

制导信息处理

胡见堂 罗晚成 编著

31821902

国防工业出版社

前 言

制导信息处理技术涉及的范围甚宽,本书着重讨论倒置接收技术、正交复用矢量合成技术、调频负反馈技术、锁相混频技术、零(低)中频技术、流水线作业技术等。此外,还对精确制导中的主动式雷达导引头的主要技术问题、脉冲多普勒体制问题、毫米波在制导中的应用问题以及作用距离等总体技术问题也做了相应的讨论和分析。

为了优化信息处理功能,作者设计了单片机信息处理电路。这种电路软、硬件配置灵活,可方便地完成目标识别、频率搜索、频率跟踪以及搜索与跟踪转换等功能,并且研制完成了实现上述功能的软件。运行结果表明,仿真是成功的。

本书由陆仲良教授、张广发教授审阅,曹志刚同志在软件研制方面做了许多工作,在此一并表示衷心地感谢!

本书可作为无线电制导专业高年级本科生、研究生的教材或教学参考书,也可供无线电科技工作者参考。

由于作者才疏学浅,不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

1	概述	1
1.1	主动式雷达导引头的主要技术问题	1
1.2	脉冲多普勒、单脉冲倒置雷达系统的特点	2
2	毫米波技术及其在制导中的应用	4
2.1	毫米波的特点	4
2.2	环境条件对毫米波传播的影响	5
2.3	毫米波技术在制导中的应用	11
2.4	作用距离的计算	12
3	正交复用矢量合成、调频负反馈 和锁相混频原理及理论分析	15
3.1	典型的单脉冲倒置接收机	15
3.2	通道合并的单脉冲倒置接收机	15
3.2.1	错开频率法	18
3.2.2	正交复用矢量合成法	18
3.3	正交复用矢量合成原理及理论分析	21
3.4	调频负反馈接收原理及环路分析	24
3.4.1	倒置接收原理	26
3.4.2	调频负反馈环路分析	28
3.5	锁相混频电路原理及环路分析	39
3.5.1	锁相混频电路原理	39
3.5.2	锁相混频环路分析	40
4	正交复用矢量合成、调频负反馈、 八毫米单脉冲倒置接收机	54

4.1	模拟电路	54
4.2	数字化电路	58
5	接收机主要指标的计算方法	61
5.1	接收机灵敏度及增益的计算	61
5.2	AGC 动态范围的计算	62
6	FFT 算法、零(低)中频技术、流水线作业技术	63
6.1	FFT 算法	63
6.2	零(低)中频技术	73
6.3	流水线作业技术	77
7	单片机电路设计	80
8	仿真软件流程图及其说明	87
8.1	系统管理软件及说明	87
8.2	数据采集软件及说明	89
8.3	搜索软件及说明	92
8.4	FFT 软件及说明	96
	参考文献	98

1 概 述

倒置接收机可用于主动式脉冲多普勒雷达导引头中。

主动式雷达导引头的主要优点是：①发射后可以不管，能简化机载设备，缩短武器系统的作战反应时间，易于对付多目标，增强载机本身的自防御能力；②可在多种制导方式中复合使用，增强制导系统的灵活性，扩大作用距离，便于实现超低空和超视距攻击。可实现的复合制导方式有：初段惯导/中段指令制导/末段主动或半主动寻的制导；初段惯导/末段主动寻的制导。当今世界各国都在竞相研制，它代表着 90 年代制导技术的发展方向。

1.1 主动式雷达导引头的主要技术问题

主动式雷达导引头需要对付未来的多方位、多层次、强干扰下的运动目标，而且目标的雷达截面积很小。这样，给制导带来了下述一些技术问题。

1. 很高的收、发隔离度

譬如，对于发射机功率为 45W，接收机灵敏度为一 130dBmW 的雷达导引头，其收发隔离度高达 $130 + 10\lg(45 \times 10^3) = 176.5\text{dB}$ 。

2. 高增益，大动态范围

主动式雷达导引头要能对付雷达反射截面积很小的目

标,必须有高的增益和大的动态范围,但由于器件的限制,势必增加实现的困难。

3. 高频率稳定度、低噪声的振荡器

振荡器的频率很高,要求有高的频率稳定度和低的噪声,实现难度大。

4. 跟踪的可靠性问题

主动式雷达导引头要求制导精度高,波束必须窄,这就带来了对目标的截获、跟踪的可靠性问题。

此外,主动式雷达导引头对尺寸、散热等问题都有严格的限制。

1.2 脉冲多普勒、单脉冲倒置雷达系统的特点

主动寻的制导系统装在导弹上,允许有距离模糊,但不允许存在速度模糊,而且要求有很高的测角精度,同时,还要求在强杂波干扰下仍能有效地引导导弹攻击目标。为了满足这些要求,制导系统采用脉冲多普勒、单脉冲倒置体制是一种比较合适的选择。

