

高新技术专著系列

Special Beam Antenna Technique

特殊波束 面天线技术

杨可忠 著

- 重大工程应用 —— “嫦娥一号” 奔月工程
- 天线领域最新研究成果，权威专家倾力力作
- 理论与实践结合，技术成果极具推广价值



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高新技术专著系列

Special Beam Antenna
Technique

特殊波束 面天线技术

杨可忠 著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

特殊波束面天线技术 / 杨可忠著. —北京: 人民邮电出版社, 2009.1

ISBN 978-7-115-17782-7

I. 特… II. 杨… III. 多波束天线 IV. TN822

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第030835号

内 容 提 要

本书是一本有关特殊波束面天线技术理论研究和工程设计的专著, 主要内容包括多波束抛物环面天线、双偏置球面天线、相位校正反射面天线、椭圆波束天线、波束波导型深空探测天线、差模的应用技术和多频共用天线技术, 所涉及的内容都是作者近十几年来在面天线技术领域研究成果的总结, 大部分成果均有工程实践支持。

本书各章自成体系, 既有深入的理论分析, 又有可供设计使用的公式和图表。

本书可供从事天线、馈源研究和设计的技术人员及高等院校相关专业的教师、研究生和本科生阅读参考。

特殊波束面天线技术

-
- ◆ 著 杨可忠
责任编辑 梁 凝
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 13 彩插: 1
字数: 244 千字 2009 年 1 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2009 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17782-7/TN

定价: 58.00 元

读者服务热线: (010)67120142 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

随着通信、雷达、导航、遥控、遥测和遥感技术的迅速发展，面天线技术也取得了明显的进步，特别是在波束宽角扫描天线、多波束天线、高效率椭圆波束天线、波束波导馈电的大型反射面天线领域，涌现了许多新技术和新方法。另外，随着多频共用天线和馈源模式的综合利用，近年来也有众多新颖的技术成果面世。

本书以分析关键技术为出发点，详细讨论和研究了上述各技术领域新技术和新方法的基本原理，基本技术因素以及所涉及的物理和几何参数的综合优化过程，同时也介绍了这些新技术和新方法与传统的技术和方法相比所产生的效益。书中对理论分析和数学处理给予特别关注，以求技术和方法形成的完整性和严密性。本书的目的是通过分析和归纳，向进行天线理论研究和工程设计的志士同仁提供可用的参考信息，促进面天线技术的发展和进步。

本书共分7章，第1章详细讨论了多波束抛物环面天线的物理及几何参数的相互关系以及这些参数对辐射特性的影响；给出了确定抛物环面生成角 α 的两种方法——“三卫星法”和“最小二乘法”，并对两种方法进行了比较；针对抛物环面天线口径波长比大于一定值时波束增益严重下降这一亟待解决的问题提出了3项口面校相技术，特别就附加相位校正副面的多波束抛物环面天线提出了副面赋形的5个约束条件，即等光程条件、低交叉极化条件、几何绕射约束条件、方位面跟踪相邻副面互不碰撞条件、扩大每个波束对抛物环面利用面积的条件，从而全面综合地解决了电气和结构上的多项关键技术。

第2章从分析球面天线的散焦特性入手，研究了不同半径口径比对球面天线的电性能影响，进而提出了双偏置球面天线的设计方法。本章利用射线描迹法所导出的双偏置球面天线的辐射场计算公式，不但适用于球面天线，也适用其他类型的双偏置天线。

宽角扫描或宽角度多波束天线是目前天线领域受到极大关注的问题，第3章介绍了介质校相宽角扫描天线的两种赋形方法，即简单的三点赋形法和改进的三点赋形法，详细地讨论了赋形机理和工程近似处理。

针对切割抛物面形成椭圆波束存在的低效率问题，第4章提出了变焦距高效率椭圆波束天线的新概念，通过变焦距结构，将馈源辐射的旋转对称波束转换为椭圆波束的次级方向图，避免了两个主平面E面和H面照射电平不相等的弊端，从而实现了高效率椭圆波束性能。本章以格里高利型双偏置椭圆波束天线和环焦型椭圆波束天线为例，详细地分析了主、副反射面的赋形机理、赋形方法及其约束条件，给出了完整的设计程序。

