

# 三角形短波自适应天线阵研究

王伟<sup>1</sup> 曹祥玉<sup>1</sup> 王瑞<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710027)

**摘要** 根据自适应天线原理, 提出了一种三角形自适应天线阵。并分别研究了该三角形自适应阵和常用的均匀直线自适应阵的性能。仿真结果表明, 该三角形自适应阵不仅尺寸更小, 而且还能够抑制和期望信号方向对称的干扰信号, 这是均匀直线阵无法实现的。

**关键词** 自适应天线, 干扰抑制, 短波通信

## 1 引言

短波通信以其机动灵活、抗毁性强、通信距离远等特有的优点, 一直被广泛用于政府、外交、气象、商业、军事等许多领域, 用以传送语言、文字、图像、数据等信息。在短波通讯的接收中, 通常会遇到弱的期望信号被强的干扰信号淹没的情况, 而传统的短波天线只作为单一的场路转换器件存在, 一般不具备抗干扰功能。因此天线在接收期望信号的同时, 也会接收大量的干扰信号, 导致接收机输出信干噪比严重下降。

一种有效的解决方法是采用自适应天线阵<sup>[1]</sup>。它是一种在工作时通过反馈来自行控制其方向图的天线系统。其基本原理是通过调整每个阵元上的复数权, 之后再行功率合成, 从而优化天线阵方向图, 在期望信号方向上形成主波束, 而在干扰信号方向上形成零陷。从而抑制掉干扰, 达到预定准则下的最佳接收效果。许多国内外的机构都在积极研究这一领域。而通常的自适应天线阵大多采用直线阵<sup>[1-7]</sup>, 尺寸非常大, 而且由于其波束对称, 不能抑制和期望信号来波方向对称的干扰。为了克服这些不足, 本文提出了一种三角形自适应阵, 既能全向接收, 又能克服上述缺点。

## 2 波束控制理论

考虑  $N$  个天线单元组成均匀直线阵, 阵列单元间距  $d = \lambda/2$ ,  $\lambda$  为工作频率对应的波长,  $M$  ( $M \leq N-1$ ) 个干扰信号分别从与阵列法线方向成角  $\theta_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 的方向入射到阵列, 阵列

接收到的不需要信号矢量可表示为

$$X_u(t) = X_i(t) + n(t) \quad (1)$$

式中  $X_i(t)$  表示干扰信号,  $n(t)$  是背景噪声。假设  $n(t)$  为空间白噪声, 且与干扰不相关, 则有矩阵

$$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_M)] \quad (2)$$

其中,  $a(\theta_m)$  表示第  $m$  个干扰信号的导向矢量, 对于间距为  $\lambda/2$  均匀直线阵有

$$a(\theta_m) = [1, e^{-j\pi \sin \theta_m}, \dots, e^{-j\pi(N-1) \sin \theta_m}]^T \quad (3)$$

则协方差矩阵为

$$\begin{aligned} R &= E[X_u(t)X_u^H(t)] \\ &= \sum_{m=1}^M r_m a(\theta_m) a^H(\theta_m) + \sigma^2 I \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $r_m$  为第  $m$  个干扰信号的功率,  $\sigma^2$  为噪声功率,  $I$  表示单位矩阵。

稳态时, 该均匀直线阵的方向函数可以表述为

$$\begin{aligned} F_w(\theta) &= |W^T a_d| \\ &= w_1 + w_2 e^{-j\pi \sin \theta_d} + \dots + w_N e^{-j(N-1)\pi \sin \theta_d} \\ &= \sum_{k=1}^N w_k e^{-j(k-1)\pi \sin \theta_d} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $W$  表示复数权值,  $a_d(\theta_d)$  表示天线阵静态导向矢量或者期望信号方向矢量, 且有

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N(t)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{a}(\theta_d) = [1, e^{-j\pi \sin \theta_d}, \dots, e^{-j\pi(N-1) \sin \theta_d}]^T \quad (7)$$

