的角度, 即为波达方向 $\hat{\theta}$;

[0023] (5) 将步骤(4)中估计出的目标角度 $\hat{\theta}$ 作为波束指向, 得到波束形成 y ;

$$[0024] \quad y = W^H X = a(\hat{\theta})^H X,$$

[0025] 其中, W 为加权向量, $a(\hat{\theta})$ 表示从 $\hat{\theta}$ 方向到达的导向矢量。

[0026] 本发明与现有技术相比, 具有以下优点:

[0027] 1、目标搜索范围更加准确

[0028] 本发明通过利用估计得到的目标波达方向角度作为波束指向, 极大的减小了目标的搜索范围, 使得目标搜索范围更加准确。

[0029] 2、能有效接收多径相干信号

[0030] 为减弱多径效应对波束形成的影响, 传统方法采取抑制多径效应的方法。本发明充分利用多径相干信号的来波信息, 通过对回波信号进行协方差矩阵重构及MUSIC角度估计, 利用估计得到的目标角度作为波束指向, 进行波束形成, 因而在低空多径的情况下, 能有效解决多径相干信号接收问题, 适用范围较广。

[0031] 仿真结果表明, 本发明明显提高了回波信号的信多噪比。

附图说明

[0032] 图1是本发明的实现流程图;

[0033] 图2是在信噪比为-10dB时, 仿真本发明中使用Toeplitz矩阵重构解相干后的角度估计结果图;

[0034] 图3是在信噪比为-10dB时, 仿真常规波束形成方法与本发明方法的方向增益对比图;

[0035] 图4是本发明中使用Toeplitz矩阵重构解相干的方法对目标进行波达方向估计, 仿真估计角度个数随输入信噪比变化的结果图;

[0036] 图5是用常规的波束形成方法、自适应波束形成和本发明波束形成方法,仿真输出信多噪比随输入信噪比变化的比较图。

具体实施方式

[0037] 参照图1,本发明的具体实现步骤如下:

[0038] 步骤1:获取雷达回波数据。

[0039] 假设接收阵列为N阵元的均匀线阵,阵元间隔d为半波长,信源为直达波和多径波的合成,则阵列雷达接收信号,得到的回波数据X包括直达波信号、多径信号和噪声,其表示如下:

$$[0040] \quad X = [a(\theta_t) + \Gamma a(\theta_r) e^{-j\varphi}] S + P$$

[0041] 其中, Γ 为地面或着海面的反射系数,其取值在水平极化和平坦地、海面条件下为 $\Gamma = -1$, $a(\theta_t)$ 为直达波方向的导向矢量, $a(\theta_r)$ 多径波方向的导向矢量, φ 为直达波与多径波的延迟相位,S为载波信号,P为高斯白噪声。

[0042] 步骤2:根据回波数据X,计算协方差矩阵 R_{xx} :

$$[0043] \quad R_{xx} = E[XX^H]$$

[0044] 其中, $(\cdot)^H$ 为共轭转置运算, $E[\cdot]$ 为取均值运算。

[0045] 步骤3:对协方差矩阵 R_{xx} 进行Toeplitz矩阵重构,得到新的协方差矩阵R。

[0046] 3a) 依次取出与协方差矩阵 R_{xx} 主对角线平行的对角线元素,计算其平均值 $r(-k)$:

$$[0047] \quad r(-k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} R_{xx}(i, i+k),$$

[0048] 其中,N为阵元个数, $k=0,1,\dots,N-1$;

[0049] 3b) 根据平均值 $r(-k)$ 的共轭反特性: $r(-k) = r^*(k)$,计算得到 $2N-1$ 个平均值:

$$[0050] \quad \{r(-N+1), r(-N+2), \dots, r(0), \dots, r(N-2), r(N-1)\}$$

[0051] 其中, $(\cdot)^*$ 为共轭运算;

[0052] 3c) 根据得到的 $2N-1$ 个平均值,得到Toeplitz矩阵重构后的协方差矩阵R:

$$[0053] \quad R = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & r(2) & \cdots & r(N-1) \\ r(-1) & r(0) & r(1) & \cdots & r(N-2) \\ r(-2) & r(-1) & r(0) & \cdots & r(N-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(-N+1) & r(-N+2) & r(-N+3) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}_{N \times N}。$$

[0054] 步骤4:根据重构后的协方差矩阵R,计算波达方向 $\hat{\theta}$:

[0055] 4a) 对重构协方差矩阵R进行特征值分解,得到噪声子空间 E_N :

$$[0056] \quad R = E_S \Sigma_S E_S^H + E_N \Sigma_N E_N^H,$$

[0057] 其中, E_S 指信号子空间, Σ_S 指R的大特征值组成的对角阵, Σ_N 指R的小特征值组成的对角阵;

[0058] 4b) 用搜索矢量 $a(\theta)$ 向噪声子空间 E_N 作投影,计算空间谱函数 $S(\theta)$:

[0059]
$$S(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)E_N E_N^H a(\theta)},$$

[0060] 其中, $a(\theta)$ 表示从 θ 方向到达的导向矢量,

$a(\theta) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}2d\sin\theta}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d\sin\theta}]^T$, 其中 d 为阵元间距, λ 为信号波长, $(\cdot)^T$ 表示转置操作;

[0061] 4c) 从空间谱函数 $S(\theta)$ 中找出谱峰的峰值点所对应的角度, 即为波达方向 $\hat{\theta}$:

[0062]
$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} S(\theta)$$

[0063] 完成雷达低空目标相干信源DOA估计。

[0064] 步骤5: 将步骤(4)中估计出目标角度 $\hat{\theta}$ 作为波束指向, 得到波束形成 y 。

[0065] 5a) 根据估计目标角度 $\hat{\theta}$, 得到 $\hat{\theta}$ 方向到达的导向矢量 $a(\hat{\theta})$:

[0066]
$$a(\hat{\theta}) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\hat{\theta}}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}2d\sin\hat{\theta}}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d\sin\hat{\theta}}]^T,$$

[0067] 其中, d 为阵元间距, λ 为信号波长, $(\cdot)^T$ 表示转置操作;

[0068] 5b) 获得波束形成输出 y :

[0069] 波束形成是用一定形状的波束来通过有用信号或需要方向的信号, 并抑制不需要方向的干扰, 可通过将各阵元输出进行加权求和, 在一段时间内将天线阵列波束“导向”到一个方向上, 即可获得波束形成输出 y :

[0070]
$$y = W^H X,$$

[0071] 其中, W 为阵列加权向量;

[0072] 5c) 将 $\hat{\theta}$ 作为波束指向, 使 $W = a(\hat{\theta})$, 得到波束形成 y :

[0073]
$$y = a(\hat{\theta})^H X,$$

[0074] 其中, $(\cdot)^H$ 为共轭转置运算。

[0075] 本发明的效果可通过以下仿真实验进一步验证。

[0076] 1. 实验场景:

[0077] 以一组阵元个数为32的均匀线阵为例进行仿真, 阵元间距为半波长, 载频为 $f_0 = 4\text{GHz}$, 天线高度为29m, 目标高度为142m, 目标距离为10Km, 带宽为50MHz, 多径波信号与直达波信号的距离差为0.8236m, 反射系数幅值0.9, 相位 160° , 直达波信号来波角度为 0.6475° , 多径波信号来波角度为 -0.9797° , 直达波信号与多径波信号的来波角度差为 1.6272° 。

[0078] 2. 实验内容和实验结果分析:

[0079] 实验1, 在快拍数为256、信噪比为-10dB的条件下, 通过Toeplitz协方差矩阵重构以及MUSIC谱估计方法对目标进行波达方向估计, 其结果如图2所示; 然后用估计得到的目标角度作波束指向进行波束形成, 仿真常规波束形成方法与本发明波束形成方法的方向增益对比图, 其结果如图3所示。

[0080] 从图2和3可见: 估计得到的角度估计为 0.044° , 相比起直达波角度 0.6475° 和多径波角度 -0.9797° , 解相干后的角度更接近于直达波角度; 与常规波束形成方法相比, 本发明

由于利用估计得到的目标角度作为波束指向进行波束形成,使得在目标方向具有较高的方向增益,可以更好的接收直达波信号。

[0081] 实验2,在快拍数为1024、输入信噪比的范围为-25dB到10dB且步长为2dB的条件下,通过Toeplitz协方差矩阵重构以及MUSIC谱估计方法对目标进行波达方向估计,进行100次Monte-Carlo仿真实验,仿真估计角度个数随输入信噪比的变化,其结果如图4所示。

[0082] 从图4可见:在输入信噪比的范围为-25dB到-14dB时,通过Toeplitz矩阵重构解相干后的估计角度在直达波信号来波角度和多径波信号来波角度之间,且个数为1。而在输入信噪比的范围为-14dB到10dB时,通过Toeplitz矩阵重构解相干后的估计角度在直达波信号来波角度和多径波信号来波角度之间,且个数为2。

