

电扫阵列

——MATLAB[®]建模与仿真

Electronically Scanned Arrays
MATLAB[®] Modeling and Simulation

【英】A·D·布朗 著

汪连栋 孔德培 译

乔会东 周 波

戴幻尧 审校

- 源于诺思罗普·格鲁曼公司高级设计师和工程师的科研实践感悟
- 全面覆盖电扫阵列（ESA）设计与分析的建模仿真
- 提供翔实的MATLAB仿真代码，便于得到多种ESA方向图综合算例
- 是从事雷达、通信、电子战等相关专业领域的科研、教学人员的理想读物

电 扫 阵 列

——MATLAB[®] 建模与仿真

Electronically Scanned Arrays MATLAB[®] Modeling and Simulation

[英] A · D · Brown 著

汪连栋 孔德培 译

乔会东 周 波

戴幻尧 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-202 号

图书在版编目(CIP)数据

电扫阵列: MATLAB 建模与仿真 / (英)布朗
(Brown, A. D.) 著;汪连栋等译. —北京:国防工业出版社, 2014. 6

(高新科技译丛)

书名原文: Electronically scanned arrays matlab
modeling and simulation

ISBN 978-7-118-09409-1

I. ①电... II. ①布... ②汪... III. ①天线-电子扫描- Matlab 软件 IV. ①TN820. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 101335 号

Electronically Scanned Arrays MATLAB Modeling and Simulation by A · D · Brown.

© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Taylor & Francis Group LLC. 授权国防工业出版社独家出版发行.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售.

版权所有, 侵权必究.

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售



*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 3/4 字数 252 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

电子扫描阵列(Electronically Scanned Array)是一类通过电子方法实现天线波束指向在空间转动或扫描的天线,电子扫描阵列天线按实现天线波束扫描的方法分为相位扫描阵列天线(相控阵)和频率扫描阵列天线(频扫阵)。在国内,有时也将频扫阵纳入相控阵的范畴,将两者统称为相控阵天线。相控阵天线又可分为有源相控阵(AESA)和无源相控阵,两者本质区别在于,无源相控阵采用传统雷达的发射机,共用一部发射机、共用一部集中式移相器;而有源相控阵的每个阵元或者子阵后面都级联一个功放和低噪放(LNA),使得天线阵列的波束赋形和波束扫描更加灵活。

采用电子扫描阵列天线的雷达比使用纯机械扫描的传统雷达有更强的参数测量能力、低截获概率能力、多目标处理能力、边扫描边跟踪能力、空域抗干扰能力,以及空对空一空对地多模式同时工作的能力等,得到越来越广泛的应用。电子扫描阵列雷达有相当密集的天线阵列,电扫阵列的设计与实现是电子扫描阵列雷达的基础与核心技术。

诺思罗普·格鲁曼公司是美国主要的航空航天飞行器制造厂商之一,在全球防务商排行第三位,也是最大的雷达与军舰制造商。本书作者A·D·布朗博士于2000年进入诺思罗普·格鲁曼公司电子系统分部,从事过辐射源设计、阵列方向图综合、天线架构的系统级分析和系统架构设计等工作,同时还承担了天线基础课程、天线系统设计和电扫阵列课程等培训和教学工作。本书原理论述与工程实例相结合,对电扫阵列的基本概念和工作原理等基础知识进行了系统讲解,同时提供了完成基本计算的MATLAB程序,本书可为学习、设计电扫阵列的科技人员提供很好的参考,可以作为大学课程的教科书及实践工程师的参考书。

