

基于旁瓣电平和主瓣偏移的光控线性相控阵子阵数确定方法

高瑜翔 何子述 徐继麟 韩春林

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 在光控相控阵列系统物理模型的基础上, 分析了子阵数与旁瓣电平和主瓣偏移的关系, 给出了基于旁瓣电平和主瓣偏移相结合的、直接数值搜索子阵数的算法及其实现过程, 并通过计算机仿真验证了该方法的正确性。

关键词: 相控阵列 瞬时带宽 子阵划分 数值搜索

中图分类号: TN958.92 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)08-1222-04

Determining of Subarray Number Based on Sidelobe Level and Mainlobe Deviation for Optically Linear Phased Array

Gao Yu-xiang He Zi-shu Xu Ji-lin Han Chun-lin

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper, based on the physical model of optically phased array, analyzes the relationship between the number of subarray and the sidelobe level and mainlobe deviation. It gives the realization process of the algorithm based on the combining the sidelobe level and the mainlobe deviation for solving the number of subarray by directly numerical search. And this method is verified to be correct by computer simulation.

Key words Phased array, Instantaneous bandwidth, Subarray partition, Numerical search

1 引言

采用真实延时(True Time Delay, TTD)技术可以大大提高相控阵的瞬时带宽能力^[1,2]。然而对于大型相控阵, 由于体积和成本因素不可能在每一阵列单元均采用延时器, 故通常都采用划分子阵的方法实现阵列馈电, 这不仅使得整个天线阵列的结构简单、成本降低, 而且阵列的方向特性又能保证。在子阵延时的光控相控阵中, 子阵数的多少决定了阵列的带宽能力; 仅对阵列的工作带宽来说, 当然子阵数越多越好, 而从综合因素来看, 情况并非如此。因而就涉及到如何确定最佳子阵数的问题。其实, 在参考文献[2]中, 得到了一个有关子阵数和带宽关系的近似公式, 但是只给出了方向图的偏移对带宽的约束; 本文的最佳子阵数的确定方法, 将旁瓣电平和主瓣偏移结合起来, 同时考虑二者对阵列瞬时工作带宽的约束来完成最佳子阵数的确定, 结果证明是正确和有效的, 这对系统设计有着重大意义。

2 光控相控阵列天线系统的物理模型及其方向图特性

2.1 子阵延时的光控相控阵列天线系统模型

光控相控阵列天线系统的构成如图 1 所示。它表示该阵

列为由 N 个单元构成的均匀线阵, 被分成 M 个子阵, 则每个子阵包含的单元数为 $n_s = N/M$ 。且各子阵配置一个延时单元, 简称为 TTD, 即真实延时单元; 实际阵列中, 该延时器为 b_1 位可编程的, 可以提供 2^{b_1} 个时移单位; 子阵内各单元均有一个 b_2 位的移相器, 完成 $0 \sim 2\pi$ 内的移相, 它可以提供 2^{b_2} 个相移单位。之所以采用此种结构, 是因为子阵延时加单元移相这种结构, 不仅降低了阵列的成本和复杂性, 更为重要的是可以部分抵消孔径渡越时间, 从而获得较宽的瞬时信

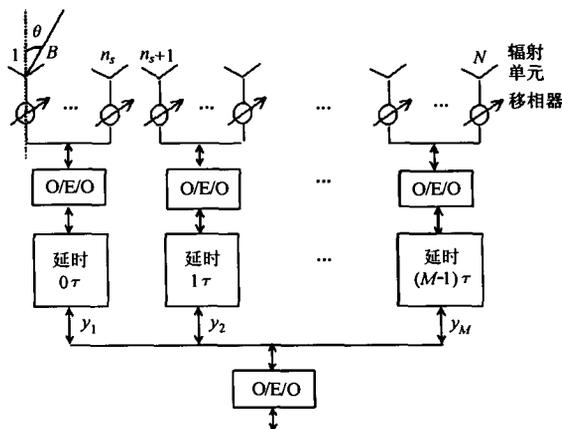


图 1 光控相控阵列天线系统构成模型

号带宽。天线阵列工作时，对于发射，先将发射机功放送来的信号经过电光变换(E/O)后分成 M 路，再分别送给 M 个 TTD 延时单元，信号在这里经不同延时后，再经过光电变换(O/E)送给位于 T/R 组件内的各单元的移相器进行移相，从而形成某一方向的波束，即波束控制，之后再将信号馈送给阵列的各天线单元，向空间辐射出去；对于接收，各子阵单元接收的信号先经过移相后，在子阵再经电光变换(E/O)，然后在时延网络中经不同时延，最后合成在一起送给光电变换(O/E)得到某一方向的合成信号。当改变各 TTD 单元的时延值和移相器的移相值时，便可完成波束在一定空域内扫描，可见光控相控阵雷达它既解决了阵列瞬时带宽受限问题，又实现了天线波束扫描。