[0083] 实验3,在快拍数为1024、输入信噪比的范围为-25dB到10dB且步长为2dB的条件下,分别用常规波束形成、自适应波束形成和本发明多径利用波束形成的方法,仿真输出信多噪比随输入信噪比的变化,进行100次Monte-Carlo仿真实验,其结果如图5所示。

[0084] 从图5可见:本发明波束形成方法的输出信多噪比性能随着信噪比的提高而提高。与常规波束形成和自适应波束形成方法相比,本发明波束形成方法的输出信多噪比高于前两种方法。



图1

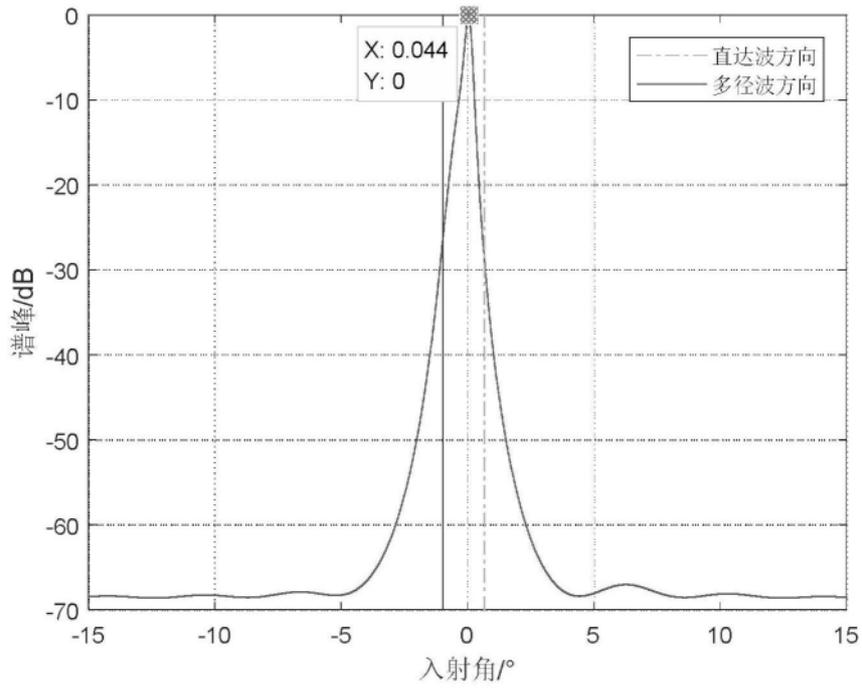


图2

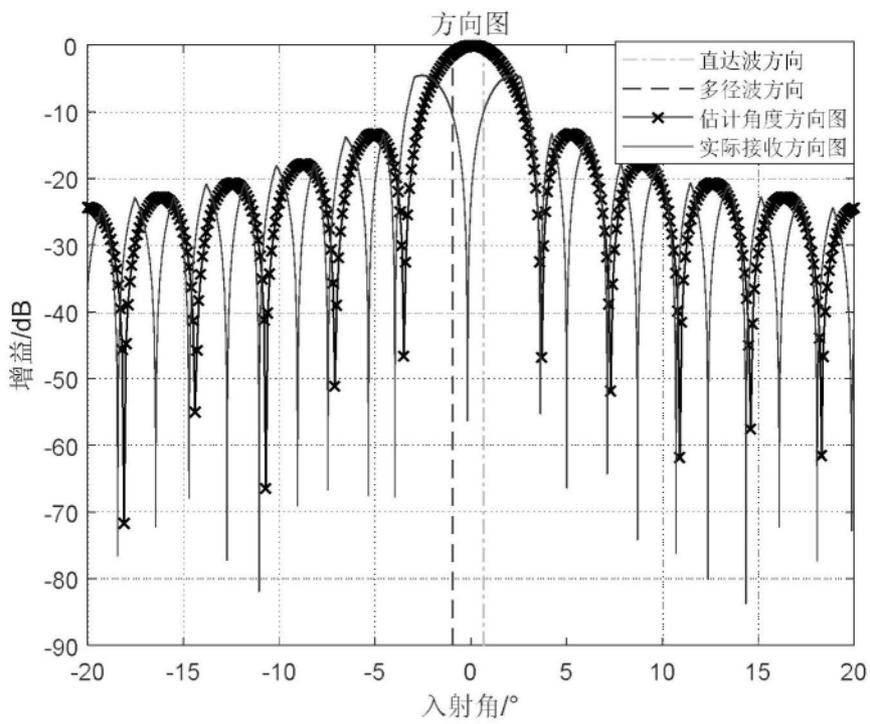


图3

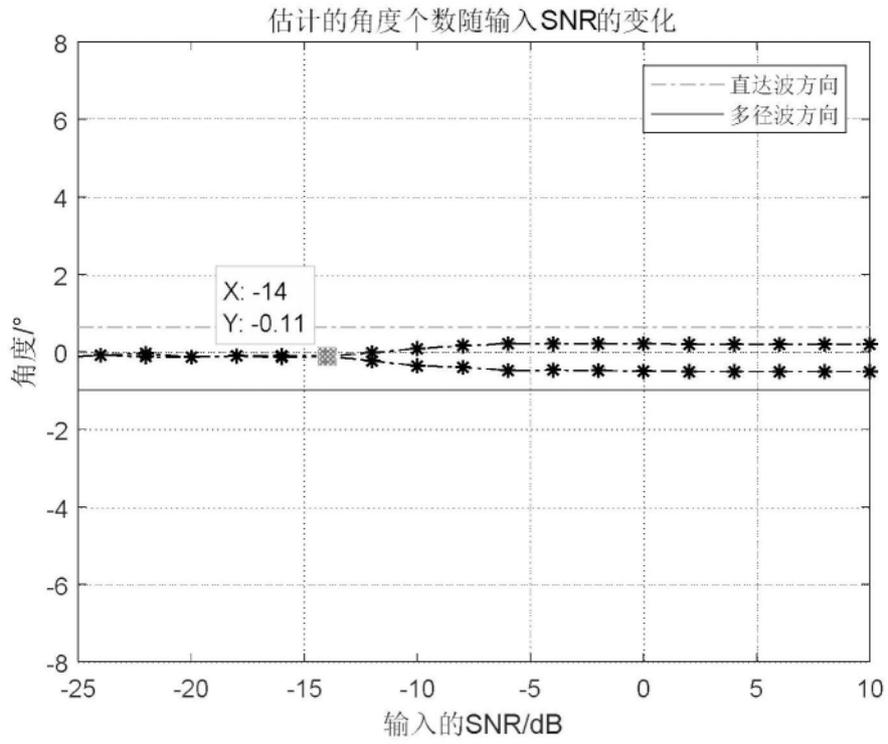


图4

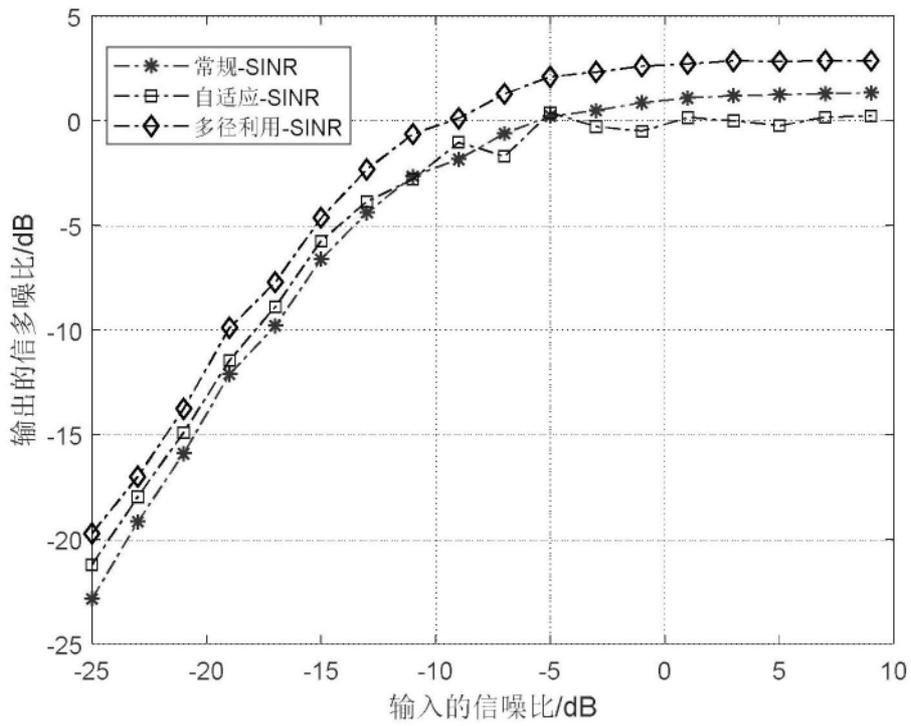


图5