



激光数据链路

王海晏 魏贤智◎著

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

激光数据链路

王海晏 魏贤智 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书介绍将激光数据链路应用到战斗机协同空战中的各种问题,内容主要涉及构建机载激光数据链路及其相关问题的解决办法,同时对激光数据链路在协同攻击中的应用进行了理论研究和描述。

本书主要内容包括机载激光数据链路系统及使用的技术、自用空间数据传输的坐标解算、激光链路建立的关键技术、利用机载红外搜索跟踪系统及激光数据链路被动定位、基于激光数据链路的协同静默攻击等。这些问题的研究和讨论将丰富空战平台之间的信息传输方式,增强协同空战信息共享能力。

本书可以作为相关专业高年级学生、研究生的补充阅读材料,也可作为工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

激光数据链路/王海晏,魏贤智著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.12
ISBN 978-7-5606-4169-0

I. ① 激… II. ① 王… ② 魏… III. ① 空间激光通信系统—应用—歼击机
IV. ① TN929.1 ② E926.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 195261 号

策 划 胡华霖

责任编辑 王 静

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印张 9.5

字 数 166千字

印 数 1~1000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-4169-0/TN

XDUP 4461001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

21 世纪人类已经迈入了一个崭新的信息时代,信息技术和信息网络无处不在,给人类社会带来了深刻的变革,也促使战争的形态从机械化战争向信息化战争转变。在信息化战争的需求牵引和信息网络技术的发展驱动下,以武器平台为中心的“平台中心战”正被以信息网络为中心的“网络中心战”所取代。

在网络化作战体系中,机载平台是网络中的重要节点,它们通过协同、配合实现作战效能的倍增。协同空战有利于提高机群的探测跟踪和攻击能力,对提高机群的整体作战效能具有重要的意义。网络化中的战斗机相对于无网络的敌机必然会取得信息优势,而信息优势是克敌制胜的先决条件,它可以使我方战机获得更加全面的战场态势信息,使我方编队指挥机进行正确的空战指挥决策和目标分配。

多机协同下的空战是体系与体系的对抗,空战体系的各个成员通过无线电数据链作为沟通的媒介,体系中的成员通过信息交联实现协同。随着网络节点的增多,传感器技术日益发展,节点平台共享的信息量正以一个前所未有的速度增长。同时,随着机载高光谱传感器、合成孔径雷达等先进图像传感器的应用,这种增长将会继续持续下去,与此同时,传感器获取的战场信息将从二维向更高分辨率的三维图像信息发展。在这种情况下,战场信息量更是与日俱增,而在一些情况下各个作战单元必须能够实时传输这些大容量的信息,这就要求通信链路不断拓展带宽和提高传输数据容量,显然无线电通信已经难以满足这种发展的要求。另一方面,随着电子对抗技术在信息化战争中的广泛应用,复杂电磁环境已经成为当前空战的一个突出特征,会对信息化战争的进程和结局产生重要甚至决定性的影响。在这种环境中基于无线电数据链的协同作战将会受到很大的威胁,可能导致传输数据中断、差错率升高以及协同效率下降。

机载激光数据链路是以激光束作为载波在机载平台和其他平台之间进行语音、数据、图像等信息传输的空间链路。它具有大通信容量、无限带宽、高传输速率、高隐蔽性、高抗干扰、抗截获能力强的优点。这些优点使得机载激光数据链路可以很好地克服现行体制数据链存在的缺陷和使用弊端,比如不利于射频隐身、易受敌方干扰等。如果将激光数据链路应用到战斗机协同空战中,可以很好地解决当前无线电数据链带宽问题和电磁干扰等。因此,研究基

于激光数据链路的协同攻击具有重大的意义，它既是应对现代复杂电磁干扰的一种最有效的数据传输方式和隐身防护手段，又是解决“网络中心战”中节点之间日益需求的信息大数据量实时传输的一种有效方法。

