

中图分类号 TN820.1<sup>+</sup>3 ,TN820.1<sup>+</sup>5

文献标识码 :A

文章编号 :CN51-1418(2003)02-0037-04

# 一种超低旁瓣天线设计的研究

黄贤锋 李仙茂 袁学华

(解放军电子工程学院,合肥 230037)

**摘要** 通过对雷达信号空间谱的分析和变换获得空域的加权系数,利用得到的加权系数对阵列天线各单元信号进行加权后再叠加,可设计出一种超低副瓣的雷达阵列天线,并通过实时改变其加权系数以获得不同特性的天线。

**关键词** 阵列天线 超低旁瓣 空间谱 加权

## Study of a Super-low Side Lobe Array

HUANG Xian-feng, LI Xian-mao, YUAN Xue-hua

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract** A method for designing a super-low side lobe is introduced, which is based on weighting to each of the antenna elements. It bases on analysis and transformation of spatial spectrum to achieve weight coefficient, and these coefficients can also be changed to achieve different antenna.

**Keywords** array antenna; super-low side lobe; spatial spectrum; weighting

## 0 引言

在现代战场上,雷达面临各种复杂的电子干扰,其中旁瓣干扰是干扰的主要形式。因此通过降低旁瓣等方式以降低或避免旁瓣受干扰是雷达抗干扰的重要措施之一。本文提出一种基于谱分析的方法,通过寻求最佳加权系数用以设计一种超低旁瓣的雷达阵列天线。它能够根据不同雷达的设计要求,合理协调旁瓣抑制和主瓣变宽之间的矛盾。通过对不同天线单元的信号进行不同倍数的放大,实现各单元信号的加权。

## 1 空间谱分析和加权系数

采用对各天线单元接收的信号进行不同的加权处理再叠加的算法,实现超低副瓣的天线波束,

阵列天线的到达信号如图1所示。

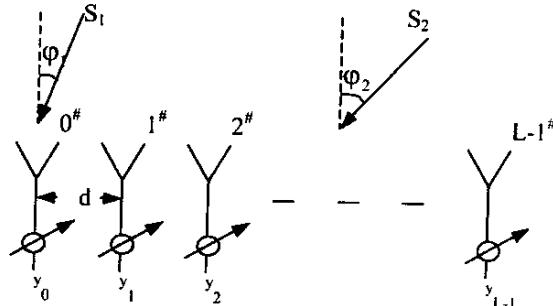


图1 阵列天线及到达信号示意图

在阵列天线这样一个小范围内,到达信号可被看作是一个平行平面波。设阵列天线的各单元是等间距地排列在一条线上,则

$$\theta_i = \frac{d}{\lambda} 2\pi \sin \varphi_i$$

式中,  $\varphi_i$ —第  $i$  个信号的波达方向<sup>[1]</sup>,  
 $\lambda$ —为到达信号的波长。

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^p s_i(t) e^{j\theta_i t} + n_k(t)$$

$s_i(t)$ —各到达信号,  $i = 1 \dots p$ 。

设任一空间信号为  $s(n)$ , 对应的空间谱为  $S(\theta)$ , 定义空间谱的傅氏变换和逆变换为:

$$S(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(n) e^{-jk\theta}$$

$$s(n) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\pi}^{\pi} S(\theta) e^{jn-1}\theta d\theta$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\theta) e^{jn\theta} d\theta$$

在阵列天线接收的信号中, 设一次测量值为  $x_k$ ,  $0 \leq k \leq L-1$ 。

$$X(\theta) = \sum_{k=0}^{L-1} x_k e^{-jk\theta} = \sum_{k=0}^{L-1} e^{jk\theta_1} \cdot e^{-jk\theta} =$$

$$\sum_{k=0}^{L-1} e^{-jk(\theta - \theta_1)} = \frac{1 - e^{-jL(\theta - \theta_1)}}{1 - e^{-j(\theta - \theta_1)}}$$

$$\frac{\sin \frac{L(\theta - \theta_1)}{2}}{\sin \frac{(\theta - \theta_1)}{2}} \cdot e^{-j\frac{L-1}{2}(\theta - \theta_1)}$$

