

宽带相控阵天线设计中几个问题的讨论

江立红 叶素珍

扬州市七二三所 225001

[摘要] 本文重点讨论了宽带相控阵天线如何利用移相器实现宽频带馈相以及如何利用更合理的随机相位量化法减小相位量化误差的影响，并提出了一种改善功率合成效率的方法，最后讨论了作为单元天线的槽线天线的有关特性及去耦措施。

关键词：相控阵天线、数字移相器、相位量化、槽线天线、互耦

1 宽带相控的实现

移相器是实现相控阵天线宽带工作的关键部件。宽带数字移相器依据移相量与频率的关系大体上可分为两种形式：在频带范围内移相量保持平坦的均衡数字移相器和由无色散传输线构成的在频带范围内相对频率相位线性变化的线性数字移相器。

线性数字移相器由于采用无色散时延线具有空一时相对应的特性，利用无色散传输线的长度补偿了单元间程差，理论上带宽可达无限宽频域(不考虑量化误差的影响)。在此，我们拓宽移相器的概念，认为移相器就是能实现程差补偿的延迟线段，移相器的最小移相位 $\Delta\varphi_{\min}$ 不是 $\lambda_0/2^{\circ}$ ，而是由天线阵的最小波束跃度 $\Delta\theta$ 和阵元间距 d 以及最大扫描角 θ_{\max} 决定：

$$\Delta\varphi_{\min} = d(\sin\theta_{\max} - \sin(\theta_{\max} - \Delta\theta))$$

延迟位从第一位到末前位都是在 $\Delta\varphi_{\min}$ 的基础上按二进制进位的，最后一位由阵列长度、最大扫描角所确定的最大延迟量与其前所有延迟位之和的差确定。这种移相器所构成的相控阵天线能达到极宽的频带，但对于大型天线阵，每个单元上均接有全部实时延迟线是不可想象的，只能采用将若干个天线单元组成子阵，从而将一部分延迟线移出接在子阵后以减少延迟线的数量。

然而利用开关线组成的在 360° 范围内随频率线性移相的数字移相器在倍频程宽带天线阵中使用却存在问题：如有一 5 GHz-15 GHz 的 64 元间距为 $\lambda_0/2$ 的线阵天线 (λ_0 为中心频率 10 GHz 时的波长)，利用 5 位线性数字移相器，在不使用延迟线的情况下，扫描至 30° 角时，相对于起始点的第 5 个单元的移相器回到零位，而事实上 5 GHz 和 15 GHz 时应补偿的相位为 180° ，因此在这个单元上产生的相位误差达到 180° 。第 6、7、8 个单元在 5 GHz 时的相位误差也是 180° ，由此可以看出当程差超过一个中心波长，线性数字移相器的移相量不再与频率无关，出现的相位误差为：

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{f - f_0}{f_0}$$

因此，划分子阵应避免在子阵内出现程差超过子阵后所接最短延迟线的长度。

天线阵分子阵后所接最短实时延迟线通常是一个中心频率的波长，假设以最大程差为一个波长为单位划分子阵，在某一子阵中，有可能出现子阵中的某一单元相对于起始元的程差小于一个波长，而另一单元相对于起始元的程差大于一个波长的情况，这样最小延迟位的使用与否都将给予阵中某些单元带来如上所述的大的相位误差，因此可在子阵后多接一位半波长的延迟位来解决这一问题。这种方法在线阵能够解决延迟线移出的问题，但在二维面阵中，如果按以上规则划分子阵将十分困难，尤其是三角形栅格的面阵划分出来的子阵极不规则，将给馈电带来很大的困难。

若采用均衡数字移相器，此时天线的带宽就受制于天线方向图的带宽，也就是说在频带内边频波束的最大值不能偏离到中心波束的-3 dB 处，由此可知其带宽因子约为

$$k = \frac{\lambda_0}{l \sin \theta_{\max}}$$

$\lambda_0, l, \theta_{\max}$ 分别为中心频率波长、阵面宽度以及最大扫描角。因此，要在空间上给其定位，需先在频域定位，但若在其后面加上频域分离器件如频域滤波器，利用信道化接收技术也可实现频域和空间定位。