2.2 子阵延时的光控阵列天线方向图

根据图 1 所示的光控相控阵列天线系统的物理模型，可以通过数学推导得到子阵延时的光控阵列天线的方向图的表达式如下：

$$F_N(\theta) = \sum_{i=0}^{M-1} e^{j/n_s kd(\sin\theta - \sin\theta_0)} \cdot \sum_{l=0}^{n_s-1} e^{jl(kd \sin\theta - k_0 d \sin\theta_0)} \quad (1)$$

其中 $k=2\pi/\lambda$ ，称为波数， λ 为工作频率对应的波长； $k_0=2\pi/\lambda_0$ ； d 表示相邻单元的间距，设 $d=\lambda_0/2$ ， λ_0 为设计频率 f_0 对应的波长； θ_0 为指向角。若对式(1)求和再化简，则可以得到具有子阵延时、单元移相的均匀线阵的归一化方向图为

$$F(\theta) = \frac{\sin[Nkd(\sin\theta - \sin\theta_0)/2]}{M \sin[n_s kd(\sin\theta - \sin\theta_0)/2]} \cdot \frac{\sin[n_s(kd \sin\theta - k_0 d \sin\theta_0)/2]}{n_s \sin[(kd \sin\theta - k_0 d \sin\theta_0)/2]} \quad (2)$$

式(2)也可在形式上进一步简化，写成阵因子 $f_1(\theta)$ 和子阵方向图 $f_2(\theta)$ 的乘积，即

$$F(\theta) = f_1(\theta) \cdot f_2(\theta) \quad (3)$$

其中

$$f_1(\theta) = \frac{\sin[Nkd(\sin\theta - \sin\theta_0)/2]}{M \sin[n_s kd(\sin\theta - \sin\theta_0)/2]}$$

$$f_2(\theta) = \frac{\sin[n_s(kd \sin\theta - k_0 d \sin\theta_0)/2]}{n_s \sin[(kd \sin\theta - k_0 d \sin\theta_0)/2]}$$

2.3 类栅瓣旁瓣电平与子阵数的关系

在参考文献[3]中，给出了类似栅瓣的旁瓣电平近似估算公式，详细推导过程见该文献，在此给出第一旁瓣电平公式：

$$P_s \approx \frac{\pi^2 X^2}{\sin^2 \pi(X+1/n_s)} \quad (4)$$

其中 $X = \frac{d \sin\theta_0}{\lambda_0} \cdot \frac{\Delta f}{f_0}$ ；对其取对数为

$$P_s = 10 \lg \frac{\pi^2 X^2}{\sin^2 \pi(X+1/n_s)} \text{ (dB)} \quad (5)$$

此式表明了旁瓣电平与子阵数是一种非线性、非单调的复杂关系，虽为一个近似计算式，但当子阵数达到一定值时，仍能用它来说明子阵数与旁瓣电平的关系。

2.4 主瓣偏移与子阵数的关系

对于等间距均匀线阵，若仍采用子阵延时、单元移相来扫描波束，则方向图主瓣偏移(即由于带宽和子阵数的影响，实际的阵列的最大方向偏离预先给定的阵列指向的角度)与子阵数、带宽的关系通过推导和简化可得到如下近似表达式：

$$\Delta\theta = \frac{\Delta f}{2f_0} \cdot \frac{N/M-1}{N-1} \cdot \text{tg}\theta_0 \quad (6)$$

从此式知，主瓣偏移随子阵数增大而单调减小，特别是子阵数较小时，主瓣偏移较大，而当子阵数达到一定程度时，主瓣偏移都很小。故在求解最佳子阵数时，按式(6)求解是十分有利的，它正好可以弥补基于旁瓣优化的不足，避免基于旁瓣电平的最佳子阵数求解结果处于误区。

