DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.231031001

引用格式:刘嘉兴.相控阵测控技术(五):相控阵测控系统的附加误差分析法[J].电讯技术,2023,63(12):1925-1928.[LIU J X. Phased array TT&C technology—part5:additional error analysis method for phased array TT&C system[J]. Telecommunication Engineering,2023,63(12): 1925-1928.]

相控阵测控技术(五):相控阵测控系统的附加误差分析法*

刘嘉兴

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:在相控阵测控系统中,由于角度误差对测速、测距误差耦合效应等的影响,使测速/测距误差 加大。为分析这些特殊误差,提出了附加误差分析法和基准阵元法,用相控阵中的基准阵元等效机 扫天线,以此作为比较基准,从而分析得到对机扫天线测控系统相控阵化后增加的各项附加误差,总 的误差等于该附加误差与原机扫天线测控系统误差之和。该方法继承了机扫天线测控系统测速、测 距精度分析的成熟理论,聚焦到了相控阵化后的特殊问题,物理概念较为清晰,具有较大的工程实用 意义。

关键词:相控阵测控系统;测速/测距误差;合成载波相移;附加误差法;基准阵元法

开放科学(资源服务)标识码(OSID);



中图分类号:TN821.8 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2023)12-1925-04

Phased Array TT&C Technology—Part5: Additional Error Analysis Method for Phased Array TT&C System

LIU Jiaxing

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In a phased array TT&C system, due to the coupling effect of angle error on range rate measurement and ranging errors, the errors of range rate measurement and ranging are increased. To analyze these special errors, the author proposes Additional Error Analysis Method and Reference Array Element Method. The reference elements in phased array, equivalent to mechanical scanning antennas, are used as comparison benchmark, thus obtaining the additional error increased by the phased array of previous machine scanning antenna TT&C systems through analysis. The total error is the sum of this additional error and the error of the original machine scanning antenna TT&C system. The methods inherit the mature theory of range rate and range measurement error analysis of previous machine scanning antenna TT&C systems, focusing on the special problems after phased array. The physical concept of the methods is relatively clear, and they have great engineering practical significance.

Key words: phased array TT&C system; range rate and range error; synthetic carrier phase shift; additional error method; reference element method

^{*} 收稿日期:2023-10-31;修回日期:2023-11-29 通信作者:刘嘉兴

0 引 言

无线电测控系统具有跟踪测轨、遥控、遥测功 能,它采用连续波测量体制,相比于其他飞行器测轨 设备,其特点是具有高的测速精度和测距精度^[1-2], 而这两个指标也是研制测控系统的重要指标,因此 对测速、测距的精度分析是测控系统设计的重要内 容。连续波测控系统采用载波多普勒频移测速获得 了极高的测速精度,采用频率较高的测距信号(甚 至载波)的相位测量获得了很高的测距精度,但是 测控系统相控阵化后,由于控制相位进行角扫描和 角跟踪的同时引起了合成载波相位的变化,从而使 测速、测距精度变差,这种角误差对测速/测距误差 的耦合效应笔者已在文献[3]中作了介绍。这是相 控阵测控技术中的一个特殊的新问题,相应的精度



分析也需要一种新的方法,这也是当前工程技术人员急需解决的理论问题。这种方法既要能继承已 往的精度分析的成果,又要针对它的特殊问题探讨 一种准确且简单实用、物理概念清晰、便于工程应用 的新分析方法。有鉴于此,本文提出附加误差法和 基准阵元法。

机扫天线测控系统相控阵化后的附加 误差

从我国相控阵测控系统的发展过程来看,它是由 机扫天线测控系统相控阵化后形成的一种新系统,相 控阵化以后,它较原机扫天线系统增加了一部分误 差,本文将其命名为附加误差,即图1(b)和图1(a) 两种天线对应系统的测速、测距误差之差。



图 1 两种天线阵及其基准阵元

本文提出用基准阵元法分析测速、测距附加 误差。

图 1(a) 所示的机扫阵列天线,是以基准阵元的 相位为基准,通过馈线网络使其他阵元与基准阵元 同相相加,达到合成载波为最大,这时合成载波的相 位与基准阵元同相,即基准阵元的相位是合成载波 相位的复制,它代表了全阵合成载波的相位。而基 准阵元的增益 G_B 要比阵增益 G_{Σ} 小,小的倍数近似 为全阵的阵元数N,即 $G_{\Sigma}/G_B \approx N_{\circ}$ 因此,如用基准 阵元的增益来计算测距、测距误差,则在全阵工作时 误差将减小 \sqrt{N} 倍。机扫天线的扫描与角跟踪由机 电伺服系统驱动,距离和速度用该阵列天线输出的 合成载波进行测量。