当给定天线的期望方向图  $F_d(\theta)$ , 希望找到一组复权矢量, 使加权方向图  $F_w(\theta)$  在一组角度  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}$  上与期望方向图  $F_d(\theta)$  最接近, 即若给定如下方向性要求:

$$\left. \begin{aligned} F_d(\theta_1) &= g_1 \\ F_d(\theta_2) &= g_2 \\ &\vdots \\ F_d(\theta_{N-1}) &= g_{N-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则有

$$\min E = \sum_{k=1}^{N-1} f(\theta_k) |F_w(\theta_k) - g_k|^2 \quad (9)$$

其中:  $f(\theta_k)$  表示  $\theta_k$  方向的干扰功率。

根据线性约束最小方差准则<sup>[2][5]</sup>, 求得最佳自适应权为

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_d / [\mathbf{a}_d^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_d] \quad (10)$$

上式求得的自适应权在保证期望信号方向上(由  $\mathbf{a}_d$  决定)增益为一定值的条件下, 使得阵列功率最小, 因而能自适应地在干扰方向形成零陷抑制干扰信号。

在理论上对于  $N$  元阵而言, 在方向控制上有  $N-1$  个自由度<sup>[6]</sup>。所以可以通过选择权向量, 使得至多  $N-1$  个方向的天线增益满足既定的要求。

由于均匀直线阵阵元排列是对称性, 所以直线阵的方向图也是对称的, 即直线阵两侧的方向图完全相同。这一特点会使直线阵对称的出现主波束和波束零陷。如果期望信号和干扰信号的来波方向正好对称, 直线阵就会失去抑制干扰的能力。图 1 是文献[1]给出的直线阵的方向图。对应的条件是, 32 元直线阵, 期望信号来波方向是  $30^\circ$ 。可以看出, 对称的  $150^\circ$  方向也出现了一个主波束。阵元间距  $d = \lambda/2$ , 则该直线阵总体长度为  $l = 15.5\lambda$ 。

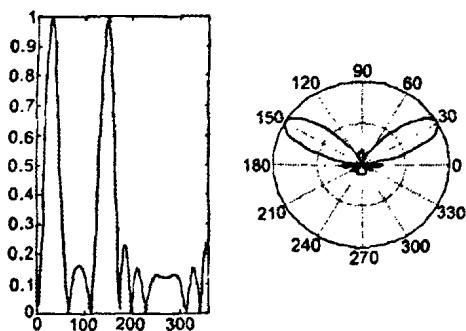


图 1 文献[1]中的直线阵方向图

### 3 三角形短波自适应天线阵

因为均匀直线阵尺寸大, 不能抑制和期望信号方向对称的干扰信号, 为了克服这些不足, 本文提出了一种三角形的短波自适应天线阵, 可以实现全方向性接收期望信号, 抑制干扰信号, 而且天线阵的总体尺寸大大减小了。该三角形自适应阵, 阵元均匀的排列在一个等边三角形上, 相邻阵元间距  $\lambda/2$ , 阵元总数为  $N$  (必须是 3 的整数倍, 令  $K = N/3$ ), 如图 2。阵元  $1, 2, \dots, K+1$  位于第一边上; 阵元  $K+1, K+2, \dots, 2K+1$  位于第二边上; 阵元  $2K+1, 2K+2, \dots, N, 1$  位于第三边上。设期望信号  $X_d(t)$  以与第一边的法向成角度  $\theta_d$  的方向入射到天线阵上。设  $\phi_k$  表示阵元  $S_k$  相对于阵元  $1$  的相位差。则依次有

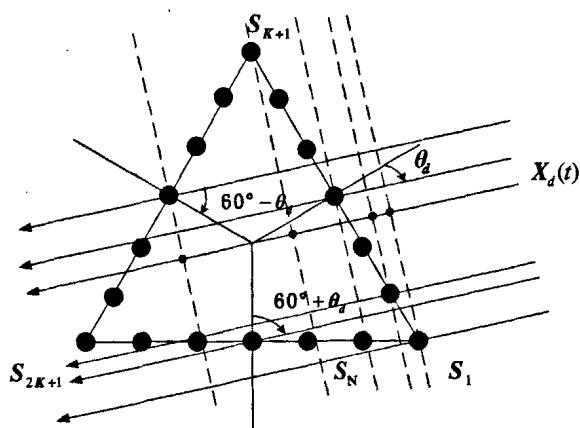


图 2 三角形短波自适应天线阵结构图

第一边:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 0 \\ \phi_2 &= 2\pi g \frac{AB}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_d \\ \phi_j &= (j-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_d, \quad k=1, 2, \dots, K+1 \end{aligned}$$

