

亚波长金属线阵中一维时间反演电磁波的 聚焦机理研究*

章志敏¹⁾²⁾ 王秉中^{1)†} 葛广顶¹⁾ 梁木生¹⁾ 丁帅¹⁾

1) (电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

2) (淮北师范大学物理与电子信息学院, 淮北 235000)

(2011年10月22日收到; 2012年2月21日收到修改稿)

基于周期金属线阵的等效电介质模型, 并使用传输线理论方法, 得到了金属线阵中时间反演电磁波的解析表达式. 接着, 在等效电介质模型的适用范围内, 讨论了金属线半径、金属线阵周期、金属线阵周期数对时间反演电磁波聚焦的影响. 从而在理论上证实, 这种结构可以实现远场时间反演电磁波聚焦, 同时, 也为时间反演技术提供了工程参考.

关键词: 时间反演, 亚波长结构, 金属线阵, 等效电介质模型

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.-q

1 引言

时间反演电磁波具有稳健的自适应聚焦特性, 因此它在通信^[1-3]、无损探伤、医学成像^[4-8]等方面引起了人们的广泛关注. 在时间反演电磁学的研究中, 如何获得一个时间反演电磁波的高聚焦增益是一个非常重要的研究方向^[9]. 一个典型的时间反演实验需要在意图聚焦的地方放置一个源. 首先, 源发射一个短脉冲, 该脉冲经过周围的散射体散射并传播至远场, 由放置在远场处的时间反演镜接收脉冲序列; 然后, 将时间脉冲序列进行时间反转并重新发送; 最后, 时间反演电磁波会聚焦在源所在的位置^[10]. 实验表明, 时间反演技术需要丰富的多径作为辅助, 以便达到更加完美的聚焦效果. 因此, 为了得到更高的时间反演电磁波聚焦增益, 人们总是会在进行时间反演电磁波聚焦实验时, 有意图地增加一些散射体用来丰富多径^[11-14].

令人振奋的是, 在电偶极子天线周围随机摆放很多金属线用以提高时间反演电磁波聚焦效果时, Fink 课题组实现了时间反演电磁波的超分辨时空

聚焦^[15], 这使得人们将研究的目光投向了时间反演电磁波在特异性材料中的传播行为研究, 展开时间反演电磁波超分辨时空聚焦物理机理的进一步思考. Pendry 在文献 [16] 中首先指出时间反演技术与双负介质材料在展现超分辨率特性方面有着类似的共性, 接着, 时间反演电磁波在特异性材料中的传播特性研究^[17-21] 和基于特异性材料的时间反演器件的研制^[22-25] 也随即展开.

然而, 人们对时间反演电磁波在特异性材料中的传播行为研究主要限于仿真和实验, 对于使用解析方法来研究时间反演电磁波聚焦增益的文献尚未见报道. 本文针对时间反演电磁波在亚波长周期金属线阵的时间聚焦问题, 提出一种基于传输线理论的一维时间反演模型, 将亚波长金属线阵等效为介质板模型, 给出时间反演电磁波经过亚波长金属线阵后的解析表达式, 同时也推导该模型下的凋落模式和传播模式的具体数学表达式. 在模型的适用范围内, 一方面讨论金属线半径、金属线阵周期、金属线阵周期数对时间反演电磁波聚焦增益的影响, 另一方面, 为了更好地解释金属线阵参量和时

* 国家自然科学基金 (批准号: 61071031), 博士点基金 (批准号: 20100185110021), 中央高校基本科研业务费项目 (批准号: E022050205) 和淮北师范大学青年科研项目 (批准号: 2012xq41) 资助的课题.

† E-mail: zhzhmmail@163.com; bzwang@uestc.edu.cn

间反演电磁波聚焦增益之间的关系, 给出金属线阵参量和透过金属线阵的平均电场幅值之间的关系.

