

文章编号: 0253-2239(2003)05-0534-07

互换式幅度相消定位方案性能分析*

吴龟灵

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

骆清铭 穆晨鹏 刘贤德

(华中科技大学生物医学光子学教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 用解析模型详细、深入的分析了更接近实际的非理想情况下新的幅度相消定位方案(互换式幅度相消定位)的性能;分析了探测系统的分辨率和灵敏度有限及非完全交换时交换式幅度相消定位方案的定位性能;讨论了非完全交换时系统参量和异质子参量对其定位能力的影响。结果表明:新方法可减小相对幅度和相位及异质子参量对系统的影响,明显地提高定位精度,探测到尺度和吸收系数更小、深度更深的异质子。

关键词: 信息处理技术; 相位调制光谱仪; 幅度相消; 光子密度波; 空间定位

中图分类号: TN911.74 文献标识码: A

1 引 言

组织中微小异质子的精确定位一直是临床医学检测所面临的一个重要问题。核磁共振成像(MRI-Magnetic Resonance Imaging)可以达到很高的成像分辨率,但具有需要大磁场、不适于某些特殊人群且价格昂贵等缺点。相比而言,光学方法具有简单、经济、无损、便携等优点。随着对组织中光子输运理论的深入了解,用近红外光对大体积组织中异质子的定位和成像技术已成为可能^[1~3]。因此,近年来该技术引起了广泛的关注。由于多次散射效应,直接光学投影成像不能得到清晰的图像^[1,3],而目前普通的散射光子成像需要多个源-探测器对,以及复杂的、耗费大量计算时间的算法^[2,4]。为此,Knüttel等提出了利用光子密度波的干涉效应实现精确定位的幅度相消定位技术^[5,6],又称为相位阵列(Phased-array)系统。研究表明:该系统比单光源系统更加灵敏,而且包含更多的信息^[8],因而吸引很多国内外同行的注意^[7,9,10,11]。进一步的研究表明^[12,13]:当不满足幅度相消条件时,上述的幅度相消定位系统的探测灵敏度和定位精度下降。尤为重要的是,不满足幅度相消条件时,系统对小尺度或与背景光学参

量相差不大的异质子的探测灵敏度和定位精度下降。这将限制该系统在肿瘤早期诊断中的应用。因为,早期的肿瘤一般都对应着小尺度及与背景光学参量相差不大的异质子。不满足幅度相消条件的另一个负面影响是相位跃变点与“零线”的偏离。这种效应可通过定标进行校正^[7,9]。但是,这种影响与背景的光学参量有关,而不同的对象的光学参量是未知的且是变化的。因此,很难精确定标。

为了消除相对幅度和相位对上述幅度相消定位技术的定位性能的影响,我们提出了一种新的幅度相消定位方案^[12,13],并称其为互换式幅度相消定位。与普通的幅度相消相位调制定位方法相比,该方法中,使用了两对相同的等幅、反相射频调制信号。在系统扫描测量的过程中,探测器始终位于两光源间的中心线上,在每一个扫描点进行两次测量。第二次测量中两光源的调制信号与前一次测量中的互换,图 1(a)为其系统结构示意图。初步的研究表明:在实际探测系统的灵敏度和分辨率无限大及两次测量完全交换的理想情况下,该定位方法不受两光源间的相对幅度和相位的影响,在探测系统的可分辨范围内也与异质子的尺度及其与背景的吸收系数的差别无关。

本文将对更接近实际的非理想情况下新的幅度相消定位方案的性能进行详细、深入的分析。文章的结构安排如下:第 2 部分描述了幅度相消定位系统的解析模型。第 3 部分给出了模拟结果和讨论。首先,分析了探测系统的分辨率和灵敏度有限时幅度相消