第二边:

$$\begin{aligned} \phi_j &= 2\pi g \frac{CD}{\lambda} + \phi_{k+1} \\ &= (j-K-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(60 - \theta_d) + K \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_d, \\ k &= K+2, K+3, \dots, 2K+1 \end{aligned}$$

第三边:

$$\begin{aligned} \phi_j &= (N-j+1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(60 + \theta_d), \\ k &= 2K+2, 2K+3, \dots, N \end{aligned}$$

相应的期望信号方向矢量为

$$a(\theta_d) = \begin{pmatrix} f_1(\theta_1)\exp(-j\phi_1) \\ f_2(\theta_2)\exp(-j\phi_2) \\ \vdots \\ f_N(\theta_N)\exp(-j\phi_N) \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中,  $f_i(\theta)$  表示第  $i$  个阵元的方向图,  $\exp()$  表示复数指数函数,  $N$  表示阵元的个数。  $\phi_k$  如上式计算得到。

将 (4)、(11) 式代入 (10) 式, 就可以得到此三角形自适应阵最佳自适应权值的表达式。将此最佳权值代入 (5) 式, 就可以得到此时的稳态方向图。

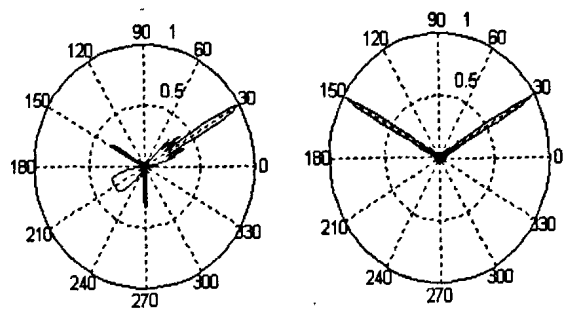
#### 4 计算机仿真结果

为了对本文提出的三角形自适应阵的性能进行检验, 在计算机上做了仿真, 并与均匀直线阵进行了性能比较。假设由 33 元各向同性的天线阵元组成三角形自适应阵, 阵元的方向函数为  $f_i(\theta)=1$ 。接收 30MHz 的短波信号, 阵元间距为半波长 5m。同时, 用 33 元各向同性的天线阵元组成均匀直线阵作为对比。三角形阵每边 12 个阵元, 边长 55 米。均匀直线阵由 33 阵元组成, 总长 160 米。可见, 三角形阵的尺寸要比均匀直线阵小很多。下面是对两者性能的仿真结果。

图 3 是期望信号从  $30^\circ$ 、干扰信号从  $50^\circ$  入射到天线阵上时的电压方向图。(a) 图对应本文提出的三角形自适应阵, (b) 图对应文献[1]中的均匀直线阵的方向图。从图中方向图曲线可以看出, 本文提出的三角自适应阵, 在  $30^\circ$  方向只有一个比较窄的主波束, 在  $50^\circ$  方向有很深的零陷。而均匀直线阵有  $30^\circ$ 、 $150^\circ$  对称的两个主波束, 在  $50^\circ$  方向也有很深的零陷。

图 4 是期望信号从  $170^\circ$ 、干扰信号从  $150^\circ$  入射时的方向图。其结果和图 3 时的情形一致。

图 5 是期望信号从  $150^\circ$ 、干扰信号从  $30^\circ$  对称入射时的方向图。仿真发现, 均匀直线阵此时的输出很小, 几乎为零, 已经不能工作了。但是本文提出的三角形自适应阵, 仍能正常工作, 图 5 给出了三角自适应阵此时的方向图。

