

FEKO 基础与实战系列丛书

FEKO 仿真原理与工程应用

刘 源 焦金龙 王 晨 王晓峰 等编著



机械工业出版社

本书基于 FEKO 的最新版本 FEKO 14.0 编写，此版本较旧版本新增了时域有限差分（FDTD）算法，支持更多的混合算法和功能特性。本书传递了作者们多年技术支持工作中积累的应用技巧和心得体会，会极大帮助初学者和工程人员提升工作效率。本书涵盖了 FEKO 的所有重点应用领域，包含多样化及最新的热门应用，如 CMA、汽车电磁兼容、生物电磁等，贴近 FEKO 用户的实际使用场景。读者读完此书会对 FEKO 的优势和特点有全面的了解。

本书主要适用于从事天线、雷达、微波、射频以及电磁兼容领域相关设计和特性研究的工程技术人员和高校师生等，既可以作为航空航天、汽车、电子、通信、船舶和军工等行业进行工程分析的参考用书，也可以作为计算电磁学和 FEKO 软件的教学用书和培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

FEKO 仿真原理与工程应用 / 刘源等编著. —北京：机械工业出版社，2017.1
(FEKO 基础与实战系列丛书)

ISBN 978-7-111-56144-6

I. ①F… II. ①刘… III. ①电磁场—有限元分析—应用软件
IV. ①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 034320 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张淑谦 责任编辑：张淑谦 陈瑞文

责任校对：张艳霞 责任印制：李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 6 月·第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·32.75 印张·799 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-56144-6

定价：95.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：（010）88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：（010）68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

（010）88379203

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

序 一

FEKO（出自德语“Feldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche”，意为任意形状目标体的各种类型的电磁场分析）最早源于 20 世纪 90 年代初利用矩量法（MoM）解决金属体（金属表面和导线）电磁兼容和天线问题的研究代码。研究人员很快发现，将矩量法（用于仿真精细结构，如天线）和低频近似算法（用于仿真大型载体，如飞机机身）进行混合是解决电大尺寸问题的必由之路。必须提及的是，当时的计算机运行速度缓慢，内存配置也很低，甚至还比不上如今的智能手机。1994 年，结合了矩量法与物理光学法的混合算法 MoM/PO 诞生了。

多年来，FEKO 愈加成熟，不断增加先进的计算方法以满足新的应用和市场需求。不仅包括更加高效的求解器（如 MLFMM——多层快速多级子算法，以及加入很多加速算法的 RL-GO——射线寻迹几何光学法），而且优化和扩展了现有求解器，以支持特定的功能来解决复杂的实际问题（集成风窗天线即是一个例子）。FEKO 当前版本 FEKO 14.0（本书即基于此版本）是一个高级的、采用最先进技术的通用电磁仿真软件包。FEKO 主要用于高频应用，也有一些在较低频段的扩展应用（本书亦有所涉及，如 AM 天线和低频屏蔽等）。

本书给出了 FEKO 相关的计算电磁学概述，介绍并阐述了 FEKO 中的多种计算方法，如 MoM、MLFMM、PO、RL-GO 以及 FEM（有限元法）和 FDTD（时域有限差分法）等，应用涉及雷达系统、天线、天线布局、电磁兼容、波导、天线罩、微带电路和生物电磁等多个领域。

本书还讨论了 FEKO 用户界面以及前后处理模块 CADFEKO 和 POSTFEKO。高级 FEKO 用户将会发现关于 LUA 脚本的章节特别有用，它展示了 FEKO 用户界面的最强大的功能。此外，还有一些包含 FEKO 高级功能的章节，如 CMA（特征模式分析）、周期性结构、优化、线缆建模及采用等效源的模型分解等。

我非常高兴看到这本书能与广大中国科研及工程人员见面。衷心希望本书能给应用数值方法和仿真技术的读者带来借鉴作用，尤其是带给 FEKO 用户切实的帮助！



Dr. Ulrich Jakobus
FEKO 创始人、IEEE Fellow、ACES Fellow
Altair 电磁方案副总裁
2016 年 7 月

序 二

150 多年前，麦克斯韦预言了电磁波的存在，至今电磁场理论与微波技术已经广泛应用于国防、民用通信、医疗、射电天文、导航等各个领域。如今，包括毫米波与太赫兹在内的高频技术备受关注，天线设计、雷达隐身、电磁兼容等典型应用场景也从大型军工系统延伸到民用车辆、即时通信、产品标签和物联网应用等民用领域。随着科技的发展，电磁场与微波技术将会对社会经济、国防以及人们日常生活的各个方面产生更加深远的影响。

