#### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.018

引用格式:纪斌,杨勇.相控阵雷达在线幅相校正[J].电讯技术,2014,54(5):621-625.[JI Bin,YANG Yong. Online Gain and Phase Calibration for Phased Array Radar[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(5):621-625.]

# 相控阵雷达在线幅相校正\*

# 纪 斌\*\*,杨 勇

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:TR 组件有源通道会随环境条件的变化引起雷达回波幅度和相位的变化,使得相控阵天线波 束的指向精度下降、副瓣电平抬高,导致雷达系统在探测、成像、跟踪时失效。为此,通过对相控阵天 线产生幅相误差原因的分析,提出了采用远场最优方向图和近场平均矢量法相结合的算法,对相控 阵雷达进行非实时在线幅相校正,从而提高相控阵天线的幅相一致性,保证雷达系统正常工作。暗 室试验和外场试验验证了算法的正确性和可实现性。

关键词:相控阵雷达;幅相校正;最优方向图;平均矢量法

中图分类号:TN958.92 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)05-0621-05

## **Online Gain and Phase Calibration for Phased Array Radar**

#### JI Bin, YANG Yong

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

Abstract: Because the radar echo's amplitude and phase will be changed when the temperature of TR module channel rises, the phased array antenna beam pointing accuracy will descend and side-lobe level will drive up, resulting in the failure when the radar system begins to detect, imaging and track. Through analyzing the reason causing amplitude-phase error, this paper introduces an algorithm which combines far-field measurement method of optimized radiation pattern with near-field measurement method of average vector algorithm to calibrate the radar non-realtimely and improve the phased array antenna's amplitude-phase consistency. The correction and feasibility of this algorithm have been proved by the measurement in anechoic chamber and outfield test.

Key words: phased array radar; gain and phase calibration; optimized radiation pattern; average vector algorithm

## 1 引 言

由于相控阵雷达具有波束快速捷变、多波束形成、空间功率分配可控和低副瓣等优点,能实现对多个目标快速扫描和跟踪,而且近几年来国内 TR 芯片技术的飞速发展和成本的迅速下降,使相控阵雷达受到了越来越多的重视和发展。但是,由于相控阵雷达采用多个天线单元空间合成的方式实现波束的发射和接收,每个天线的幅相不一致性以及 TR 温度和外部环境变化,都会引起发射和接收波束的偏差,影响雷达目标识别和跟踪精度,严重时会导致

任务失败,因此多通道幅度相位的监测与校准是相 控阵系统正常工作的前提。

常用的方法是在实验室测试每个 TR 组件时,测 出其自身的幅度、相位误差,然后补偿到波控算法中, 进行一次性修正。但是现在大功率 TR 组件发热量 很大,外部环境温度和内部信道参数变化也很大,在 实验室得出的补偿参数不能很好地满足使用需求。 为此,本文分析了相控阵天线指向误差的构成,提出 了一种非实时的在线校正方法来减小测量误差,使相 控阵雷达利用工作间隙进行校正后能正常工作。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-11-28;修回日期:2014-03-24 Received date:2013-11-28;Revised date:2014-03-24

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:ziyoudianzi1981@ sina. com Corresponding author:ziyoudianzi1981@ sina. com

## 2 相控阵雷达误差分析和在线校正原理

相控阵雷达发射和接收信号是阵列中所有天线 单元辐射电磁波的矢量合成,因此,引起相控阵雷达 回波误差的因素包括各个单元的幅度误差、相位误 差、单元的定位误差和单元失效误差。

单元的定位误差是指安装时天线单元的位置会 偏离理论值,导致波束指向偏离理论值,造成波束指 向误差。单元失效误差是指在使用过程中,单元因 各种原因造成失效,使得波束指向偏离理论值,造成 波束指向误差。由于这些误差值不随外部环境的变 化而改变,因此都可以通过前期测量和计算,进行一 次性补偿。而幅度误差和相位误差具有很大的随机 性和环境温度变化性,会对相控阵雷达的波束指向 和天线增益产生较大影响,因此必须对相控阵雷达 进行定时的幅相校正,才能满足现在高精度雷达对 目标的识别和跟踪。

