

超宽带信号激励线阵的波束形成

杨宝强¹, 张雄¹, 雷文太²

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710051; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073:

摘要: 分析了线阵在超宽带冲激信号激励下的辐射特性, 给出了这一信号体制的线阵辐射特性的表征方法, 提出了用非等间距非等幅激励线阵代替等间距等幅激励线阵提高方位向分辨率压低旁瓣的方法, 并进行了仿真实验。

关键词: 超宽带; 线阵; 方位分辨率; 波束形成

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)03-0034-03

超宽带(UWB)雷达在民用、环境和国防等应用领域正在成为越来越重要的探测手段^[1]。这一雷达体制的一个发展方向是采用阵列天线技术, 利用波束形成提高系统的方位分辨力。然而 UWB 雷达从发射、接收到信号处理都基于瞬态电磁特性, 窄带雷达波束形成的理论和算法不能用于超宽带阵列天线的分析。有必要建立关于瞬态电磁场波束形成的理论, 在这一理论指导下研究波束形成系统设计和算法实现。

1 线阵的超宽带辐射特性

设冲激信号为 $s(t)$, 脉宽为 t , 同相激励 N 元线阵, 各阵元完全相同, 均为全向阵, 依次放置于 x 轴 x_0, x_1, \dots, x_{n-1} 处, 则该线阵构成一边射阵。不考虑阵元间的耦合, 远区场处线阵的辐射信号可表示为激励信号 $s(t)$ 和线阵的脉冲辐射特性的卷积形式^[2]: $s_0(q, t) = s(t) * h(\theta, t)$, 而线阵的脉冲辐射特性 $h(\theta, t)$ 可表示为 $h(\theta, t) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \delta[1 - x_i \cos\theta/c]$ 。式中 w_i 为第 i 个阵元的幅度加权系数, c 为电磁波在空气中的传播速度。可见, 线阵的脉冲辐射特性与 θ 和 t 有关。在超宽带信号激励下, 线阵的辐射特性不是由稳态干涉形成的, 激励脉冲位置的测定是按时间, 而不是根据相位实现的。阵列合成波形不仅随空间变化, 还随时间变化, 为瞬态值。传统的幅度方向图已经无法描述这种空时二维辐射特性。对窄带信号激励下的线阵, 其能量方向图和幅度方向图在描述天线空间辐射特性上是一致的。因此, 可以用其能量方向图来代替传统意义上的幅度方向图, 从而定义超宽带信号激励下的线阵的空间辐射特性及其方位向分辨率。定义线阵的能量方向图为

$$e(\theta) = \int_0^{\infty} |s_0(\theta, t)|^2 dt = \int_0^{\infty} \left| \sum_{i=0}^{N-1} s\left(t - \frac{x_i}{c} \cos\theta\right) \right|^2 dt \quad (1)$$

归一化为 $e'(\theta) = e(\theta) / \max e(\theta)$ 。则半能量波瓣宽度为 $2\theta_{HE} = |\theta_{HER} - \theta_{HEL}|$, θ_{HER} 和 θ_{HEL} 均满足 $e'(\theta) = 1/2$ 。线阵的方位向分辨率可仿照常规线阵定义为 $\delta' = R2\theta_{HE}$ 。

能量方向图实际上是对线阵的辐射特性在时间维进行压缩, 只考虑其空间辐射特性。对均匀线阵, 当阵元间距 $d \geq c\tau$ 时就成为超稀疏线阵^[3]。在任一 θ 角的方向上, 相邻阵元辐射信号的时差为 $\delta t = d \cos\theta / c$ 。当 $\delta t \geq \tau$ 时, 即可认为这两个信号在时域中是分离的。因此, 阵元间距越大, 激励信号的时宽越窄, 线阵的干涉区域就越小, 方位向分辨率就越好。

窄带信号激励下, 非均匀阵与均匀阵相比, 从阵中到边缘幅度递减(锥削)分布, 导致主瓣展宽而副瓣降低; 反之, 从中心到边缘的递增分布则有较窄的主瓣和较高的副瓣电平^[2]。但在超宽带信号激励下, 线阵电

收稿日期: 2005-09-12

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(514730401103TB3201)