* 国家自然科学基金(69778004,59836240)和国家杰出青年基金(60025514)资助课题。

E-mail: ibp@mail.hust.edu.cn; ibpwugl@sohu.com

收稿日期:2002-03-18; 收到修改稿日期:2002-05-31

定位方案的定位性能;然后分析了非完全交换时交换式幅度相消定位方案的定位性能,及此时系统参量和异质子参量对其定位能力的影响。最后是总结。

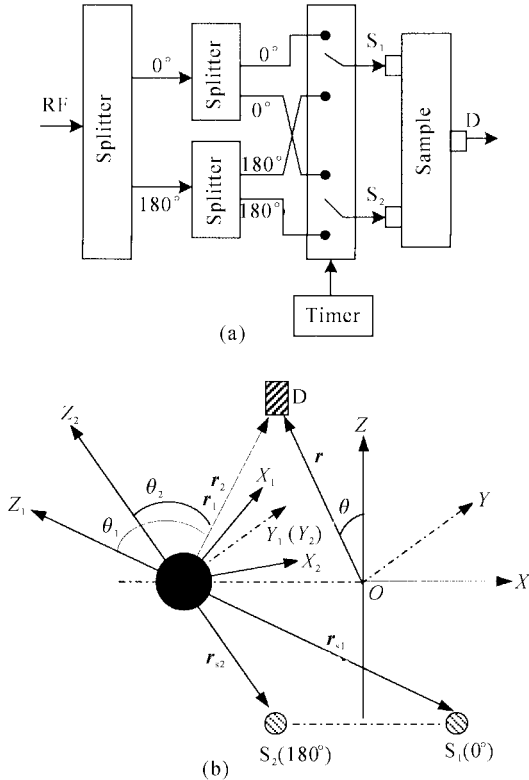


Fig.1 (a) The detection geometry of the interchange amplitude cancellation localization scheme; (b) The spherical coordinate for analytical model

2 理 论

在以前的文章,我们中已给出了幅度相消系统的解析模型的详细描述。此处,只是给出解析模型的简单描述,具体可参考文献[12,13]。高散射介质(如生物组织)中光子的传输可由玻尔兹曼输运方程的扩散近似来很好地描述。频域中的扩散方程为^[14]

$$(\nabla^2 + k^2)\phi(\mathbf{r}) + \frac{1}{D}S_0(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

其中, $\phi(\mathbf{r})$ 为光辐射强度; $S_0(\mathbf{r})$ 为各向同性光源的空间分布; k 为波数:

$$k^2 = \frac{-\mu_a c + i\omega}{vD}, \quad (2)$$

$D = (\mu_a + \mu'_s)/3$ 为扩散系数; μ_a 和 μ'_s 分别为吸收系数和约化散射系数; ω 为调制角频率; v 为介质中的光速。大体积组织中异质子的探测问题可近似为无限大介质中球形异质子的探测问题^[14]。在相位阵列系统模拟中,先在不同的坐标系下考虑单个光源,然后,通过坐标变换将两个坐标系下的结果变换到同

一坐标系下并叠加得到总的结果。利用角向对称性,只有光源 S_1 时,在 $X_1 Y_1 Z_1$ 坐标系下[如图1(b)所示],(1)式在异质子外的通解为^[14]

$$\phi_{\text{out}}(\mathbf{r}_1) = \phi_{\text{inc}}(\mathbf{r}_1) + \phi_{\text{sca}}(\mathbf{r}_1), \quad (3)$$

其中:

$$\phi_{\text{inc}}(\mathbf{r}_1) = \frac{S_{\text{AC}}}{4\pi D_{\text{out}} |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{s1}|} \exp(ik_{\text{out}} |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{s1}|), \quad (4)$$

为无限大均匀介质中方程(1)的解,

$$S_{\text{AC}} = |S_{\text{AC}}| \exp(i\varphi_0),$$

$|S_{\text{AC}}|$ 为光源的调制幅度, D_{out} 为球外介质的扩散系数, $\mathbf{r}_1 = (r_1, \theta_1, \phi_1)$ [$\mathbf{r}_{s1} = (r_{s1}, \pi, 0)$]为异质球的球心(坐标原点)到探测器(光源)的矢量。

$$\phi_{\text{sca}}(\mathbf{r}_1) =$$

$$\sum_l [A_{l,0} j_l(k_{\text{out}} r_1) + B_{l,0} n_l(k_{\text{out}} r_1)] Y_{l,0}(\theta_1, \phi_1) \quad (5)$$

为散射波; $j_l(x)$ 、 $n_l(x)$ 分别为球形贝塞尔和诺依曼函数; $Y_{l,0}(\theta, \phi)$ 为球谐函数; k_{out} 、 k_{in} 为球外和球内的复波数,由边界条件和球谐函数的正交性可得

$$A_{l,0} = -i \frac{S_{\text{AC}} k_{\text{out}}}{D_{\text{out}}} H_l^{(1)}(k_{\text{out}} r_{s1}) Y_{l,0}^*(\pi, 0) \times \left\{ \frac{D_{\text{out}} x j_l'(x) j_l(y) - D_{\text{in}} y j_l(x) j_l'(y)}{D_{\text{out}} x [H_l^{(1)}(x)]' j_l(y) - D_{\text{in}} y H_l^{(1)}(x) j_l'(y)} \right\}, \quad (6)$$

$$B_{l,0} = iA_{l,0}, \quad (7)$$

其中, $x = k_{\text{out}} a$ 、 $y = k_{\text{in}} a$, a 为球的半径, $Y_{l,0}^*(\theta, \phi)$ 为球谐函数 $Y_{l,0}(\theta, \phi)$ 的复共轭函数。 $H_l^{(1)}(x)$ 为一阶汉开尔函数; j_l' 和 $[H_l^{(1)}]'$ 为 j_l 和 $H_l^{(1)}$ 对相应宗量的一阶导数。