本书提出将激光数据链路系统应用于协同攻击，旨在未来复杂电磁环境下顺利传输战场信息，使编队飞机可以顺利地实现战场信息共享。由于激光数据链路的特点，空战中进行信息共享的战斗机之间无电磁辐射，是一种电磁静默状态。针对这种现象，本书将激光数据链路系统应用于协同静默攻击，保持电磁静默的攻击机在接敌过程中可以和指挥机有效地进行信息传输而不会被敌方识别，保证了接敌的隐蔽性，为攻击机发起突然攻击奠定了基础。这种攻击方式属于激光数据链路在协同空战中的典型应用。

本书第 0~5 章由王海晏编写，第 6 章由雷洪利编写，第 7 章由魏贤智编写。王海晏、雷洪利统编全稿。

由于著者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者

2016 年 8 月

目 录

第 0 章 激光数据链路及IRST系统被动定位的研究概况	1
0.1 机载激光链路的意义	1
0.2 国内外研究概况	2
0.3 激光数据链路的相关技术及其特点	5
第 1 章 机载激光数据链路系统	8
1.1 机载激光数据链路的基本原理	8
1.2 机载激光数据链路系统的组成	9
1.2.1 系统组成结构	10
1.2.2 系统主要设备	10
1.3 发射与接收器件选择	12
1.3.1 激光器的选择	12
1.3.2 光电探测器的选择	13
1.4 信息的激光传输技术	14
1.4.1 数据格式	14
1.4.2 编码调制技术	15
第 2 章 机载激光数据链路猝发接收技术	19
2.1 激光猝发接收技术	19
2.1.1 激光猝发接收系统的结构和原理	20
2.1.2 工作机制的设计	21
2.1.3 断点续传原理	22
2.2 激光猝发接收的光束对准技术	24
2.2.1 信标光的捕获	25
2.2.2 信标光的跟踪与瞄准	32
2.3 仿真分析	41
2.3.1 基于战斗机空战运动仿真的光端机对准分析	41
2.3.2 基于Optisystem软件的激光猝发接收过程仿真	43
第 3 章 基于激光数据链路的多机信息共享处理	46
3.1 激光数据链路数据预处理	46

3.2 目标状态参数转换	49
3.2.1 坐标系的选取	50
3.2.2 基准坐标系的确定	51
3.2.3 矢量转换模型的建立	52
3.2.4 目标信息参数转换	54
3.3 激光数据链路与被传感器信息融合	60
3.3.1 目标信息融合原理	61
3.3.2 红外搜索跟踪系统与激光数据链路融合方法	61
3.3.3 仿真与结果分析	66
第4章 建立激光链路的捕获技术	70
4.1 机载激光链路快速高概率捕获技术	73
4.1.1 捕获过程概述	73
4.1.2 选择不确定区域	74
4.1.3 捕获模式与扫描方式	76
4.1.4 捕获概率的计算	77
4.1.5 最大捕获时间	81
4.2 仿真分析	81
第5章 利用机载红外搜索跟踪系统及激光数据链路被动定位	85
5.1 被动定位基本体制	85
5.2 红外目标探测理论	88
5.2.1 红外辐射特性	88
5.2.2 红外成像探测	89
5.3 单机IRST被动定位	90
5.3.1 单机多点测向定位	90
5.3.2 双波段红外被动定位	91
5.3.3 基于红外图像序列的被动定位	92
5.4 多机IRST被动定位	94
5.4.1 定位原理	94
5.4.2 多机定位问题	95
5.4.3 基于激光链路的被动定位	96
第6章 被动定位的参数及其处理	99
6.1 被动定位参数转换	99
6.2 被动定位几何模型及误差	101
6.2.1 被动定位几何模型	101

