

时间反演电磁波超分辨率特性*

葛广顶 王秉中† 黄海燕 郑 罡

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2009 年 3 月 13 日收到, 2009 年 4 月 7 日收到修改稿)

时间反演电磁波在特定的远场环境下具有超分辨率特性. 结合时间反演技术构建具有超分辨率特性的模型进行仿真, 对结果分析后筛选出能够实现超分辨率特性的关键因素, 可为实用的小型化、多天线无线通信系统的设计提供指导.

关键词: 时间反演电磁波, 时间反演技术, 超分辨率

PACC: 4110H, 4190, 4230H

1. 引 言

超分辨率最早应用于光学亚波长成像, 光学亚波长成像在近场探测物体本身包含的精细结构对应的高频分量以实现超分辨率特性. 2000 年, Pendry^[1]在理论上证明了同时具有负介电常数和负磁导率特性的介质可以突破衍射极限从而构成具有超分辨率特性的完美透镜, 并指出双负介质通过放大隐失波在近场具有超分辨率特性, 从而开启了研究双负介质中隐失波传播特性的大门^[2-6]. 随后 Pendry^[7]指出时间反演技术与双负介质的材料在展现超分辨率特性方面有着类似的共性. 早在 2002 年, Rosny 等^[8]已使用时间反演技术在近场发现了超分辨率的现象. 但这种方法需要预知源信号, 应用受到一些限制. 文献^[9]给出了一种方案, 在未知源信号的情况下也能实现超分辨率的空间聚焦特性. 其方法是在待分辨目标的近场放置一个探测点, 用以记录源信号的场, 结合远场测试的结果重构一个近似函数, 能够得到超分辨率的空间聚焦特性. 但此方法的实验结果受到环境中噪声的干扰比较严重. 2007 年, Lerosey 等^[10]给出了一种微结构天线, 这种结构结合时间反演技术在封闭且具有强反射的环境下, 可把隐失波信息转换到传播波中, 从而在远场环境下得以建立具有超分辨率特性的高速率通信系统. 本文构建与文献^[10]中类似的模型进行仿真后, 筛选出实现超

分辨率特性的关键因素, 以期对具有超分辨率特性的新型多天线无线通信系统提供设计指导.

2. 仿真模型及方案

如图 1(a)所示, 整个仿真系统放置在一个半封闭的金属矩形腔内, 面 ABCD 完全开口, 腔内外由空气均匀填充. 时间反演天线阵列由 3 个 $\lambda/2$ 偶极子天线组成, 这种用作时间反演的装置通常称为时间反演镜 (TRM). 发射调制高斯脉冲信号的频谱带宽为 0.1—8 GHz, λ 为中心频率 4 GHz 对应的波长. 微结构天线阵列由 5 个改进后的同轴探针按图 1(b)的方式排成一排, 每个天线周围随机放置一些金属丝, 天线之间的间隔是 $\lambda/15$, 与 TRM 中心的距离是 4λ .

首先由 2 号微结构天线发射调制高斯脉冲信号 $x_2(t)$, TRM 中第 m 个天线接收到的信号记为 $y_{m,2}(t)$. $y_{m,2}(t)$ 经过时间反演后变为 $y_{m,2}(-t)$ ($m=1, 2, 3$), 然后由 TRM 中的天线把各自反演后的信号 $y_{m,2}(-t)$ 发射出去, 记录第 i 个微结构天线接收到的信号 $y_{i,2}^{\text{TR}}(t)$ ($i=1, 2, \dots, 5$). 已证明^[11, 12]由 TRM 发射的时间反演信号可在天线 2 处产生空间及时间聚焦. 通常环境下, 时间反演聚焦特性受到瑞利判据的限制, 聚焦分辨率是 $\lambda/2$ ^[13, 14]. 然而文献^[10]指出, 在图 1 所示的环境中, 能够实现电磁波的超分辨率聚焦特性. 本文则通过构建类似的仿真模