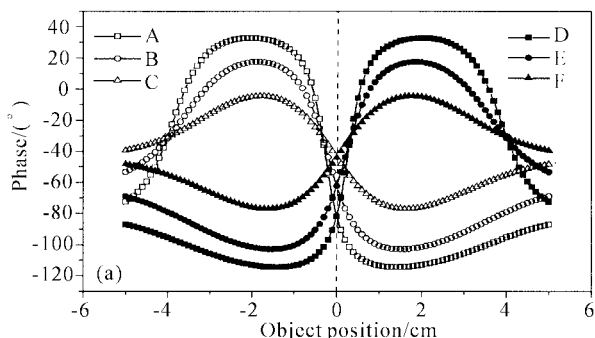
只有光源 S_2 时,有类似的表达式。共同的坐标系 XYZ 如图1(b)所示。其 $X-Z$ 平面与两光源的中心和异质子的球心确定的平面重合且 Z -轴为该平面内两光源的中线, X -轴通过异质子的球心。

3 模拟结果和讨论

3.1 探测系统的分辨率有限时新方法的定位性能

实际探测系统的灵敏度和分辨率有限时,跃变斜率越低,探测系统所能分辨的相邻点的间距越大,定位精度就越低。由于幅度和相位的跃变斜率随两光源间的相对幅度和相位与幅度相消条件的偏移的增大而下降,因此,要实现较精确的定位就必须将两光源间的相对幅度和相位与相消条件间的偏移限制在一定的范围内。图2为不同的相对幅度和相位下,两次交换测量输出的相位与半径为2 mm、 $\mu_a = 2 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\mu'_s = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 的异质子位置间的关

系。表 1 给出了图 2 中相应交叉点附近相位跃变的斜率及相位探测器的精度为 0.1° (实际中一般可达到) 时可达到的定位精度。模拟中, 背景的光学参量为 $\mu'_s \approx 5.0 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_a \approx 0.02 \text{ cm}^{-1}$; 球形异质子的半径为 2 mm, 与探测平面的距离为 4 cm, 其光学参量为: $\mu_a = 2 \text{ cm}^{-1}$, $\mu'_s = 0.01 \text{ cm}^{-1}$; 两光源间距为 4 cm, 光源与探测器间距为 8 cm; 光源的调制频率为 50 MHz, 介质中的光速为 $v = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。



可见, 当相对相位对 180° 的偏离 $< \pm 2^\circ$ 且

$$(|S_{AC2}| - |S_{AC1}|) / |S_{AC1}| < \pm 5\%$$

时, 异质子在交点附近引起的相位跃变的斜率仍 $> 4^\circ/\text{mm}$ 。实际中, 将幅度和相位的偏离控制在上述范围内是可以实现的。此时, 对该异质子的定位精度可达 0.025 mm。由表 1 还可发现相对幅度的变化对定位精度的影响更大。

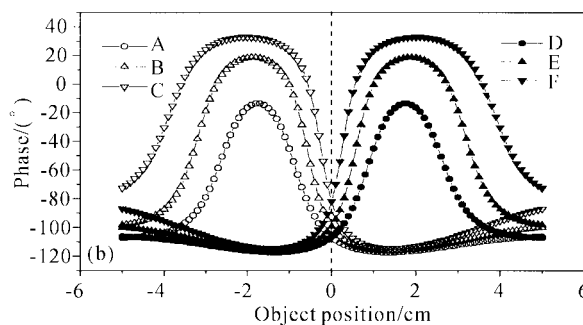


Fig. 2 The phase as a function of the object ($\mu_a = 2 \text{ cm}^{-1}$, $\mu'_s = 0.01 \text{ cm}^{-1}$, the radius is 2 mm) position for the different relative amplitude and phase between two sources. (a) The relative amplitude, $|S_{AC2}/S_{AC1}|$, is 1.02, the phase difference between two sources is 181° (A,D), 182° (B,E), 185° (C,F), respectively; (b) The phase difference is 181° , the $|S_{AC2}/S_{AC1}|$ is 1.06 (A,D), 1.04 (B,E), 1.02 (C,F), respectively

Table 1 The slope of phase transition and available precision arisen by the object with the same parameters in the cross point for different relative amplitude and phase

Relative amplitude/ mm	Relative phase/ $^\circ$	Slope in the cross point/ $^\circ/\text{mm}$	Available precision/ mm
1.02	181	10.44	0.010
1.02	182	8.832	0.011
1.02	185	4.072	0.025
1.04	181	4.373	0.023
1.06	181	2.395	0.042