6.2.2 定位误差分析	103
6.3 非线性滤波在被动定位中的应用	106
6.3.1 载机运动模型	106
6.3.2 目标机动模型估计	108
6.3.3 基于 UKF 的被动定位算法	110
6.3.4 滤波算法的性能评估	113
6.3.5 仿真	114
第 7 章 基于激光数据链路的协同静默攻击	118
7.1 基于激光数据链路的协同静默攻击火力控制过程	118
7.2 协同静默攻击目标分配	120
7.2.1 综合优势函数构造	120
7.2.2 协同静默攻击的决策算法——目标分配算法	123
7.2.3 仿真分析	124
7.3 基于激光数据链路的攻击机隐蔽接敌	125
7.3.1 攻击机接敌方式选择	126
7.3.2 攻击机隐蔽接敌模型	127
7.3.3 基于模糊控制方法的隐蔽接敌决策	130
参考文献	137

第0章

激光数据链路及IRST系统被动定位的研究概况

0.1 机载激光链路的意义

机载激光链路是指搭载在航空平台上的无线激光数据通信链路系统,是机载数据链路技术和无线激光通信技术的结合。随着星际间激光通信系统关键技术日渐成熟、大气激光传输理论研究不断深入和未来网络中心战情况下机载平台对大容量、高保密、抗干扰通信链路的需求增多,机载平台激光链路及通信系统研究得到了国内外的重视并取得了一定进展。以机载平台为中心,可建立空星、空空、空地、空潜等激光链路,机载平台已经成为未来构建空天信息网的重要节点和枢纽。图0.1为以激光链路为主实施的美国TSAT计划示意图。

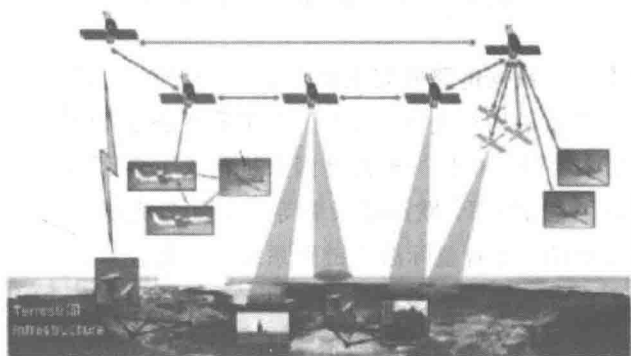


图0.1 美国TSAT计划示意图

对未来空天作战体系来说,研究机载激光链路具有以下重要意义:

(1) 机载激光链路提供了一种行之有效的通信补充手段,在强电磁干扰情

况下可快速建立并保证通信畅通,确保实现战术指控中心与各作战单元的战术指挥;将光通信与现有的射频通信有机结合起来,形成优势互补,共同组成宽带、高速、安全的军用通信系统。

(2) 机载激光链路为新的作战、引导、攻击等方式奠定技术基础,推动新的航空火力控制原理的发展。利用抗干扰、抗截获能力强的激光链路可以开展多机协同作战、信息融合、任务规划、无线电静默攻击以及基于激光数据链路的导弹制导等技术研究,大大提高了未来战场上的信息获取能力和火力打击能力。

(3) 机载激光链路拓展了通信带宽,可满足海量通信的要求,为未来战机高光谱、高分辨率传感器融合和数据高速传输提供硬件支持。随着成像光谱仪、合成孔径雷达等高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率的传感器在航空平台侦察探测中的广泛应用和多机多传感器信息融合的不断发展,迫切需要将海量原始数据以无损压缩方式从探测平台传输至指控终端或在平台之间共享探测信息,从而获得更加全面的战场态势信息。

(4) 临近空间平台特性、环境特性与飞机平台特性、环境特性具有较大的相似性,机载激光链路系统中的多项关键技术适用于临近空间。所以,研究机载激光链路为空天飞机装备的研制、发展起到抛砖引玉的作用,适应未来空天一体化作战需求。

0.2 国内外研究概况

机载平台的激光数据链路研究主要是星空、空空、空地等方面的研究,从事这方面研究的主要机构在美国、欧洲。由于该系统主要以国防军用为主要目的,因此欧美的主要研究机构一般都是国家机构或军事部门,如美国国家航空航天局(NASA)、美国空军,欧洲航天署等。空间激光链路的研究,最新是在星际通信方向发展的,随着星际激光链路系统中关键技术日益成熟、大气激光传输理论和认识的深入以及机载平台重要性的增加,美国、欧洲航天署等发达国家和组织相继开展机载平台激光通信系统和链路的研究。