2 一维时间反演模型

2.1 一维时间反演系统描述

一维时间反演系统所用的金属线阵结构如图 1 所示, 金属线平行于 x 方向放置, 其半径为 r , 并且假定为无穷长, 金属线在 y 方向以周期 a 排列, 而在 z 方向以周期 b 排列. 为讨论方便, 假定 y 方向金属线的排布是无限长的, 而在 z 方向排布为 n 个周期 (即, 金属线阵的纵向长度 $L = nb$). 利用文献 [26] 提供的金属线阵等效模型, 该金属线阵可以等效成 x 方向和 y 方向无限延伸、 z 方向厚度为 nb 、相对介电常数为 $\varepsilon_r(\omega)$ 的均匀电介质, 其中

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(\omega) &= 1 - \frac{k_p^2}{k^2} \\ &= 1 - \frac{2\pi}{ab} \left\{ k^2 \left[\ln(\sqrt{ab}/2\pi r) + \left[-\frac{1}{2} \ln(\zeta) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\coth(\pi m \zeta) - 1}{m} \right) + \frac{\pi}{6} \zeta \right] \right] \right\}^{-1}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中, $k = \omega/c$ 为自由空间的波数, k_p 为等离子体波数, $\zeta = a/b$ 为金属线阵的横向周期与纵向周期的比值 (纵横周期比).

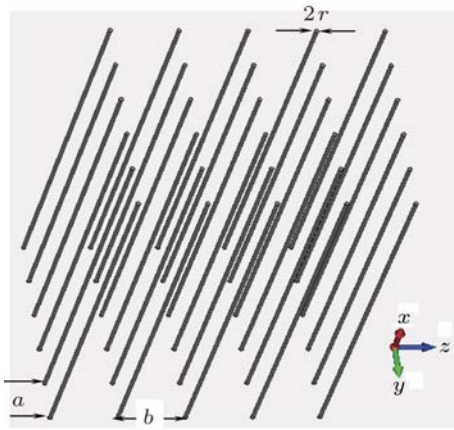


图 1 金属线阵结构示意图

如同引言所述, 假设发射源发送一个一阶微分高斯调制的 4 GHz 正弦脉冲, 该脉冲在自由空间激发一 x 方向极化、 z 方向传播的均匀平面电磁波, 电磁波通过金属阵列后被接收, 反演后再重新发送, 时间反演电磁波再次经过金属线阵后, 会发生时间

聚焦, 我们以此来分析金属线阵对时间反演电磁波的影响.

2.2 计算模型描述

发射源激发的电场为

$$\begin{aligned} E^i(t) &= \frac{d}{dt} \left(A e^{-(t/\tau)^2} \cos(\omega_0 t) \right) e_x \\ &= A e^{-(t/\tau)^2} \left(-\frac{2t \cos(\omega_0 t)}{\tau^2} - \omega_0 \sin(\omega_0 t) \right) \\ &\quad \times e_x. \quad (2) \end{aligned}$$

对时域信号进行傅里叶变换. 那么, 入射波可以表示为

$$E^i(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}^i(\omega) e^{j(\omega t - kz)} d\omega, \quad (3)$$

式中, $\tilde{E}^i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E^i(t) e^{-j\omega t} dt$.

经过金属线阵后, 透射波可表示为

$$E^t(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T(\omega) \tilde{E}^i(\omega) e^{j(\omega t - kz)} d\omega, \quad (4)$$

式中, $T(\omega)$ 为金属线阵的透射系数. 基于金属线阵等效模型, 利用传输线理论方法 [27], 可以得到 x 方向极化的平面波沿 z 方向入射该电介质时,

$$\begin{aligned} T(\omega) &= 2\sqrt{\varepsilon_r(\omega)} \left[2\sqrt{\varepsilon_r(\omega)} \cos(k\sqrt{\varepsilon_r(\omega)}L) \right. \\ &\quad \left. + j(1 + \varepsilon_r(\omega)) \sin(k\sqrt{\varepsilon_r(\omega)}L) \right]^{-1}. \quad (5) \end{aligned}$$

经过时间反演后的电磁波可以表示为

$$\begin{aligned} E_{tr}^i(z, t) &= E^t(z, -t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T^*(\omega) \tilde{E}^{i*}(\omega) e^{j(\omega t + kz)} d\omega, \quad (6) \end{aligned}$$

式中, $T^*(\omega)$ 和 $\tilde{E}^{i*}(\omega)$ 分别是 $T(\omega)$ 和 $\tilde{E}^i(\omega)$ 的相位共轭.

