

# 子阵级应用延迟线对相控阵天线带宽改善的分析

张 蕾, 郭陈江, 丁 君

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)



**摘 要:**采用频率无关移相器的相控阵天线的波束指向会随频率发生变化,实时延迟线是提高宽带相控阵天线指向精度的重要方法。分析了平面相控阵天线波束指向随频率改变而产生漂移的现象,理论分析和仿真结果均表明,当频率改变时,平面相控阵天线的波束指向仅在俯仰角面发生漂移,而在方位角的指向不变。详细讨论采用子阵分割技术,并在子阵级别用实时延迟线,单元内采用移相器的混合波束控制技术。结果表明,这种方法可以有效扩展相控阵天线的带宽。

**关键词:**孔径效应; 宽带相控阵天线; 实时延迟线

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-654X(2007)06-0065-03

## 引言

传统的相控阵天线常采用频率无关移相器控制波束扫描,这种方法使相控阵天线的瞬时带宽受到了很大的限制。而且要求的阵列尺寸越大,对带宽的限制也越强。随着技术的发展,人们对相控阵天线的瞬时带宽提出了越来越高的要求,如何扩展相控阵天线的带宽是一个很重要的研究课题。

孔径效应会使相控阵天线的波束指向随工作频率的变更而发生不希望的漂移,它严重制约了相控阵天线的瞬时带宽。解决这一问题的办法是采用实时延迟线控制波束扫描,这样波束指向不会随频率变化而发生漂移,从而可以大大增加天线的瞬时带宽<sup>[1]</sup>。但是如果在每个单元信号通道都加入延迟线必然会使阵列的成本很高,本文主要研究在子阵级加入延迟线,子阵内部采用频率无关移相器的混合控制方法。这种方法在适当扩展阵列带宽的情况下,不至于使阵列的成本过高。

## 1 频率变化对相控阵天线波束指向的影响

在如图1所示的  $M \times N$  平面相控阵天线中,阵列单元在  $x$  和  $y$  轴方向呈均匀分布, $x$  和  $y$  向单元间距分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,波束指向角  $(\theta_B, \varphi_B)$  为,假设辐射元为各向同性单元,幅度为均匀分布,则方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(\Delta\varphi_{mn} - \Delta\varphi_{Bmn})} \quad (1a)$$

其中

$$\Delta\varphi_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda} (md_1 \sin\theta \cos\varphi + nd_2 \sin\theta \sin\varphi) \quad (1b)$$

$$\Delta\varphi_{Bmn} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (md_1 \sin\theta_B \cos\varphi_B + nd_2 \sin\theta_B \sin\varphi_B) \quad (1c)$$

孔径上 A 点处的单元比原点处的单元有最大的信号传播超前时间,这个时间也称为阵列天线的孔径渡越时间。设 A 点与原点之间距离为  $L$ ,则孔径渡越时间为

$$T = \frac{L \sin\theta_0 \cos(\varphi_0 - \alpha)}{c} \quad (2)$$

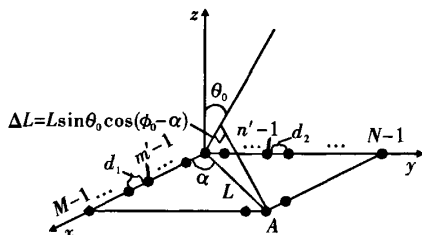


图1 平面相控阵天线示意图

因为天线波束的指向取决于由移相器决定的“阵内相位差”与“空间相位差”的平衡,而且随着频率改变,移相器提供的相移不变<sup>[2]</sup>,所以当频率在由  $f_0$  变成  $f_1$  时,为了实现“阵内相位差”与“空间相位差”平衡,波束指向必然会发生变化,即新的波束指向  $(\theta_{B1}, \varphi_{B1})$  应该满足

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\pi f_1}{c} m d_1 \sin \theta_{B1} \cos \varphi_{B1} &= \frac{2\pi f_0}{c} m d_1 \sin \theta_B \cos \varphi_B \\ \frac{2\pi f_1}{c} m d_2 \sin \theta_{B1} \cos \varphi_{B1} &= \frac{2\pi f_0}{c} m d_2 \sin \theta_B \sin \varphi_B \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据(3)可推得下面两式

$$\theta_{B1} = \sin^{-1} \left( \frac{1}{1+\xi} \sin \theta_B \right) \quad (4)$$