另外，这种形式的天线还受天线孔径渡越时间 T_{ph} 的限制 ($T_{ph} = l \sin \theta / c$)，当孔径渡越时间 T_{ph} 大于信号带宽的倒数时，阵列两端天线单元所接收到的信号不能同时相加。对于要对付低截获概率雷达的电子战接收机天线，不能将接收到的信号同时相加将是一个无可估量的损失。因此，利用均衡数字移相器的天线阵要实现宽带工作，须分成子阵，并在子阵后接开关控制的无色散延迟线来实现。

上面所讨论的移相和延迟都是在高频实现的，现在我们可以考虑在视频利用时间延迟开关对天线子阵实施实时时间延迟。这里时间延迟开关的最小延迟时间是中频波传播一个波长的时间，时间延迟开关也应采用二进制，利用多位时间延迟开关来实现 T_{ph} 的延迟。实际上，这种方法是利用了取样时间的延迟实现了对相控阵天线孔径渡越时间的补偿。

2 相位量化误差的影响

在相控阵天线系统中，波束扫描是通过数字移相器实现的，这就存在相位量化的问题。相位量化的存在将使天线波束偏离规定指向，同时在特定的方向上产生寄生副瓣。为了减小相位量化误差的影响，通常采用是随机相位量化法。随机相位量化法在减小相关相位误差的同时也会使相位误差的方差增大，因此应该采用适当的相位量化法来减小相位量化的影响。

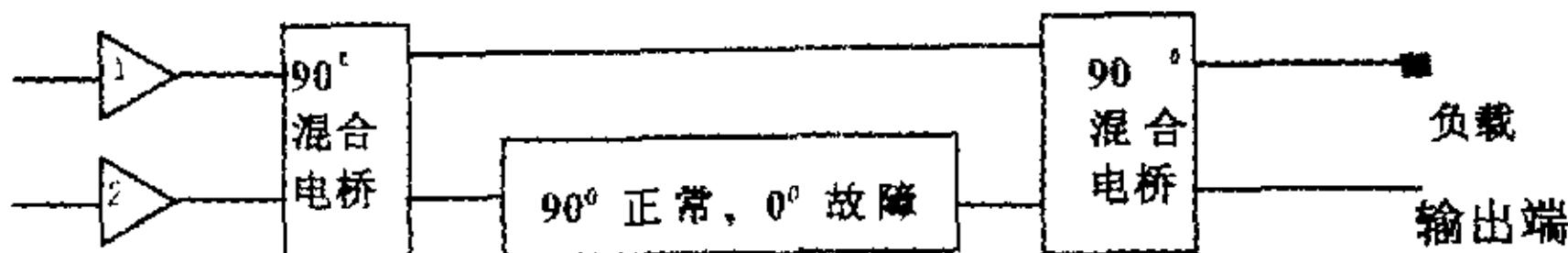
通常所用的随机馈相法是相位误差均值为零法，其决定某一单元的移相器进位与否，只取决于此单元的相位结尾误差和进位概率，若以结尾相位相对于移相器最小移相值的比值为结尾系数 $p_{m,n}$ ，以由一均匀随机数产生的任一在 0-1 之间随机数作为数字移相器最小位的进位概率 $p_{m,n}^*$ ，当 $p_{m,n}^* > p_{m,n}$ 时，移相器最小进位，否则不进位。

显然当结尾系数很大而进位概率更大的情况下，移相器的最小位不进位，由此带来的相位误差将很大，从而使相位量化误差的方差增大，影响天线阵的平均副瓣电平。解决这一问题的方法有多种，最简单的是利用一门槛 q （譬如 q 取 0.1），当 $p_{m,n} < q$ 时，不论进位概率 $p_{m,n}^*$ 多小，移相器最小移相位不移相，而当 $p_{m,n} > 1-q$ 时，也不论进位概率 $p_{m,n}^*$ 多大，移相器最小移相位进位，当 $p_{m,n}$ 在 q 和 $1-q$ 之间时，移相器最小位的进位与否由结尾系数 $p_{m,n}$ 和进位概率 $p_{m,n}^*$ 比较后确定。这种方法既能够使天线阵寄生副瓣电平约为-12N dB，而波束