倒置接收体制将窄带滤波器接在前置中放之后,在接收机前端电路中就将脉冲信号变换成了单谱线的连续波信号,这实际上就成了脉冲发射、连续波接收的情况,使其兼有连续波体制、脉冲体制的优点。发射机采用高功率脉冲(低平均功率)发射,能量利用率较高,发射机散热问题也能较合理地解决,而且更重要的是,采用脉冲发射,可以利用时间分隔原理,较好地解决收、发隔离问题;采用连续波接收,能获得很高的速度分辨率、能对付强杂波中慢运动目标。同时,由于倒置接收机前端的带宽很窄,可大大提高接收系统的灵敏度,降低了

对导引头动态范围的要求,而且杂波在进入后边的放大和信号处理电路之前,就受了很大程度的衰减,可有效地避免强杂波对信号的压制,提高在强杂波中对目标信号的检测能力。

采用调频负反馈接收技术,可以获得对目标速度的跟踪。这有“稳定主振—受控本振”和“稳定本振—受控主振”两种办法。前者适合于主振功率小、稳定性高的场合。它要求发射功率相对稳定,通过调频负反馈环使本振频率随多普勒频率变化。后者适用于主振功率大、稳定性要求较差的场合。它要求本振处于相对稳定状态,通过调频负反馈环使主振频率跟随多普勒频率改变。

毫米波技术用于制导,可获得高的制导精度、强的抗干扰能力,可以减小导引头体积和重量。

可见,主动式毫米波脉冲多普勒雷达导引头可以对付未来的空中威胁,具有 90 年代的先进性。而单脉冲倒置接收机是其中的关键课题之一。特别是毫米波技术用于其中,使得它既有先进性,又有复杂性,是一个技术难度较大的课题。

2 毫米波技术及其在制导中的应用

2.1 毫米波的特点

毫米波在电磁波谱上处于微波与红外光谱之间,通常是指 30~300GHz 这一频率区域。

毫米波具有许多与微波和红外光不同的特性。这使得它能够在许多领域得到很好的应用。然而由于元器件等条件的限制,毫米波技术开始时进展缓慢。随着实际应用的发展,微波和红外光在一些方面受到了极大的限制;微波系统在某些测量中精度不够,并且频带使用很拥挤;红外和光学系统在恶劣环境(如雾、尘)及夜间的工作性能很差,而毫米波正好可以弥补它们的缺陷,这使得人们对毫米波产生了极大兴趣,因此,随着器件技术的不断进步,近年来毫米波技术在许多方面得到了快速的应用和发展。

毫米波的三个主要特点——波长短、频带宽以及同大气成分有相互作用,决定了毫米波技术的主要优缺点。

优点:

- a. 对同样的天线增益和波束宽度,天线尺寸小。
- b. 对同样大小的天线,它增加了角度分辨力。
- c. 有相对低的使用密度和窄波束,增强了抗友邻干扰和敌人干扰的能力以及抗敌方探测的能力。

- d. 提高了测量多普勒频率的灵敏度。
- e. 有良好的反隐身能力。从现有的技术资料看,在毫米波段还没有出现有效的隐身材料。

缺点:

- a. 因为大气的吸收和衰减,毫米波的传播距离受到很大限制。晴天限制小,在雨、雾恶劣气候条件下限制大。
- b. 小天线尺寸意味着只能收集较少的能量,要求接收系统的灵敏度高。
- c. 窄波束使得它很难用于搜索和探测。
- d. 毫米波元器件价格比较贵。