Table 2 The slope of phase transition and available precision arisen by the object with different radius and absorption for $S_{AC2}/S_{AC1} = 1.02 \exp(i\pi 182/180)$

Radius/ mm	Absorption coefficient/ cm^{-1}	Slope in the cross point/ $^\circ/\text{mm}$	Available precision/ mm
0.8	2	2.171	0.046
1	2	3.214	0.031
2	2	8.832	0.011
3	2	15.027	0.007
2	0.65	1.723	0.058
2	0.8	3.006	0.033
2	1.2	6.034	0.017

另外, 当两光源间的相对幅度和相位与相消条件间的偏移一定时, 实际探测系统对斜率的要求也限制了新方法可探测的异质子的尺寸及其与背景间的光学参量的差值。这是因为随着异质子的尺寸及其与背景间的光学参量的差值的减小, 两次测量中的幅度和相位的跃变斜率都会下降^[12,13]。表 2 是当 $S_{AC2}/S_{AC1} = 1.02 \exp(i\pi 182/180)$, 调制频率为 50 MHz 时, 由模拟结果得到的不同半径和吸收系数的异质子在交点附近引起的相位跃变的斜率及相位探测器的精度为 0.1° 时可达到的定位精度。模拟所用其它参量同表 1。

3.2 非完全交换时新方法定位性能分析

前面的所有讨论都是在两次交换完全对称的假设下, 即第二次测量中两光源的调制幅度和相位与第一次的完全交换的条件下进行的。显然, 这只是一种理想的状况。实际中, 交换不可能是完全对称的。下面将讨论这种情况下新方法的定位性能。

3.2.1 非完全交换对新方法定位精度的影响

图 3 是当第一次测量与第二次测量不对称时中心点输出相位与半径为 2 mm、光学参量为 $\mu_a = 2 \text{ cm}^{-1}$, $\mu'_s = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 的异质子的位置的关系。

两图中,第一次测量时,两光源间的关系均为: $S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)(A)$ 。图 3(a)为第二次测量中两光源的相位与第一次的完全互换,而幅度互换有偏差时的结果,交换后的幅度比 $|S_{AC1}/S_{AC2}|$ 分别为 1.01(B)、1.02(A')、1.03(C);图 3(b)为第二次测量中两光源间的幅度与第一次的完全互换而相位不完全互换时的结果,交换后光源间的关系分别为

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.02\exp(i\pi 181/180)(B),$$

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.02\exp(i\pi 182/180)(A'),$$

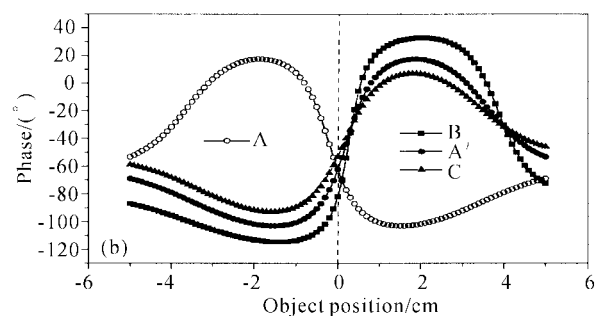
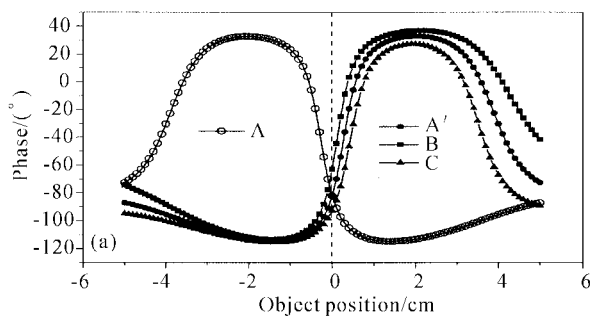


Fig. 3 The relationship between the output phase and the position of the object ($\mu_a=2\text{ cm}^{-1}$, $\mu'_s=0.01\text{ cm}^{-1}$, the radius is 2 mm) when the interchange between two measurements is asymmetric. (a) The phases of two sources, the amplitudes are not; (b) The amplitudes of two sources are completely interchanged, the two phase are not

