

非均匀线阵数字多波束测向算法研究

Study on Digital Multi-Beam Direction Finding Algorithm for Non-Uniform Linear Array

董晔 李晓明 李瑞

中航雷达与电子设备研究院航空电子系统射频综合仿真航空科技重点实验室

摘要: 提出了一种适用于非均匀线阵的数字多波束测向方法, 该方法首先通过数字配相法形成同时多波束, 然后根据目标信号在相邻三波束的输出值来估计目标方向, 通过给出数字阵列雷达的系统架构, 建立非均匀线阵信号模型, 对上述方法进行了计算机仿真分析, 仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 非均匀线阵; 数字多波束测向; 数字配相法

Keywords: non-uniform linear array; digital multi-beam direction finding; digital phase matching method

0 引言

多波束测向是数字多波束技术的应用方向之一, 已成为近年来的研究热点^[1]。文献[2]给出了数字配相法和快速傅里叶变换(FFT)算法两种数字多波束形成方法。文献[3]提出了基于FFT的数字多波束测向算法, 由于采用FFT处理中要求阵元是均匀间隔的, 并且各个波束最大值之间的间隔不能任意改变, 导致在系统实际应用时缺乏灵活性。文献[4]对传统雷达的多波束比幅测向精度进行了分析。

随着有源相控阵雷达技术的发展, 智能蒙皮技术已成为当今雷达技术的发展热点。智能蒙皮必然带来阵列单元布阵的非均匀性。本文针对非均匀线阵, 提出了适用于非均匀线阵的数字多波束测向算法, 该方法首先通过数字配相法形成同时多波束, 然后根据目标信号在相邻三波束的输出值来估计目标方向, 进一步仿真分析数字多波束测向精度以及相关因素对测向精度的影响, 仿真结果证明了该方法的有效性与可行性。

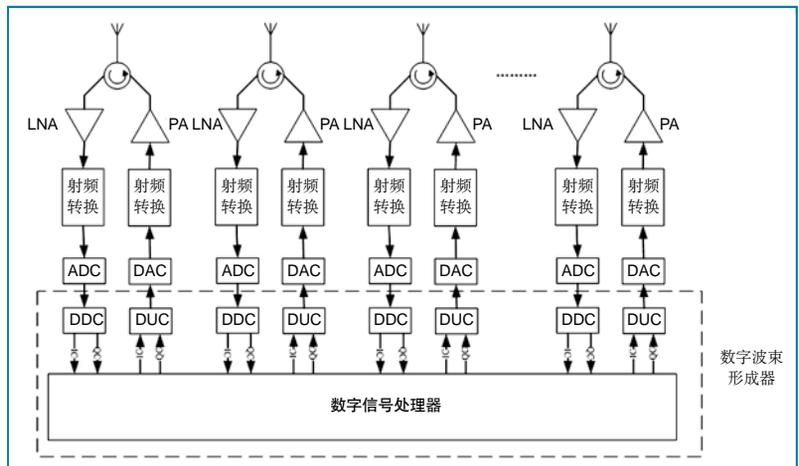


图1 数字阵列雷达系统框图

1 非均匀线阵信号模型

数字阵列雷达系统采用数字多波束形成技术能同时产生密集多波束, 阵列单元通道信号被数字采样后, 在不降低信噪比的情况下, 对接收信号进行数字处理便可形成多个同时的低副瓣密集波束^[5], 其结构如图1所示。

假设数字阵列雷达系统由 M 个阵元的非均匀线阵组成, 如图2所示。

以阵元1为参考阵元, 各阵元与参考阵元的间距记为 $d_i, i=1, \dots, M$, 其

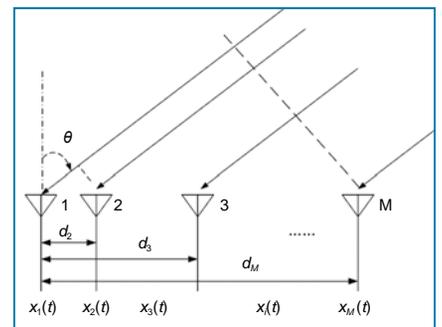


图2 非均匀线阵示意图

中 $d_1=0$ 。若同时有同一频率 ω_0 的 L 个窄带平面波信号 $s_1(t), s_1(t), \dots, s_L(t)$ 分别以

$\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_L$ 方向入射到如图2所示的非均匀线阵上, 并假定阵元1收到的信号为

$$x_1(t) = s_1(t)e^{j\omega_0 t} + s_2(t)e^{j\omega_0 t} + \dots + s_L(t)e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

