

# 基于伪随机码加权的非均匀天线阵 自适应多波束形成方法

林 森

(安徽邮电职业技术学院,安徽 合肥 230031)

**[摘要]** 非均匀阵列有其特殊的应用价值,对此本文提出一种基于伪随机码加权的非均匀天线阵的自适应接收多波束形成新方法。描述了该方法的工作原理,建立了非均匀直线阵的信号模型,给出了波达方向估计和接收多波束形成算法,仿真验证了该方法的有效性和灵活性。其优点是无需信号环境的先验知识,无需计算加权矢量,只需相关运算即可形成接收多波束,因此简单高效。

**[关键词]** 非均匀天线阵;伪随机码加权;波达方向估计;自适应多波束形成;相关运算

**[中图分类号]** TN820.1    **[文献标识码]** A    **[文章编号]** 1674-2273(2014)03-0020-03

## 1 引 言

基于阵列天线的波达方向估计(DOA)和数字波束形成(DBF)技术在军事和民用领域都有重要的应用,与常规的均匀阵列相比,非均匀阵列也有很多实际需求<sup>[1-3]</sup>。一方面是从使用场合和设备成本的角度考虑,将均匀阵列排列成非均匀子阵;另一方面,非均匀阵列的阵元间距可以突破二分之一波长的限制,在阵元数相同的情况下能够获得更大的孔径,从而提高DOA估计的精度。但是,非均匀阵列的阵元间距没有确定的排列规律,致使DOA估计理论发展缓慢<sup>[4-5]</sup>,相关的DBF理论更是鲜见,限制了非均匀阵列的使用。对此,本文提出一种基于伪随机码加权的非均匀天线阵的接收多波束形成方法。在阐述了该方法基本思想的基础上,建立了非均匀天线阵的信号模型,给出了波达方向(DOA)估计和多波束形成算法,并通过仿真验证了该方法的有效性和使用的灵活性。该方法无需信号环境的先验知识即可估计波达方向,也无需计算加权矢量即可在多个波达方向上形成接收波束,计算过程简单高效,对非均匀阵列的工程应用具有很高的参考价值。

## 2 伪随机码加权的非均匀天线阵多波束形成方法 描述

### 2.1 波束形成原理

一个在空间上任意分布的天线阵列,它所接

收的每一个不同方向的来波在各个阵元上所形成的方向矢量都是唯一的,这个唯一性构成了分辨不同波达方向的依据。先用伪随机码对期望信号的方向矢量做加权求和,形成期望信号的独特识别信号,然后用同样的伪随机码对每个阵元的接收信号做加权求和得到天线阵的输出,这个输出信号只有在期望信号的波达方向上与识别信号相关,因此通过相关运算可以在期望信号的波达方向上形成接收波束,并将信号恢复出来,而其他方向的输出信号因不具有与识别信号的相关性被滤除。伪随机加权码之间的相关性决定了接收波束的增益,相关性越强接收波束的增益越大,而且相关运算恢复出来的接收信号对传输信息的提取没有影响。

### 2.2 非均匀直线阵的信号模型

建立非均匀直线阵的波束形成器模型,如图1所示。该模型由四个单元组成,一个是信号接收与加权求和单元,第二个是波达方向(DOA)估计单元,第三个是识别信号生成器单元,第四个是相关运算波束形成器单元,它们分别完成信号的接收与加权求和、来波方向估计、识别信号生成以及识别信号与接收信号之间的相关运算等功能。

[收稿日期] 2014-01-12

[基金项目] 安徽省自然科学基金(1408085MF128)