感谢参加本书翻译、审校的各位同仁,他们为保证本书质量付出了艰苦劳

动。特别感谢申绪润、戴幻尧同志,他们为本书的翻译和出版提供了大量帮助和支持。

本书涉及到一些天线的基本概念、术语及电扫阵列的基本原理,公式和图表较多,对译词不当之处,敬请读者批评指正。

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室

2014 年 1 月于洛阳

原版序

在诺斯罗普·格鲁曼公司度过的职业生涯中,我曾有幸负责几个内部教学任务,来指导新入职的工程师。几年前,我注意到一件事情:我们许多很有才华的新员工缺乏敏锐的洞察力,出现这种情况的原因是基础知识不足。在天线分析的过程中,我经常看到他们没有真正领悟到关键概念,对课本以外的难题很难找到有效的解决方案。众所周知,电扫阵列(Electronically Scanned Array, ESA)(本书原著中使用了 ESA 和 ESAs 两个术语,一个指电扫阵列的统称,一个指各类电扫阵列,两个术语在汉语中区别不大,故译文中统一使用 ESA——译者注)的方向图可以通过 MATLAB 的 FFT 功能来计算。而且,在一眨眼的功夫,你面前就会得到一个精美的、彩色的 ESA 方向图。然而,当面对分析子阵、共形阵阵列结构等问题的时候,当务之急是要知道 ESA 的基本原理,而不是如何在 MATLAB 中键入单词 *fft* 或 *fftshift*。因此,这本书的目标之一就是为那些刚刚接触 ESA 的人员提供一个工具,从而使他们对 ESA 是如何工作的有个基本了解,同时也提供代码来辅助他们学习,而不必从头开始运行。

几年前,我有幸承担了另一个 ESA 的教学任务,给不熟悉 ESA 的客户讲解一些基本概念。我的导师之一, Bill Hopwood,他是这门课程的鼻祖。他指出,让诺斯罗普·格鲁曼公司的客户来听这门课是非常有益的。那些对 ESA 有浓厚兴趣的客户,他们不满足于一个粗略的顶层的介绍,而是希望学习更多关于 ESA 的知识,我也希望这本书对他们来说可以作为一个很好的参考书。

最后,希望这本书能够成为大学课程中的一本教科书,成为实践经验工程师的参考书之一。MATLAB 是一个很好的工具,可用于探索 and 了解科学和工程的各种概念。本书中提供的代码也可作为参考工具,通过分析和仿真更加了解 ESA。

本书共由 6 个章节组成。第 1 章和第 2 章主要是介绍 ESA 的基本理论,包

括 ESA 的波束宽度、栅瓣、瞬时带宽等,这些是 ESA 研究人员的基础知识。第 1 章主要关注的是一维电扫阵列,第 2 章深入探讨和分析了二维电扫阵列,包括坐标定义、正弦空间和方向图分析。

第 1 章和第 2 章介绍了 ESA 基本理论,在此基础上,第 3 章和第 4 章提出了子阵和方向图优化,第 3 章侧重于子阵的架构以及组成子阵列的架构之间的细微差别,如相位与时间延迟控制的对比,瞬时带宽的考虑,以及数字波束形成的用途。第 3 章还总结了重叠子阵数字波束形成的结果。

第 4 章是由我的同事——丹尼尔博士执笔,着重讨论方向图优化问题。研究副瓣的空间分布优化方法是非常重要的,本章分别介绍了方向图优化方法,以及优化后所新增的能力。

第 5 章和第 6 章涉及的内容是其他 ESA 的书籍中所没有的,我很高兴能够将这部分知识展现给大家,而且对读者也是大有裨益的。第 5 章的主题是 ESA 在空间环境领域的应用,这一章的作者蒂莫西·库克是一位非常有才华的系统工程师,他重点讲述了空间轨道区域中方向图推算,正弦空间到纬度/经度坐标系的变换,以及一些基本的航天动力学原理,这些对于理解和分析 ESA 在空间平台上的应用是非常必要的。

第 6 章总结了 ESA 的可靠性。坦率地说,这在分析中往往是被忽略的方面。本章的素材主要来源于诺斯罗普公司退休的高级系统架构师 Bill Hopwood 授权的一份技术备忘录,我的同事贾巴瑞尔·米勒博士对其中可靠性分析及其对 ESA 影响的部分进行了收集、整理,从而提供了这个非常有用的章节。

致谢

首先,我感谢上帝给了我这个机会、能力和灵感来创作这本书。在一个星期二的晚上,开车从马里兰州圣殿山的精神信仰圣经学院(Spirit of Faith Bible Institute)回家的路上,上帝给了我写这本书的想法。我以前从没有意图或强烈的愿望来写作一本书,这确实是神给予我的一个启示。

我要感谢我的妻子 Nadine,在我写作这本书时她为我祈祷、支持我、牺牲自己的时间,没有她我不会取得今天的成就。我也要感谢我的女儿和儿子, Alexis 和 Joshua,在我不得不为完成这本书工作时牺牲了陪伴他们的时间。感谢我的父母 Rudy 和 Meredith,他们一直支持我和信任我,他们从小对我的指导,为我在麻省理工学院和密歇根大学接受教育以及在诺思罗普·格鲁曼公司取得成功铺平了道路,他们做出的牺牲我永远无法偿还。感谢我的爷爷奶奶、外公外婆, James 和 Ethel Mae, Wesley 和 Lilly,还有我的教母 Ruth、姑姑 Deborah、岳父和岳母 Raymond 和凯思琳斯 Kathleen Stuart,感谢他们为我提供额外的支持和鼓励。我也同样对我的大家庭中的所有人士表示感谢。