相控阵雷达校准的功能在于补偿各通道发射/ 接收通道信号之间幅度和相位的不一致性,若能做 到每次探测时对发射和接收通道做一次检测,就能 得到更能反映当时雷达状态的补偿值。相控阵雷达 在线校正原理为:在每次使用前,通过雷达设备自带 的耦合天线发射信号对设备的 TR 组件单元和信道 单元通道间一致性进行测试,雷达信号处理机把接 收到的校正信号通过平均矢量法和 FFT 校正法,计 算得到当前实时的幅相值,与前期保存在雷达中的 初始值进行比较,从而得到相控阵雷达随时间和温 度变化产生的误差值,进而进行必要的补偿,这样就 能解决相控阵雷达幅相误差随环境变化的问题。相 控阵雷达在线校正的硬件框图如图 1 所示,关键在 于雷达系统设计中需要考虑校准通道和校准天线的 设计和使用。



图 1 相控阵雷达在线校准框图

Fig. 1 Diagram of online calibration for prased array radar • 622 •

## 3 幅相校正流程及算法

根据相控阵雷达的组成和天线产生误差的原因,设计了整个幅相校正工作流程,如图2所示。



图 2 整个幅相校正工作流程图 Fig. 2 Gain and phase calibration flow

相控阵雷达的幅相校正需要整个系统,包括天线、TR 组件、信道、信号处理和主控的相互配合,校 正流程分为三个步骤:

(1)首先是在暗室环境下,通过远场最优方向图,测得和存储相控阵天线的远场发射幅相数据 A1和接收幅相数据 A2;

(2)然后通过雷达整机的测试天线和终端处理计 算并储存近场发射幅相数据 B1 和接收幅相数据 B2;

(3)最后把雷达整机挪到外场测试实时工作时 的近场发射幅相数据 C1 和接收幅相数据 C2,计算 得到准确的发射和接收幅相数据。

#### 3.1 远场天线图测量

在暗室中,主控计算机通过随机布相法,给被测 相控阵雷达的波控单元产生上万个接收和发射的幅 度、相位码值,并通过标准天线逐一测试被测天线的 方向图,然后从中分别找出接收和发射幅度、相位最 好两幅,则为最优方向图。记录下这两幅图的幅度 和相位码值,分别记为 A1 和 A2,存储到被测雷达 中。这个步骤的目的是测试出每个单元天线由于幅 度和相位的不一致性和单元定位差异引起的幅相误 差的补偿值。

## 3.2 近场幅相校正测量

近场幅相校准是通过信号处理机的配合,使用 平均矢量法,计算出幅相数据 B1 和 B2,用于后续外 场环境下进行幅相校正的计算基准,具体近场幅相 校正算法流程如图 3 所示。



图 3 近场幅相校正算法流程 Fig. 3 Near-field measurement method of gain and phase calibration flow

近场测试总的思路是屏蔽 TR 组件其他支路的 耦合影响,一次只对其中一路的某个 TR,通过平均 矢量法求得幅度和相位值,最后组合成整个天线的 幅度和相位码。流程中使用到了 FFT 相参积累,算 法为:信号处理采集在接收模式下采集 M 组幅相值 (M=8 192)A=a<sub>i</sub>,i=1,2,…,M,利用下式进行 FFT 变换:

$$A\_FFT = FFT(A, M) \tag{1}$$

取变换后的第 17 通道的数据 *A\_FFT*(17) 为后 续平均矢量法处理的第 *I* 个 TR 单元的幅相值。其 中, |*A\_FFT*(17) |是 |*A*|的8 192 倍, angle (*A\_FFT*(17))= angle(*A*)相位相同。