则不加窗时的输出信号的谱:

$$Y_0(\theta) = X(\theta)$$

为了改变输出的波束特性, 降低副瓣幅度, 需要在天线单元上加一窗函数, 此时的输出信号的谱表示为:

$$Y(\theta) = X(\theta) * H(\theta)$$

另外, 理想的系统函数需要无限元, 而实际作为窗函数的单元数是有限的, 故可在理想的无限元系统函数上加一个矩形窗口, 把窗口之外的部分取零值就可以得到实际的阵列天线窗函数。设实际的阵列天线有  $L$  个单元, 取  $N = L$ , 则有:

$$h(n) = h_d(n) \cdot R_N(n)$$

$R_N(n)$ —单元数为  $N$  的矩形脉冲窗口函数,

$h_d(n)$ —无限单元数的系统函数。

设  $R_N \xrightarrow{\text{傅变}} W_R(\theta)$  则:  $W_R(\theta) = A_R(\theta) e^{-ja}$ ,

$$A_R(\theta) = \frac{\sin(N\theta/2)}{\sin(\theta/2)}$$

$$H(\theta) = H_d(\theta) * W_R(\theta)$$

为了抑制副瓣, 可以取一个加权的窗函数作为系统函数, 表示为:

$$h(n) = u(n)$$

$u(n)$ —单元数为  $N$  的窗口函数。

设  $u(n) \xrightarrow{\text{傅变}} W(\theta)$

$$Y(\theta) = X(\theta) * H_d(\theta) * W_R(\theta) = X(\theta) * W(\theta)$$

$$y(n) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\pi}^{\pi} Y(\theta) e^{jn-1}\theta d\theta =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Y(\theta) e^{jn\theta} d\theta$$

叠加后输出的合成信号为:

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Y(\theta) \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\theta} d\theta =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Y(\theta) \frac{1 - e^{jN\theta}}{1 - e^{j\theta}} d\theta$$

从空间谱角度求解:

$$y = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [X(\theta) * W(\theta)] \frac{1 - e^{jN\theta}}{1 - e^{j\theta}} d\theta$$

从空域角度求解:

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) u(n)$$

此方法需要通过对天线空间谱的分析选取最佳窗函数的空间谱, 分析它们卷积后的空间谱是否满足要求(即逆变换后能否得到具有超低旁瓣的天线和具备符合要求的波束宽度)。如果满足要求, 就得到最佳的窗函数空间谱, 再通过窗函数空间谱的傅氏逆变换得到最佳的窗函数。用此窗函数对阵列天线单元进行加权, 就可以获得超低旁瓣的天线, 且主瓣的波束宽度也满足要求。

## 2 窗函数的选取举例

下面以二个窗函数谱为例, 说明通过谱分析法, 寻求最佳窗函数(即加权系数)的方法。

(1) 采用改进的升余弦窗[也称汉明(Hamming)窗]<sup>[2]</sup>

$$W(\theta) = A(\theta) e^{-j\theta a}$$

$$A(\theta) = 0.54 A_R(\theta) + 0.23 \left[ A_R(\theta - \frac{2\pi}{N-1}) + A_R(\theta + \frac{2\pi}{N-1}) \right]$$

频谱特性如图 2 所示。从图中可以看到, 由于这三部分频谱的相加, 使旁瓣大大抵消, 从而使能量相当有效地集中在主瓣内。但是它的代价是使主瓣加宽一倍。经过逆变换后得到窗函数为:

$$u(n) = \left[ 0.54 - 0.46 \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right] R_N(n)$$