我要感谢三位优秀的绅士,丹尼尔·布瑞格博士、贾巴瑞尔·米勒博士和蒂莫西·库克,他们每人在这本书中撰写了一章。非常高兴有这样的同事,他们确实是诺思罗普·格鲁曼公司中一些最好和最聪明的人。我也要感谢所有帮助我完成这本书的人:John Wojtowicz, Richard Konapelsky, Kurt Ramsey, Kevin Idstein, Urz Batzel, Dr. Sumati Rajan, Jon Ulrey, John Long, Kevin Schmidt, and Tom Harmon。尤其要感谢 Joseph Payne 博士能够抽出时间来审定手稿,以及我过去的导师,John L. Volakis 博士,他总是不厌其烦地解答我的问题,作出了一个伟大职业道德的表率。最后,感谢 Leo Kempel 博士。

在诺思罗普·格鲁曼公司的职业生涯中,有三个人成为我的朋友和伟大的指导者。指导者以身作则,让学员能够沿着他们的道路前进和学习。从这三个

人身上我领悟到没有实践和辛勤的工作,仅凭智力很多事都难以完成。Bill Hopwood,常被亲切地称为“Uncle Bill”和“Mr. ESA”,感谢对我的支持,他真是我所见过的最有创意的人之一,非常高兴能够和他一起工作;Lee Cole,谢谢为我展示的系统架构师的思考方法和对我没有保留的传授,他真的是一个令人称奇的人,我将一直向他学习。Dan Davis,我感谢所有他的一对一的指导,无论何时我到他的办公室,他总是愿意和我讨论概念问题,很多次从他那里我学习到,困难问题可以得到简化的、优雅的解决方案。在我职业生涯的早期,他指导我把写完的 MATLAB 代码放入自己的“工具箱”中,这样就可以随时使用。嗯,我遵从了他的指示!

最后,我想如果我不感谢我的牧师和精神之父,Michael A. Freeman 博士,是失职的。我从他那里了解到首先要依靠神的指示其次再依靠我的智力(这是不容易的!)。感谢他的指引、模范的生活方式,推动我从不满足于平庸。

原稿共同撰稿人

丹尼尔·布瑞格博士, 诺思罗普·格鲁曼公司电子系统分部, 马里兰州巴尔的摩

A·D·布朗博士, 诺思罗普·格鲁曼公司电子系统分部, 马里兰州巴尔的摩

蒂莫西·库克, 诺思罗普·格鲁曼公司电子系统分部, 马里兰州巴尔的摩

贾巴瑞尔·米勒博士, 诺思罗普·格鲁曼公司电子系统分部, 马里兰州巴尔的摩

目 录

第 1 章 一维电扫阵列基础	1
1.1 引言	1
1.2 一维线阵公式	2
1.2.1 非电扫方向图公式	2
1.2.2 电扫方向图公式	3
1.3 电扫阵列的基本参数	4
1.3.1 波束宽度	5
1.3.2 瞬时带宽	6
1.3.3 栅瓣	8
1.4 一维线阵方向图综述	9
1.4.1 不同振幅分布	11
1.4.2 频率变化	14
1.4.3 扫描角变化	14
1.5 共形阵列	15
1.5.1 公式表达	15
1.5.2 共形阵列的综合方向图	17
1.5.3 实例	17
1.6 MATLAB 程序和函数	18
1.6.1 BeamwidthCalculator. m	18
1.6.2 Compute_1D_AF. m (Function)	19
1.6.3 Compute_1D_EP. m (Function)	19
1.6.4 Compute_1D_PAT (Function)	20
1.6.5 process_vector. m (Function)	20