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA01Z275, 2008AA01Z206) 和国家自然科学基金 (批准号: 60872029, 60872034) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: bzwang@uestc.edu.cn

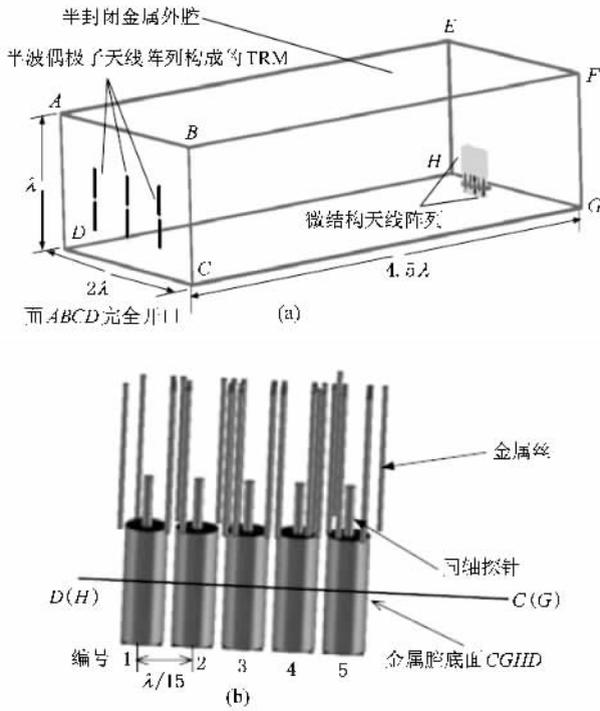


图 1 仿真模型示意图 (a) 外腔及天线摆放位置, (b) 由同轴探针构成微结构天线阵列

型对这种现象做进一步研究,筛选出对实现超分辨率特性起作用的关键因素。

为了便于研究各个微结构天线接收到的信号 $y_{i2}^{\text{TR}}(t)$ 的能量大小,本文在频域上采用如下公式计算信号的能量:

$$P_i = \sum_k |Y_{i2}^{\text{TR}}(f_k)|^2 \Delta f \quad (i = 1, 2, \dots, 5; k = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

式中 i 是微结构天线的编号, $|Y_{i2}^{\text{TR}}(f_k)|$ 对应于频率 f_k 的频谱幅度, f_k 对应于 0.1—8 GHz 带宽内均匀采样后的离散频点, Δf 是采样间隔, P_i 正比于第 i 个微结构天线接收到的信号在指定频带内的能量。计算信号的时域峰值并观测频域中能量的分布情况,可以对系统所展现出的分辨率进行多方位的分析。

以图 1 中的模型为基础,使用电磁仿真商业软件 CST MIROWAVE STUDIO 建模并仿真。由于仿真模型中微结构天线的间距只有 $\lambda/15$,同轴探针周围随机放置的金属丝之间的间距最小为 $\lambda/50$,为了得到高精度的仿真结果,要求软件对同轴探针附近的区域划分局部细网格,网格空间步长为 $\lambda/300$,而其他区域使用粗网格,网格空间步长为 $\lambda/20$,且从粗网格到细网格的渐变比取为 1.2。

3. 仿真结果与分析

经初步分析,文献 [10] 给出的模型中可能影响同轴探针分辨率的因素包含以下几个: (1) 随机摆放在同轴探针周围的金属丝; (2) 封闭的强反射外腔; (3) 时间反演技术。

通常情况下,由于天线在没有使用时间反演技术时,不具有自适应空时聚焦特性,自然不会产生超分辨率的聚焦现象,因此将仿真工作的重点放在使用时间反演技术这一前提下进行。下面分 3 种情形进行讨论。