美国很早就将激光通信界定为一种可行的空对空通信技术,其主要的研究部门有美国国家航空航天局和美国空军等。NASA早在20世纪70年代初就自主进行CO₂激光和灯泵浦的Nd:YAG激光空间通信系统的研究。此项研究主要用于高码率的低轨卫星(LEO-LEO)间光链路和低码率深空光中继,此

后随着相关设备体积减小、成本降低,激光通信的应用逐步扩展到 LEO-飞机的光通信链路。NASA 下属的 JPL 实验室还在高空无人机与地面间开展自由空间激光通信试验。试验时,高空无人机的飞行高度为 18~23 km,通信速率为 2.5 Gb/s,通信波长为 1550 nm,链路距离为 50 km。2003 年,NASA 还进行了 ATP(Acquiring-Tracking-Pointing,捕获、跟踪、瞄准)系统的演示试验。美国空军研究实验室传感器分部 AFRL/SN 正在研究一种可行的机载激光数据链路,该项技术发展项目计划分两个阶段:第一阶段包括激光数据链路地面演示系统的设计与评估;第二阶段是将地面演示实验的结果转换为优化的终端设计,以便将其安装到两个商用型喷气机上。目前,AFRL 在夏威夷成功试验的基础上正在做进一步的研究,目标是研制一种可以安装在 T-39 型飞机上的新型激光通信终端,并用这种终端进行全双工激光通信链路的飞行演示试验。在该试验中,要求通信速率为 1 Gb/s,通信距离为 5~500 km,飞行高度为 12 km。1996 年,美国 TT 公司进行了飞机对地面站间的光通信试验,试验中,飞机飞行高度为 11 000 m,通信距离为 20~30 km,传输速率为 1 Gb/s。1999 年,TT 公司又完成了飞机对飞机激光通信试验,链路距离为 50~500 km,传输速率为 1 Gb/s。2004 年 8 月 19 日,美国空军选定诺斯罗普·格鲁曼公司等 4 家公司进行光端机研制,于 2007 年实现空中平台与天基平台间的激光通信。另外,美国空军还进行了一些很有价值的激光通信试验,主要有预警机与战斗机之间的通信,其作用距离为 8~64 km,飞机飞行高度为 7600~16 000 m,可同时与 50 个目标进行通信,传输码率均为 2 Mb/s,误码率优于 10^{-6} 。

欧洲在自由空间激光通信上也进行了大量的研究,不仅起步早,而且制定了一系列研究计划,成绩显著。2003 年 12 月,法国国防部采购局(DGA)和欧洲航空防务与空间公司(EADS)签订用于机载激光光学链路技术演示器(LOLA)的开发合同,目的是 2006 年在地球同步卫星和飞机之间进行激光通信演示验证。2006 年 12 月欧洲空间局(ESA)成功地在静止轨道 ARTEMIS 卫星与法国达索航空公司的一架 Mystère 20 飞机间建立了空星激光通信链路,在 9970 m 高度,利用其机载激光系统,与距离 40 000 km 外的 ARTEMIS 卫星之间成功建立了 6 条双向激光通信链路,通信速率达到 50 Mb/s。此后,在 2007 年 5 月的巴黎航展上进行了实时的飞机和 ARTEMIS 卫星之间的通信展示,这是世界上首次实现的卫星和飞机之间的激光通信,如图 0.2 所示。