电磁仿真软件是用计算电磁学方法解决实际问题的有效工具。在复杂的工程设计中，相较于凭借工程师个人的经验来推断和测试，利用成熟的商业软件进行仿真验证和优化修正可以极大地提升效率和准确性，FEKO 即是其中一款非常优秀的三维电磁场仿真软件。FEKO 软件基于矩量法 (MoM) 实现对 Maxwell 方程组的求解，并实现将矩量法和高频近似算法 (包括 PO、UTD 等) 相结合的混合算法，特别适合求解电大尺寸等复杂的电磁问题。FEKO 也是首款将多层快速多极子方法 (MLFMM) 成功商用的软件，在国内已经拥有众多用户。

最早对 FEKO 的了解是基于其原理上的独特性，即将高频方法与矩量法结合实现计算时间和计算精度的有效提升，以及内存的节省。该方法特别适合于整体偏向平滑而局部比较复杂的结构。之后，该软件逐渐演进为一款功能强大的电磁仿真软件，适用于解决各种电大复杂的电磁问题。

2014 年，Altair 与东南大学毫米波国家重点实验室联合成立了 FEKO 培训中心。在两年多的合作中，FEKO 工程师认真细致的工作态度和严谨执着的专业精神令我们印象深刻。本书作者刘源博士具备深厚的电磁领域背景，焦金龙、王晨和王晓峰等也都拥有超过 10 年的电磁领域应用经验，他们平时的大量时间都与 FEKO 用户一起，协助解决各类应用场景的实际问题，本书凝聚了他们多年的工程经验和软件使用心得，对于具备一定电磁基础知识的 FEKO 初学者和相关领域有应用需求的工程人员将有很大帮助。

希望通过此书的出版，能帮助国内电磁领域的专业人士更加高效地掌握 FEKO 软件工具的特点和优势，快速解决实际问题，在实现高效工作的同时，将更多精力用于科研创新，提升我国电磁行业的整体水平。



洪伟教授

教育部长江学者计划特聘教授、IEEE Fellow、CIE Fellow
东南大学信息科学与工程学院院长、毫米波国家重点实验室主任

前 言

FEKO 进入中国市场已经整整 15 个年头，从最初的 1.0 版本发展到今天，Altair 中国 FEKO 技术团队的很多成员经历了与 FEKO 的共同成长，见证了软件的发展历程，在为客户服务的过程中，积累了大量的软件技巧和工程经验。目前，市场上关于 FEKO 的中文书籍很少，只能通过一些有限的渠道进行学习和交流。因此，我们深感同广大电磁仿真领域从业人员及 FEKO 使用者分享技术和经验的重要性。

2015 年，FEKO 加入 Altair HyperWorks 产品体系。2016 年 3 月，随着 HyperWorks 14.0 正式发布，FEKO 版本号也从 7.0 升级为 14.0。FEKO 14.0 包含了众多新功能和求解器性能的改进，为广大用户带来全新的应用体验。本书是“FEKO 基础与实战系列丛书”的第 1 本——FEKO 基础篇。本书基于 FEKO 14.0（书中大部分应用案例和仿真流程同样支持 FEKO 7.0，网盘所包含的例子和视频基于 FEKO 7.0 和 FEKO 14.0 两个版本），详细介绍了前处理模块 CADFEKO、后处理模块 POSTFEKO 和脚本编辑模块 EDITFEKO 的使用技巧以及求解方法选择的经验总结，并给出了非常全面的应用实例及仿真实现流程。

全书包括两大部分共 10 章。第 1 部分主要为电磁场理论、行业工程问题及 FEKO 软件介绍等基础内容，包括 4 章：第 1 章概述电磁场基础以及雷达工程相关问题；第 2 章结合具体工程应用详细介绍 FEKO 所使用的电磁计算方法，以加深读者对算法选择的理解；第 3 章对 CADFEKO、POSTFEKO 和 EDITFEKO 三大模块的软件界面、菜单、图标按钮等进行详细说明，便于读者快速查阅和掌握；第 4 章针对天线设计师所关心的端口选择和激励设置等问题给出选择原则，并做总结说明。对于系统设计师所关心的等效源技术与数据格式、网格剖分原则以及计算方法如何选择等，在第 4 章也进行了总结。同时，为方便利用 FEKO 进行二次开发，本书介绍了 LUA 脚本的语法基础，并附大量 LUA 脚本实例供读者学习参考。