时间反演电磁波返回通过厚度为 L 的金属线阵后, 结果如下:

$$\begin{aligned} E_{tr}^t(z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T(\omega) T^*(\omega) \tilde{E}^{i*}(\omega) \\ &\quad \times e^{j(\omega t + kz)} d\omega. \quad (7) \end{aligned}$$

3 计算结果及讨论

根据上述一维时间反演模型, 可以得知时间反演聚焦特性跟金属线阵的几何尺寸有关系, 因此, 我们给出了金属线半径 r 、金属线阵周期 a, b , 金属线阵周期数 n 和时间反演聚焦之间的计算结果.

同时考虑到金属线阵等效模型的局限性, 我们只在 $r \ll a < \lambda, r \ll b < \lambda$ (λ 为电磁波在自由空间中的波长) 范围内讨论金属线阵几何尺寸与时间反演聚焦之间的关系.

3.1 金属线半径与时间反演聚焦增益的关系

对金属线阵的几何尺寸取如下值: $a = 0.1\lambda, \zeta = 1, n = 30$, 计算不同的 r 对时间反演聚焦的影响.

图 2 分别给出了 $r = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 和 $r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 情况下, 电磁波到达金属线阵右边时的场分布. 图 2 的结果表明, 当金属线半径 $r = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 时, 透过金属线阵的电场强度比 $r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 时大, 但是后者比前者接收到了更多的路径分量. 对于一定周期的金属线阵, 随着金属线半径的增大, 金属线的散射截面增大, 只有更加高频的信号才能通过金属线阵, 故, 随着半径的增加, 通过的信号幅度会相应地减小, 而多径分量会增加.

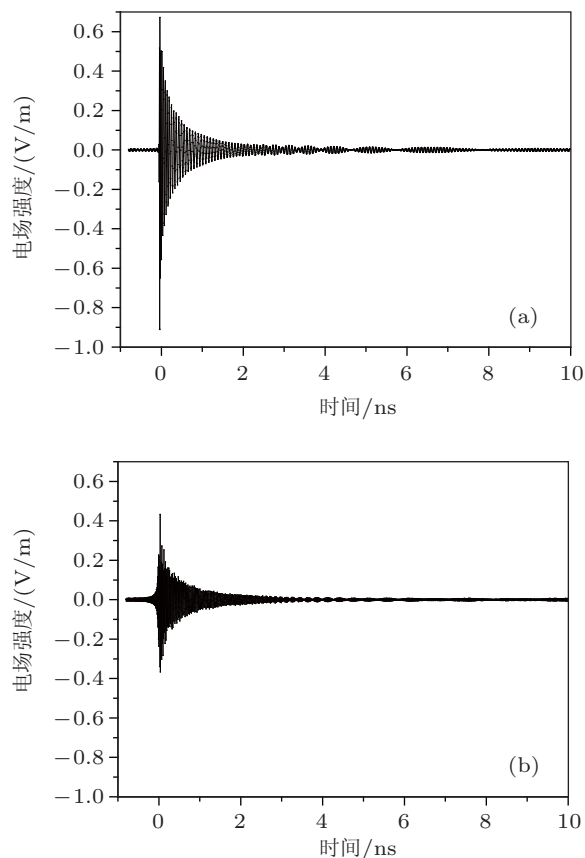


图 2 金属线阵右边的场分布 (a) $r = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$; (b) $r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$

图 3 所示的是上述两种情况下, 时间反演电磁波的聚焦场分布. 从图 3 可以看出, 经过时间反演的电磁波在重新经过金属阵列后, 脉宽发生了压缩, 电场的峰峰值增加, 也就是说, 时间反演电磁波有时间聚焦特性.