1. 6. 6	Pattern1D. m	20
1. 6. 7	Pattern1D_GLs. m	24
1. 6. 8	Pattern1D_IBW. m	26
1. 6. 9	Taylor. m (Function)	29
1. 6. 10	AmpWeightsCompare. m	30
1. 6. 11	Pattern1D_ConformalArray. m	30
	参考文献	32
第 2 章	二维电扫阵列基础	33
2. 1	二维 ESA 的方向图表达式	33
2. 2	ESA 的空间坐标定义	35
2. 2. 1	天线坐标系	35
2. 2. 2	雷达坐标系	37
2. 2. 3	天线圆锥角坐标系	38
2. 3	正弦空间表示法	39
2. 4	ESA 阵元网格	41
2. 4. 1	矩形网格	41
2. 4. 2	三角形网格	45
2. 5	二维阵列方向图分析	46
2. 5. 1	天线方向图综合	46
2. 5. 2	阵面倾斜的 ESA 的天线方向图	55
2. 5. 3	综合增益	57
2. 6	MATLAB 程序和函数	59
2. 6. 1	Compute_2D_AF. m (Function)	59
2. 6. 2	Compute_2D_AFquant. m (Function)	59
2. 6. 3	Compute_2D_EP. m (Function)	60
2. 6. 4	Compute_2D_PAT. m (Function)	61
2. 6. 5	Compute_2D_INTGAIN. m (Function)	61
2. 6. 6	process_matrix. m (Function)	62
2. 6. 7	process_matrix2. m (Function)	62
2. 6. 8	Taylor. m (Function)	62
2. 6. 9	Pattern2D. m	63

2. 6. 10 GratingLobePlotter. m	75
参考文献	77
第 3 章 子阵波束形成	78
3. 1 引言	78
3. 2 子阵方向图表达式	80
3. 3 子阵波束形成	81
3. 3. 1 子阵相位延迟控制波束形成	82
3. 3. 2 子阵时间延迟控制波束形成	84
3. 3. 3 子阵数字波束形成	86
3. 4 重叠子阵	87
3. 5 MATLAB 程序列表	90
3. 5. 1 Compute_1D_AF. m (Function)	90
3. 5. 2 Compute_1D_EP. m (Function)	91
3. 5. 3 Compute_1D_PAT (Function)	91
3. 5. 4 process_vector. m (Function)	91
3. 5. 5 Taylor. m (Function)	91
3. 5. 6 Subarray1D. m	92
3. 5. 7 Subarray1D_DBF. m	96
3. 5. 8 Subarray1D_Overlapped. m	99
参考文献	105
第 4 章 方向图优化	106
4. 1 引言	106
4. 2 随机方向图优化概述	106
4. 2. 1 粒子群优化概述	107
4. 2. 2 遗传算法概述	107
4. 3 方向图优化的实现	108
4. 3. 1 构建成本函数	108
4. 3. 2 粒子群算法实例	109
4. 3. 3 遗传算法实例	112
4. 4 MATLAB 程序列表	114

4.4.1	simpleCostFunction. m	114
4.4.2	simpleGA_AmpTaperEx. m	115
4.4.3	simpleGA_FlatTopEx. m	121
4.4.4	simpleGA_PhaseOnlyEx. m	128
4.4.5	simplePS_AmpTaperEx. m	135
4.4.6	simplePS_FlatTopEx. m	140
4.4.7	simplePS_PhaseOnlyEx. m	145
参考文献		150
第5章	电扫阵列在天基平台中的应用	151
5.1	引言	151
5.2	二体轨道模型	151
5.3	坐标系	155
5.4	视场的计算	158
5.5	天线方向图在大地测量坐标系中的投影	159
5.6	MATLAB 程序列表	160
5.6.1	defineObite. m	160
5.6.2	defineEarth. m	165
5.6.3	makeEllipse. m	166
5.6.4	defineESA. m	166
5.6.5	los2ecef. m	167
5.6.6	computeHorizon. m	168
5.6.7	computeFOV. m	170
5.6.8	main_example1. m	171
5.6.9	main_example2. m	173
5.6.10	main_example3. m	174
参考文献		178
第6章	电扫阵列的可靠性	179
6.1	引言	179
6.2	阵元的故障率	180
6.3	平均无故障时间	182

6.4	模块故障对一维和二维天线方向图的影响	183
6.5	模块故障对雷达距离方程的影响	189
6.6	MATLAB 程序列表	191
6.6.1	Reliability Code	191
	参考文献	197
附录 A	阵因子(AF)公式的推导过程	198
附录 B	瞬时带宽(IBW)公式的推导过程	200
附录 C	三角分布栅瓣公式的推导过程	202

第 1 章 一维电扫阵列基础

1.1 引言

电扫阵列 (Electronically Scanned Array, ESA) 具有波束方向可控、扫描灵活、增益高的优势,在雷达、气象监视和成像领域获得了广泛应用。相比较而言,传统的反射面天线采用惯性器件来控制天线波束指向,而 ESA 不需要改变阵列的物理指向,就可以实现空间上的波束扫描(图 1.1)。ESA 的波束扫描工作在微秒量级,而反射面天线只能工作在毫秒量级。这增加了扫描速率和扫描的灵活性,并且可以根据预定的扫描模式来控制波束形成后在空间的指向。