在图 1(a)中加入移相器即构成图 1(b)所示的 相控阵天线。图中基准阵元通道不加移相器,或加 移相器但不参加电控,它是与机扫天线基准阵通道 完全相同的一个机械天线,当阵中各阵元通道移相 器置于0°时,该相控阵也与机扫天线完全相同。

下面先讨论入射电波垂直于阵面情况。这时各 阵元通道输出载波同相相加且合成载波与基准阵元 载波同相,在阐述图 1(a)时已经指出,这种情况下, 基准阵元相位代表了机扫阵列天线阵的相位,因此 对输出载波的相位而言,可用基准阵元等效代替图 1(a)所示的机扫天线(天线阵的增益除外),而机扫 天线测控系统的测速/测距误差分析在理论上和工 程应用上都很成熟,已有成熟的公式计算^[4],这时 算出的误差定义为基本误差。

以下再讨论入射波偏离阵面垂线 θ 时的情况。 这时按电波空间相移理论值,以基准阵元相位为基 准对阵中各阵元配相,理论上可实现各阵元输出同 相相加并与基准阵元同相。实际上由于各种误差因 素的影响,使得各阵元输出信号不能同相相加,使合 成载波的相位偏离了基准阵元的相位,亦即偏离了 机扫天线阵输出载波的相位,也就是产生了载波附 加相移。由于测控系统是利用合成载波测速、测距 的,从而产生了测速、测距附加误差,这个附加误差 是相控阵测控系统需要研究的特殊误差。

从上述分析可见,在相控阵中,以阵中基准阵元 为基准分析全阵合载波相位对基准阵元信号相位的 附加偏移,就可得到相控化后附加的测速、测距误 差。本文称这种方法为基准阵元法和附加误差法。 这两种方法相辅相成,用基准阵元法分析得到附加 误差,用附加误差与基本误差求和得相控阵测控系 统总的测速误差和总的测距误差。其中,基本误差 是机扫天线时的测距、测速误差,在图1中用 ΔR_0 和 σ_R 表示,已有成熟的计算公式,从这些计算公式 可以看出该误差与机扫天线的类型无关。另一项是 控制各阵元相位时各种误差因素带来的测距和测速 附加误差,在图1中用 ΔR_p 和 σ_{Rp} 表示,由于篇幅 所限,笔者将在下一篇论文中介绍。

2 阵元方向图引入的基准阵元法方法误差

对于机扫天线,它由伺服系统驱动天线对准目标,因此目标运动时,信号是在基准阵元相位方向图和幅度方向图的一个固定角度上传输的。这时阵元的相移和增益是固定的,但对于相控阵天线,则是天线阵面不动,目标飞掠过基准阵元。由于阵中基准阵元的方向图是不平坦的,故在不同的方向角θ上,基准阵元的相移是不一样的。作为例子,图2给出了单环缝隙阵中阵内阵元相位方向图随θ变化的情况^[5]。



图 2 缝隙阵元在阵中的相位方向图

从图 2 可见,由于相控阵的互耦、边缘效应、多 径反射等的影响,阵元在阵内的相位方向随 θ 而变, 且与阵元间距有关。图 2 是缝隙阵元情况,改变阵 元形式会有不同的变化。

由于前述的附加误差分析是以基准阵元在阵面 法线方向上的相移作基准来分析合成载波附加相移 的,因此当信号偏离阵面法线方向而使基准阵元相 移发生变化时,合成载波的相移也会随之变化,就会 引起测距/测速附加误差,因此要将它作为一个另加 的附加误差项。它的分析和计算,笔者将在下一篇 论文中介绍。

3 T/R 组件相移引入的基准阵元法方法 误差

以上分析了图 1(b) 所示天线阵引入的测速、测距误差,它还没有包括有源相控阵的 T/R 组件。当阵元后面联接有 T/R 电路时,是在 T/R 输出实现信号合成,如图 3 所示。



图 3 带 T/R 组件的相控阵天线

从图 3 可见, T/R 组件的相移也会使合成载波的相移发生变化, 它包括两个方面:

 基准阵元通道 T/R 组件的相移:由于它是 各阵元通道载波合成的基准,所以会引起合成载波 的同步移相,引起距离附加误差。它可以通过距离 标校来扣除,但基准阵元通道的慢漂移会引起距离 漂移误差。

2) 各阵元通道 T/R 组件相移的不一致性:它 引起合成载波相位的变化,使之与基准载波的相位 不一致,产生测距附加误差^[6]。它同样可用标校扣 除,但其慢漂移也会产生距离慢漂移误差。