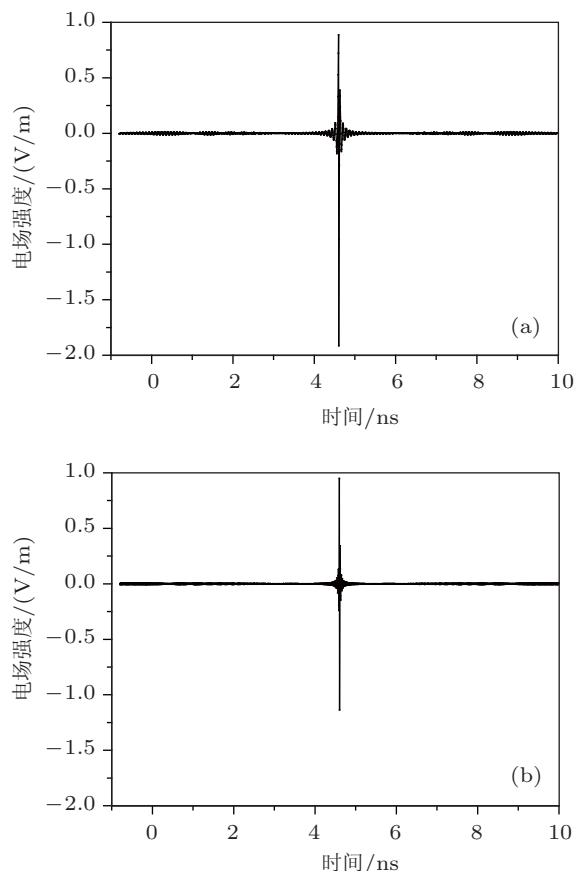


图 3 时间反演电磁波聚焦信号场分布 (a) $r = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$; (b) $r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$

为了衡量时间反演技术对时间反演电磁波聚焦作用的大小, 定义

$$G = 10 \log (E_{\text{trpp}}^t / E_{\text{pp}}^t), \quad (8)$$

表示时间反演电磁波的聚焦效果, 式中, G 为聚焦增益, E_{trpp}^t 为时间反演电磁波聚焦信号的电场强度峰峰值, 是 (7) 式峰峰值, E_{pp}^t 为金属阵列右边的电场强度峰峰值, 是 (4) 式峰峰值. 我们可以得到, 在 $r = 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 和 $r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 情况下, 聚焦增益分别为 2.478 dB 和 4.166 dB, 可见, 后者比前者具有更好的聚焦能力.

图 4 给出了金属线半径与聚焦增益之间的关系. 图 4 表明, 聚焦增益随着金属线半径的增大呈现总体上升准周期振荡的趋势.

为更好地解释图 4 的结果, 我们选定一组谐

波 ($\omega_n = \omega_0 + 2n\pi c/b, n = \pm 1, \pm 2, \dots$), 考察金属线半径对该组谐波的传输特性的影响.

谐波传播到金属线阵右边的场由 (5) 式决定, 谐波透过金属线阵的电场强度的大小为 $|E^t(\omega_n)| = |T(\omega_n) \tilde{E}^i(\omega_n)|$.

对于传播波 ($k_n^2 = \omega_n^2/c^2 > k_p^2$),

$$|E^t(\omega_n)| = \left\{ 1 + \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r(\omega_n)}} - \sqrt{\varepsilon_r(\omega_n)} \right) \times \frac{\sin(k_n \sqrt{\varepsilon_r(\omega_n)} L)}{2} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times |\tilde{E}^i(\omega_n)|. \quad (9)$$

对于凋落波 ($k_n^2 = \omega_n^2/c^2 < k_p^2$),

$$|E^t(\omega_n)| = 2\sqrt{2} \left\{ \cosh(2k_n \sqrt{|\varepsilon_r(\omega_n)|} L) \times \left[\left(\frac{1}{\sqrt{|\varepsilon_r(\omega_n)|}} + \sqrt{|\varepsilon_r(\omega_n)|} \right)^2 + 4 \right] - \left(\frac{1}{\sqrt{|\varepsilon_r(\omega_n)|}} - \sqrt{|\varepsilon_r(\omega_n)|} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times |\tilde{E}^i(\omega_n)|. \quad (10)$$