则类似地, 各阵元信号为

$$x_i(t) = s_1(t)e^{j\phi_i} e^{j\omega_0 t} + s_2(t)e^{j\phi_i} e^{j\omega_0 t} + \dots + s_L(t)e^{j\phi_i} e^{j\omega_0 t} \quad (2)$$

式(2)中

$$\phi_i = \frac{2\pi d_l}{\lambda} \sin \theta_i, i=1, \dots, M; l=1, \dots, L$$

相应各阵元基带信号为

$$x_i(k) = s_1(k)e^{j\phi_i} + s_2(k)e^{j\phi_i} + \dots + s_L(k)e^{j\phi_i} \quad (3)$$

阵列输入矢量可写成

$$x(k) = [a_1, a_2, \dots, a_L] s(k) = A \cdot s(k) \quad (4)$$

式(4)中, $s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_L(k)]^T$ 为信号矢量, $a_i = [1, e^{j\phi_i}, \dots, e^{j\phi_M}]^T$ 为信号 $s_i(k)$ 的操纵矢量, 而 $A = [a_1, a_2, \dots, a_L]$ 为操纵矢量阵。

考虑噪声时的输入信号矢量可表示为 $x(k) = A \cdot s(k) + \text{Noise}$ (5)

2 数字多波束测向

数字多波束测向的前提和基础是形成多波束覆盖系统要求的测向范围。采用数字配相法形成同时多波束的示意图如图3所示, 使用数字配相法可形成多个具有任意指向间隔的波束, 波束间隔可以调整, 且各个波束可因幅度加权系数的不同, 具有各自不同的波束形状^[6]。采用数字配相法形成同时多波束的缺点是, 当波束数目 N 增大时, 信号处理运算量将显著增加^[7]。

若形成 N 个波束, 第 n 个波束指向为 θ_n , 则第 n 个波束的导向矢量为 w_n 。

$$w_n = a(\theta_n) = [1 \quad e^{-j\phi_1} \quad \dots \quad e^{-j\phi_M}]^T \quad (6)$$

式(6)中, $\phi_i = \frac{2\pi d_i}{\lambda} \sin \theta_n; i=1, \dots, M$ 。

设 M 个阵元的幅度权为 $w_m, m=1, 2, \dots, M$, 则第 n 个波束的方向图为:

$$F_n(\theta) = |(w_m \cdot w_n)^H a(\theta)| \quad (7)$$

结合式(6), 第 n 个波束输出:

$$y_n = (w_m \cdot w_n)^H * x(k) \quad (8)$$

特殊地, 当 M 个阵元为均匀线阵时, 可以采用FFT方法形成同时多波束示意图, 如图4所示, 这一方法基于天线方向图天线口径电流分布函数的傅里叶变换, 即天线方向图函数与天线口径照射函数之间存在着傅里叶变换对的关系。

FFT法与数字配相法相比, 形成

同样数目的多波束的运算量较小, 便于硬件实现模块化, 但该方法各个波束最大值之间的间隔不能任意改变。采用FFT方法实现数字多波束实质上是数字配相法的一个特例。

多波束测向机理是根据天线对到达不同方向电磁波的振幅响应来测量目标信号方向。设多波束比幅测向系统由 N 个同时多波束组成, 覆盖整个测向范围 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 。实际测量中, 覆盖范围可以任意改变, N 也可以任意改变, 该方法具有测向速度快、测向精度高等优点。