它可以使99.96%的能量集中在主瓣内,可获得很好的旁瓣抑制。

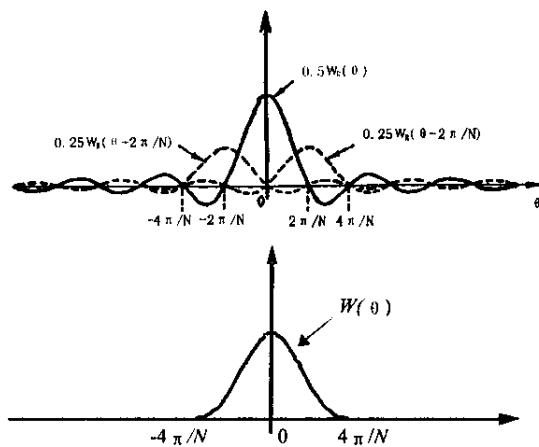


图2 改进的升余弦频谱

(2) 采用二阶升余弦窗[也称布拉克曼(Blackman)窗]时<sup>[3]</sup>:

如果对改进的升余弦窗再作一点调整,可以得到旁瓣更小的效果,这样得到的谱为:

$$A(\theta) = 0.42A_R(\theta) + 0.25 \left[ A_R\left(\theta - \frac{2\pi}{N-1}\right) + A_R\left(\theta + \frac{2\pi}{N-1}\right) \right] + 0.04 \left[ A_R\left(\theta - \frac{4\pi}{N-1}\right) + A_R\left(\theta + \frac{4\pi}{N-1}\right) \right]$$
$$W(\theta) = A(\theta) \cdot e^{-j\theta a}$$

逆变换得到的窗函数为:

$$u(n) = \left[ 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \right]$$
$$R_A(n)$$

称之为二阶升余弦窗。它可以得到更低的旁瓣,但是主瓣宽度加宽到矩形窗的三倍。

采用以上二种不同的窗函数,可以得到不同的主瓣宽度和旁瓣幅度。根据以下的计算机仿真结果可知,采用汉明窗和布拉克曼窗的两种加权法都可满足超低旁瓣的要求(即归一化后最大副瓣小于-40dB)。

### 3 工程实现方法

谱分析加权法的加权系数主要靠理论分析计算得到,工程上实现这种超低旁瓣天线,其关键是加权系数的工程实现。信号的放大是有方向的,不是双向的<sup>下方数据</sup>,这种雷达的接收和发射天线结

构<sup>[3]</sup>是不同的。以下分别讨论它们的实现方法。

#### 3.1 发射天线系统

因为雷达发射天线系统中各功放的放大倍数一般是一样的,是不可随意调节的,而预放是可以调节的。所以,通过对不同通道的信号进行不同倍数的预放,而后再经过相同倍数的功率放大就可以实现天线阵各单元信号的加权,其结构如图3所示。在工程实现中可以加移相器,对不同通道信号的各处理过程带来的附加相移进行校正,功放和功分器各通道的不一致性可以通过预放在设计系数附近上下调整。

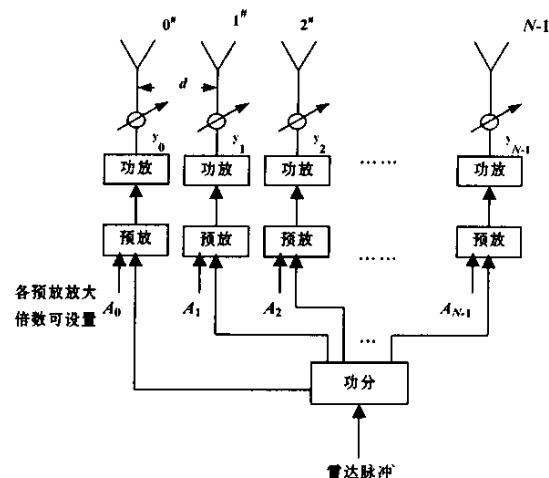


图3 雷达发射天线结构

#### 3.2 接收天线系统

各通道合成前的加权有两种:一、各通道进行不同幅度的衰减,再叠加;二、各通道进行不同幅度的低倍放大,再叠加。在雷达接收时,回波的信噪比是最重要的指标。第一种方法会使得信噪比下降,第二种方法信噪比下降很小,所以,采用第二种方法实现信号加权更为可行。其结构如图4所示。为了使信号易于合成,需先将接收信号进行低放得到射频信号,再下变频到中频,然后再合成得到中频的雷达接收信号。同理,在工程实现中可以加移相器,对不同通道信号的各处理过程带来的附加相移进行校正,各环节信号衰减的不一致性可以通过低放在设计系数附近上下调整。