图 5 给出了金属线半径与谐波平均电场强度之间的关系, 即

$$|E^t(r)| = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |E^t(\omega_n, r)|, \quad (11)$$

从图 5 可以看出, 谐波通过金属线阵的平均场强大小随着金属线半径的增加出现准周期振荡, 并有总体减小的趋势. 结合 (1), (9), (10) 式可以得知, 谐波中角频率相对较低的谐波模式, 将会随着金属线半径的增加由传播模式转化为凋落模式, 故而使得透过金属线阵的平均电场强度的幅值减小, 又由于在金属线半径增加的过程中, 金属线阵对谐波有带通和带阻的交替作用, 从而导致了平均电场强度大小的准周期振荡.

对比图 4 和图 5, 我们发现, 虽然金属线半径的增加会使得透过金属线阵的电场幅度准周期振荡变小, 但是金属线半径的增加, 总是倾向于得到一个较高的时间反演聚焦增益. 从 (8) 式出发, 这个结果可以得到解释: 时间反演电磁波的聚焦增益是由时间反演电磁波的聚焦信号的电场强度峰峰值和金属线阵右边的电场强度的峰峰值共同决定的, 随着金属线半径的增加, 金属线阵右边的电场强度会

准周期性衰落, 但是, 时间反演电磁波因为具有利用多径的自适应聚焦特性, 其电场强度峰峰值的衰减要缓慢一些, 这样就导致了透过金属线阵的电场幅度准周期变小的同时, 却带来了时间反演聚焦增益的增加.

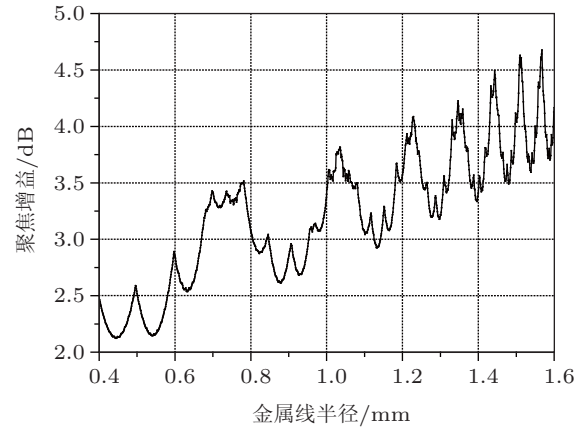


图 4 金属线半径与聚焦增益之间的关系

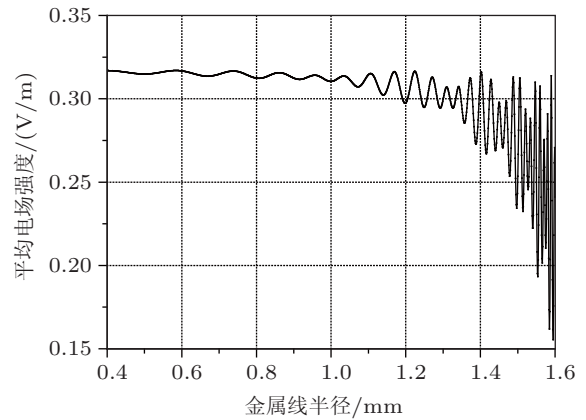


图 5 金属线半径与平均电场强度之间的关系

3.2 金属线阵周期与时间反演聚焦增益的关系

选择参量 $r = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $L = 3\lambda$, $\zeta = 1$, 图 6 给出了金属线阵周期与聚焦增益之间的关系, 图 7 为金属线阵周期与谐波平均电场强度之间的关系 (金属线阵周期按照 $b = L/n$ ($n = 20, 21, \dots, 39, 40$) 进行取值). 图中结果表明, 随着金属线阵周期的变大, 呈现聚焦增益总体下降准周期振荡、平均电场强度总体上升准周期振荡的趋势.