多波束比幅法测向主要采取三波束抛物线法测角, 原理如图5所示, 各波束以 -3dB 或 -3dB 以内相交, 目标

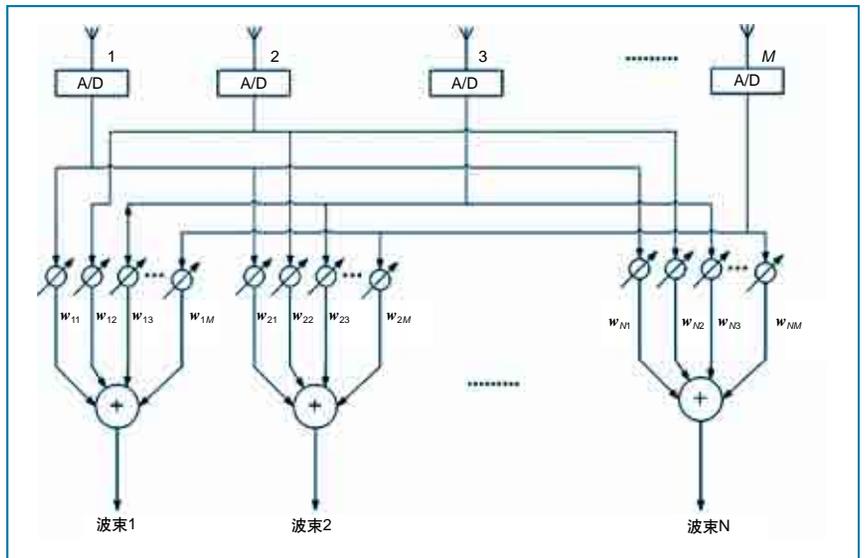


图3 数字配相法形成多波束示意图

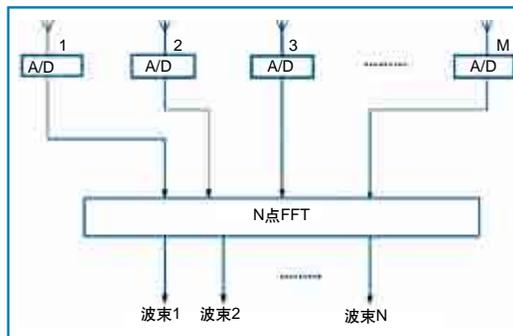


图4 FFT方法形成多波束示意图

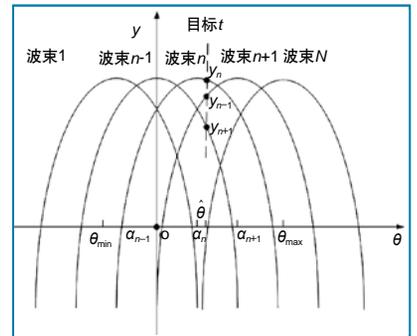


图5 三波束抛物线法测角原理图

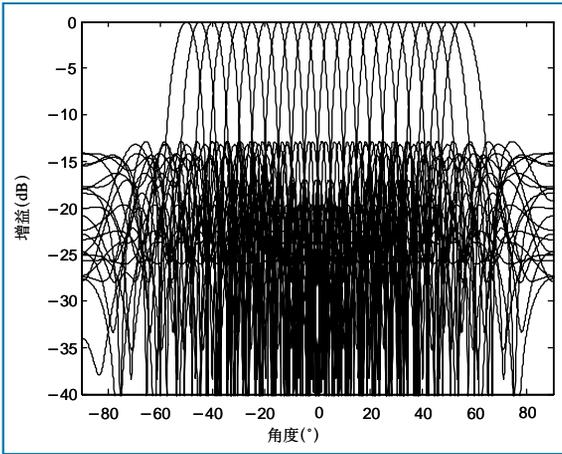


图6 多波束空间覆盖示意图

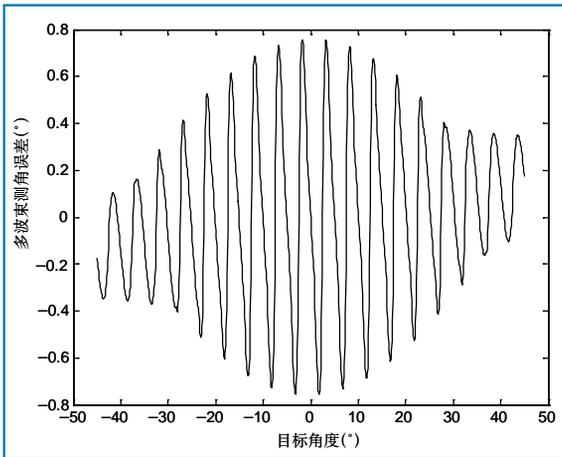


图7 多波束测角误差示意图

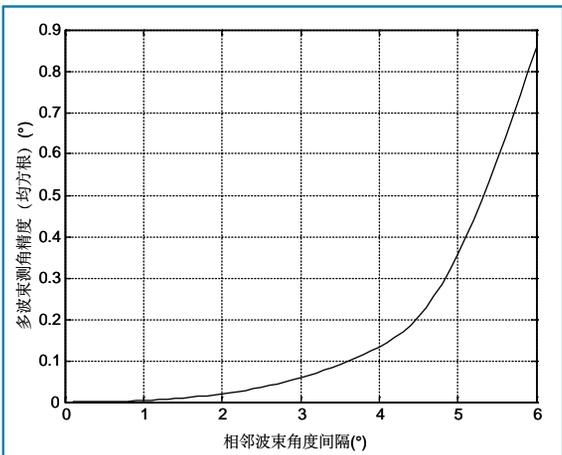


图8 测向精度与波束间隔关系曲线

信号以 θ 方向入射,多波束系统得到相邻三波束输出相对于其他波束输出较大。以这三个波束的输出结果作为目标方向估计运算的输入。

设这三个相邻波束的主值方向为 $\alpha_{n-1}, \alpha_n,$

α_{n+1} , 其对目标入射信号的输出分别为 y_{n-1}, y_n, y_{n+1} 。采用数字配相法形成同时多波束时, y_n 可由式(8)获得。根据三波束抛物线目标精确定向方法可以得到目标入射方向的估计值:

$$\hat{\theta} = \alpha_n + \frac{(y_{n-1} - y_{n+1})(\alpha_n - \alpha_{n-1})}{2(y_{n-1} + y_{n+1} - 2y_n)} \quad (9)$$

3 非均匀线阵数字多波束测向仿真