第5章以波束波导馈电的深空探测天线为例，详细地分析了波束波导系统馈电的大型天线系统的设计方法，提出了以几何光学设计为向导，以高斯模分析方法为基础的综合分析与设计方法。本章的内容侧重在波束波导的分析上，这是因为它是这类天线系统的核心。分析波束波导系统方便的方法是高斯模法，因此本章深入地讨论和研究了高斯模的模式分类、3种主要模式的物理特征、高斯模在波束波导中的传输以及反射镜系统中高斯模参数的确定等问题。

模式应用是馈源的主要问题，除了人们所熟悉的模式应用外，近几年涌现出许多模式应用的新技术。第6章重点介绍了差模在天线应用中的一些新技术，主要包括利用多模（主模和差模）馈源实现角分集的新技术、利用圆波导的差模 TE_{21} 模或波纹喇叭中的 HE_{21} 模改善偏置抛物面交叉极化特性的新技术。模式是一种资源，模式的应用技术将会有更多的新成果出现。

多频共用天线技术是近期天线技术领域中最受关注的问题之一，这是因为多频共用一个天线将大大提高天线的效用和降低天线的成本。本书第7章对多频共用天线技术进行了初步的分类研讨，提出了一些约束条件，重点放

在多频共用馈源技术上。

本书各章自成体系，注意理论的系统性，同时对实际工程设计和应用也给予极大关注。书中提供了许多设计方法和计算公式，对实际工程设计是十分有用的。

本书是作者十几年来从事天线理论研究、工程设计、指导研究生论文研究的成果的总结，同时也参考了国内外文献，书中多数内容都具有新颖性。

限于作者水平，书中难免存在一些缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

杨可忠

目 录

第 1 章 多波束抛物环面天线

1.1	概述	2
1.2	抛物环面天线的机理	4
1.2.1	抛物环面天线的形成及其特点	4
1.2.2	抛物环面天线的几何特征	5
1.2.3	抛物环面天线的波束方向扫描轨迹	9
1.3	α 角的确定	10
1.3.1	卫星相对于地球站的方位角和俯仰角	10
1.3.2	“三卫星”法求解 α 角	12
1.3.3	最小二乘法求解 α 角	13
1.3.4	“三卫星”法与最小二乘法的比较	17
1.4	物理光学法计算抛物环面天线的辐射特性	19
1.4.1	抛物环面天线镜面反射波的传播方向	19
1.4.2	抛物环面天线的口面相差	20
1.4.3	馈源辐射场	20
1.4.4	抛物环面天线的镜面反射场	21
1.4.5	抛物环面天线的辐射场	22
1.4.6	各种参数对天线增益的影响	23
1.4.7	抛物环面天线的旁瓣特性和效率	26
1.4.8	交叉极化特性	28
1.5	多波束抛物环面天线的边界角、馈源位置及波束间隔	30
1.5.1	边界角的确定	30
1.5.2	馈源位置的确定	31

1.5.3	最大和最小波束间隔	32
1.6	多波束抛物环面天线的轴系关系	33
1.6.1	多波束生成轴 $\hat{e}_z$ 与地球极轴 e_z 的关系	33
1.6.2	多波束抛物环面天线生成轴 $\hat{e}_z$ 与地球站当地垂直轴的关系	33
1.6.3	多波束抛物环面天线的倾斜角	34
1.7	反射面的复用率	34
1.8	抛物环面天线的口面相位的校正技术	36
1.8.1	利用相位校正副面校正抛物环面天线的口面相差	36
1.8.2	用透镜喇叭馈源校正口面相差	39
1.9	抛物环面天线俯仰面跟踪时的增益损失	40
	参考文献	42