这个结果与 3.1 讨论的情况相似, 随着金属线阵周期变大, 低频成分对应的谐波将由凋落波转化

成传播波,并透过金属线阵,使得在金属线阵右边接收到的电场幅度变大,时间反演聚焦增益下降.随着金属线阵周期的变化,金属线阵对相应的谐波起到了带通和带阻的交替变化,故而,使得金属线阵周期与聚焦增益之间、金属线阵周期与平均电场强度之间表现出周期性.

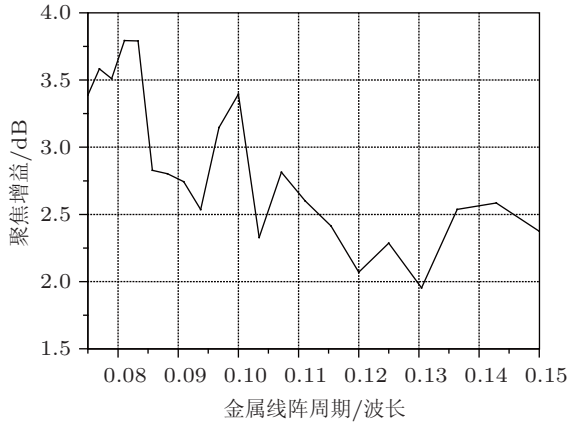


图6 金属线阵周期与聚焦增益之间的关系

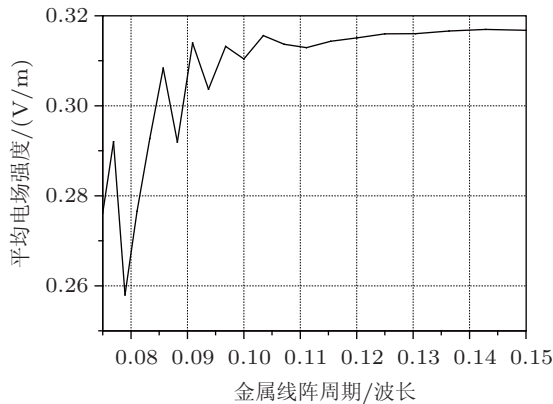


图7 金属线阵周期与平均电场强度之间的关系

从图6和图7的结果,我们可以得知,随着金属线阵周期的变大,透过金属线阵的电场幅值准周期变大,然而,时间反演电磁波因为具有自适应聚焦特性,使得场强的变化没有那么剧烈.因此,当金属线阵周期变大时,在透射场强的增加同时,时间反演电磁波聚焦增益反而减小.

3.3 纵向周期数与时间反演聚焦增益的关系

对金属线阵取如下参量: $r = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $a = 0.10\lambda$, $\zeta = 1$,图8给出了金属线阵纵向周期数与聚焦增益之间的关系,图9为金属线阵纵向

周期数与谐波平均电场强度之间的关系.图中结果表明,随着纵向周期数的增大,聚焦增益呈现总体上升周期振荡的趋势,而谐波的平均电场强度幅值只是表现出周期振荡.

如图9所示,与3.1和3.2结果不同的是,透过金属线阵的谐波的平均电场强度幅值只是随着纵向周期数的变化而表现出周期性,并未有整体的增大或是减小.这是因为,等效介电常数 $\epsilon_r(\omega)$ 并不是纵向周期数 n 的函数,换句话说就是,传播模式和凋落模式之间的转化并不会随着纵向周期数的变化而变化,故而,平均电场强度随纵向周期数仅仅呈现出的是周期性,而其表现出来的周期振荡可以解释为:当金属线阵纵向周期数增加时,意味着等效传输线电长度的增加,其输出频率响应将随着传输线电长度的增加而呈现出周期性.