由此可见,若交换后的幅度比($|S_{AC1}/S_{AC2}|$)和相位差均大于(或小于)交换前的幅度比和相位差则幅度和相位交换的不对称性引起的交点偏移相反,从而使二者的影响互相抵消,如图 4 所示。图 4 中,第一次测量中,

$$S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)(A),$$

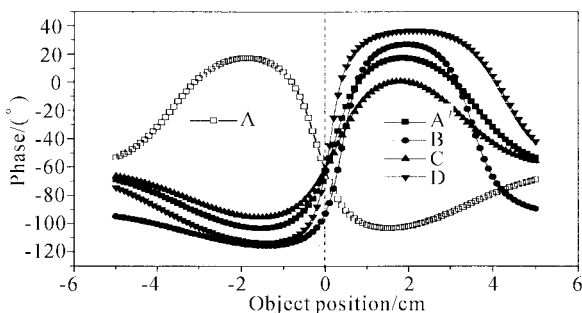


Fig. 4 The phase as a function of the object ($\mu_a=2\text{ cm}^{-1}$, $\mu'_s=0.01\text{ cm}^{-1}$, the radius is 2 mm) position when both amplitudes and phases between two sources are not completely interchanged. A for the complete interchange; C(D) for the case where both the amplitude and phase in the second measurement are great than (less than) that in the first time; B for the case while the changes of the amplitudes and phases are inverse

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.02\exp(i\pi 183/180)(C),$$

图 3(a)、图 3(b)表明:当两次测量中光源的幅度或相位不完全交换时,两次测量曲线的交点都将偏离中心点,从而导致定位误差。同时,由图 3(a)的结果可见,当交换后幅度比($|S_{AC1}/S_{AC2}|$)大于交换前的幅度比($|S_{AC2}/S_{AC1}|$)时,两次测量的交点偏向右,反之偏向左。图 3(b)的结果则表明:第一次测量的相位差小于第二次测量的相位差时,两次测量的交点偏向左,反之偏向右。

第二次测量中,光源间的相互关系分别为

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.02\exp(i\pi 182/180)(A'),$$

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.03\exp(i\pi 181/180)(B),$$

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.03\exp(i\pi 183/180)(C),$$

$$S_{AC1}/S_{AC2}=1.01\exp(i\pi 181/180)(D).$$

图 4 中曲线(C)、(D)表明:在一定范围内,两次测量中幅度和相位交换不对称性的影响确实可以相互补偿,从而可提高定位精度,而另一方面,若幅度和相位交换不对称性的影响相互增强的话,则定位精度将明显下降[曲线(B)]。

3.2.2 非完全交换时异质子参量对新方法定位精度的影响

当两次测量的交换对称时,异质子参量对新方法的定位精度的影响表现为对跃变斜率的影响,这在前面已的讨论过。下面主要讨论交换不对称时异质子参量对新方法定位精度的影响。

1) 幅度和相位的作用不能相互补偿时

图 5 给出了两次交换测量中幅度和相位交换的不对称性的影响不能相互补偿时,透射式测量中,异质子的吸收系数、尺度、空间位置对系统定位精度的影响。两次测量中,光源调制信号间的关系分别为 $S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)$ (图中下标为 1 的曲

线)和 $S_{AC1}/S_{AC2}=1.03\exp(i\pi 181/180)$ (图中下标为 2 的曲线)图 5(a)中,异质子的吸收系数为 2 cm^{-1} ,半径分别为 $2\text{ mm}(A_1, A_2)$ 、 $1\text{ mm}(B_1, B_2)$,与源平面的间距为 4 cm 。图 5(b)中,异质子的吸收系数分别为 $2\text{ cm}^{-1}(A_1, A_2)$ 、 $0.8\text{ cm}^{-1}(B_1, B_2)$ 、半径为 2 mm ,与源平面的间距为 4 cm 。图 5(c)中,异质子的吸收系数为 2 cm^{-1} ,半径为 2 mm ,与源平面分别为 $1\text{ cm}(A_1, A_2)$ 、 $3\text{ cm}(B_1, B_2)$ 、 $5\text{ cm}(C_1, C_2)$ 、 $7\text{ cm}(D_1, D_2)$ 。三种情况下,源与探测面间距、异质子的约化散射系

数均为 8 cm 和 0.01 cm^{-1} 。系统的其它参量和背景光学参量同前。由图可见,随异质子吸收系数、半径的下降,两次交换测量的交点与中心点的偏离量增加,交点处的跃变斜率也下降,而且都变化得非常明显。这将使系统的定位能力下降。随异质子与源平面间间距的增加,两次交换测量的交点与中心点的偏离量先增加后下降,其原因同单次测量一样。同时,由图可见,异质子与源平面的距离对偏移量的影响与吸收系数或半径的影响相比要小的多。