2.5 类栅瓣旁瓣和主瓣偏移随子阵数变化的数值仿真及结果分析

方向图类栅瓣旁瓣电平和主瓣偏移随子阵数增加而变化的仿真结果如表 1 所示。它表示了在单元数为 128， $\theta_0=60^\circ$ ， $f_0=1.3\text{GHz}$ ， $\Delta f=200\text{MHz}$ 时的旁瓣电平和主瓣偏移随子阵数变化的数值结果。从表中可以定性地知道，子阵数越多，阵列的工作带宽能力越强。但从表 1 中第 2 行也可以看出，在子阵数为 1，2，4 时的旁瓣电平比子阵数为 8 时的还低，说明了仅以旁瓣电平作为约束来优化子阵数，是不全面的，否则，求解时可能得到子阵数为 1，2，4 的非最优解，因为子阵数为 1，2，4 时主瓣偏移会很大，故不为最佳子阵数。同时，在求解基于旁瓣电平约束的最佳子阵数时，应采用子阵数从大到小的搜索方向，以免子阵数较小时旁瓣搜索限于局部解。

表 1 的第 3 行表示了单元数为 128， $\theta_0=60^\circ$ ， $f_0=1.3\text{GHz}$ ， $\Delta f=200\text{MHz}$ 时主瓣偏移与子阵数的关系。从表中可知，真正的偏移并非是子阵数的单调函数，只有在子阵数达到一定程度时，才是单调的，所以在通过数值搜索求解时，也应采用子阵数从大到小的搜索方向，以保证结果的正确性，因为子阵数越大求解条件越易满足。

表 1

| 子阵数 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 |
|----------|-------|--------|-------|------|-------|--------|--------|--------|
| 旁瓣电平(dB) | -13.2 | -12.57 | -13.1 | -6.1 | -12.6 | -13.09 | -13.21 | -13.23 |
| 主瓣偏移(°) | 9.75 | 9.84 | 9.87 | 0.15 | 0.03 | 0.01 | 0 | 0 |

可见,研究方向图特性与子阵数的关系,不仅是求解算法的必要,而且可以使设计的计算方法更简,效率更高。

3 光控阵列天线子阵数求解方法

本文的最佳子阵数的确定,是指在给定阵列条件和阵列方向特性要求(指向偏移和旁瓣电平)的前提条件下的最小子阵数的求解。由于式(4)或式(6)均为强的非线性函数,约束函数式(4)既含有三角函数,又有平方关系,故较为复杂;同时,二者都是近似公式,存在一定误差,例如,在单元总数为32、其它条件不变时,子阵数8和4的阵列方向图的类栅瓣第一旁瓣电平的真实值与由式(4)计算的值相差分别为1.8dB和4.3dB,因此在用于定量求解时,采用直接对方向图模型函数进行数值搜索方法求解,既简单又相对准确,故本文采用此法。

一个好的求解算法,既要考虑其正确性和可靠性,还要结合所研究的实际的物理问题,来研究算法的实现过程与方法,才能提高算法的实用性和效率。对于阵列最佳子阵数的求解,主要应考虑实际情况有子阵数的搜索步长和搜索方向,在此不详述了。

3.1 子阵数求解算法示意图

图2表示了两种求解子阵数的先后顺序;图2(a)表示求解开始时,先按照指向偏移搜索子阵数,搜索时,子阵数从最大值 M_0 开始,然后子阵数逐渐减小,当得到一个符合要求的子阵数值 M_{11} 后,再按照旁瓣电平搜索子阵数,此时子阵数的搜索方向应按子阵数增大的方向调整,因为子阵数越大,旁瓣电平呈减小趋势;搜索过程最终停止于 M_{12} 。而图2(b)表示求解开始时,先按照旁瓣电平搜索子阵数,搜索时,子阵数也从最大值 M_0 开始,然后子阵数逐渐减小,当得到一个符合要求的子阵数值 M_{21} 后,再按照指向偏移搜索子阵数,此时子阵数的搜索方向仍应按子阵数增大的方向调整,因为子阵数越大,主瓣偏移越小;搜索过程最终停止于 M_{22} 。由于方向图的旁瓣电平和主瓣偏移与子阵数的关系,从总的来看是,随着子阵数的增大而旁瓣降低、偏移减小,且在子阵数较少时方向图的旁瓣和偏移变化较快,在

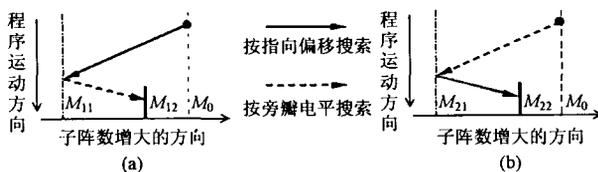


图2 子阵数的求解示意图

子阵数较大时变化较慢。在子阵数较少时,这种变化不仅快,更为重要的,它是非线性和非单调的。因此实际的求解算法中,采用将两个约束条件下的两种先后次序均使用,然后从最终结果中择优的方法,这样进一步保证了求解结果的正确性。