第 2 部分主要介绍行业应用和丰富的 FEKO 工程应用案例，包括 6 章：第 5 章介绍工程上几类常用天线的仿真实现，与第 4 章的天线端口设置和激励相对应；第 6 章详细介绍 FSS 设计、雷达天线罩透波和瞄准误差（BSE）的仿真实现，提供了完整的 LUA 脚本和 MATLAB 脚本得到的瞄准误差曲线；第 7 章为载体天线布局的仿真应用；第 8 章介绍关于复杂线缆束的快速建模以及线缆辐射/抗干扰的仿真流程；第 9 章为各类目标体的雷达散射截面（RCS）仿真应用实例；第 10 章为一些特色应用，包括非辐射网络、等效馈电网络与天线一体化仿真、降低计算复杂度、常用优化方法以及如何通过优化得到天线的最佳电性能、特征模分析方法在天线设计中的应用、机箱屏蔽和生物电磁等。

本书内容主要由刘源、焦金龙、王晓峰、王晨编写，参与编写的还有陶津平、李岳春、甘海和马小康。此外，Altair 市场部的王蔓女士负责与出版社的沟通，并对该书的框架提出了宝贵建议，Altair 电磁技术团队的其他成员曾庆豪、王琪、实习生杨晨晨参与了本书的校稿，在此深表感谢！

由于编者水平有限，虽然已经多次校对，但书中错误和不足之处在所难免，敬请专家和广大读者不吝指正。

目 录

序一
序二
前言

第 1 章 电磁场基础与雷达工程问题概述..... 1

| | | | | | |
|-------|---------------|----|-------|---------------|----|
| 1.1 | 无线电波..... | 2 | 1.3.5 | 电波传播..... | 15 |
| 1.2 | 雷达..... | 3 | 1.4 | 电磁理论基础..... | 16 |
| 1.3 | 主要的电磁场问题..... | 6 | 1.4.1 | 麦克斯韦方程组..... | 16 |
| 1.3.1 | 天线..... | 6 | 1.4.2 | 介质本构关系..... | 17 |
| 1.3.2 | 雷达目标隐身..... | 9 | 1.4.3 | 求解域的边界条件..... | 17 |
| 1.3.3 | 天线罩..... | 10 | 1.4.4 | 阻抗边界条件..... | 18 |
| 1.3.4 | 电磁兼容..... | 14 | | | |

第 2 章 电磁场数值计算方法..... 19

| | | | | | |
|-------|---|----|-------|--------------------------|----|
| 2.1 | 矩量法 (Method of Moments) 的 原理与实现..... | 20 | 2.4 | 时域有限差分 (FDTD)..... | 32 |
| 2.1.1 | 矩量法的原理与实现..... | 20 | 2.5 | 高频近似方法..... | 34 |
| 2.1.2 | 典型应用..... | 25 | 2.6 | 主要的混合方法..... | 35 |
| 2.2 | 多层快速多极子 (MLFMM) 的 原理与实现..... | 26 | 2.6.1 | 矩量法与有限元混合原理..... | 35 |
| 2.2.1 | 多层快速多极子的原理与实现..... | 26 | 2.6.2 | 多层快速多极子与有限元混合 技术..... | 36 |
| 2.2.2 | 典型应用..... | 30 | 2.6.3 | 矩量法与高频混合技术..... | 37 |
| 2.3 | 有限元 (FEM) 的原理..... | 31 | 2.6.4 | 多层快速多极子与高频混合技术..... | 37 |

第 3 章 FEKO 基础..... 39

| | | | | | |
|-------|-----------------------------|----|-------|--------------------------|----|
| 3.1 | FEKO 工作环境介绍..... | 40 | 3.1.3 | 关于命令行提交方式和批处理 说明..... | 45 |
| 3.1.1 | FEKO 主要模块组成..... | 40 | 3.1.4 | 命名规则说明..... | 46 |
| 3.1.2 | FEKO 文件组成与各模型之间的 关系..... | 40 | 3.2 | 前处理模块——CADFEKO..... | 46 |