3.1. 无外腔且同轴探针周围无金属丝的情形

去掉图 1 中的金属外腔与同轴探针周围的金属丝,将 TRM 与同轴探针天线阵列放置在开放式的环境下,其他的条件不变。由同轴探针 2 发射一个信号 $x_2(t)$, TRM 中 3 个偶极子天线接收到的信号为 $y_{m2}(t)$, 然后分别发射反演后的信号 $y_{m2}(-t)$, 再记录每个同轴探针接收到的信号 $y_{i2}^{\text{TR}}(t)$ 。

首先对信号的时域峰值进行分析。对比信号 $y_{i2}^{\text{TR}}(t)$ 的峰值 A_i 后,发现第 5 个天线接收到的信号峰值 A_5 最大。把每个天线接收到的信号峰值 A_i 分别对 A_5 进行归一化,结果如图 2 中虚线所示。然后在频域对信号的能量进行分析,由 (1) 式计算出每个天线接收到的信号能量 P_i , 计算结果表明 P_5 最大。同样,把每个 P_i 对 P_5 进行归一化,得到如图 2 中实线所示的结果。由此可见,信号不论是在时域上记录的峰值,还是在频域上计算出的能量值,都没有在 2 号同轴探针附近产生超分辨率的空间聚焦特性。由此得出结论,仅仅由同轴探针构成的天线阵列结合

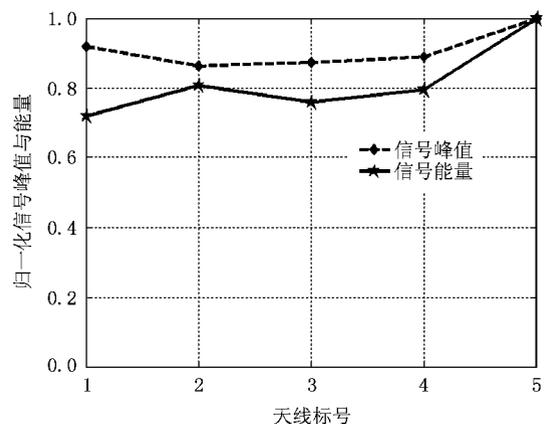


图 2 无外腔且同轴探针周围无金属丝情形下的仿真结果

时间反演技术不具有超分辨率特性。

3.2. 有外腔但同轴探针周围无金属丝的情形

下面需要检验金属外腔与同轴探针结合是否能展现出超分辨率特性. 文献 [10] 给出的实验环境中有一个封闭外腔, 具有强反射的腔壁可以使时域脉冲信号在传输过程产生丰富的多径, 而丰富的多径恰恰是实现时间反演空时聚焦特性的重要因素, 但封闭的外腔是否对超分辨率特性起到关键的作用, 需要通过仿真加以检验. 类似图 1 所示的模型环境, 将 TRM 放置在半封闭矩形金属腔开口处, 5 个同轴探针构成的天线阵列以 $\lambda/15$ 的间距排成一排, 与 TRM 间距有 4λ , 此时同轴探针周围不附加任何的金属丝.

仿真方法与上述类似. 由同轴探针 2 发射一个信号 $x_2(t)$, TRM 中 3 个偶极子天线接收到的信号为 $y_{m,2}(t)$ 然后分别发射反演后的信号 $y_{m,2}(-t)$, 再记录每个同轴探针接收到的信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$. 将信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 的峰值 A_i 分别对最大的一个峰值 A_1 归一化, 结果如图 3 虚线所示. 由此可知最小的 A_5 与最大的 A_1 之间相差不超过 A_1 的 30%. 接着计算各个天线接收到的信号能量 P_i . 图 3 中显示的实线是每个 P_i 分别对最大的 P_5 进行归一化后的结果. 此时天线 2 接收到的能量 P_2 依然不是最大的. 可见信号不论是在时域上记录的峰值, 还是在频域上计算出的能量值, 都没有在 2 号同轴探针附近产生超分辨率的空间聚焦特性. 由此得出结论由同轴探针构成的天线阵列放置在半封闭金属腔内并结合时间反演技术, 仍然没有展示出超分辨率特性.