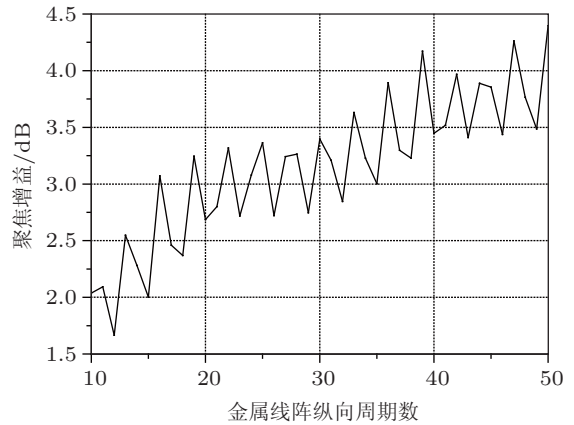


图8 金属线阵纵向周期数与聚焦增益之间的关系

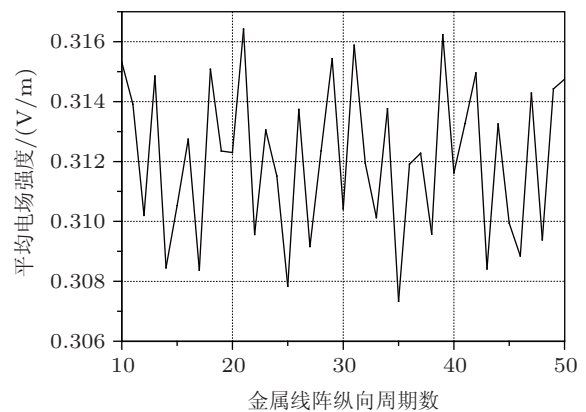


图9 金属线阵纵向周期数与平均电场强度之间的关系

综合图8和图9的结果,我们可以看出,随着纵向周期数的增加,透过金属线阵的场强仅出现周期性变化,但是,纵向周期数的增加意味着增加了

散射体的规模, 这样使得在金属阵列右边接收到的路径增多, 又因为时间反演电磁波可以利用丰富的多径实现更好的自适应聚焦, 因此时间反演电磁波的场强幅值将会随着纵向周期数的增加而增加, 这将导致时间反演电磁波的聚焦增益呈现总体上升周期振荡的趋势.

4 结论

本文结合当前时间反演电磁学在特异性材料中的应用研究, 针对时间反演电磁波在亚波长金属线阵中的时间聚焦问题, 基于周期金属线阵的等效模型, 利用传输线理论, 推导了时间反演电磁波的解析表达式, 同时, 得到了凋落模和传播模的数学表达. 根据该亚波长金属线阵的一维时间反演模型, 我们讨论了金属线半径、金属线阵周期、纵向周期数对聚焦增益的影响. 一般来说, 金属半径越大、金属线阵周期越小、纵向周期数越多, 总是倾向于得到一个更高的时间反演聚焦增益. 为了解释他们之间的相互关系, 我们同时还给出了金属线阵

参量对透过金属线阵的平均电场强度之间的关系. 从计算结果可以看出, 虽然金属半径越大、金属线阵周期越小, 会导致较低频率的电磁波会由传播模式向凋落模式转化, 致使透过金属线阵的场强呈现准周期振荡并总体变小的趋势, 但是, 时间反演电磁波因为具有利用多径的自适应聚焦特性, 其场强的变化要小一些, 从而使得时间反演电磁波的聚焦增益呈现总体增加准周期性振荡的趋势. 同时, 我们也可以在金属线阵周期数和聚焦增益之间关系中得到时间反演电磁波利用多径自适应聚焦来实现时间高增益聚焦这个事实: 透过金属线阵右边的电场强度呈现周期性, 时间反演电磁波聚焦增益呈现周期振荡并总体增加的趋势, 那只能是时间反演电磁波利用多径自适应聚焦的结果. 这个金属线阵的一维时间反演模型是在一些假设前提下得到的, 虽然, 因为假设不具备有一般性而使得模型具有一定的缺陷, 但是, 它在一定的程度上能够指导我们如何获得一个较高的时间反演电磁波聚焦增益. 如何建立一个更为广泛适用的时间反演电磁波模型需要我们进一步地研究.