$$\varphi_{B1} = \varphi_B \quad (5)$$

式中,  $\xi = f_1/f_0 - 1 = (f_1 - f_0)/f_0$ , 称为相对带宽。

从(4)、(5)两式可看  $\theta$  出角指向会随频率变化而

发生偏移, 而  $\varphi$  角指向则不随频率改变。我们可以通过方向图来证实, 仿真一个  $50 \times 50$  的面天线, 单元间距  $d_1 = d_2 = \lambda_0/2$ , 期望波束指向角为  $(60^\circ, 60^\circ)$ 。为了方便观察波束最大值指向, 可以将方向图化成等高线的形式, 横、竖坐标分别表示  $\theta$  和  $\varphi$  的值, 等高线图表示的是方向图函数的增益。观察图 2, 黑点处为方向图函数最大值点, 增益为 0dB。当频率不变时, 方向图最大值指向相应为  $(60^\circ, 60^\circ)$ , 当频率改变时,  $\theta_B$  发生偏移, 频率变大,  $\theta_B$  减小, 反之,  $\theta_B$  增大,  $\varphi_B$  角则不随频率发生变化。

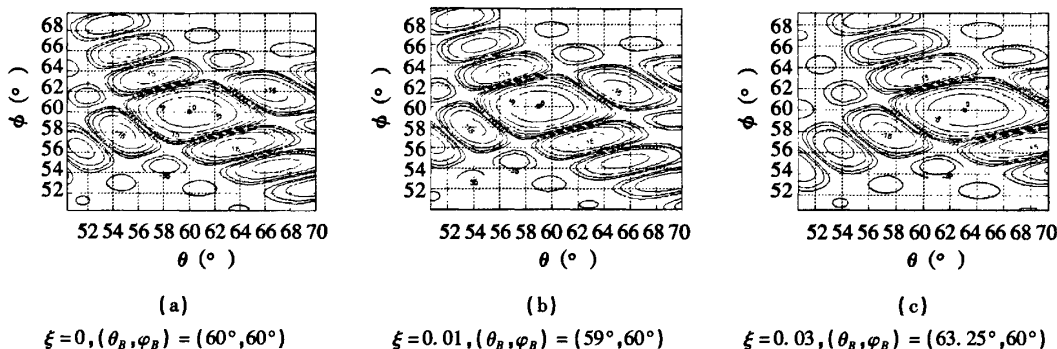


图2  $50 \times 50$  平面阵不加延迟线的等高线方向图

## 2 子阵级别使用延迟线对指向精度的改善

为了展宽相控阵天线的瞬时带宽, 人们自然想到了利用延迟线代替移相器控制天线的波束扫描, 由于延迟线可以补偿阵内的孔径渡越时间, 如果延迟线的补偿足够小, 理论上天线波束指向不随频率变化。但是延迟线的成本相对移相器高的多, 因此如果给每一个单元均加一个移相器, 势必会造成整个天线的成本太高。下面研究通过将阵列分解为一系列的子阵, 通过给每一个子阵加延迟线, 而子阵内部的单元加频率无关移相器来控制波束扫描<sup>[2]</sup>。

如图3所示, 将平面相控阵天线均匀的划分成矩形子阵, 在子阵级别上加入实时延迟线。设每个子阵内有  $m' \times n'$  个单元, 子阵序号为  $(a, b)$ ,  $a = 0, 1, \dots, M/m' - 1$ ;  $b = 0, 1, \dots, N/n' - 1$ 。方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{a=0}^{(M/m')-1} \sum_{b=0}^{(N/n')-1} \sum_{m=0}^{m'-1} \sum_{n=0}^{n'-1} e^{j(\Delta\varphi_{mn} - \Delta\varphi \dots Bmn)} e^{j(\Delta\varphi'_{mn} - \Delta\varphi' Bmn)} \quad (6a)$$

$$\Delta\varphi'_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda} (amd_1 \sin \theta \cos \varphi + bnd_2 \sin \theta \sin \varphi) \quad (6b)$$

$$\Delta\varphi'_{Bmn} = \frac{2\pi}{\lambda} (amd_1 \sin \theta_B \cos \varphi_B + bnd_2 \sin \theta_B \sin \varphi_B) \quad (6c)$$

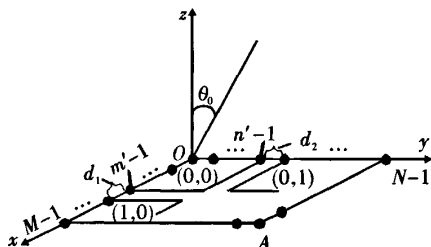
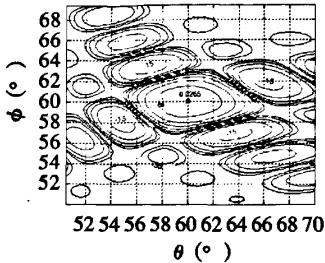