| | | | | | |
|------------|--------------------------|-----------|------------|-------------------------------|-----------|
| 3.2.1 | 菜单栏与工具按钮 | 48 | 3.4.1 | 脚本编辑区域 | 70 |
| 3.2.2 | 模型与求解树形管理器 | 58 | 3.4.2 | 命令函数控制面板 | 71 |
| 3.2.3 | 3D 模型视图窗口 | 60 | 3.4.3 | 常用命令函数的说明与应用 | 71 |
| 3.2.4 | 信息管理窗口 | 61 | 3.5 | 相对工作平面 (Workplane) 的应用 | 75 |
| 3.2.5 | 快捷工具条 | 61 | 3.5.1 | 何时用到 Workplane | 75 |
| 3.2.6 | 主要的快捷键 | 62 | 3.5.2 | 定义 Workplane | 77 |
| 3.3 | 后处理模块——POSTFEKO | 62 | 3.5.3 | 基于 Workplane 建模 | 79 |
| 3.3.1 | 菜单与工具按钮集 | 63 | 3.6 | 建立 FEKO 工程的仿真过程 | 87 |
| 3.3.2 | 工程与树形管理器 | 67 | 3.6.1 | 主要功能与仿真流程 | 87 |
| 3.3.3 | 3D/2D 结果视图显示 | 67 | 3.6.2 | 建立 FEKO 工程的一般过程 | 88 |
| 3.3.4 | 计算参数设置面板 | 68 | | | |
| 3.4 | 命令流脚本编辑器 EDITFEKO | 69 | | | |

第 4 章 FEKO 软件的使用技巧与方法选择89

| | | | | | |
|------------|-----------------|-----------|------------|---------------------|------------|
| 4.1 | 天线的端口与激励 | 90 | 4.3 | FEKO 的方法选择技巧 | 100 |
| 4.1.1 | 线端口与电压源激励 | 90 | 4.4 | 主要的求解参数设置 | 107 |
| 4.1.2 | 棱边端口与电压源激励 | 91 | 4.4.1 | 近场设置 | 107 |
| 4.1.3 | 波导端口与波导激励 | 91 | 4.4.2 | 远场设置 | 109 |
| 4.1.4 | 有限元模式端口与激励 | 92 | 4.4.3 | S 参数求解设置 | 111 |
| 4.1.5 | 微带线端口与激励 | 92 | 4.5 | LUA 脚本基础与应用 | 112 |
| 4.1.6 | 远、近场等效技术 | 93 | 4.5.1 | LUA 脚本基础 | 112 |
| 4.2 | 网格剖分技术 | 97 | 4.5.2 | FEKO 的 LUA 脚本功能 | 126 |

第 5 章 工程仿真案例 1——常用工程天线 136

| | | | | | |
|------------|-------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|
| 5.1 | 半波振子天线 | 137 | 5.5.1 | 全模型仿真实现 | 187 |
| 5.1.1 | 振子天线设计背景与原理 | 137 | 5.5.2 | 等效技术的实现 | 201 |
| 5.1.2 | 半波振子天线的仿真实现 | 137 | 5.6 | 微带天线 | 217 |
| 5.2 | 矩形波导天线 | 149 | 5.6.1 | 矩量法 (MoM) 的实现 | 218 |
| 5.3 | 低频线圈天线 | 161 | 5.6.2 | 时域有限差分 (FDTD) 的实现 | 227 |
| 5.4 | 圆波导圆极化天线 | 172 | 5.7 | 介质谐振天线 (DRA) | 229 |
| 5.4.1 | TE ₁₁ 模圆极化仿真 | 173 | 5.7.1 | 矩量法 (MoM) 的实现 | 229 |
| 5.4.2 | 高次模圆极化的实现 | 183 | 5.7.2 | 矩量法/有限元 (MoM/FEM) 混合法的实现 | 241 |
| 5.5 | 偏馈反射面天线 | 185 | | | |

| | | |
|------------|-----------------------------|-----|
| 5.8 | 波导缝隙天线 | 249 |
| 5.8.1 | 波导缝隙天线的设计背景 | 249 |
| 5.8.2 | 基于多层快速多极子 (MLFMM) 的实现 | 250 |
| 5.9 | 相控阵天线 | 261 |
| 5.9.1 | 相控阵天线的设计原理 | 261 |

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 5.9.2 | EDITFEKO 脚本控制的仿真实现 | 262 |
|-------|--------------------------|-----|

| | | |
|-------------|----------------------------------|-----|
| 5.10 | 汽车车窗天线 (Windscreen) | 272 |
| 5.10.1 | 车窗天线仿真技术 | 272 |
| 5.10.2 | 车窗天线布局的仿真实现 | 272 |