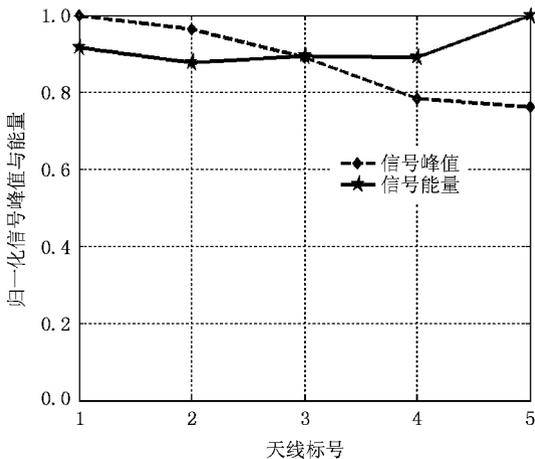


图 3 有外腔但同轴探针周围无金属丝情形下的仿真结果

3.3. 无外腔但同轴探针周围有金属丝的情形

去掉图 1 中的金属外腔, 同轴探针近场添加金属丝构成的微结构天线与 TRM 一起放置在开放式空间, 其他条件不变. 信号的收发方式与以上无金属丝情形类似. 记录每个微结构天线接收到的信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$, 然后在时域与频域上对信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 进行分析. 每个微结构天线接收到的 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 的峰值 A_i 分别对最大的 A_2 进行归一化, 结果如图 4 中虚线所示. 可见天线 2 接收到的信号 $y_{2,2}^{TR}(t)$ 的峰值 A_2 为最大, 并且其他天线接收到的信号峰值 A_i 均不超过 $A_2/2$. 结果很明显展示出超分辨率的空间聚焦特性. 接着计算 5 个微结构天线接收到的信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 的能量 P_i . 图 4 中的实线是每个 P_i 对最大的 P_2 进行归一化后的结果. 同样, 结果展示出了超分辨率的空间聚焦特性. 结合前面的仿真结果得出如下结论: 同轴探针周围随机放置金属丝构成的微结构天线阵列结合时间反演技术, 可展示出超分辨率特性以获得亚波长信息.

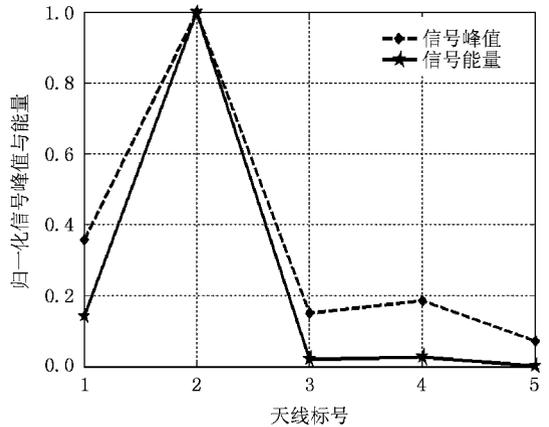


图 4 无外腔但同轴探针周围有金属丝情形下的仿真结果

3.4. 信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 在不同仿真环境下的频谱

为了进一步了解以上 3 种模型中信号的能量在频域上的分布, 需要对信号频谱进一步分析. 图 5 (a) 中的 6 条曲线分别是图 2 中 5 个同轴探针接收到的信号 $y_{i,2}^{TR}(t)$ 的频谱及原始发射信号 $x_2(t)$ 的频谱, 且每条曲线是归一化到各自频谱最大分量后的结果. 图 5 (b) 与 (c) 分别是图 3 与图 4 中同轴探针接收到的信号频谱经过归一化后的曲线.