作者简介: 杨宝强(1972-), 男, 河南潢川人, 博士生, 主要从事信号与信息处理研究。

流的锥削分布在展宽主瓣同时也提高了副瓣电平^[3],中心到边缘递增分布对减小主瓣宽度压低副瓣有益。

因此,可以通过调整阵元间距 d_i 和幅度加权系数 w_i 得到期望的高分辨率低副瓣的空间辐射特性,归结为一个有约束条件的极值问题,即

$$\min 2\theta_{HE}, e'_{SL}(\theta) \quad \text{s. t.} \quad d_i \in (0, L), \sum d_i \leq L; w_i \in (0, 1] \quad (2)$$

2 辐射特性的仿真计算

激励信号为单周波 $s_i(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_0 t) & t \in [0, 1/f_0] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$, 中心频率为 $f_0 = 2 \text{ GHz}$, 等幅同相激励 6 元等间距

线阵,阵元间距分别为 $d = \lambda_0, 4\lambda_0$ 时线阵的空间辐射特性和能量方向见图 1。

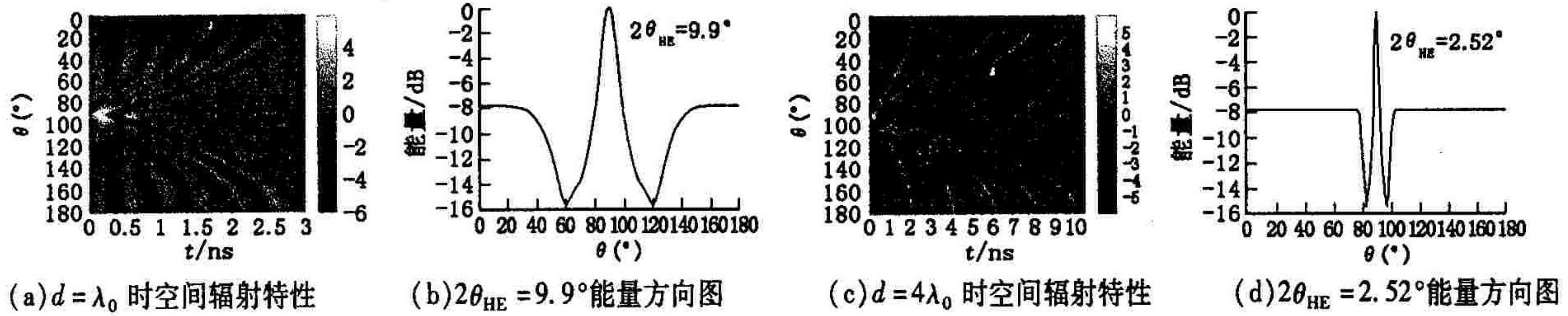


图 1 线阵的空间辐射特性和能量方向图随阵元间距的变化

图 1(a) - (d) 可见:阵元间距增大,线阵的干涉区域减小,非干涉区域增大,能量方向图变得尖锐。

单周波激励下 6 元阵的最佳辐射特性归结为式(2)的求解。取 $L = 29\lambda_0$ 。运用模拟退火算法^[4]解得 $d_{opt} = (1.99\lambda_0, 1.41\lambda_0, 25.6\lambda_0, 1.41\lambda_0, 1.99\lambda_0)$, $w_{opt} = (1, 0.6, 0.1, 0.6, 1)$ 。最优线阵与等间距等幅激励线阵的辐射特性见图 2。