2.2 环境条件对毫米波传播的影响

毫米波在空间传播时,必然受到很多因素的限制。大气的衰减,后向散射,背景(如海面 and 地面)的散射,自然覆盖物(如雪、树叶)的衰减等,都影响着毫米波的传播。

1. 大气影响

毫米波在大气中传播时,通过对大气中的气体、颗粒物质和水气凝结物的相互作用而使其受到影响。这种相互作用有三种主要机理:吸收、散射和折射。

影响毫米波传播的主要气体是水蒸气和氧气,气体的吸收随着毫米波频率、大气压力、温度的变化而变化。

影响毫米波传播的主要颗粒物质是尘和烟雾。这些颗粒物质与水比较起来,其介电常数要小得多,它们的衰减截面积也要小得多。所以,颗粒物质对毫米波的影响可以忽略。

影响毫米波传播的主要水气凝结物是雨、云、雾和雪,其中雨的影响最大。雨的吸收与降雨率、雨滴尺寸、雨滴大小分

布、环境温度、毫米波频率以及降雨处与雷达的距离等因素有关。云和雾也同样衰减毫米波,但其衰减程度比雨要小得多。干雪的衰减比较小,湿雪的衰减则比较大。

• 晴天的衰减

在晴天的大气中,毫米波的主要吸收者是水蒸气和氧气,其衰减主要依赖于温度和压力。压力又取决于高度和该高度上的湿度。

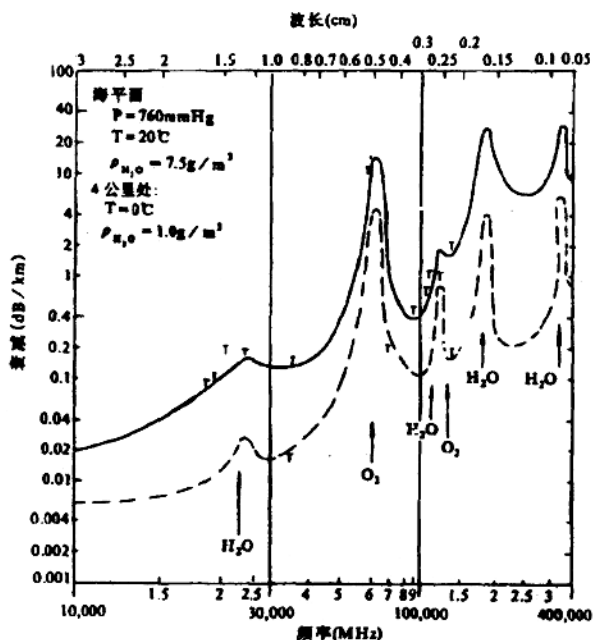


图 2.2-1 晴天时的单程衰减特性

图 2.2-1 给出了在海平面和 4km 高度处,毫米波在晴朗大气中水平传播时的单程衰减特性。由图可知,在 35,94,140 和 220GHz 等处衰减相对地比较小,称之为“传播窗”,常被选为雷达的工作频率,而在 60,119 和 183GHz 等处衰减相对地比较大,称为“吸收窗”。

• 雨中的传播

毫米波在雨中的传播特性主要受衰减和后向散射的影响,衰减主要由雨滴的吸收和散射引起,由入射波波长、雨滴的大小、形状、折射系数等因素决定。

电磁波在雨中传播时的衰减特性如图 2.2-2 所示。由图可以看出,约在 100GHz 以前,随着频率的增加,衰减系数有明显的增加;而在 100GHz 后,衰减系数趋于平稳。

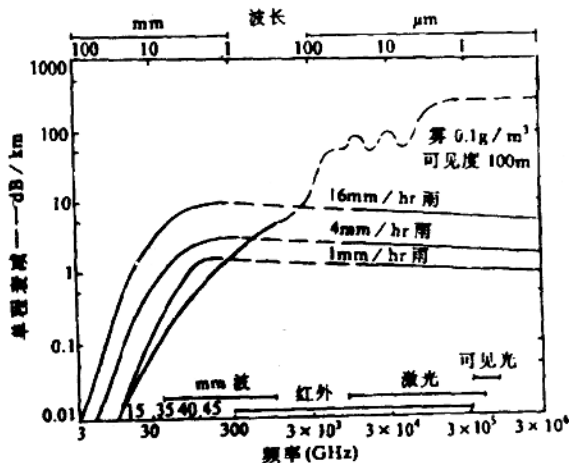


图 2.2-2 雨和雾的衰减

图 2.2-3 给出了 15.5, 35, 70, 94GHz 时, 雨的后向散射面积的雷利近似, 由图可知, 后向散射截面积随着降雨量的增加而增大。图中曲线是在垂直极化波的情况下得出的, 对于圆极化波其后向散射截面积要小一个数量级以上。