计算结果表明: 图 2 中 5 个同轴探针接收到的

信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的能量 90% 集中在 3.5—5.8 GHz, 图 3 中的 5 个同轴探针接收到的信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的能量 90% 集中在 4—5.5GHz, 意味着这两种系统结构均具有超宽带特性. 而图 4 中 5 个同轴探针接收到信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的能量 90% 集中在 3.25—3.45 GHz, 这种系统结构具有窄带特性. 那么这种窄带特性的原因由何引起? 对比 3 种情形的异同, 可分析出以下两种可能的原因 (1) 可能是由同轴探针周围的金属丝引起 (2) 也可能是由金属丝与时间反演技术共同作用引起.

为了研究图 4 和图 5(c) 信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的窄带特性的原因, 可在不使用时间反演技术的情况下按其模型环境进行仿真, 过程如下: 同轴探针 2 发射一个信号 $x_2(t)$ 后, 由 TRM 中 3 个偶极子天线分别发射未经反演的 TRM 接收信号 $y_{m_2}(t)$, 然后记录每个同轴探针接收到的信号 $y_{i_2}(t)$. 经过计算, $y_{i_2}(t)$ 的能量 90% 仍然集中在 3.25—3.45 GHz, 见图 5(d). 通过以上分析, 判断出能量在频域的相对集中是由于同轴探针周围的金属丝的滤波作用所致, 即具有超分辨率特性的模型本身在频域上具有窄带特性.