3.2 约束条件的确定

首先是旁瓣电平的确定。旁瓣电平当然是越低越好,但是太低可能得不到解的结果,只能选择一个合适值 P_{s0} ,可根据要求或经验选择。

其次就是主瓣偏移大小的确定。可以按照参考文献[4]给出的公式 $\Delta\theta \leq \theta_{1/2}(\theta_0)/4$,其中, $\Delta\theta$ 表示主瓣偏移, $\theta_{1/2}(\theta_0)$ 表示主瓣在指向角为 θ_0 时的相对功率的3dB宽度值,此条件即为偏移要小于主瓣宽度的1/4,具体可写为

$$\Delta\theta \leq 51\lambda_0/(Nd \cos\theta_0)/4 \quad (7)$$

其单位为度。只要 λ_0 , N , d , θ_0 给定,则 $\Delta\theta$ 可以确定。

4 计算机仿真结果及结论

按照图2所描述的算法,在 $\Delta f=200\text{MHz}$, $\theta_0=60^\circ$ 时,对不同阵列单元总数和不同的旁瓣电平要求,将两种求解顺序结合起来,通过计算机得到的一组结果见表2。可见求解结果与初始条件十分相关,不同的旁瓣电平和主瓣偏移要求,所求得的结果是不同的。

再根据表2的条件,由式(2)的方向图表达式,通过计算机仿真出相应的方向图如图3,图4,图5所示。在图3,图4和图5中,实线为低旁瓣要求下所求解的子阵数对应的方向图,虚线为较高旁瓣要求下所求解的子阵数对应的方向图。图中的方向图主瓣偏移和旁瓣电平的大小,与本文的最佳子阵数的求解方法完全相符,从而证明了该方法是正确。

表2

| 阵列单元总数 | 32 | | 128 | | 1024 | |
|----------|----|-----|-----|-----|------|-----|
| 旁瓣条件(dB) | -2 | -12 | -5 | -12 | -10 | -12 |
| 优化的子阵数 | 2 | 4 | 8 | 16 | 64 | 128 |

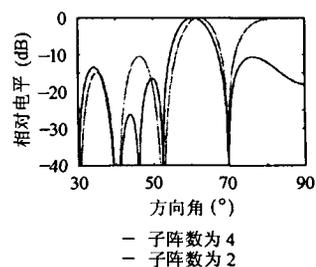


图3 32单元、子阵数分别为2和4时的方向图

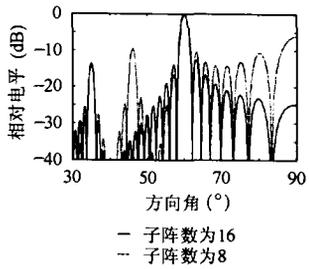


图4 128单元、子阵数分别为8和16时的方向图

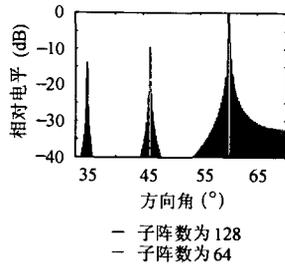


图5 1024单元、子阵数分别为64和128时的方向图

本文在全面分析了阵列方向图特性和子阵数的关系的基础上,采用旁瓣电平和主瓣偏移相结合的数值求解搜索方法,完成了对子阵延时的光控阵列的最佳子阵数的求解算法设计和计算机仿真。该方法的算法简单,结果正确可靠,这对整个光控相控阵列的系统设计有着重要意义。

参考文献

- [1] Mailloux R J. *Phased Array Antenna Handbook*. Boston-London, Artech House, 1994.
- [2] 张光义著. 相控阵雷达系统. 北京, 国防工业出版社, 2001: 323 - 333.
- [3] Mailloux R J. Array grating lobes due to periodic phase, amplitude, and time delay quantization. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1984, 32 (12): 1364 - 1368.
- [4] 张直中. 论宽带相控阵雷达的战术优越性. *电子学报*, 1993, 31(3): 86 - 92.

高瑜翔: 男, 1970年生, 博士生, 从事宽带阵列天线和智能天线系统、光控相控阵雷达及其信号处理方面的研究。

何子述: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 现主要从事阵列信号处理、智能天线、光控相控阵技术等的研究。

徐继麟: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 长期从事电路与雷达系统、超宽带雷达及软件无线电等方面的研究工作。