第2章
双偏置球面天线

2.1	概述	45
2.2	球面天线的基本特征	45
2.2.1	球面天线的几何特征	45
2.2.2	球面天线的散焦特性	46
2.2.3	球面天线馈源位置的选择	48
2.2.4	球面天线的多波束特性	49
2.3	双偏置球面天线	50
2.3.1	几何关系	50
2.3.2	副反射面赋形方程	51
2.3.3	主反射面在 xoy 平面的投影	52
2.3.4	副反射面在 xoy 平面的投影	53
2.3.5	双偏置球面天线的辐射场	54
2.3.6	双偏置球面天线的设计	62
2.3.7	多波束双偏置球面天线	64
	参考文献	64

第3章
相位校正反射面天线双偏置球面天线

3.1	概述	67
-----	----	----

3.2 三点法设计介质校相反射面技术	67
3.2.1 介质表面方程	68
3.2.2 口面场	69
3.3 改进的三点设计法	72
3.3.1 介质表面方程	72
3.3.2 改进的三点设计法与普通三点设计法的比较	74
3.4 最佳设计方法	77
参考文献	79

第4章

椭圆波束天线

4.1 概述	81
4.2 格里高利型双偏置椭圆波束天线	82
4.2.1 对称平面的几何参数的确定	83
4.2.2 主反射面口面方程	83
4.2.3 副反射面	84
4.2.4 Δz 的求解	86
4.3 环焦型椭圆波束天线	89
4.3.1 环焦型椭圆波束天线的约束条件	90
4.3.2 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 两平面内的主副面参数	91
4.3.3 过渡函数	93
4.3.4 φ 平面的副面参数	93
4.3.5 主面参数的确定	94
4.3.6 环焦型椭圆波束的射线关系	96
参考文献	97

第5章

波束波导型深空探测天线

5.1 概述	99
5.1.1 波束波导型深空探测天线简介	99
5.1.2 波束波导特点	100
5.2 波束波导系统的分析	100
5.2.1 波束波导系统的类型	100

5.2.2	对称型波束波导系统的对称转换条件	101
5.3	天线及馈源的技术分析	102
5.3.1	主、副反射镜几何及物理参数的确定	102
5.3.2	卡塞格伦天线的赋形	104
5.3.3	副反射面降低噪声的技术措施	106
5.4	抛物面/抛物面型波束波导系统的分析	111
5.4.1	基本参数	111
5.4.2	参数选择	112
5.4.3	抛物面/抛物面型波束波导系统的优点	113
5.4.4	平板反射镜	113
5.5	双凹形椭球面/双曲面型波束波导系统	114
5.5.1	几何关系	115
5.5.2	主要几何尺寸的确定	117
5.5.3	双凹形椭球面/双曲面型波束波导系统的优缺点	119
5.6	凸凹形双曲面/椭球面型波束波导系统	119
5.7	物理光学计算镜面辐射场	120
5.7.1	几何关系	122
5.7.2	表面积分的近似处理	123
5.8	高斯模理论分析波束波导	126
5.8.1	高斯模的电磁场表达式	126
5.8.2	高斯模的正交性	128
5.8.3	几种常用高斯模	129
5.8.4	常用模的单位矢量表示式	131
5.8.5	用高斯模表示馈源喇叭的场	133
5.8.6	用高斯模分析曲面反射镜的反射	136
5.8.7	关于截获效率	143
5.8.8	反射镜高斯模参数的求解	148
	参考文献	158

第6章 差模的应用技术

6.1	概述	161
6.2	利用多模馈源实现角分集的天线	161

6.2.1	角分集的差模	162
6.2.2	方喇叭差模分集技术	164
6.2.3	利用圆喇叭的 TM_{01} 模进行分集	169
6.2.4	角分集特性的粗略估算	171
6.3	利用同轴波导的 TEM 模进行单脉冲自跟踪	173
6.3.1	用于单脉冲跟踪的机理	173
6.3.2	和差信号的分离	174
6.4	利用圆波导的 TE_{21} 模或波纹喇叭 HE_{21} 模改善偏置抛物面的交叉极化特性	175
6.4.1	偏置抛物面焦平面内的场	175
6.4.2	TE_{21} 模或 HE_{21} 模用来降低偏置抛物面交叉极化的原理	175
6.4.3	TE_{21} 模的激励方法	178
	参考文献	179