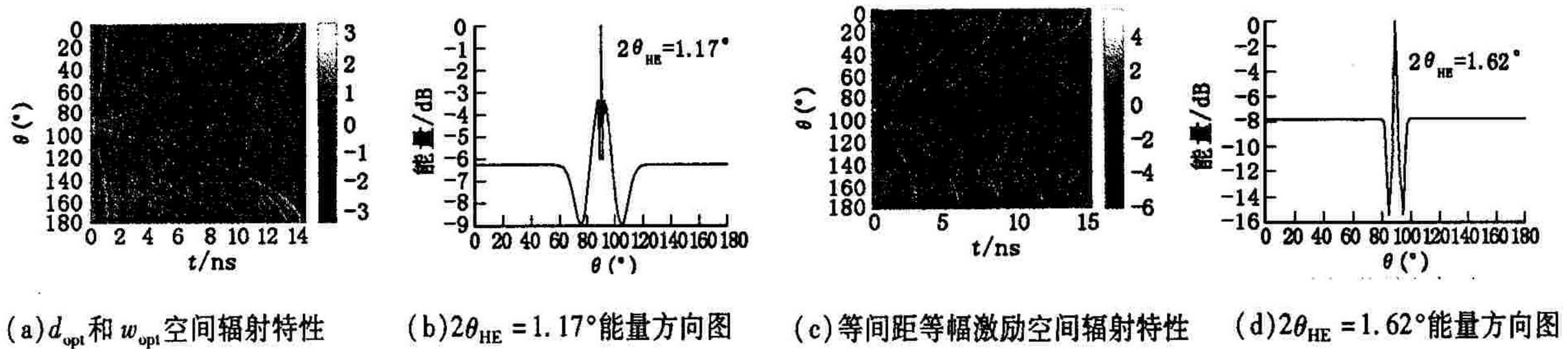


图 2 最优线阵与等间距等幅激励线阵的空间辐射特性和能量方向图

图 2 可见:最优线阵较大程度提高了线阵空间分辨率,降低了旁瓣干扰。与等间距等幅激励线阵相比,其非干涉区域副瓣电平提高了 19.7%,干涉区域副瓣电平减小了 42.2%,半能量波瓣宽度减小了 27.8%。

比较图 1 和图 2:①线阵空间干涉区域由阵元间距控制,半能量波瓣宽度主要受阵元激励电流幅度影响。副瓣电平则与二者都有关系;②运用非等间距非等幅激励线阵提高方位分辨率压低旁瓣是有效的。

3 结束语

本文分析了线阵在超宽带冲激信号激励下波束形成机理和辐射特性表征方法。理论分析和计算表明:①对超宽带冲激信号激励下的线阵,方向性不是利用相位特征的干涉作用形成的。线阵的空间辐射特性与激励信号的形式有关。②用非等间距非等幅激励线阵代替等间距等幅激励可以较好的改善线阵的方位分辨率和旁瓣干扰。③能量方向图只能反映空间辐射能量集中的程度,不能反映波形失真情况。如要完整的描述线阵的辐射特性,有必要引入保真度,斜率方向性图等其他参数。

参考文献:

[1] Barret T W. History of Ultra Wideband (UWB) Radar & Communication: Pioneers and Innovators[A]. Progress In Electromagnetics Research Symposium 2000(PIERS 2000)[C]. Cambridge, MA;2000.

- [2] 刘克成,宋学诚. 天线原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1989.
- [3] Schwartz J L, Steinberg B D. Ultrasparse, Ultrawideband Arrays[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(2): 376 - 393.
- [4] Giovanni Cardone, Gabriella Cincotti, Paola Gori, et al. Optimization of Wide - Band Linear Arrays[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(4): 943 - 951.

(编辑:姚树峰)

Beam -forming of Linear Array Excited by Ultra -wide Band Signal

YANG Bao - qiang¹, ZHANG Xiong¹, LEI Wen - tai²

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The radiation characteristics and expression method of linear - array under the excitation of ultra - wide band (UWB) impulse signal are analyzed in this paper. Through detailed analysis, it is shown that the azimuth resolution can be enhanced through adjusting the weight coefficients of the elements and the spaces between the elements of the linear - array without altering the array length. Finally, the result of the simulation is presented.

Key words: ultra - wideband; linear array; azimuth resolution; beam - forming

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] 金观昌. 电子错位散斑干涉术用于无损检测的探讨[J]. 实验力学, 1992, 7(2): 181 - 187.
- [2] Nakadate S, Yatagai T, Saito H. Electronic Speckle Pattern Interferometry Using Digital Image Processing Technique[J]. Appl Opt, 1980, 19(11): 1879 - 1883.
- [3] Creath K. Digital Speckle Pattern Interferometry Using a 100 X 100 Imaging Array[J]. Proc SPIE, 1984, 501: 292 - 298.
- [4] 金观昌. 计算机辅助学测量[M]. 北京:清华大学出版, 1997.
- [5] 杜功焕. 声学基础(上)[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1981.

(编辑:姚树峰)

Audio -frequency Driving Vibration Used in Structure Components

Nondestructive Testing with DSSPI

CUI Yong - zhong¹, ZHANG Jian²

(1. Department of Precision Instruments and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: The article introduces a self - developed Wide Audio - frequency Driving Vibration Loading system. Composite samples with artificial defects are inspected and validated by using DSSPI with the loading system. The experimental results show that the system is effective and has advantages of fast, continuum, non - contact. Thus it is suitable for outfield original state inspections with loading of aeroplane structure components.

Key words: wide audio - frequency driving vibration loading; DSSPI; nondestructive testing; composite; defect