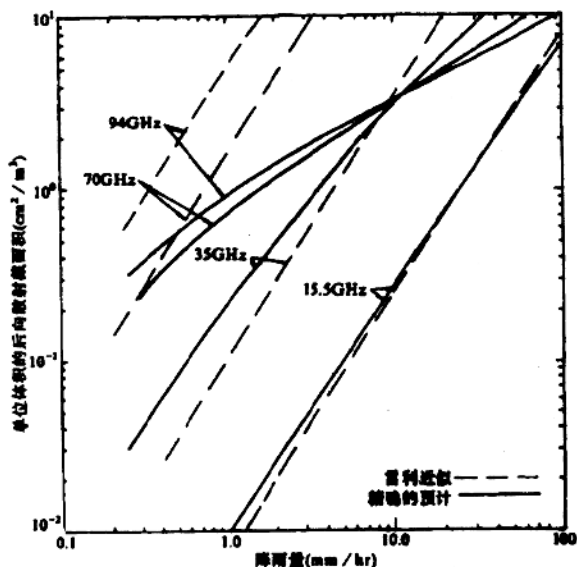


图 2.2-3 雨的后向散射特性

• 雾中的传播

雾是大气中的水蒸气凝聚成微型水滴悬浮在空中而形成

的。雾对毫米波的衰减主要由吸收引起。在雷利散射区,由雾引起的单程衰减系数⁽⁴⁾

$$\alpha = \frac{81.86M \cdot I_m(-\xi)}{\lambda \rho} \text{dB/km} \quad (2.2.1)$$

式中 M ——雾中每单位体积内的液体水含量(g/m^3);

$I_m(-\xi)$ ——吸收系数;

$$\xi = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2};$$

m ——复折射系数;

λ ——波长(m);

ρ ——水的密度(g/cm^3)。

毫米波在雾中的衰减特性如图 2.2-2 所示。由图可知,毫米波在雾中的衰减比红外和光学区要小得多。

雾的后向散射截面积比雨要小两个数量级以上,对雷达系统性能的影响可以忽略。这里不作进一步考虑。

• 云、雪中的衰减

毫米波在云和雪中传播时,由后向散射返回接收机的能量和雨比较起来,可以忽略不计。

云中的衰减很大程度上取决于其中液态水含量。表 2.2-1 给出了在 35、94GHz 时,层积云和积云中的衰减情况。

表 2.2-1 毫米波在云中传播时的衰减^①

云条件	单程衰减系数(dB/km)	
	35GHz	94GHz
层积云	0.18	0.61
积云	0.2	0.34

① 液态水含量层积云为 $0.3 \sim 0.6 \text{g}/\text{m}^3$, 积云为 $0.5 \sim 1.0 \text{g}/\text{m}^3$ 。

对于雪,其介电常数比水小得多,因此,其散射截面积要

比同样尺寸的雨滴小得多,它的吸收也远小于雨滴。故雪中的衰减和雨中的衰减比较起来是很小的。 0°C 的雪(干雪)对 35GHz 和 94GHz 的毫米波只产生 0.007dB/km 和 0.0028dB/km 的衰减。但对于表层融化成水的雪花(湿雪),其衰减比较大,通常,其后向散射比雨中的衰减还要大 5~10dB。

2. 背景影响

除大气外,目标周围的背景干扰也影响毫米波雷达的性能,这种干扰主要是由于背景的后向散射引起的。表 2.2-2 和表 2.2-3 分别给出了陆地和海面背景在单位几何面积上由后向散射产生的平均雷达截面积 σ_0 (即散射系数)的值。表 2.2-2 给出的陆地背景包括树、草和雪,其 σ_0 值随着波长的减小以及俯角(入射余角)的增加而增大。海上的背景散射不仅与波长有关,而且与波的极化(水平或垂直)、浪的高度、风速和俯角等因素有关。

表 2.2-2 陆地散射特性

波长 (mm)	俯角($^{\circ}$)	单位面积雷达截面积(dB)				
		湿树	干树	干草	湿雪	结成冰的雪
32	2	—	-32	-36	-45	—
8.6	2	—	-22	-28	—	—
3.2	2	—	-22	—	—	—
32	8	—	-28	—	-35	—
8.6	8	—	-22	—	-20	-10
3.2	8	—	-17	—	—	—
32	15	—	—	—	-30	—
8.6	15	—	—	—	-18	-8
3.2	15	—	—	—	< -10	< -10
8.6	30	-15	-19	—	—	—
3.2	30	-11	-8	—	—	—
8.6	45	-14	-18	—	—	—