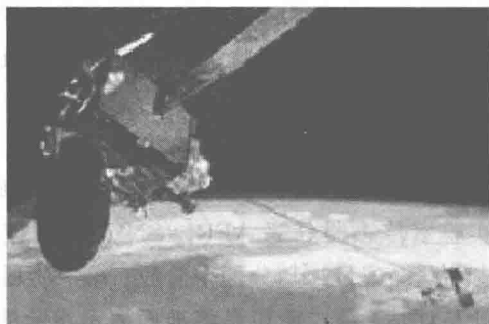


图 0.2 欧洲空间局开展空星激光链路

我国国内空间激光通信的研究起步相对较晚,但是国家对于空间激光通信的研究非常重视。2011年8月,中国科学院上海光学精密机械研究所(简称中科院上海光机所)空间激光信息技术研究中心在南海开展了空中平台与水下平台间的通信试验,成功实现了预定指标。吕春雷等人进行了机载光端机性能验证试验,采用双探测器、双光轴机载激光通信复合轴 ATP 跟踪系统方案,最终使跟踪精度达到 $3\mu\text{rad}$,实现通信距离 17.5 km、通信速率 1.5 Gb/s、误码率达 10^{-7} 的飞机对地面激光通信任务。

国内在激光通信方面的研究单位和研究方向如表 0.1 所示。

表 0.1 国内在激光通信方面的研究单位和研究方向^[9]

研究单位	研究方向
长春理工大学	空地激光通信及组网
哈尔滨工业大学	星际及星地激光通信
电子科技大学	激光通信系统理论与系统研究
武汉大学	静态激光通信
华中科技大学	对潜激光通信
中国航天 504 研究所	空间激光通信总体研究及地面检测
中科院安徽光机所	激光大气传输特性
中科院上海光机所	激光通信测试系统
中科院成都光电所	自适应激光通信
中国电子科技集团公司第 34 研究所	大气静态激光通信
中国电子科技集团公司第 27 研究所	空间激光通信用激光器及关键技术
中国兵器工业集团 209 研究所	战术激光通信

0.3 激光数据链路的相关技术及其特点

1. 机载数据链路技术

战术数据链路(Tactical Data Link, TDL)是用于传输机器可读的战术数字信息的标准通信链路。自20世纪50年代起,数据链路首先装备于地面防空系统和海军舰船,之后逐步扩展到预警飞机和作战飞机。机载数据链路又称航空数据链路,以美军为例,主要发展了16号数据链路(Link 16)、机间数据链路(IFDL)和战术瞄准网络(TTNT)。其中,Link 16是美军和北约组织正在发展和使用的战术数据链路,工作在L频段,采用直接序列扩频、跳频等抗干扰技术,集通信、导航和识别功能于一身。美国空军的E-3和F-15,海军的F/A-18A、F-14和E-2C等飞机都已配备了Link 16。诺斯罗普·格鲁曼公司研制的机间数据链路,主要用于第四代作战飞机编队协同作战。它采用的是Q频段的透镜多波束天线,能实现作战飞机之间实时、抗截获数据动态自组网和交换,在编队飞机中可传输态势信息、瞄准信息、燃料状态和武器存量等。战术瞄准网络技术(TTNT)是一种高速、保密、基于IP的武器协同数据链路,主要用于实现目标探测、主动识别、瞄准、打击和毁伤评估的过程中,各种作战信息的及时共享。TTNT工作在L波段,单条链路的最高速率可达2 Mb/s,最低延时低于2 ms。

2. 无线激光通信技术

激光通信是一种采用光波作为信息载体的通信技术,按信道特性可分为有线激光通信(光纤)和无线激光通信。激光通信的主要特点是:

(1) 通信容量大。由于光波频率比微波频率高几个数量级,因此光通信具有更高的传输速率,其数据率可达吉比特每秒。目前,40 Gb/s的光纤通信已经实用化,100~622 Mb/s的地面空间光通信系统已经商业化,5.65 Gb/s的空间激光链路系统已经演示验证成功,通信速率为几吉比特每秒至几十吉比特每秒的空间光通信系统正在研究和规划中。

(2) 较小的发射功率需求。激光波长大致在微米和亚微米量级,而射频和微波波长在数十厘米到毫米量级。根据波动光学理论,在相同通光口径的情况下,光波衍射极限发散角正比于波长。因此,激光束比微波波束的发散角小3~5个量级,增加了接收端的能量密度,并为减轻质量、减少功耗、增加工作距离提供了基本条件。