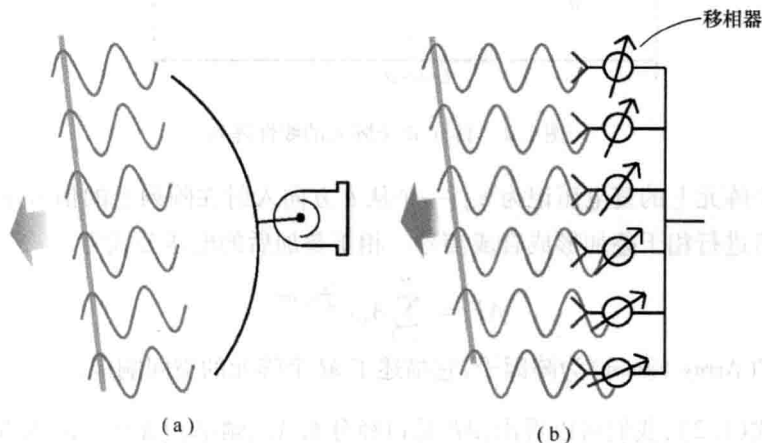


图 1.1 反射面天线和 ESA 波束扫描的对比图

(来自沃尔什, T 等, 有源电子扫描天线 (AESA), 雷达系统工程课程, 诺斯罗普·格鲁曼公司
电子系统分部, 巴尔的摩, 马里兰州, 2003 年 12 月)

(a) 反射面天线需要惯性器件机械控制波束指向; (b) ESA 电扫控制波束指向。

在设计 ESA 时, 我们需要懂得一些基本的原理 (如栅瓣、波束宽度、瞬时带宽等)。除此之外, 必须对 ESA 的应用有一个基本的了解 (如方向图优化、子阵划分、数字波束形成 (CDBF) 等)。当我们对这些基础知识建立起概念后, 在设

计 ESA 的时候,就要全面考虑诸如可靠性等工程应用指标。本章将着重介绍 ESA 的基础知识。

1.2 一维线阵公式

1.2.1 非电扫方向图公式

假设一个一维阵列,由 M 个阵元组成,如图 1.2 所示。阵元是均匀放置的,相邻阵元的间距为 d ,阵列的总长是 L ,因此有 $L = Md$,阵元的中心位于坐标原点 $x = 0$,那么阵元的位置可以表示为

$$x_m = (m - 0.5(M + 1))d, m = 1, \dots, M \quad (1.1)$$

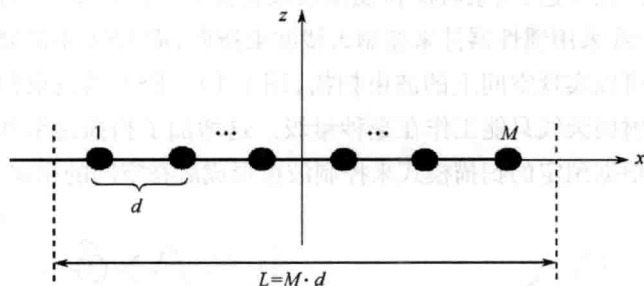


图 1.2 具有 M 个阵元的线性阵列

每个阵元上的复电压记为 a_m ,一个从 θ 方向入射在阵列上的信号由每个阵元接收后进行相干叠加形成合成信号。相干叠加后的电压公式为

$$AF = \sum_{m=1}^M A_m e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin\theta} \quad (1.2)$$

式中: AF (Array Factor) 为阵因子,它描述了 M 个阵元的空间响应。

由式(1.2),我们可以看出, AF 是口径分布 A_m 、频率 f ($\lambda = \frac{c}{f}$, c 为真空中的光速)、阵元间距 d 和入射角 θ 的函数。式(1.2)中的阵因子 AF 在 $\theta = 0^\circ$ 时有最大值,最大值为 M ,恰好是阵列中阵元的数量。在 MATLAB 中编写代码时,这也可以用来验证代码的正确性。在后面我们会给出更加详细的说明,无论是一维的还是二维的 ESA,阵因子的最大值都等于阵列中阵元的数目。

阵因子并不能全面描述阵列的空间响应,阵列中每个阵元的方向图描述了该阵元的空间响应。对阵元方向图进行建模时,往往采用余弦函数的乘方形式