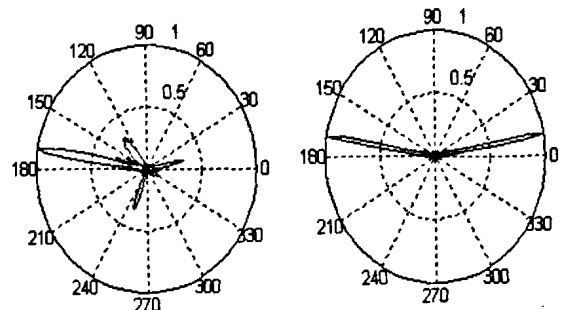


(a) 三角形自适应阵

(b) 均匀直线阵

图 3 期望信号从  $30^\circ$ 、干扰信号从  $50^\circ$

入射时的方向图



(a) 三角形自适应阵

(b) 均匀直线阵

图 4 期望信号从  $170^\circ$ 、干扰信号从  $150^\circ$

入射时的方向图

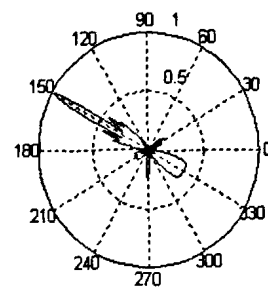


图 5 期望信号从  $150^\circ$ 、干扰信号从  $30^\circ$

入射时三角自适应阵的方向图

#### 5 结论

使用自适应阵接收短波信号, 能够调整天线波束, 保留期望信号, 抑制干扰信号, 提高信噪比。本文提出的三角形自适应阵比通常的均匀直线阵, 尺寸更小、性能更好, 能够抑制和期望信号方向对称的干扰信号, 这是均匀直线阵无法实现的。

## 参考文献

- [1] 罗小武, 刘勤让. 窄波束全向接收的自适应天线阵研究[J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 100~103.
- [2] 李荣锋, 王永良, 万山虎. 自适应天线方向图干扰零陷加宽方法研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(2): 42~45.
- [3] 姚中兴, 李学武, 朱德煜等. 关于自适应阵列信号处理技术在通信中的应用[J]. 信号处理, 1995, 11(4): 301~304.
- [4] P. W. Howells. Explorations in Fixed and Adaptive Resolution at GE and SURC[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 575~583.
- [5] B. Widrow, P. E. Mantey, L. J. Griffiths, and B. B. Goode. Adaptive Antenna Systems. Proceedings of the IEEE, 55, No. 12(December 1957): 2143~2152.
- [6] [美] R. T. 康普顿 著, 龚耀寰, 邱文杰等译. 自适应天线—基本概念与特征[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990: 4~40.
- [7] 桑怀胜, 李峥嵘. 智能天线的原理、自适应波束形成算法的研究进展与应用[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(6): 83~89.

王伟 (1979-), 男, 陕西人, 现为空军工程大学电讯工程学院博士研究生, 主要从事 EBG 结构、自适应天线方面的研究。

曹祥玉 (1964-), 女, 西安人, 现为空军工程大学电讯工程学院教授, 博士生导师。研究方向: 电磁场数值计算, 电磁兼容、相控阵天线。

## 一种新颖宽带毫米波反射阵列天线单元设计\*

李 华<sup>1,2</sup> 王秉中<sup>1</sup> 杨 毅<sup>3</sup> 杜 平<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学物理电子学院应用所 四川 成都, 610054;

2. 电子科技大学物理电子学院应用物理系 四川 成都, 610054;

3. 四川建筑技术学院 四川 德阳, 618000)

**摘 要** 设计了一种适用于毫米波段反射阵列天线的新型宽带单元, 该单元具有“复合十字”型结构, 能实现  $364^\circ$  移相, 弥补了现有单层单元移相范围不足  $360^\circ$  的缺陷, 从而显著提高天线带宽。通过两种电磁仿真软件 ANSOFT HFSS 和 Designer 仿真测试均表明, 基于该新型单元的中心频率为 30GHz 的 18 元阵列能实现符合设计要求的  $15^\circ$  波束转向, 以及 20% 的 1-dB 增益带宽, 优于传统方形贴片反射阵列天线的带宽。

**关键词** 反射阵列天线, 单元, 宽带

李 华 (1976-), 女, 四川人, 电子科技大学无线电物理专业博士生, 主要研究方向为电磁场理论与天线技术。

## 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>