(3) 抗电磁干扰、抗截获能力强。激光采用直线定向的方式,其束散角仅

有毫弧度量级(甚至微弧度量级),不易拦截;通信速率快,在相同数据量条件下,其有效传输时间非常短,所以不易被侦听,因此满足军事应用中的保密和抗干扰要求。

机载激光数据链路属于自由空间光通信范畴,所以它的特点和空间激光通信相同。

激光数据链路具有以下优点:

(1) 通信频带宽、信息容量大。由于激光的波长很短,所以激光载波的频率很高,它的频率宽度大概是微波带宽的数万倍。

(2) 较小的发射功率需求。天线增益与波束发散角平方成反比。经准直后的激光束散角可以达到微弧度量级,所以光学天线的增益非常大,在通信距离相同的情况下,空间光通信相对于无线电通信发射的功率更小。而这个特点也为空间光通信远距离、小型化奠定了基础。

(3) 抗电磁干扰、抗截获能力强。不受电磁干扰,是因为光波段远离射频谱段,所以激光数据链路可以免受各种人工电磁波的干扰(如电磁脉冲武器的攻击);抗截获主要表现为三个方面:① 激光采用直线定向的方式,其束散角仅有毫弧度量级(甚至微弧度量级),不易拦截;② 通信激光选择近红外波段,为非可见光,所以不易被敌发现和截获;③ 通信速率快,相同数据量条件下,其有效传输时间非常短,所以不易被侦听。

(4) 体积小、质量轻。激光数据链路系统的通信光发射单元和信标光发射单元都采用半导体激光器,它相对于其他激光器具有功耗小、转换效率高、热腔功率小等优点。同时,激光波长短,收、发天线相对于微波天线几何尺寸小。

任何事物都具有两面性,激光数据链路也存在很多方面的缺点,而这些不足在很大程度上限制了它的发展,这里分析激光数据链路缺点的同时也提出对于这些不足的应对方法。

(1) 大气对激光传输的影响与解决方法。大气中的气体分子、水雾、雪、霾、气溶胶等离子,其几何尺寸与激光波长相近甚至更小,会对光束产生强烈的吸收和散射,致使光束强烈衰减,而在强湍流情况下,光信号将会受到严重的干扰甚至脱靶。因此如何实现随机信道下系统的正常工作,对大气信道的工程化研究是十分重要的。另外,采用自适应光学、多孔径发射接收技术来解决这个问题,也取得了较好的效果。同时,还可以通过减小束散角和增加激光发射功率来提高激光传输距离。随着大功率集成激光器件的出现,激光在大气中的传输衰减问题可以得到很好的解决,激光数据链路将会成为人类今后主要的通信方式。

(2) 空间激光信号的捕获与跟踪及解决办法。在建立空空、空地数据链路时,由于激光束散角小,加上机载平台较大的低频扰动和高频振动的影响,必然要求跟踪系统具有大的跟踪带宽和较高跟踪精度,它加剧了光束对准难度和复杂程度。当前主流的方法是采用 ATP(捕获、跟踪与瞄准)技术来完成光端机的对准。

本书主要针对机载平台,我们可以采用一些简单的方法对准,例如采用现役装备中的红外定向等火控瞄准装置、头盔瞄准定位等快捷的定位技术对准通信双方或多方,这些方法可以有效地完成双机或多机机载光端机之间的初始对准。当光端机初始对准完成后,可以采用大发散角的信标光完成光束的初始捕获,最后采用粗、精两个跟踪步骤完成光束的对准,实现动态通信要求。

第 1 章

机载激光数据链路系统

1.1 机载激光数据链路的基本原理

机载激光数据链路是指在战斗机机载光端机之间建立光通路,利用激光束作为信息载体,实现两机间的信息传输。激光传输信息的过程:首先,采用 ATP 技术将两光端机相互对准;然后,两个光端机相互向对方发射调制的激光信号(语音、文件、图像信息等),接收并解调来自对方的激光信号,实现双工通信,即通信双方都可以发送和接收信息。双机之间的激光数据传输演示如图 1.1 所示。