由于 T/R 组件的相移是慢漂移的,其微分数值 会很小,所以引起的测速附加误差也会很小。

需要指出的是,对于图1所示的两种阵列天线, 合成载波的相位与其基准阵元近似同相,因此基准 阵元的相位中心可以作为测距的参考点。但是对于 图 3 所示的有源相控阵天线,它是一个由阵元天线 与有源 T/R 电路组合的系统,是电磁场与电路的结 合,是在 T/R 组件输出端实现同相合成(相当于聚 焦),物理上它不存在电磁场的相位中心,如果仍沿 用相位中心的概念来研究这个问题,就很难与实际 系统一致。实际上,在研究测距误差时,可以把相位 中心漂移,归结到总的测距误差漂移中去研究并用 工程中的距离标校去扣除,而不必去单独测量相位 中心。这时测距的基准点是载波信号的相位,在它 之前引起附加距离静态误差可用距离标校来扣除。

4 相控阵测控系统总的测距、测速误差

4.1 测距总误差

工程中求总误差的常用方法是,对随机误差和 系统误差中的不相关部分用平方和开方计算,对系 统误差中的相关部分用代数和计算。本系统中对测 距基本误差 Δ*R*₀ 和相控阵附加误差中的互不相关 部分,它们的总测距误差

$$\Delta R_{\Sigma} = \sqrt{\Delta R_0^2 + \Delta R_0^2} \quad (1)$$

式中: ΔR_{s} 为相控阵测控系统的总测距误差,其中 恒值分量可以用标校去除; ΔR_{0} 为基本测距误差,其 中热噪音引起的误差应按最大天线增益时的合成信 噪比 ρ_{0} 计算; ΔR_{0} 为相控阵引入的附加测距误差。

相控阵引入的测距附加误差包括相时延和群时 延两种,相时延是载波在无色散介质中的时延(如 空气),群时延是调制在载波上的测距信号在有色 散介质中的时延(如带通滤波器)。相控阵中合成 载波的附加相移等效为相时延,它引起的测距误差 与载波在空气中传播的时延等效,可用下式计算:

$$\Delta R_{\rm p} = \frac{c \tau_{\rm p}}{2} = \frac{c \varphi_{\rm p}}{2\omega_0} \,\,. \tag{2}$$

式中:φ_p为相控阵引入到合成载波的附加相移;ω₀ 为载波工作频率;c为光速;τ_p为相控阵引入到合成 载波的附加相时延(如果测距采用了高精度的载波 相位测量,也可将它包含到载波测相的误差中去;对 于调制信号测距,则要分析在多通道滤波器合成后 的群时延,具体可参见文献[5])。

4.2 测速总误差

$$\sigma_{\rm R\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\rm R0}^2 + \sigma_{\rm Rp}^2} \, \, \circ \, \, (3)$$

式中: σ_{RS} 为相控阵测控系统的总测速误差; σ_{R0} 为基本测速误差,其中热噪声引起的误差项按全阵增益时的合成信噪比 ρ_{p} 计算; σ_{Rp} 为相控阵引入的附加测速误差,

$$\sigma_{\rm Rp} = \frac{\mathrm{d}(\Delta R)}{\mathrm{d} t} = \frac{\mathrm{c}}{2\omega_0} \frac{\mathrm{d} \varphi_{\rm p}(t)}{\mathrm{d} t}_{\circ} \qquad (4)$$

5 结束语

本文介绍的相控阵中测速、测距附加误差分析 方法继承了几十年来机扫天线测控系统精度分析的 已有成果,聚焦于分析测控系统相控化的特殊问题, 物理概念较为清晰。这种分析方法对于相控阵测控 工程研制具有较大的实用意义。笔者采用这种方法 分析了相控阵化后由角度误差对测速、测距误差耦 合效应等引起的多项附加误差,但由于篇幅所限,分 析结果及计算公式将在下一篇系列论文中介绍。

参考文献:

- [1] 陈芳允,贾乃华. 卫星测控手册[M]. 北京:科学出版 社,1992.
- [2] 罗海银,刘利生,李安,等.导弹航天测控通信技术词 典[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [3] 刘嘉兴,李增有.相控阵测控技术(四):相控阵测控中 角误差对测速/测距误差的耦合效应[J].电讯技术, 2023,63(11):1704-1708.
- [4] LIU J X. Space TT&C and information transmission theory and technologies[M]. Heideiberg: Springer, 2014.
- [5] JOSEFSSON I, PERSSON P. 共型阵列天线理论与应用
 [M]. 肖绍球,刘元柱,宋银锁,译. 北京:电子工业出版社,2012.
- [6] 刘嘉兴. 相控阵测控技术(二):相控阵连续波角跟踪 的系统误差[J].电讯技术,2023,63(9):1307-1314.

作者简介:

刘嘉兴 男,1940年生于重庆,研究员,主要研究方向 为航天测控总体技术,已发表论文100多篇,出版专著6册。