第 6 章 工程仿真案例 2——天线罩设计与仿真

| | | |
|------------|-----------------------|-----|
| 6.1 | 天线罩快速设计 | 280 |
| 6.1.1 | 格林函数法 (SGF) | 280 |
| 6.1.2 | 周期边界法 (PBC) | 287 |
| 6.2 | 天线罩透波分析 | 298 |
| 6.2.1 | 天线罩仿真流程与求解器选择技巧 | 298 |

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| 6.2.2 | FEKO 软件的仿真实现 | 299 |
|-------|--------------------|-----|

| | | |
|------------|-------------------------------|-----|
| 6.3 | 天线罩瞄准误差 (BSE) 仿真 | 311 |
| 6.3.1 | FEKO 软件的仿真实现 | 312 |
| 6.3.2 | 与 MATLAB 联合实现 | 319 |

第 7 章 工程仿真案例 3——载体平台天线布局

| | | |
|------------|-------------------------------------|-----|
| 7.1 | FEKO 的 GridSearch 扫参技术 | 322 |
| 7.2 | 锥台结构平台上的多天线隔离度 | 330 |

| | | |
|------------|------------------------|-----|
| 7.3 | 直升机天线布局仿真 | 343 |
| 7.4 | 车内天线布局 | 358 |

第 8 章 工程仿真案例 4——复杂线缆束 EMC

| | | |
|------------|--------------------------------------|-----|
| 8.1 | 复杂线缆束 EMC 分析流程 | 372 |
| 8.2 | 复杂线缆束 EMC 仿真在 FEKO 中的实现 | 372 |

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 8.2.1 | 线缆类型与快速建模 | 372 |
| 8.2.2 | 天线与屏蔽线缆束的场线耦合 | 376 |
| 8.2.3 | 线缆束的辐射与抗干扰仿真 | 385 |

第 9 章 工程仿真案例 5——电磁散射

| | | |
|------------|------------------------------|-----|
| 9.1 | 电磁散射单站与双站 RCS | 405 |
| 9.2 | FEKO 典型目标体的仿真应用 | 408 |

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 9.2.1 | 金属球锥体的单站 RCS 计算 | 408 |
| 9.2.2 | 介质金属混合体的单站 RCS | 428 |

第 10 章 其他工程仿真案例 445

10.1 非辐射网络应用 446

10.1.1 S 参数非辐射网络 446

10.1.2 传输线网络的级联 464

10.1.3 天线匹配网络与天线的一体化
仿真 467

10.2 天线优化设计 470

10.2.1 常用的优化技术 470

10.2.2 FEKO 软件的仿真实现 470

10.3 天线特征模分析 (CMA) 478

10.3.1 CMA 理论背景 478

10.3.2 FEKO 天线特征模分析的仿真
实现 479

10.4 机箱屏蔽效能 492

10.4.1 问题描述 492

10.4.2 FEKO 中的仿真实现 493

10.5 生物电磁 503

第 1 章



电磁场基础与雷达工程

问题概述

- 1.1 无线电波
- 1.2 雷达
- 1.3 主要的电磁场问题
- 1.4 电磁理论基础

1.1 无线电波

无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的射频频段的电磁波。无线电波的波长越短，相同时间内传输的信息就越多。

无线电波是一种电磁波，以 TEM 波（横电磁波）的形式传播。电磁波包含很多种类，按照频率从低到高的顺序排列为：无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线及 γ 射线。无线电波分布在 3Hz~3000GHz 的频率范围之内。在这个频谱内可以细划为 12 个波段，具体见表 1-1。

表 1-1 无线电波的划分

| 波段 | | 频率范围 | 波长范围 |
|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| 极长波（ELF，极低频） | | 3~30 Hz | $10^5 \sim 10^4$ km |
| 超长波（SLF，超低频） | | 30~300 Hz | $10^4 \sim 10^3$ km |
| 特长波（ULF，特低频） | | 300~3000 Hz | 1000~100 km |
| 甚长波（VLF，甚低频） | | 3~30 kHz | 100~10 km |
| 长波（LF，低频） | | 30~300 kHz | 10~1 km |
| 中波（MF，中频） | | 300~3000 kHz | 1000~100 m |
| 短波（HF，高频） | | 3~30 MHz | 100~10 m |
| 超短波（VHF，甚高频） | | 30~300 MHz | 10~1 m |
| 微波 | 分米波（UHF，特高频） | 300~3000 MHz | 10~1 dm |
| | 厘米波（SHF，超高频） | 3~30 GHz | 10~1 cm |
| | 毫米波（EHF，极高频） | 30~300 GHz | 10~1 mm |
| | 亚毫米波（THF） | 300~3000GHz | 1~0.1mm |