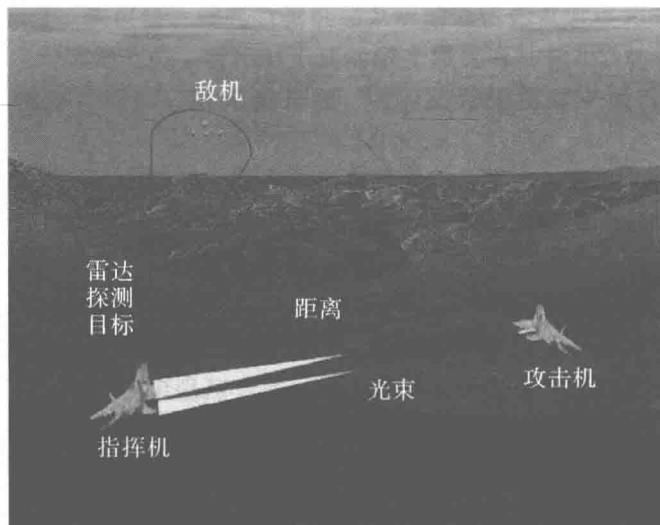


图 1.1 双机之间的激光数据传输演示图

机载平台的激光数据链路系统主要由激光光源子系统、发射子系统、接收子系统以及大气信道组成,其系统框图如图 1.2 所示。该系统可完成语音、数据、图像等大信息量的双向传送。

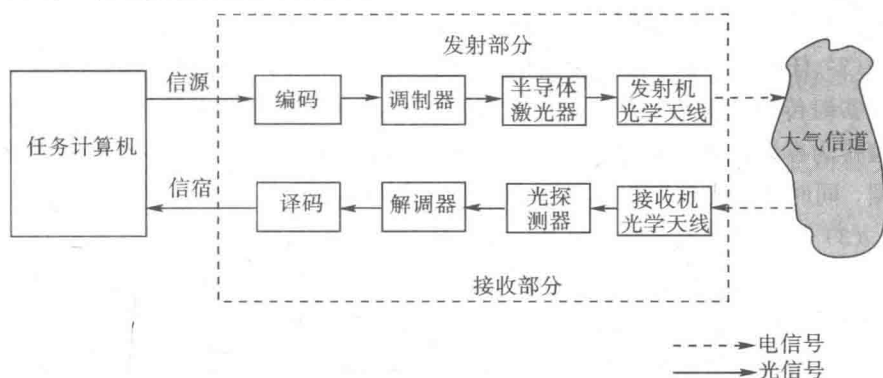


图 1.2 机载平台的激光数据链路系统框图

光发射机的作用是在发射端将电信号转变成适合于大气信道传输的光信号;光接收机的作用是在接收端对光信号进行接收、放大和处理。信源是信息的产生之地,它是任务计算机确定的需要共享的战术信息。编码器负责把信源发出的信息转换成数字形式的信息序列,同时加入冗余信息进行纠错编码。编码后的信号加载到调制器上,调制器的激励电流就随信号的变化规律而变化;通过调制器调制、驱动电路对激光器进行直接光强度调制后,驱动半导体激光器发光;最后经过光学天线变换为发射角很小的已调光束向空间发射出去。

接收光学天线接收到已调光束之后,经过光探测器将传来的微弱光脉冲信号转换成电流脉冲信号。在解调之前,需要对光束进行预处理,主要包括信号的放大、滤波和脉冲处理。译码就是根据编码方法和接收数据所含的冗余信息重构原始序列、恢复原始信号。信宿是信息的接收者,最终将信息传送到任务计算机。

1.2 机载激光数据链路系统的组成

机载激光数据链路系统是与机载任务计算机相连的系统,类似于数据链系统。它利用激光实现各个作战平台之间的信息交流,使各个平台之间能够在复杂电磁干扰的情况下正常共享战场信息。