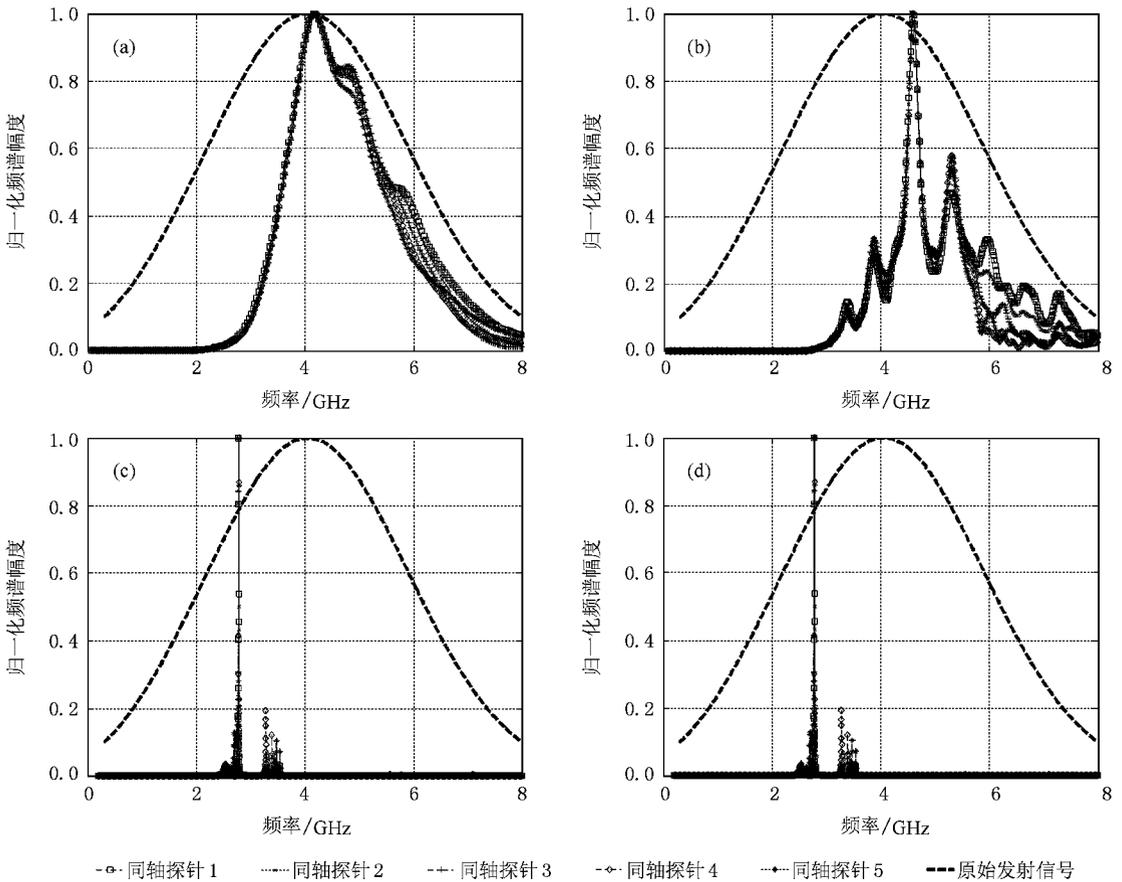


图 5 同轴探针接收到的信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 或 $y_{i_2}(t)$ 的频谱 (a) 图 2 中信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的频谱, (b) 图 3 中信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的频谱, (c) 图 4 中信号 $y_{i_2}^{TR}(t)$ 的频谱, (d) 在未使用时间反演时 $y_{i_2}(t)$ 的频谱. 曲线分别是同轴探针 1—5 接收到的信号的频谱及原始发射信号 $x_2(t)$ 的频谱

4. 结 论

根据文献 [10] 建立仿真模型, 对比各种环境下的仿真结果, 可知同轴探针近场放置金属丝构成的

微结构天线结合时间反演技术是在空间实现超分辨率的关键. 对信号频域特性进行分析, 发现这种结构实现的超分辨率特性只能在窄带的情况下得以展示. 要使超宽带信号展示类似的超分辨率聚焦特性需要做更进一步研究.

- [1] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [2] Chen Y Y , Huang Z M , Shi J L , Li C F , Wang Q 2007 *Chin. Phys. B* **16** 173
- [3] Dong J W , Hu X H , Wang H Z 2007 *Chin. Phys. B* **16** 1057
- [4] Yang Y M , Qu S B , Wang J F , Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1031 (in Chinese) [杨一鸣、屈绍波、王甲富、徐卓 2009 物理学报 **58** 1031]
- [5] Meng F Y , Wu Q , Fu J H , Gu X M , Li L W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6213 (in Chinese) [孟繁义、吴群、傅佳辉、顾学迈、李乐伟 2008 物理学报 **57** 6213]
- [6] Xiang Y , Qian Z P , Liu X , Bao J S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5537 (in Chinese) [项阳、钱祖平、刘贤、鲍峻松 2008 物理学报 **57** 5537]
- [7] Pendry J B 2008 *Science* **322** 71
- [8] Rosny J D , Fink M 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 124301
- [9] Conti S G , Roux P , Kuperman W A 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 3602
- [10] Lerosey G , Rosny J D , Tourin A , Fink M 2007 *Science* **315** 1119
- [11] Fink M , Prada C , Wu F , Cassereau D 1989 *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium (Montreal : IEEE)* p681
- [12] Cassereau D , Wu F , Fink M 1990 *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium (Hawaii : IEEE)* p1613
- [13] Draeger C , Fink M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 407
- [14] Jackson D R , Dowling D R 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 171

Super-resolution characteristics of time-reversed electromagnetic wave^{*}

Ge Guang-Ding Wang Bing-Zhong[†] Huang Hai-Yan Zheng Gang

(Institute of Applied Physics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 13 March 2009 ; revised manuscript received 7 April 2009)

Abstract

Time-reversed electromagnetic wave has the property of super-resolution in some special far-field circumstances. A model with the property of super-resolution was constructed and simulated by time-reversal technique. By analyzing the simulation results , we can find the main reason for realization of property of super-resolution. The research provides support for the design of compact multi-antenna wireless communication system.

Keywords : time-reversed electromagnetic wave , time-reversal technique , super-resolution

PACC : 4110H , 4190 , 4230H

^{*} Project supported by the High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2006AA01Z275 , 2008AA01Z206) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60872029 , 60872034).

[†] Corresponding author. E-mail : bzwang@uestc.edu.cn