(续)

波长 (mm)	俯角(°)	单位面积雷达截面面积(dB)				
		湿树	干树	干草	湿雪	结成冰的雪
3.2	45	-7	-5	-	-	-

表 2.2-3 海面散射特性

波长 (mm)	浪高 ^① (ft)	风速 ^② (m/h)	单位面积的平均截面积(dB)	
			H	V
32	0.6	0	<-70.0	<-73.0
32	1.0	0	-69.5	-60.2
32	1.6	12	-47.0	-42.0
32	3.7	11	-42.8	-36.5
8.6	0.6	0	-63.7	-59.8
8.6	1.0	0	-41.8	-43.6
8.6	1.6	12	-44.1	-37.3
8.6	3.7	11	-	-
3.2	-	4	-38.0	-43.0
3.2	-	7	-35.0	-43.0
3.2	-	12	-35.0	-38.0

① 数据是在俯角 1.4° 时取得的。

② 有效的浪高。

2.3 毫米波技术在制导中的应用

前面已对毫米波的特点及其环境对它的影响作了基本的介绍,下面结合毫米波在导弹制导中的应用作一概括说明。

· 能分辨空间靠得很近的目标,区分更多的目标形体细节,制导精度高。制导雷达截面的距离分辨率为^{①)}

$$P_x = \beta R = k \frac{\lambda}{d} \quad (2.3.1)$$

式中 β ——半功率点波束宽度;

R ——目标与制导雷达的距离;

λ ——制导雷达工作波长；

d ——天线直径。

可知，与微波相比，毫米波的波长短，分辨率高。

- 元器件尺寸小，重量轻，能够满足弹上质轻体小的要求。
- 多路径和背景杂波少，能够对付低空目标。
- 抗干扰能力强，能在干扰环境下进行有效制导。
- 多普勒测速灵敏度高，能够盯住慢运动目标。多普勒频率

$$f_d = \frac{2V_r}{c} f_0 \quad (2.3.2)$$

式中 V_r ——目标相对于制导雷达的径向速度；

f_0 ——制导雷达工作频率；

c ——自由空间光速。

因为毫米波频率 f_0 比较高，由式(2.3.2)可以看出，对于 V_r 较小的目标，多普勒频率仍有较大值。

• 宽的使用频带，可同时发射多枚导弹，用不同的频率进行制导，而相互之间不受影响。

• 有助于引导导弹攻击隐身目标。

• 由于大气等环境因素的影响，一般只能实施近距离(20km以内)制导。其中有些因素影响大，如雨、浓雾；有些因素影响小，如烟尘。因此，在战争烟尘污染的环境中毫米波仍能有效地制导。

2.4 作用距离的计算

由前面的讨论可知，在毫米波区域，影响传播特性的主要

因素是大气、雨、雾、云、雪所产生的衰减和雨所产生的后向散射，而雾、云、雪的后向散射回到接收机的能量比雨的情况要小两个数量级以上，对雷达作用距离的影响可以忽略。

由于下列原因，我们可以不考虑背景杂波的影响：毫米波雷达波束很窄，进入接收机的背景杂波少；采用脉冲多普勒、倒置接收体制对杂波有很强的抑制能力。

就空对空毫米波制导雷达来讲，多路径的影响可以忽略。

为了计算，下面给出考虑衰减时的雷达作用距离方程⁽⁹⁾

$$R^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_T 10^{-0.2\alpha R}}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n (S_0/N_0)_{\min} L_s}$$

$$= \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_T 10^{-0.2\alpha R}}{(4\pi)^3 S_{\min} L_s} \quad (2.4.1)$$

式中 R ——雷达作用距离；

P_t ——发射功率(W)；

G ——天线增益；

λ ——雷达工作波长(m)；

σ_T ——目标的雷达截面积(m²)；

K ——玻尔兹曼常数，为 1.38×10^{-23} J/K；

T_0 ——雷达工作温度(K)；

F_n ——接收机噪声系数；

B_n ——接收机带宽(Hz)；

α ——传播时单程衰减系数(dB/km)；

$(S_0/N_0)_{\min}$ ——接收机正常工作时输出端的最小信噪比；

L_s ——系统损耗；

$S_{\min}$ ——接收机的灵敏度， $S_{\min} = k T_0 B_n (S_0/N_0)_{\min}$ 。

考虑雨的后向散射，当雨回波等于目标回波时雷达作用