[作者简介] 林 森(1973—),女,安徽合肥人,硕士,讲师,研究方向为信号处理与计算机仿真。

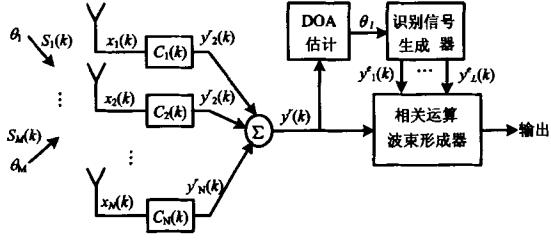


图 1 伪随机码加权的波束形成器

假设在信号接收与加权求和单元中有  $N$  个阵元沿直线非均匀排列,以第 1 个阵元为参考,各阵元位置为  $d_1, d_2, \dots, d_N$ 。空间有  $M$  个来波,它们的波达角分别为  $\theta_m, m = 1, 2, \dots, M$ , 则它们在天线阵上形成的方向矢量为

$$a(\theta_m) = [1 \ e^{j\eta d_2 \sin \theta_m} \ e^{j2\eta d_3 \sin \theta_m} \cdots \ e^{j\eta d_N \sin \theta_m}]^T \quad (1)$$

式中,  $\eta = \frac{2\pi}{\lambda}$  为相移常数, 上标  $T$  表示转置。

假设第  $m$  个来波为  $s_m(k)$ , 被第  $n$  个天线阵阵元接收, 则接收信号可以表示为

$$x_n^m(k) = e^{j\eta d_n \sin \theta_m} \cdot s_m(k) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

该阵元接收  $M$  个来波的输出为

$$\begin{aligned} x_n(k) &= \sum_{m=1}^M x_n^m(k) + n_n(k) \\ &= \sum_{m=1}^M e^{j\eta d_n \sin \theta_m} s_m(k) + n_n(k) \\ n &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $n_n(k)$  为第  $n$  个天线阵阵元接收的加性、零均值、高斯噪声, 其方差为  $\sigma_n^2$ 。对  $x_n(k)$  做伪随机码加权, 并将所有  $N$  个阵元的输出求和, 得到天线阵的输出

$$y'(k) = \sum_{n=1}^N y_n(k) = \sum_{n=1}^N C_n(k) x_n(k) = C^T(k) X(k) \quad (4)$$

其中,  $C(k) = [C_1(k) \ C_2(k) \ \dots \ C_N(k)]^T$  为伪随机码加权矢量,  $X(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_M(k)]^T$  为接收信号矢量

$$X(k) = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a_M(\theta_M)] \cdot \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \vdots \\ s_D(k) \end{bmatrix} + n(k) \quad (5)$$

$$n(k) = A s(k) + n(k)$$

式中,  $A = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a_M(\theta_M)]$  为所有波达角  $\theta_m$  的方向矢量构成的矩阵,  $n(k)$  为每个天线阵元的噪声矢量,  $n(k) = [n_1(k) \ n_2(k) \ \dots \ n_N(k)]^T$ 。

### 2.3 波达方向(DOA)估计

为了在来波方向形成接收波束, 先要对来波的方向进行估计。为此, 先在 DOA 估计单元中生成

相关扫描信号, 其表达式为

$$y_L(\theta) = C^T(k) a(\theta) \quad (6)$$

式中,  $a(\theta) = [1 \ e^{j\eta d_2 \sin \theta_m} \ e^{j2\eta d_3 \sin \theta_m} \ \dots \ e^{j\eta d_N \sin \theta_m}]^T$  为扫描矢量。

将(6)式与(4)式表示的接收信号做相关运算, 可得

$$R_k(\theta) = E\{y'(k)[y_L(\theta)]^H\} = A s[k a(\theta)]^T \quad (7)$$

上式中使用了伪随机码自相关为 1 和互相关为 0 的理想条件, 即  $E[C_n(k) C_n^T(k)] = 1$  和  $E[C_n(k) C_m^T(k)] = 0$ 。当(7)式取最大相关值时, 可以确定为一个来波的波达方向  $\theta_m, m = 1, 2, \dots, M$ 。这种波达方向估计的空间谱具有常规的分辨能力, 即 3dB 波束宽度。由于口径长度增加非均匀阵列的分辨率优于均匀阵列, 但仍然会随着波束与阵列轴线夹角的最大而改变。