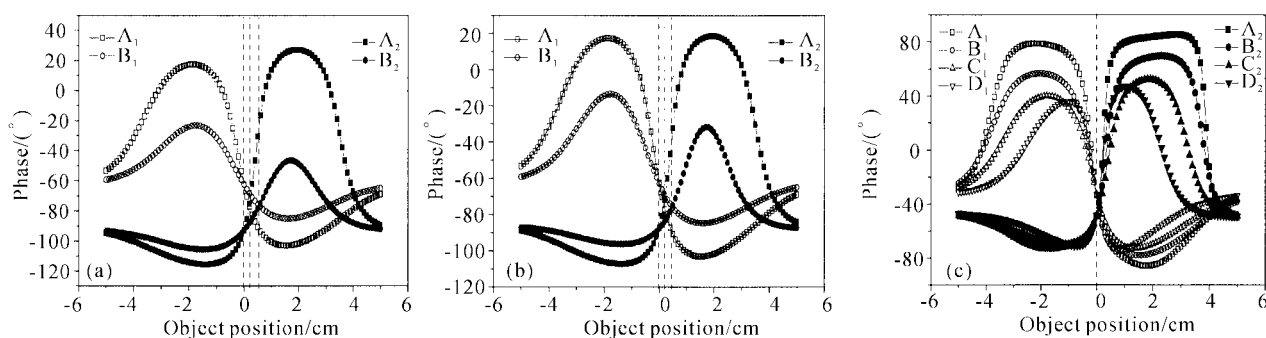


Fig. 5 The output phase as a function of the object with different parameters when $S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)$ (with subscript 1), $S_{AC1}/S_{AC2}=1.03\exp(i\pi 181/180)$ (with subscript 2), and the distance between the source and the detection plane is 8 cm . (a) The radius is $2\text{ mm}(A_1, A_2)$, $1\text{ mm}(B_1, B_2)$ respectively, the absorption coefficient is 2 cm^{-1} , the deep is 4 cm ; (b) The absorption coefficient is $2\text{ cm}^{-1}(A_1, A_2)$, $0.8\text{ cm}^{-1}(B_1, B_2)$ respectively, the radius is 2 mm , the deep is 4 cm ; (c) The deep is $1\text{ cm}(A_1, A_2)$, $3\text{ cm}(B_1, B_2)$, $5\text{ cm}(C_1, C_2)$, $7\text{ cm}(D_1, D_2)$, respectively, the radius is 2 mm , the absorption is 2 cm^{-1} . The scattering constant scattering coefficient is a constant, 0.01 cm^{-1}

2) 幅度和相位的作用相互补偿时

图 6 为两次交换测量中,幅度和相位交换的不对称性的影响相互补偿时,透射式测量中,异质子的吸收系数、尺度及空间位置对系统定位精度的影响。两次测量中光源调制信号间的关系分别为 $S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)$ (图中下标为 1 的

曲线)和 $S_{AC1}/S_{AC2}=1.01\exp(i\pi 181/180)$ (图中下标为 2 的曲线)。图 6(a)中,异质子的吸收系数分别为 2 cm^{-1} ,半径分别为 $2\text{ mm}(A_1, A_2)$ 、 $1\text{ mm}(B_1, B_2)$ 、 $0.5\text{ mm}(C_1, C_2)$,与源平面的间距为 4 cm 。图 6(b)中,异质子的吸收系数分别为 $2\text{ cm}^{-1}(A_1, A_2)$ 、 $1\text{ cm}^{-1}(B_1, B_2)$ 、 $0.6\text{ cm}^{-1}(C_1, C_2)$,半径