- [1] Xiao S Q, Chen J, Wang B Z, Liu X F 2007 *Progress in Electromagnetics Research* **77** 329
- [2] Guo N, Sadler B M, Qiu R C 2007 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **6** 4221
- [3] Song H C, Hodgkiss W S, Kuperman W A, Akal T, Stevenson M 2007 *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **32** 915
- [4] Jin Y, Moura J M F 2009 *IEEE Trans. Signal Processing* **57** 1396
- [5] Liu X F, Wang B Z, Li L W 2009 *IEEE Antenna Wireless Propag. Lett.* **8** 1426
- [6] Jin Y, Moura J M F, O'donoghue N 2010 *IEEE J. Selected Topics in Signal Processing* **4** 210
- [7] Liu X F, Wang B Z, Xiao S Q, Lai S J 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1731
- [8] Wang D, Wang B Z, Ge G D, Chen S T, Tang M C 2011 *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* **25** 63
- [9] Davy M, Rosny J D, Fink M 2010 *Propagation and Remote Sensing* **11** 37
- [10] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
- [11] Ge G D, Wang B Z, Huang H Y, Zheng G 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 8249 (in Chinese) [葛广顶, 王秉中, 黄海燕, 郑罡 2009 物理学报 **58** 8249]
- [12] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Fink M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 154101
- [13] Rosny J D, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **92** 1
- [14] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D, Zhao D S 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 104101 (in Chinese) [丁帅, 王秉中, 葛广顶, 王多, 赵德双 2011 物理学报 **60** 104101]
- [15] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1119
- [16] Pendry J B 2008 *Science* **322** 71
- [17] Lemoult F, Lerosey G, Rosny J D, Fink M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 203901
- [18] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D, Zheng G, Liu X 2010 *ICMMT chengdu* **11** 60
- [19] Mudry E, Moal E L, Ferrand P, Chaumet P C, Sentenac A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
- [20] Katko A R, Gu Shi, Barrett J P, Popa B I, Shvets G, Cummer S A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 123905
- [21] Glasgow S A 2010 *Phys. Rev. E* **82** 011115
- [22] Sivan Y, Pendry J B 2011 *Phys. Rev. A* **84** 033822
- [23] Ge G D, Wang D, Wang B Z 2011 *Progress In Electromagnetics Research* **114** 429
- [24] Ge G D, Wang B Z, Wang D 2011 *IEEE Trans. on Antennas Propag.* **59** 4345
- [25] Ge G D, Zhang R, Wang D, Wang B Z 2011 *IET Electronics Letters* **47** 901
- [26] Maslovski S I, Tretyakov S A, Belov P A 2002 *Microwave and Optical Technology Letters* **35** 47
- [27] Chen K S 2007 *Electromagnetic Fields and Waves* (Beijing: Higher Education Press) p251 (in Chinese) [陈抗生 2007 电磁场与电磁波 (北京: 高等教育出版社) 第 251 页]

Research on the focusing mechanism of one dimensional time reversal EM wave in sub-wavelength metal wire array*

Zhang Zhi-Min¹⁾²⁾ Wang Bing-Zhong^{1)†} Ge Guang-Ding¹⁾
Liang Mu-Sheng¹⁾ Ding Shuai¹⁾

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

2) (*School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China*)

(Received 22 October 2011; revised manuscript received 21 February 2012)

Abstract

Based on the equivalent dielectric model of the periodic metal wire array, the analytical expression of time reversal EM wave in the metal wire array is derived using transmission line method. Then, the influence of metal wire radius, metal wire array period and the amount of layers on time reversal EM wave focusing property is discussed within the equivalent dielectric model. This structure can be used to focus time reversal EM wave in the far field, at the same time, it provides an engineering reference for time reversal technique.

Keywords: time reversal, sub-wavelength structure, metal wire array, equivalent dielectric model

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.-q

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071031), Ph.d. Program Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20100185110021), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. E022050205), and the Scientific Research Foundation for Young Scientist of Huaibei Normal University, China (Grant No. 2012xq41).

† E-mail: zhzhmmail@163.com; bzwang@uestc.edu.cn