射频与微波

射频（Radio Frequency, RF）表示可以辐射到空间的电磁频率，频率范围为 300kHz~300GHz，它是一种高频交流变化电磁波的简称，人们在日常生活中所接触的手机与基站以及射频识别（RFID）等应用均属于射频领域的问题。

微波是指频率范围为 300MHz~300GHz 的电磁波，又是射频的较高频段，是无线电波中一个有限频带的简称，即波长在 0.1mm~1m 之间的电磁波，是分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波的统称。微波频段的具体划分见表 1-2。

表 1-2 微波频段的划分

| 波段代码 | 标称波长/cm | 频率/GHz | 波长范围/cm |
|------|---------|--------|----------|
| L | 22 | 1~2 | 15~30 |
| S | 10 | 2~4 | 7.5~15 |
| C | 5 | 4~8 | 3.75~7.5 |
| X | 3 | 8~12 | 2.5~3.75 |

(续)

| 波段代码 | 标称波长/cm | 频率/GHz | 波长范围/cm |
|------|---------|--------|-----------|
| Ku | 2 | 12~18 | 1.67~2.5 |
| K | 1.25 | 18~27 | 1.11~1.67 |
| Ka | 0.8 | 27~40 | 0.75~1.11 |
| U | 0.6 | 40~60 | 0.5~0.75 |
| V | 0.4 | 60~80 | 0.375~0.5 |
| W | 0.3 | 80~100 | 0.3~0.375 |

1.2 雷达

雷达是集中了现代电子科学技术各种成就的高科技系统，现在已经广泛应用于地面（含车载）、舰载、机载和弹载方面，执行着各种军事任务和民用任务。近年来，雷达应用已经向外层空间发展，出现了面向卫星载、航天飞机载、宇宙飞船载等应用的空间基雷达，建立比地面预警雷达、机载预警雷达和超视距预警雷达更优越的星载预警监视雷达。同时，雷达也在向空间相反方向发展，出现了各种探地雷达，它已经应用于探雷、资源勘探、地下构造“窥探”、地下危险物品侦察以及探月等方面。另外，在民用各部门，如气象与天文、遥感遥测、船只导航、直升机、汽车防撞、交通管制等领域，雷达的应用也越来越广泛。典型雷达应用场景如图 1-1 所示。



图 1-1 典型雷达应用场景

雷达 (Radar) 是“Radio Detection and Ranging”缩写的音译，是一种通过发射电磁波和接收目标回波，对目标进行探测和测定目标信息（距离、距离变化率或径向速度、方位、高度等）的设备，其工作原理与功能框图如图 1-2 和图 1-3 所示。