第 7 章

多频共用天线技术

7.1	概述	182
7.2	扼流槽型圆波导双频共用馈源	182
7.2.1	基本原理	182
7.2.2	主要技术因素	182
7.3	低频段为扼流槽式、高频段为多模式的双频共用馈源	183
7.3.1	基本原理	183
7.3.2	主要技术因素	183
7.4	双频共用同轴型馈源	185
7.4.1	基本原理	185
7.4.2	主要技术因素	185
7.5	中心加载介质棒的喇叭	186
7.5.1	基本原理	186
7.5.2	主要技术因素	186
7.6	双槽深波纹喇叭	187
7.6.1	基本原理	187
7.6.2	主要技术因素	188
7.7	环加载波纹馈源	189

- 7.7.1 基本原理 189
 - 7.7.2 主要技术因素 190
- 7.8 拼阵型多频共用天线..... 191
 - 7.8.1 单元拼阵的技术因素 192
 - 7.8.2 关于各频区照射电平的控制 194
 - 7.8.3 频比的配置问题 195
- 7.9 频率选择表面多频共用天线技术..... 195
- 参考文献 196

第 1 章
多波束抛物环面天线

1.1 概述

目前卫星通信发展的一个重要趋势是,利用一个卫星通信地球站天线,同时对几个同步轨道卫星通信,以降低卫星通信地球站的建站成本,提高地球站的利用效率。这就要求卫星通信地球站天线具有多波束能力。

一般说来多波束天线应具有下述特点。

(1) 具有两个以上的独立可控波束。

(2) 每个波束都能独立地进行工作(通信、雷达、遥感、遥控、遥测等),而对其他波束不产生可计及的影响,同时也不受其他波束的影响。

(3) 每个波束对所对应的目标进行跟踪由本波束独立地实现,天线反射面将是固定不变的。各个波束对其所对应的目标的跟踪,由形成每个波束的馈源来实现。

(4) 对于多波束卫星通信地球站天线,还要求每个波束及其所伴随的旁瓣必须满足卫星通信的技术规范,例如旁瓣电平包络要求、交叉极化隔离度、端口隔离度等。

(5) 由于使用一个反射面形成多个波束,所以多波束天线的另一个重要特点是,相邻波束隔离度必须高。

在过去的 25 年里,人们对多波束天线进行了广泛而深入的研究,取得了可喜的成果,产生了许多种多波束天线结构形式和设计方法。

相控阵多波束天线^{[1]~[3]}通常由一组离散辐射器组成,这些离散的辐射器常排成二维平面结构。通过独立控制每个辐射器的振幅和相位,在空间形成满足要求的多个波束。所以相控阵多波束天线的多波束形成,不是由机械布局功能实现的,而是通过控制辐射器的振幅和相位,特别是相位来实现的,即通过辐射器的波阵面来实现的。这类多波束天线其孔径固定不动,它是最灵活最实用的多波束天线。但是相控阵多波束天线波束形成网络很复杂,特别是插入损耗太大,同时造价又昂贵。相控阵多波束天线另一个缺点是各个波束及其伴随的旁瓣结构是不相同的,特别是偏离天线孔轴越远的波束,其波束特性(例如增益、旁瓣及交叉极化隔离度)越差。基于上述原因,相控阵多波束天线在通信领域没有获得广泛应用,这类天线早期主要应用于雷达和飞行器之间的通信。近年来人们在降低波束形成网络的插入损耗和成本方面取得了一定进展,也逐渐应用于通信,但是各个波束的性能差异是这类天线难以克服的缺点。