非均匀线阵数字多波束测向仿真中,数字阵列雷达系统设为20阵元非均匀线阵,其工作频率为500MHz,非均匀线阵布阵形式如图2所示,以阵元1为参考阵元,各阵元与参考阵元的间距为[0,0.3489,0.6076,0.8621,1.2167,1.5575,1.8095,2.0426,2.3520,2.7253,3.2607,3.6509,3.9407,4.1554,4.4607,4.7576,5.0834,5.4058,5.6583]米,测向角度范围为 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 。阵元幅度权为均匀权,采用数字配相法形成多波束,同时形成多个等间隔波束覆盖系统要求的测向范围。由于非均匀线阵阵列系统主波束指向 0° 时, -3dB 主波束宽度约为 5° ,因此相邻波束之间的间隔可选为 5° ,形成22个波束覆盖 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 测向角度范围,多波束空间覆盖示意图如图6所示。

从图6可以看到,非均匀线阵数字多波束测向系统采用数字配相法形成多波束覆盖测向范围,随着主波束指向角偏离数字阵列法线方向 0° ,其相应波束的宽度将逐渐展宽。

当目标位置在测向角度范围 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 变化时,通过计算机仿

真分析非均匀线阵数字多波束测向系统的测角误差,如图7所示。

当相邻波束之间的间隔选为 5° 时,目标位置在测向角度范围 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 变化,系统测角误差将在 $\pm 0.75^\circ$ 范围内振荡变化,系统测向精度可达 0.36° (均方根)。

非均匀线阵数字多波束测向系统测向精度与相邻主波束角度间隔相关,波束间隔是影响系统测向精度的重要因素,通过计算机仿真可获得测向精度与波束间隔关系曲线,如图8所示。

从图8中可以看到,随着相邻主波束角度间隔的减小,系统测向精度将增高。同时,随着波束间隔减小,覆盖同样测向范围所需的波束数目增加,将加重系统信号处理负担。因此,系统设计时,需要综合考虑系统测向精度、系统信号处理能力、系统复杂度等诸多因素。