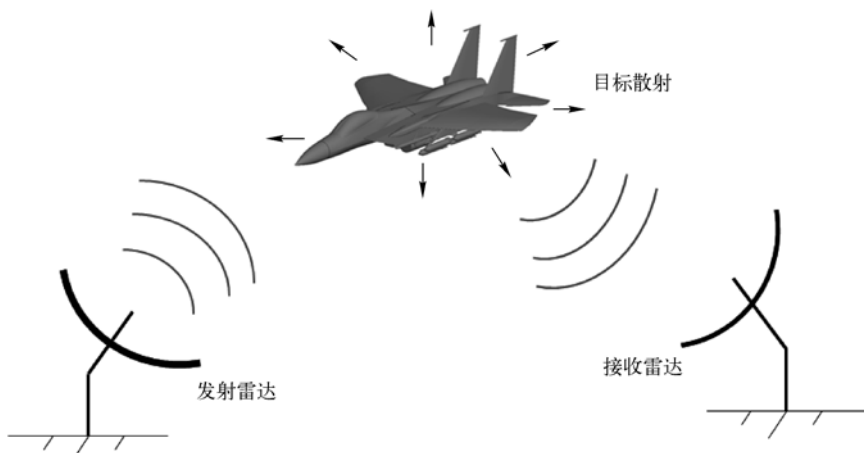


图 1-2 雷达工作原理示意图

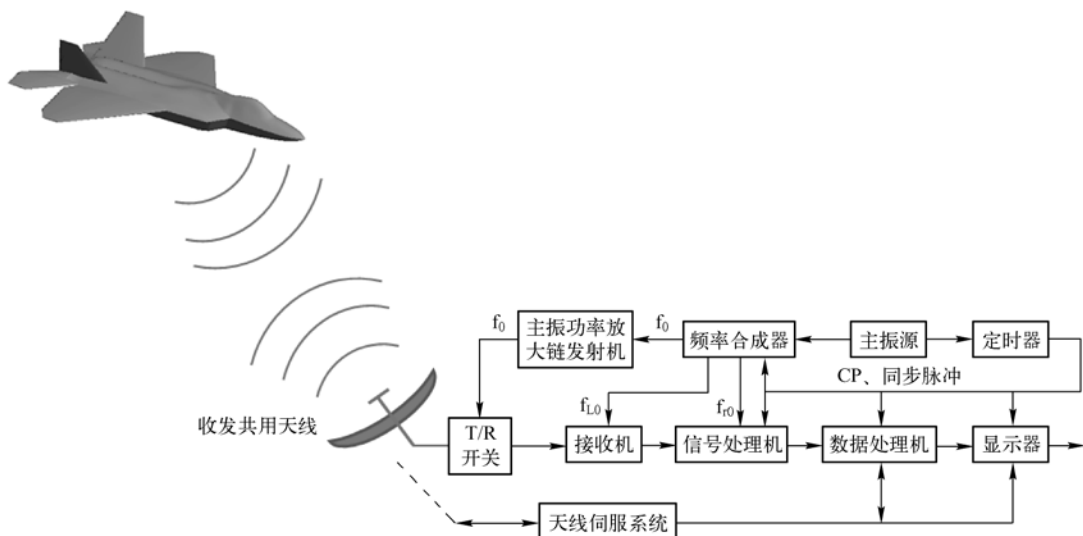


图 1-3 雷达功能框图

雷达主要战术参数和定义介绍如下：

1) 探测空域。指雷达能够以一定的检测概率和虚警概率、一定的目标起伏模型和一定的目标雷达截面积探测到目标的空间。它是由雷达最大探测距离、最小探测距离、方位扫描角、俯仰扫描角所构成的空间。

2) 目标参数测量。目标参数包括目标距离、方位角、俯仰角（或高度）、速度、批次、机型和敌我识别等，精确地测量目标的空间坐标是雷达的主要任务。

3) 分辨力。雷达分辨力是指雷达能分辨空间两个靠近目标的能力。

① 距离分辨力。指在同一个方位上，能够区分两个在距离上比较靠近目标 T1 和 T2 的最小距离 ΔR ， $\Delta R = \frac{1}{2}c\tau$ ，其中 τ 为雷达发射脉冲宽度。示意图如图 1-4a 所示。

② 方位/俯仰角分辨力。指在同一距离上，能够区分两个在方位/俯仰上比较靠近目标 T1 和 T2 的最小角度 $\Delta\theta$ ， $\Delta\theta$ 是雷达天线半功率点波束角。示意图如图 1-4b 所示。

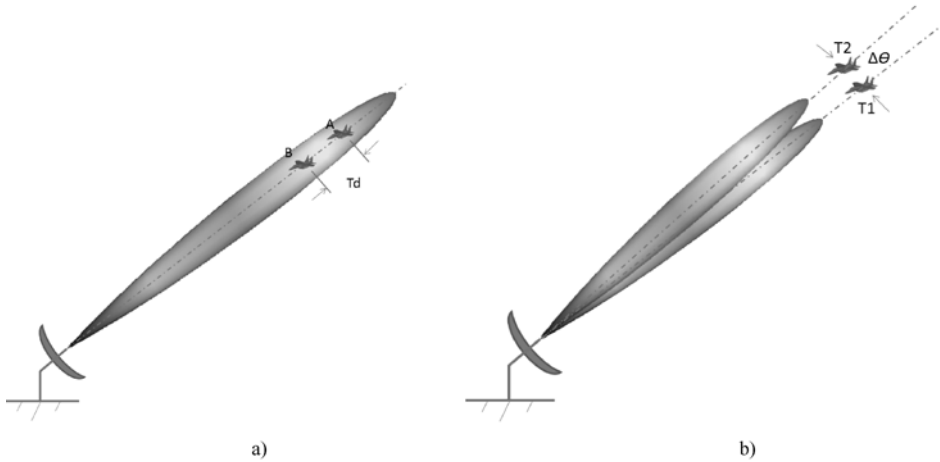


图 1-4 分辨力

a) 距离分辨力示意图 b) 方位/俯仰角分辨力示意图

注： $\Delta\theta_{\text{方位}} = \theta_{\text{方位} 0.5}$ ， $\Delta\theta_{\text{俯仰}} = \theta_{\text{俯仰} 0.5}$