微波透镜天线是另一类具有极大吸引力的天线,其中龙伯(Luneberg)透镜天线^[4]是众所周知的光学扫描天线。龙伯透镜天线采用一个球对称的折射结构,表面为球面,从任意方向入射的平行波束都聚焦在与入射波束相反一边的透镜球面上,因此把几个轻型馈源的相位中心置于不同位置的焦半径上,就会形成多个波束,波束的特性由透镜的直径确定。龙伯透镜天线的最大缺点是要求一种折射律连续变化的介质材料及严重的介质损耗。对于前者已有分层介质方案来解决其困难;对于介质损耗,如果介质材料的损耗角 α 满足 $\tan \alpha \leq 10^{-4}$,其介质损耗小于0.1dB,如果 $\tan \alpha = 10^{-3}$,介质损耗为1dB,它不但使天线增益降低,并且使天线的噪声温度增加70K,这对通信天线来说是一个严重的问题。目前我国满足 $\tan \alpha \leq 10^{-4}$ 的介质材料尚没有成熟产品。

反射面类型的多波束天线种类很多,与相控阵天线、微波透镜天线相比,这类天线是实现多波束最简单、最便宜和最可靠的天线形式,下面介绍一些主要的反射面类型的多波束天线。

球面天线具有球对称的独特优点,若馈源的相位中心置于球面半径的一半处,则局部球面可看成抛物面^{[5][6]},因此在半径为球面半径一半的球面上放置多个馈源,便会形成多个波束,且各个波束的性能一样。球面天线由于没有真正的焦点,因此存在着球面相差^[5],导致天线增益不高,旁瓣特性差。目前,已有几项新技术^{[6][7]}可改善球面相差,同时,还可利用偏置球面结构^{[8][9]}来避免馈源或副面对主面的遮挡。

众所周知,馈源横向偏焦的抛物面天线可形成多波束,但宽角扫描所产生的严重效率降低和慧瓣的出现是这种多波束天线的致命缺点^{[10]~[14]},因此它是一种性能较差的多波束天线,一般波束个数不超过3个,可用于单收站天线。

利用对称型双反射面天线,通过多个馈源照射副面也可形成多波束^{[15][16]}。从等效抛物面的观点来看,对称双反射镜天线的等效焦距 $F_e = MF$,其中 M 为放大倍数, F 为抛物面焦距,因此其等效焦距 F_e 比 F 大得多,所以可获得比前馈抛物面好得多的偏轴特性。

Dragone^{[17][18]}提出了用偏置卡氏天线实现多波束,它利用复射线方法导出了消除象散、慧瓣和球面相差的条件,而Makino等^[19]利用大副面实现了偏置卡氏天线宽角扫描的良好多波束性能,缺点是副面太大。

利用多反射面也可形成多波束,其原理是通过控制反射面的形状和位置来控制相位,从而用一个主反射面产生几个独立波束,但由于反射面增多,结构变复杂,实现起来增加了难度。

本章所研究的抛物环面天线也是一种反射面多波束天线,它易于加工、成本低,适于我国目前的国情,下面将深入分析和研究。

1.2

抛物环面天线的机理^[20]

1.2.1 抛物环面天线的形成及其特点

抛物环面天线是一抛物线段绕与其焦轴成 $\frac{\pi}{2} + \alpha$ 角的一条轴线旋转而成的反射面天线。当抛物线段旋转时, 其焦点旋转形成一焦弧, 在焦弧上放置多个馈源用以照射抛物环面天线就会产生多个波束, 如图 1.1 所示。图 1.1 中, M 为抛物线段, 为母线, F 是其焦点, f 是其焦距, V 是 M 的顶点, D_M 是抛物环面天线的竖直口径, 为避免馈源对反射面形成遮挡, 抛物环面天线通常选用上偏置结构, D_H 为静距, z 为 M 的焦轴, z' 轴为旋转轴, 也称为抛物环面天线的生成轴。图 1.1 中 (x', y', z') 是用以描述抛物环面天线的直角坐标系, (x, y, z) 是用以描述母线 M 的直角坐标系, 后面将用到的 (ρ', θ', ϕ') 是与 (x', y', z') 对应的球面坐标系。