4 结束语

多波束测向是数字多波束技术的应用方向之一。本文给出了适用于非均匀线阵的数字多波束测向具体方法,对该方法进行了计算机仿真分析,进一步仿真分析了数字多波束测向精度以及相邻波束间隔对测向精度的影响,仿真结果表明该方法有效、可行。

AST

参考文献

- [1] 张光义. 多波束形成技术在相控阵雷达中的应用[J]. 现代雷达. 2007,29(8): 1-6.
- [2] 张光义,赵玉洁. 相控阵

航空发动机材料寿命问题探讨

Discussion on Life Prediction of Gas Turbine Materials

吴犀甲 / 加拿大国家研究院

摘要: 归纳了航空发动机材料的变形损伤机理, 强调了变形物理机制模型在部件设计和全寿命预测管理方面的应用。

关键词: 疲劳; 蠕变; 变形机制; 寿命预测

Keywords: fatigue; creep; deformation mechanism; life prediction.

0 引言

航空发动机既要有高性能(大推力, 低油耗, 低排放)又要有耐久性。这要求在设计过程中认真考虑发动机工作条件与部件材料承受能力的关系。设计人员在设计中使用合适的计算分析方法和准确的热力学边界条件估算温度和应力, 然后用经验关系或安全系数对结果加以修正以确定部件的使用寿命。这些“理论”计算值将在设计中成为衡量材料性能的标杆。随着推力增大和节省燃油的要求增高, 发动机燃烧温度必须增高, 因此发动机材料要承受更高温度和更高应力, 同时还要忍受环境腐蚀和外物损伤。图1显示了发动机部件的各种失效原因所占的比重, 其中79%与材料

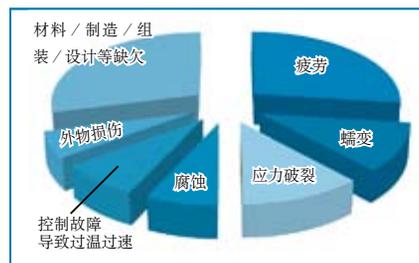


图1 发动机部件的各种失效原因

和设计有关^[1]。

现实中的材料性能依化学成分和制造工艺变化万千。一般要求是99%同种材料样品在同等温度条件下达到设计强度。这要求在选择材料时, 容许一定的成分和处理工艺的不确定性, 需要对材料进行成千上万次测试, 确定其性能的统计分布, 然后按一定的可信度选定合适的材料。但

是受实验条件的局限性, 通常只能通过材料试验评估简单加载条件下的性能, 如单向拉伸、等幅疲劳和常载荷高温蠕变。而发动机部件在使用过程中的温度变化和加载路径相当复杂, 会引起疲劳和蠕变在热力交变的条件下相互作用, 导致复杂多样的破坏机制, 严重影响使用寿命。

因此, 在现代先进发动机设计过程中需要引用材料本构-损伤模型对部件材料在使用过程(包括瞬态和稳态)的表现行为进行实时分析, 以确定其满足寿命要求。在力学上, 基本可以认为材料是均匀连续介质。但材料的本构-损伤模型实质上是多尺度物理问题, 因为损伤起始于(纳米级)晶格位错和非匀质界面, 活动于

雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[3] 龙宁, 张凤荔. 基于FFT的数字多波束测向算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(1): 16-18.

[4] 顾敏剑. 多波束比幅测向系统精度分析[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(3): 70-73.

[5] 胡梦中, 宋铮, 等. 一种新的低副瓣多波束形成方法[J]. 现代雷达, 2007, 29(10): 71-74.

[6] 黄玉学, 李其福, 桑微. 数字多波束技术信号处理算法研究[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 18-19, 52.

[7] 程进, 傅有光, 王峰. 高速实时数字多波束形成系统实现方法[J]. 现代

雷达, 2005, 27(12): 45-48.

作者简介

董晔, 工程师, 研究方向为雷达系统仿真与算法设计。

李晓明, 博士, 工程师, 研究方向为阵列信号处理。

李瑞, 工程师, 研究方向为雷达系统、信号处理。