平均矢量法算法如下:

以接收为例,假设以每个线阵为一组 TR,移相

器为6位移相器,为了保证校准精度,取N=64,令 第*m*路移相器移相 $\frac{2\pi \cdot k}{N} + \Delta \theta_{m,k}, \Delta \theta_{m,k}$ 为第*m*路支路,第*k*次状态时的移相误差, $k=0 \sim N-1$ ,其他移相器移相值不变,根据公式(2)和(3)可得到N个测试数据 $A_1 \sim A_k$ :

$$A_{k} = S_{m} \cdot a_{m} \cdot e^{-j\frac{2\pi \cdot k}{N}} + \sum_{i=1}^{M} S_{i} \cdot a_{i} \cdot e^{j \cdot 0}$$
(2)

$$S_m \cdot a_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{-\frac{2\pi \cdot i}{N}}$$
(3)

式中, $a_m$  为第 m 支路的传输 S 参数,为需要检测及校准的值; $S_m$ 、 $S_i$  为第 i、m 路校准耦合网络的传输 S 参数; $A_k$  为第 k 次测量得到的复数值;N 为  $N=2^b$ ,b 小于等于移相器的位数,当 b 等于移相器的位数时,理论上校准精度最高;M 为参与测试的 TR 阵元个数。

然后,将 $A_k$ 乘以 $e^{-j\frac{2\pi\cdot k}{N}}$ ,并将N个结果相加,取 其平均值。由于(2)式右边最后一项在N个移相状 态下是不变化的,该项乘以 $e^{-j\frac{2\pi\cdot k}{N}}$ 相加,假设N=8, 其合成等于零,故最终其和为式(3)右边部分。

改变移相支路,重复以上校准过程,可以得到其 他支路的传输参数。

以上算法实际对应了矢量的一个平均的过程, 计算公式如下:

$$B(i,k) = \frac{1}{64} \sum_{i=1}^{64} A\_FFT(i) \cdot e^{-j \cdot (\frac{i}{64} \times 360)} / S(i,k)$$
(4)

k=0,表示接收状态,k=1表示发射状态。

根据 B(i,k)可以得到相应的相位分布参数为

$$B1\_phase(i,j,k) = \text{round}(\text{angle}(\frac{B(i,k)}{2\pi} \cdot 64)) \quad (5)$$

幅度分布为

 $B1\_amp(i,j,k) = 10 \times lg(abs(B(i,k)))$  (6) 同样的方法可以得到发射参数  $B2\_phase(i,j,k)$ 

k)  $\pi B2_{amp}(i,j,k)_{\circ}$ 

## 3.3 外场实时近场校正

在外场条件下,采用近场幅相校准方法再次得 到的幅相码值为 C\_phase(i,j,k)和 C\_amp(i,j,k), 则波控得到的幅相误差为

 $Deta\_phase(i,j,k) = C\_phase(i,j,k) - B\_phase(i,j,k)$ (7)

$$Deta\_amp(i,j,k) = C\_amp(i,j,k) - B\_amp(i,j,k)$$
(8)

由此可知,求 Deta\_phase(i,j,k)和 Deta\_amp(i, j,k)也就是为了补偿在环境和温度变化的条件下产 生的幅相误差和天线单元失效带来的误差的补偿 值,用来进行法线天线图生成的幅相码校正为  $\varphi_{0_j}$  如下:  $\varphi_{0_j}$ 的相位为

 $A_{phase}(i,j,k) + Deta_{phase}(i,j,k)$  (9)  $\varphi 0_i$ 的幅度为

 $A\_amp(i,j,k) + Deta\_amp(i,j,k)$ (10)

由上式可知, 雷达实际工作时, 采用式(9) 和式 (10) 得出的幅度相位结果用来实现远场天线图扫 描、波束指向或近场天线图扫描。

### 4 幅相校正算法试验验证

在未进行幅相校正前,在暗室中对相控阵雷达 天线进行了一次指标测试,如图 4 所示,可以发现 天线的副瓣电平过高,并且不对称,而其波束指向精 度很差,最大到 4°,严重影响了天线的性能。