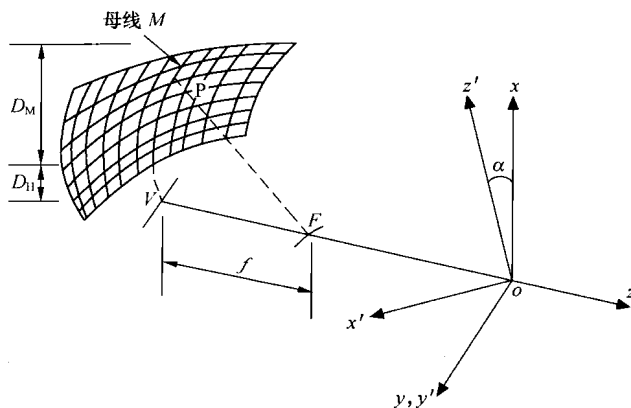


图 1.1 抛物环面天线形成原理图

由抛物环面天线的生成机理可知, 抛物环面天线有下述特点。

(1) 含 z' 轴的任何平面与抛物环面的交线均是抛物线。

(2) 与 z' 轴垂直的平面与抛物环面的交线均是圆弧线。

(3) 抛物环面天线既利用了抛物线的聚焦特性, 又利用了球面天线的宽角扫描特性, 它在一维方向可进行宽角扫描。因为, 球面天线具有慧瓣和效率低的缺点, 所以抛物环面天线的一维宽角扫描同样的代价是某种程度的慧瓣相差和效率的降低, 并且随着 $\frac{D_M}{\lambda}$ (λ 为工作波长) 的变大, 这种现象变得越来越严重。

(4) 抛物环面天线的结构特性决定了多波束抛物环面天线的各个波束的性能(主波束及其旁瓣)是相同的,这是这类多波束天线的最大优点。

(5) 抛物环面天线多波束机理表明:只要主反射面不对波束方向形成遮挡,可形成很多波束,即只要焦弧的弧角小于 180° ,在焦弧上放置尽可能多的馈源,便可形成尽可能多的波束。

(6) 多波束抛物环面天线的反射面是固定不动的,每个波束对目标的跟踪是通过移动形成该波束的馈源来实现的。馈源沿焦弧运动,不会引起波束变异,馈源在垂直于焦弧方向移动实施对目标跟踪时会产生偏焦,会导致天线增益的降低。

(7) 多波束抛物环面天线的多个波束对主反射面是复用的,并且波束越多复用率越高。

(8) 多波束抛物环面天线生成时涉及到 α 角, α 角是由多个目标所占据的空间弧度位置和天线站址所在的地理位置(经、纬度)确定的,例如多波束卫星通信抛物环面天线的 α 角是由同步卫星群所占据的同步轨道弧和地球站的经、纬度确定的。这就限制了这种天线的通用性,是这类天线的一大缺点。不过可通过将整个国家划成几个小区,而进行分区设计,在每个小区内 α 角保持不变。

1.2.2 抛物环面天线的几何特征

由图 1.1 可知, (x, y, z) 与 (x', y', z') 之间有下列坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} e_x(x) \\ e_y(y) \\ e_z(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{x'}(x') \\ e_{y'}(y') \\ e_{z'}(z') \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} e_{x'}(x') \\ e_{y'}(y') \\ e_{z'}(z') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & 0 & -\cos\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x(x) \\ e_y(y) \\ e_z(z) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

而 $(\rho', \theta', \varphi')$ 与 (x', y', z') 的关系为下述矩阵表示

$$\begin{bmatrix} e_{\rho'} \\ e_{\theta'} \\ e_{\varphi'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta' \cos\varphi' & \sin\theta' \sin\varphi' & \cos\theta' \\ \cos\theta' \cos\varphi' & \cos\theta' \sin\varphi' & -\sin\theta' \\ -\sin\varphi' & \cos\varphi' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{x'} \\ e_{y'} \\ e_{z'} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

1. 抛物环面天线的方程

假定在 (x, y, z) 坐标系中, 母线 M 焦点 F 的坐标为 $(0, 0, z_0)$, 顶点 V 的坐标为 $(0, 0, z_0 - f)$, 则在 (x, y, z) 坐标系中, M 的方程表示为

$$x^2 = 4fz + 4f(f - z_0) \quad (1.4)$$