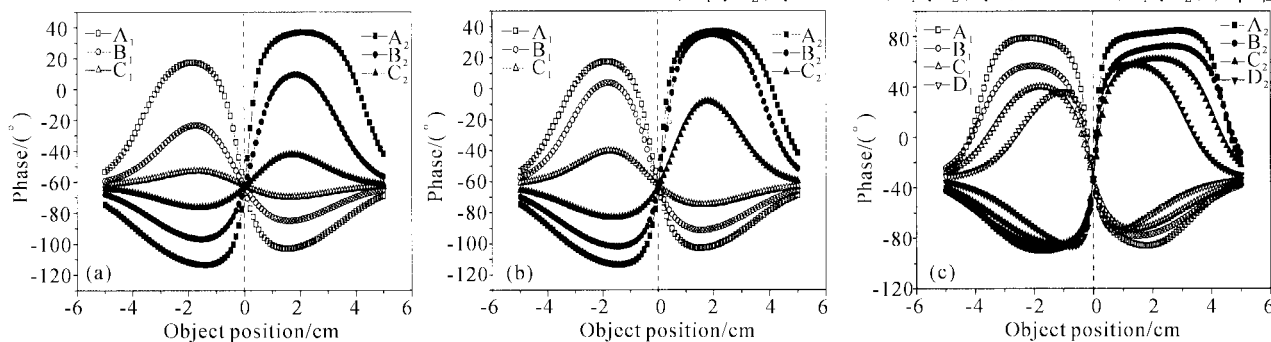


Fig. 6 The output phase as a function of the object with different parameters when $S_{AC2}/S_{AC1}=1.02\exp(i\pi 182/180)$, $S_{AC1}/S_{AC2}=1.01\exp(i\pi 181/180)$. (a) The radius is $2\text{ mm}(A_1, A_2)$, $1\text{ mm}(B_1, B_2)$, $0.5\text{ mm}(C_1, C_2)$, respectively; (b) the absorption coefficient is $2\text{ cm}^{-1}(A_1, A_2)$, $1\text{ cm}^{-1}(B_1, B_2)$, $0.6\text{ cm}^{-1}(C_1, C_2)$, respectively; (c) The deep is $1\text{ cm}(A_1, A_2)$, $3\text{ cm}(B_1, B_2)$, $5\text{ cm}(C_1, C_2)$, $7\text{ cm}(D_1, D_2)$, respectively. The other parameters are same as Fig. 5

为 2 mm, 与源平面的间距为 4 cm。图 6(c) 中, 异质子的吸收系数为 2 cm^{-1} , 半径为 2 mm, 与源平面分别为 1 cm (A_1, A_2)、3 cm (B_1, B_2)、5 cm (C_1, C_2)、7 cm (D_1, D_2)。三种情况下, 源与探测面间距、异质子的约化散射系数均为 8 cm 和 0.01 cm^{-1} 。其它系统参量和背景参量同前。由图可见, 当两次测量中幅度和相位交换的不对称性的影响相互补偿时, 两次测量的交点几乎不受异质子的吸收系数、尺度及与光源面间距的影响, 并且总是在中心点附近 ($< 0.1 \text{ mm}$)。对中心点较小的偏移意味着定位精度的提高, 而与未知的异质子参量无关则意味着满足该条件时的系统定标不随这些未知参量的改变而改变。因此, 与单次测量的定标相比更有实际意义。

图 7 为反射式探测结构中, 中心点输出相位与

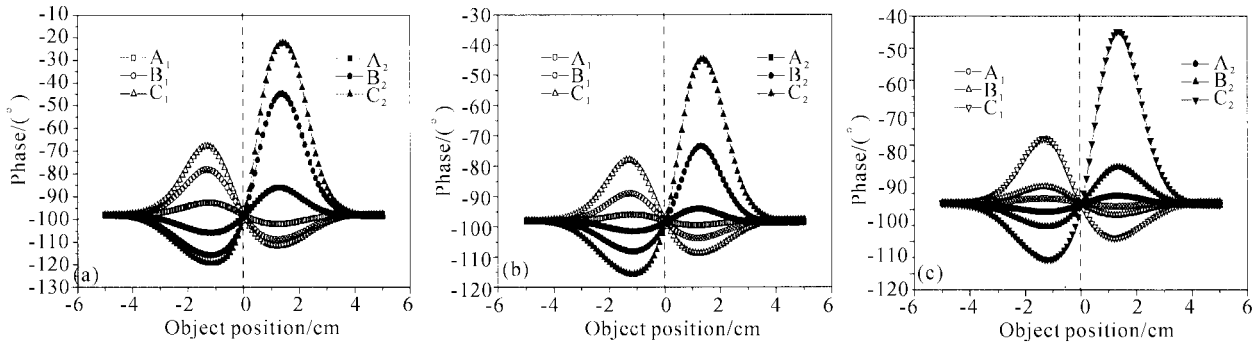


Fig. 7 The output phase as a function of the object with different parameters when $S_{AC2}/S_{AC1} = 1.02 \exp(i\pi 182/180)$, $S_{AC1}/S_{AC2} = 1.01 \exp(i\pi 181/180)$ for a remission geometry. (a) The radius is 1 mm (A_1, A_2), 2 mm (B_1, B_2), 2.5 mm (C_1, C_2), respectively; (b) The absorption coefficient is 0.6 cm^{-1} (A_1, A_2), 1 cm^{-1} (B_1, B_2), 2 cm^{-1} (C_1, C_2), respectively; (c) The deep is 3 cm (A_1, A_2), 2.5 cm (B_1, B_2), 2 cm (C_1, C_2), respectively

总结 本文用解析模型深入分析了更接近实际的非理想情况下新的幅度相消定位方案的定位性能, 讨论了系统参量和异质子参量对其定位能力的影响。研究表明: 新方法可减小相对幅度和相位及异质子参量对系统的影响, 特别是两次测量中幅度和相位交换的不对称性的影响可以相互补偿, 从而可明显地提高定位精度, 探测到尺度和吸收系数更小、深度更深的异质子。可望在肿瘤的早期诊断和定位等领域得到应用。

感谢 Steven. L J 教授 (Oregon Medical Laser Center, USA)、Xavier 博士 (Chance lab, University of Pennsylvania, USA) 和鲁强博士的帮助及有启发性的讨论。