非均匀阵列的 DOA 估计也可以超分辨, 如 MUSIC 算法。此时要先对输出信号进行解扩, 恢复出接收信号, 这可以用伪随机加权码与接收信号  $y'(k)$  做相关运算来实现, 即

$$\begin{aligned} \xi(k) &= E[y'(k) C(k)] \\ &= E[C^T(k) x(k) C(k)] = x(k) \end{aligned} \quad (8)$$

可见, 通过相关运算天线阵的接收信号得到了恢复, 然后可以利用非均匀阵列的 MUSIC 算法来估计来波方向, 其空间谱表达式为

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{|a(\theta) E_N^H a(\theta)|} \quad (9)$$

式中,  $E_N^H$  为由噪声特征向量  $e_i, i = 1, 2, \dots, N-M$  张成的  $N \times (N-M)$  维子空间,  $E_N = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_{N-M}]$ 。

### 2.4 接收多波束形成算法

如图 1 所示, 波达方向估计单元估计出各来波的 DOA 以后, 将 DOA 信息传递给识别信号生成器生成相关识别信号, 该信号是根据天线阵的空间构型和期望信号的波达角来生成的, 即

$$y_L^e = C^T(k) A_L^e \quad (10)$$

式中,  $A_L^e$  为  $L$  个期望信号波达角  $\theta_l, l = 1, 2, \dots, L$  的方向矢量构成的矩阵, 形式为

$$A_L^e = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ e^{j\eta d_2 \sin \theta_1} & \cdots & e^{j\eta d_2 \sin \theta_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{j\eta d_N \sin \theta_1} & \cdots & e^{j\eta d_N \sin \theta_L} \end{bmatrix} \quad (11)$$

该识别信号在相关运算波束形成器中与天线阵输出信号  $y'(k)$  做相关运算, 可得

$$R_k = E\{y'(k)[y_L^e]^H\}$$

$$\begin{aligned}
&= E \left\{ \sum_{n=1}^N C_n(k) \left[ \sum_{m=1}^M e^{j\eta d_n \sin \theta_m} s_m(k) + n_n(k) \right] \cdot \right. \\
&\quad \left. \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L C_n^T(k) e^{-j\eta d_n \sin \theta_l} \right\} \\
&= \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N e^{j\eta d_n (\sin \theta_m - \sin \theta_l)} s_m(k)
\end{aligned} \quad (12)$$

由于阵元间距没有确定的排列规律,(12)式无法最终得到类似 sinc 函数的形式。但是,由该式可见,当  $\theta_l = \theta_m$  时相关运算的模值最大,此时接收波束对准来波方向,接收信号获得最大增益,而当  $\theta_l$  偏离  $\theta_m$  时相关运算的模值减小,接收波束偏离来波方向,接收信号的增益减小。多个  $\theta_l$  和  $\theta_m$  相等时,可以形成多个接收波束,它们的叠加形成了多波束。而且,满足  $\theta_l = \theta_m$  条件时,相关运算波束形成器的输出就是期望信号  $s_m(k)$ 。

### 3 仿真实验

为了验证上述伪随机码加权的非均匀天线阵多波束形成算法,本文采用一个 11 阵元的非均匀直线阵,各阵元位置为  $[0, 1.14, 2.26, 3.36, 4.44, 5.50, 6.57, 7.66, 8.77, 9.90, 11.05] \times \frac{\lambda}{2}$ ,阵元间距均大

于  $\frac{\lambda}{2}$ ,且不相等。用 127 位的 Gold 码序列作加权矢量,它由 7 位移位寄存器产生,其本原多项式为  $f_a(x) = x^6 + x + 1$  和  $f_a(x) = x^6 + x^4 + x + 1$ 。