### 4 计算机仿真

当采用不同的窗口函数时,所得到的天线波

束是不同的。下面用 Matlab 仿真,对采用汉明窗、布拉克曼窗两种不同的窗口函数形成的天线波束特性进行对比。

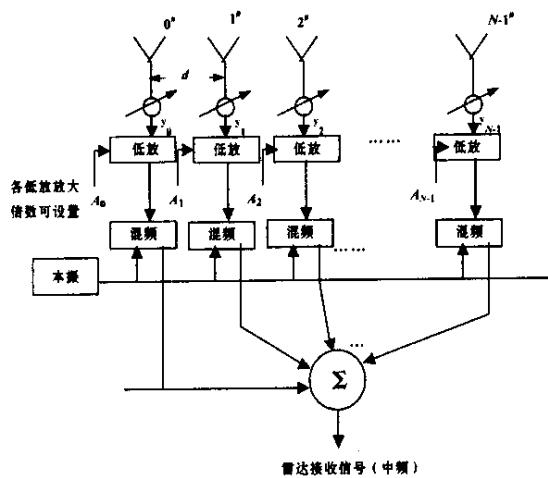


图4 雷达接收天线结构

例 取  $d = \lambda/2$ ,让窗函数的最大加权值为1。在无噪声的理想条件下,取不同窗函数形成不同特性的天线波束,如图5、6所示。

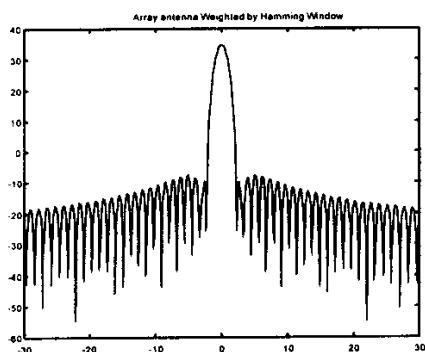


图5 汉明窗加权的天线波束特性

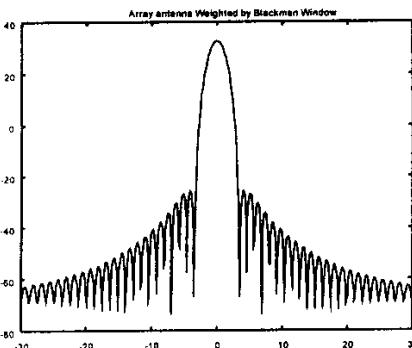


图6 布拉克曼窗加权的天线波束特性

通过以上不同窗口函数的对比和相关理论可知其大致满足凯塞窗(kaiser)的规律,即副瓣的抑制是以主瓣的加宽为代价的,副瓣抑制得越多,主瓣的宽度越大。用这两种窗函数加权做成的天线,其最大副瓣分别为-44dB和-54dB。可见,这两种方法都可以做成超低副瓣天线。实现设计中,可根据不同雷达的设计要求,采用不同的加权来合理协调副瓣抑制和主瓣变宽之间的矛盾。

## 5 结束语

本文从空间谱分析的新角度为阵列天线波束的设计找到了一种易于设计和实现的方法。该算法计算量小,能实时运算,可采用可控的放大器。对其放大量进行实时控制,可产生随时变化的主瓣,接收和发射的天线特性也可以不同。通过改变加权系数就可以实现波束的副瓣幅度、主瓣宽度的变化。

## 参考文献

- 1 刘德树,罗景青,张剑云.空间谱估计及其应用[M].中国科学技术大学出版社,1997.
- 2 邹理和.数字信号处理(上)[M].北京:国防工业出版社,1985.
- 3 茅于宽.天线设计手册[M].北京:解放军出版社,1988.

## 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](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>