图3 平面相控阵天线子阵划分示意图

下面仍以  $50 \times 50$  平面阵天线为例, 仿真得出其方向图, 单元间距  $d_1 = d_2 = \lambda_0/2$ , 波束指向角为  $(60^\circ, 60^\circ)$ 。如图4所示, 相对带宽  $\xi = -0.03$  时, 波束指向为  $(60^\circ, 60^\circ)$ , 增益下降 0.239dB。相对带宽时, 波束指向为, 增益下降。可见, 给子阵加延迟线后, 频率改变不大时, 波束指向基本不变, 但是增益会降低。当频率变化大到一定程度时, 波束指向也会发生偏移, 还会出现栅瓣。通过上述分析可知, 在子阵级别加延迟线提高了相控阵天线的指向精度, 拓宽了天线带宽。

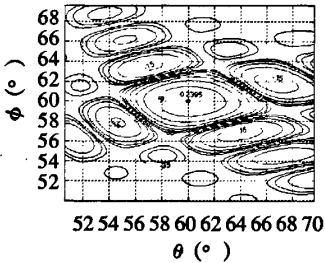
图5是仿真  $50 \times 50$  平面阵天线的相对带宽与  $\theta$  方向指向角偏移程度的关系曲线, 设  $\theta_B = 60^\circ$ 。曲线A是不加延迟线时的结果, 曲线B是将面阵分割成25个均匀子阵并在子阵加延迟线的结果, 可以看出在频率变化小的情况下, 指向角几乎不发生偏移。曲线C是

在每个单元加延迟线时的结果,此时由延迟线提供的阵内相位差可以随频率变化,波束指向不随频率发生任何变化,但是这样做在工程上成本太大,难以实现。



(a)

$\xi = 0.01, (\theta_B, \varphi_B) = (60^\circ, 60^\circ)$ , 增益下降 0.0265 dB



(b)

$\xi = -0.03, (\theta_B, \varphi_B) = (60^\circ, 60^\circ)$ , 增益下降 0.2395 dB

图 4 50×50 面阵分成 25 个均匀子阵加延迟线的等高线方向图

### 3 结束语

宽带相控阵天线的“孔径效应”问题是影响工作带宽的主要原因,当工作频率变化到某一个范围时,波束指向漂移会超出最小值限制,使天线在该频率点上不能工作。本文推导出应用实时延迟线后,波束指向漂移的表达式。结果表明,在单元或子阵级别使用实

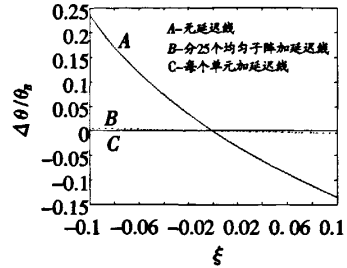


图 5  $\Delta\theta/\theta_B$  与  $\xi$  的关系曲线图

时延迟线,将使波束指向精度得到明显提高,进而降低了对带宽的限制。综合设计相控阵天线时,延迟线长度以及子阵大小的设计是很关键的,文献[3]和[4]对其进行了详细的分析。

延迟线的种类较多,通常使用光纤延迟线,因为其载波频率极高,传输稳定性强,重量轻,体积小,文献[5]对其应用中的关键技术进行了分析。

### 参考文献:

- [1] Knittel G H. Phased array antennas. Dedham [M]. MA: Artech House. 1972.
- [2] Xiaoping Ai, Zishu He, Yuxiang Gao, et al. A Joint Beam Control Method of Optical TTD's and Phase Shifters in Phased Array Antennas [J]. IEEE, 2004, 0 - 7803 - 8647 - 7:880-882.
- [3] 张光义. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [4] 卫健, 束咸荣, 李建新. 宽带相控阵天线波束指向频响分析和实时延迟线应用[J]. 微波学报, 2006, 22(1), 23 - 26.
- [5] 何子述, 金林, 韩蕴洁, 等. 光控相控阵雷达发展动态和实现中的关键技术[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2191 - 2194.

## Improving Bandwidth of the Phased Array Antennas Based on Sub-array True Time Delays

ZHANG Lei, GUO Chen-jiang, DING Jun

(School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The beam pointing of phased array antennas that adopt phased shifter irrelevant to frequency is changed with frequency. The true time delay (TTD) for wideband phased arrays is an important method to improve the beam - pointing accuracy. In this paper, the excursion of beam pointing versus frequency is analyzed while the planar phased array scanning. It is shown by analysis and simulation that the beam - pointing is just changed in elevation and changed invariably in azimuth plane. The beam - controlling techniques which sub - array division is adopted, the TTD is used in sub - arrays and phased shifter is used in elements, are discussed in detail. The results shown that the bandwidth of phased array antennas can be expanded effectively.

**Key words:** aperture effect; wideband phased array antennas; true time delay

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>