#### 3.1 波达方向(DOA)估计仿真

这里的非均匀直线阵 DOA 估计采用 MUSIC 算法来进行。由于估计信号是从天线阵的输出信号中恢复出来的,其中包含了伪随机码互相关不等于零产生的残余高斯噪声,因此主要考察它们对 DOA 估计的影响。这里假设来波方向为  $-6^\circ, 16^\circ$  和  $40^\circ$ ,信噪比为  $-10\text{dB}$ ,信号采样 1270 点,用 MUSIC 算法进行 DOA 估计的结果如图 2 所示。可见,残余高斯噪声对 DOA 估计的影响很小,MUSIC 算法仍能保证对来波方向的精确估计。

#### 3.2 接收多波束形成仿真

为了验证伪随机码加权的非均匀阵列多波束形成算法,在上小节波达方向估计之后做多波束形成,结果如图 3 所示。可见,波束形成器分别在  $-6^\circ, 16^\circ$  和  $40^\circ$  方向形成了定向接收波束。改变识别信号生成器中来波的波达方向,无需重新计算加权矢量,也无需改变波束形成器中的其他任何部分,即可完成对接收波束指向的调整,因此该方法具有很好的灵活性。

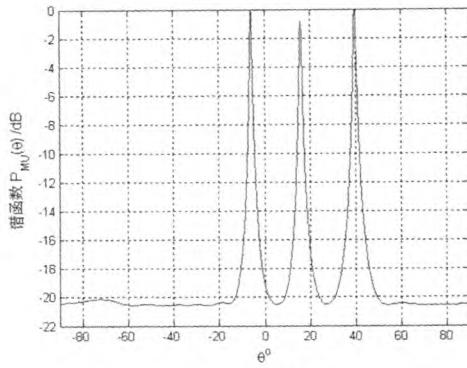


图 2 非均匀阵列的 DOA 估计结果

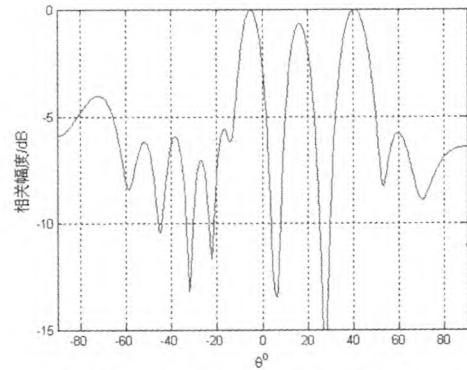


图 3 本文算法的多波束形成结果

### 4 结论

本文提出了一种基于伪随机码加权的非均匀天线阵的自适应多波束形成新方法,该方法利用天线阵列的方向矢量、伪随机加权码和空间波达方向,形成了唯一的相关识别信号,通过与输出信号做相关运算获得了期望信号的接收波束。将本文提出的常规 DOA 估计算法或超分辨的 MUSIC 算法与接收多波束形成算法相结合,可以自适应调整接收多波束的指向,计算过程简单,电路实现容易,因此具有很好的应用潜力。但在非均匀阵列中,阵元位置设置不当会引起栅瓣的出现,如何发挥非均匀阵列的优势并同时避免栅瓣将是本文下一步要解决的问题。

### [参考文献]

- [1] Frank B. Gross Smart Antennas for Wireless Communications [M]. McGraw-Hill, 2005: 250—260.
- [2] Yuri I. Resolving manifold ambiguities in direction of arrival estimation for non-uniform linear antenna arrays [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1999, 47(10): 2629—2643.
- [3] 李绍滨,赵淑清,宿富林. 非均匀天线阵的超分辨测向[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(6): 834—837.
- [4] 邵丽君,赵淑清. 非均匀阵列天线超分辨性能分析[J]. 无线电工程,2005,35(10): 43—46.
- [5] 倪菁,李品. 非均匀阵列的相关测角方法研究[J]. 现代雷达,2011,33(12): 22—24.

## 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>