参 考 文 献

1 Colak S B, Papaioannou D G, Hooft G W. Tomographic image reconstruction from optical projections in light-

不同参量的异质子位置间的关系。图 7(a) 中, 异质子的吸收系数为 2 cm^{-1} , 半径分别为 1 mm (A_1, A_2)、2 mm (B_1, B_2)、2.5 mm (C_1, C_2), 与源平面的间距为 2 cm。图 7(b) 中, 异质子的吸收系数分别为 0.6 cm^{-1} (A_1, A_2)、 1 cm^{-1} (B_1, B_2)、 2 cm^{-1} (C_1, C_2), 半径为 2 mm, 与源平面的间距为 2 cm。图 7(c) 中, 异质子的吸收系数为 2 cm^{-1} , 半径为 2 mm, 与源平面的间距分别为 3 cm (A_1, A_2)、2.5 cm (B_1, B_2)、2 cm (C_1, C_2)。三种情况下, 异质子的约化散射系数均为 8 cm^{-1} 和 0.01 cm^{-1} , 背景参量同前。两光源间距为 4 cm, 探测器位于与光源同侧的中心线上。由图可见, 对反射式来说, 有同样的结论, 只是相位跃变的斜率和幅度随深度的增加下降得更快。

diffusing media. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):180~213

2 Andreas H H, Alexander D K, Kenneth M H. Gradient-based iterative image reconstruction scheme for time-resolved optical tomography. *IEEE Transaction on Medical Imaging*, 1999, **18**(3):262~271

3 Boas D A. A fundamental limitation of linearized algorithms for diffuse optical tomography. *Optics Express*, 1997, **1**(13):404~413

4 Alfano R R, Pradham A, Tang G C *et al.*. Optical spectroscopic diagnosis of cancer and normal breast tissues. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(5):1015~1023

5 Schmitt A J M, Knutson J R. Spatial localization of absorbing bodies by interfering diffusive photon-density waves. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(4):381~389

6 Chance B, Kang K, He L. Highly sensitive object location in tissue models with linear in-phase and anti-phase multi-element optical arrays in one and two dimensions (Correction). *P C Magazine: The Independent Guide to IBM-Standard Personal Computers*, 1995, **14**(12):4074~4078

7 Chance B, Kang K A, He L *et al.*. Precision localization of hidden absorbers in body tissues phased-array optical

- systems. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(12):4324~4332
- 8 Erickson M, Reynolds J, Webb K. Comparison of sensitivity for single-source and dual-interfering-source configurations in optical diffusion imaging. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(11):3083~3092
- 9 Zhou S, Chen Y, Zou Q *et al.*. A portable dual wavelength amplitude cancellation image system for the determination of human breast tumor. *Proc. SPIE*, 1999, **3597**:571~578
- 10 Chen Y, Zhou S, Xie C *et al.*. Preliminary evaluation of dual-wavelength phased array imaging on neonatal brain function. *J. Biomed. Opt.*, 2000, **5**(2):206~213
- 11 Wu Guiling, Luo Qingming, Zeng Shaoqun *et al.*. Theoretical study of a phased-array system using the diffraction model. *J. Mod. Opt.*, 2001, **48**(1):181~187
- 12 Wu Guiling, Luo Qingming, Zeng Shaoqun *et al.*. Effects of relative amplitude and phase on phased-array system and their elimination. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):243~248 (in Chinese)
- 13 Wu Guiling, Luo Qingming, Mu Chengpeng *et al.*. Localization of an object in tissue with phase modulation spectroscopy: reduction of the effects of the relative amplitude and phase on amplitude cancellation. *J. Mod. Opt.*, 2001, **48**(14):2073~2086
- 14 Boas D A. *Diffuse Photon Probes of Structural and Dynamical Properties of Turbid Media: Theory and Biomedical Applications*. [Ph. D. Dissertation in physics], Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1996

The Performance of the Interchange Amplitude Cancellation Localization Scheme

Wu Guiling

(The State Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Luo Qingming Mu Chengpeng Liu Xiande

(The Key Laboratory of Biomedical Photonics, Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

(Received 18 March 2002; revised 31 May 2002)

Abstract: The localization performance of a new amplitude cancellation localization scheme (interchange amplitude cancellation localization scheme) under non ideal case according with actual condition is analyzed using analytical model, especially the performance when the resolution and sensitivity of the detection system is limited, and the interchange between two sources is not complete. The effects of the parameters of the heterogenous object on the localization performance of the system using the new scheme are also discussed. The results show that the method can reduce the effects of the relative amplitude and phase between two sources on the system, obviously improve the localization precision, and detect the heterogeneity with smaller size, deeper and smaller absorption coefficient.

Key words: information processing technique; phase modulation spectroscopy (PMS); amplitude cancellation; photon density wave; spatial localization