4) 雷达抗干扰能力。指雷达在电子战环境中采取各种对抗措施后，雷达生存或自卫距离改善的能力。

雷达的主要技术参数和定义介绍如下：

- 1) 雷达工作频率—— f_0 。
- 2) 雷达发射脉冲功率—— P_t 。
- 3) 脉冲信号参数。雷达不模糊的最大测量距离是 $R_{\max} = 0.5c(0.8T_r)$ ，其中 c 是光速， T_r 是发射脉冲的重复周期。
- 4) 雷达天线参数。天线形式包括线天线、面天线、平板裂缝天线、阵列天线等。
 - ① 反射面/阵面尺寸。
 - ② 主波束增益 G 。
 - ③ 第一副瓣电平和平均副瓣电平。
 - ④ 天线波束形状、主波束宽度 $\theta_{\text{方位} 0.5}$ 和 $\theta_{\text{俯仰} 0.5}$ 等。
- 5) 接收机灵敏度。指雷达以一定的检测概率和虚警概率所能探测到目标的最小回波信号功率，即 $P_{\min} = kT_0B_nF_n(S/N_0)_{\min}$ 。式中， k 是玻耳兹曼常数； T_0 为等效噪声温度； B_n 为等效噪声带宽； F_n 为噪声系数； $(S/N_0)_{\min}$ 为能够探测到目标的最小信噪比。
- 6) 雷达抗干扰技术等。

雷达距离方程，对于单基地雷达收发共用天线 $P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ 。式中， P_t 为发射机发射功率； G 为收发天线增益； λ 为雷达工作波长； σ 为目标雷达散射截面； R 为雷达与目标间距。

根据接收机信号检测理论：

当 $P_r > S_{\text{imin}}$ 时，雷达才能可靠地检测到目标。

当 $P_r = S_{\text{imin}}$ 时，雷达发现目标的最大探测距离 R_{max} 。

当 $P_r < S_{\text{imin}}$ 时，雷达不能检测到目标。

所以 $P_r = S_{\text{imin}} \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{\text{max}}^4}$ ，其中 $R_{\text{max}}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\text{imin}}}$ 。

用信噪比表示雷达方程：

因为 $S_{\text{imin}} = kT_0 B_n F_0 \left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{\text{min}} = kT_0 B_n F_0 M$ 。

所以 $R_{\text{max}}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\text{imin}} kT_0 B_n F_0 M}$ 。

由方程可以得出：最大探测距离 R_{max} 与发射机输出脉冲功率的四次方根成正比，与接收机灵敏度 (S_{imin}) 的四次方根成反比，与天线增益或有效接收面积的平方根成正比，与目标雷达散射截面积的四次方根成正比，与接收机的噪声系数以及显示器的识别系数的四次方根成反比。

不难想象，与雷达相关的应用包含了天线与天线罩、雷达的隐身/反隐身、电波传播等。

1.3 主要的电磁场问题

1.3.1 天线^[1]

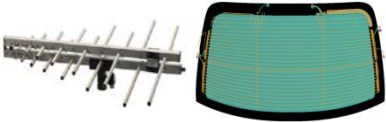
天线在无线电设备中的主要功能有两个：能量转换和定向辐射（或接收）。

能量转换功能是指行波与自由空间波之间的转换，发射天线是将馈线引导的电磁波（高频电流）转换为向空间辐射的电磁波传向远方，接收天线是将空间的电磁波（高频电流）转换为馈线引导的电磁波送给接收机。

定向作用是指天线辐射或接收电磁波具有一定的方向性，根据无线电系统设备的要求，发射天线可把电磁波能量集中在一定的方向上辐射出去，接收天线可只接收特定方向传来的电磁波。

天线的种类非常多，对其进行分类是十分困难的。不同的分类方法会有不同的结果，如果按照天线辐射方式分类，考虑天线结构、工作频段和应用等因素，可以把天线分为以下几种类型，具体见表 1-3。

表 1-3 天线分类

| 天线类型 | 天线名称 | 天线形式 |
|------|---|--|
| 线天线 | 单极子天线及其变形、偶极子天线及其变形、环天线、缝隙天线、双锥天线、鞭状天线、螺旋天线、对数周期天线、风窗天线、八木天线、菱形天线、加载天线等 |  |