通过幅相校正后,对幅相码值进行了一次比较, 如图 5 所示,可以看出幅度和相位码值发生了一定 的变化。同时在相同的发射和接收功率、波束指向 等条件下,测试的雷达天线指标如图 6 所示,可见天 线的指向精度大大提高,减小到了 0.3°以内。





## 5 结 论

采用上述在线校正算法,可以"随时随地"对雷 达设备进行幅相校正,而不需要拆下相控阵天线,在 暗室中反复测试,大大简化了校正复杂度。本算法 还可以在不同环境下对天线幅度相位进行测试和补 偿,提高了补偿的精度。通过试验验证,波束指向精 度由原来的0.5°左右提升为了0.1°左右,副瓣电平 降低了1~2 dB(法相方向),波束扫描到不同方向 的增益平坦性也有所改善,提高了相控阵雷达的测 角精度,为后端信号处理成像、识别和跟踪提供了有 效的保证。

相控阵雷达在线幅相校正还需要考虑到系统的 各项设计参数,如 TR 组件数量、接收机增益、TR 发 射功率、AD 采样频率、校正信号耦合系数等。同 时,由于不同状态下校正信号的幅度有较大的动态 变化,小信号时的信噪比较差,影响幅相校正精度, 因此,后期校正信号的设计考虑用相参积累的方法 提高接收信号信噪比,进一步改善幅相校正效果。

#### 参考文献:

- [1] 胡卫东,卢建斌. 相控阵雷达资源管理的理论与方法
  [M]. 北京:国防工业出版社,2010:25-42.
  HU Wei-dong,LU Jian-bin. The theory of Phased Array radar resource manage [M]. Beijing: Publishing House of national defence Industry,2010:25-42. (in Chinese)
- [2] 朱国富,黄晓涛. 雷达系统设计 Matlab 仿真[M]. 北 京:电子工业出版社,2009:228-270.

ZHU Guo-fu, HUANG Xiao-tao. Matlab simulations for radar system design [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2009:228-270. (in Chinese)  [3] 罗群,朱和平.相控阵天线手册[M].北京:电子工业 出版社,2008:278-295.
 LUO Qun, ZHU He-ping. Phased array antenna handbook[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Indus-

try,2008:278-295.(in Chinese)
[4] 严盟,廖桂生.阵列天线在近场条件下的幅相校正和阵元 位置估计[J].雷达科学与技术,2005,3(6):383-385.
YAN Meng,LIAO Gui-sheng. A Method for Calibrating the Arrays Gain and Phase Errors andEstimating Location in Near Field Sources[J]. Radar Science and Technology,2005,3(6):383-385. (in Chinese)

 [5] 阎鲁滨. 相控阵天线幅相校正的简单方法[J]. 航天器 工程,2006,15(4):43-45.
 YAN Lu-bin. A simple method of phased array antenna

calibration [J]. Spacecraft Engineering, 2005, 15(4):43 -45. (in Chinese)

#### 作者简介:



纪 斌(1981—),男,四川广汉人,2007 年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师, 主要从事雷达系统研发工作;

JI Bin was born in Guanghan, Sichuan Province, in 1981. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology

of China in 2007. He is now an engineer. His research concerns radar system R&D.

Email: ziyoudianzi1981@ sina. com

**杨 勇**(1978—),男,辽宁抚顺,2006 年于武汉大学电 子信息学院获通信与信息系统专业博士学位,现为高级工程 师,主要从事雷达系统研发工作。

YANG Yong was born in Fushun, Liaoning Province, in 1978. He received the Ph. D. degree from Wuhan University in 2006. He is now a senior engineer. His research concerns radar system R&D. Email: 25600073@ qq. com