指向误差比四舍五入法移相有明显的改善。

3 功率合成

在功率合成技术中，通常采用威尔金森电路作为功率合成器电路，威尔金森电路是三端口含有内部电阻加载的同相合成器/功分器电路。但其作为合成器时，对不相关的噪声和信号有3 dB 损耗，也就是说，当两个输入功率为 P 的等幅同相信号进行合成时，合成输出功率为 $2P$ ，若合成支路中有一路不能正常工作，则合成后输出功率为 $P/2$ ，其中剩余的3 dB 功率消耗在合成器的内部负载上。由某一天线单元或合成支路不能工作所造成的3 dB 功率损耗是无源合成技术无法补偿，利用正交混合电桥则可以补偿这一损耗。以下电路就是利用正交混合电桥组成的有源合成技术，当探测到某一单元不能工作时，改变电路中移相器的相位，使电路的输出功率经合成后仍为 P ，而威尔金森电路所构成的合成器的输出功率只有 $P/2$ ：



4 天线单元与互耦

宽带相控阵天线单元的首要要求是工作频带宽，另外天线单元的阵中方向图特性也是一个重要的因素，由阵列天线的增益特性 $G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \cos\theta (1 - |\Gamma(\theta, \varphi)|^2) = ng$ ，其中

$\Gamma(\theta, \varphi)$ 是天线阵的反射系数， g 为单元天线增益，因此要 $\Gamma(\theta, \varphi)$ 等于零，单元理想方向图函数为 $\sqrt{\cos\theta}$ 。另外阵列单元的体积应比较小以便于组阵排列。经过对多种不同的天线单元的实验与理论研究，发现指数渐变槽线天线比较适用于阵列单元。槽线是由介质基片上薄金属面印制而成。沿缝传播的主波电场分量是横电波。但它是双导体结构，没有低频截止特性。槽线天线是一种非周期性，连续按比例改变尺寸且具有圆形辐射孔径的行波天线。事实上，我们在实验中发现，此种天线单元的阻抗带宽可以做到 20: 1，但是单元的方向图带宽并不如文献所论述的那么宽，利用高介电常数的微波基片印制的槽线单元，在频率的高端 (> 15 GHz)，增益下降，严重的制约了天线的高频应用，而在频率的低端，天线口径的大小决定了其能够辐射的最低频率，终端效应影响着最低频段天线方向图的形状。这种天线单元主要要解决的问题是如何改变高频工作时大部分能量不能辐射出去的问题，我们经过多次实验发现不同的缝的形状对频率高端天线性能影响不同，利用特定类型的缝线形式能够改善天线高频端性能。槽线是一种平衡传输线，如何对其宽带平衡匹配馈电也是一比较困难的问题，缝线馈电的方法有许多种，可以利用 Marchand 巴伦的设计原理来设计一简单实用的微带-缝线的宽带平衡转换，也可以利用各种印制线的特点实现其与缝线之间的转换。

由于同阵面面积的三角形栅格比矩形栅格能节省约 1/10 多的单元天线，且其对元互耦的影响比矩形栅格小，所以一般采用三角形栅格来排布阵元。互耦是任何形式的阵列天线中均存在的有时能严重影响阵列天线性能的因素。由于其不仅与天线工作频率有关，

还与天线的扫描角有关，因此显得十分复杂。目前从理论上严格分析和计算各种单元间的互耦仍十分困难，只能根据天线的单元特性采用不同的去耦方法来减小互耦的影响。对于印制在介质基片上的槽线天线，其互耦的特性是：E面耦合是由于赖以形成辐射的表面波在邻近单元之间的耦合和天线间的共极化空间耦合共同构成，H面耦合只由天线间的空间耦合构成，由此可知，槽线天线的E面耦合远大于H面耦合。因此，我们主要是要减小天线阵E面单元间的耦合影响，E面之间互耦可以采用天线单元间利用隔离缝减小表面波耦合。在耦合度最大的低频段，实验表明：H面之间的间距与E面两单元之间的缝间距相同时，H面的耦合度在比E面小6-8dB。E面单元之间不加隔离缝比加隔离缝的耦合度要大5-6dB，缝越大，介电常数越高，耦合度下降越多。宽角去耦方法一般采用阵前放置介质片以改善阵列扫描时的一部分电纳变化，以获得较好的宽角阻抗匹配。

参考文献

- [1] Haifong Lee And Wei Chen “Advances in microstrip and printed antennas”
- [2] Ramakrishna Janaswamy And Daniel H.Schaubert “Analysis of the tapered slot antenna” IEEE 1987 pp1058-1064
- [3] 林守远 “关于相控阵雷达中移相器和延迟线的讨论” 《天线技术》第九期

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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),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>