

塔康相控阵天线相位校准算法

赵颖辉, 袁安民, 李玉林, 戚云军

(空军工程大学 电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘 要:由于天线要形成旋转的 9 瓣心脏形方向图,工作中必须对控制天线辐射信号的移相器相位进行实时控制,而移相器的初始相位决定了天线方向图形成的准确性,因此塔康相控阵天线必须进行相位校准后才能正常工作。在对塔康相控阵天线方向图形成原理和天线相位校准方法进行分析的基础上,运用傅里叶变换理论和矢量叠加原理,提出了一种基于矢量叠加的相位校准算法。通过该算法可减少运算量,在保证相位校准精度的前提下,提高了相位校准速度,降低了对硬件平台的要求。实验表明:该算法合理有效、相位校准速度快、相位计算精度高,在塔康相控阵天线中得到了成功应用。

关键词:塔康;相控阵天线;相位校准;矢量叠加

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.015

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)04-0066-05

塔康信标是一种近程无线电导航系统,塔康相控阵天线是塔康信标使用的一种大型地面天线,工作在 L 波段,在水平面内形成旋转 9 瓣心脏形方向图,用于飞机的近程导航^[1-4]。为了形成旋转的 9 瓣心脏形方向图,天线阵中采用射频分配合成网络实现各振子的幅相分布,采用移相器及其控制单元完成天线的波束旋转控制。为了把波束控制到特定的方向上,移相器应按特定的初始相位和相位控制步序执行。因此,在相控阵天线安装完成或更换射频器件和电缆或改变工作频率后,必须对相控阵天线进行相位校准,来消除射频分配合成网络和连接电缆引入的相位误差。本文在对塔康相控阵天线方向图形成和相位校准方法分析的基础上,运用傅里叶变换理论和矢量叠加原理,提出了一种相位校准的实现算法。

1 原理分析

1.1 方向图形成原理

塔康相控阵天线由 36 个振子组成,均匀排列在一个圆周上,形成圆形天线阵,通过射频分配合成网络和 4 个移相器完成射频信号的幅相分配。天线阵采用 36 个取样检波器提取各天线振子的检波信号,用于对天线进行相位校准和检测。

天线的射频分配合成网络是包含时变相位控制的大型 Butler 网络,其功能是完成符合 36 路振子特定要求的射频信号的幅相分配,示意图见图 1。

来自发射机的信号经过射频分配合成网络后,输出 36 路信号,形成 36 路天线振子信号 $U_k(k=1,2,\dots,36)$ 。

由文献[5-6]可知:

$$U_k(t) = U \{1 + 0.2 \cos[\Omega t + (k-1)\Delta\phi] + 0.2 \cos[9\Omega t + 9(k-1)\Delta\phi]\} e^{j\omega t} \quad (1)$$

式中: t 为时间; U 为任一路输出信号的时平均电压幅度,理想情况下,36 路信号时平均电压相同; $\Omega=2\pi \times 15$ Hz 为调制信号的频率, 9Ω 为 9 次倍频; $\Delta\phi=10^\circ$ 为相邻端口 15 Hz 幅度调制信号的相位差; $e^{j\omega t}$ 为射频信

* 收稿日期:2008-12-01

作者简介:赵颖辉(1978-),男,河北衡水人,讲师,主要从事导航工程研究。E-mail:zyhkjxa@163.com

号载波成分。

由式(1)中可以看出网络输出信号的包络是受 15 Hz 和 135 Hz 2 个正弦成分调制的双音复合调制信号,且各振子 15 Hz 调制信号相位依次相差 10° ,135 Hz 调制信号相位依次相差 90° 。形成的复合调制信号包络中 15 Hz 信号正斜率拐点和它对应的一个 135 Hz 信号正斜率拐点重合,这也是塔康信号格式的要求,理想的包络信号波形见图 2(图中细线为 15 Hz 信号包络,粗线为复合调制信号包络)。

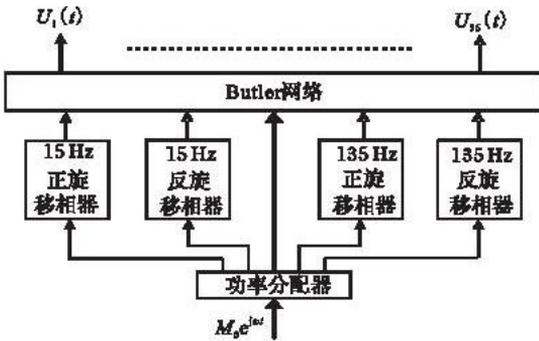


图1 射频分配合成网络示意图

Fig.1 Scheme of RF dividing combining network

36 个振子向空间辐射后,信号经过空间叠加形成 9 瓣心脏形方向图。射频网络输出信号的 15 Hz 和 135 Hz 调制信号,是通过 4 个移相器形成的。图 1 中,2 个移相器(15 Hz 正旋和 15 Hz 反旋)以 $1/15$ s 周期循环馈相,用于 15 Hz 调制信号形成,另 2 个移相器(135 Hz 正旋和 135 Hz 反旋)以 $1/135$ s 周期循环馈相,用于 135 Hz 调制信号形成。

为了形成如上所需的信号,要求 15 Hz 正旋和 15 Hz 反旋移相器输出信号经过网络后分配到每个振子上的相位始终保持共轭;135 Hz 正旋和 135 Hz 反旋移相器输出信号经过网络后分配到每个振子上的相位也必须始终共轭。其原理可用向量合成图^[7]来表示(以第 1 路振子 15 Hz 调制为例),见图 3。 U_0 是发射机输出信号经网络分配均匀馈送到各路振子上的信号。

由向量合成原理可知,在某时刻第 1 路振子上的信号为:

$$u(t) = (U_0 + U_1 e^{j\Omega t} + U_1 e^{-j\Omega t}) e^{j\omega t} = (U_0 + 2U_1 \cos \Omega t) e^{j\omega t} \quad (2)$$

因为每路振子相位差为 10° ,若以 1 号振子初始相位为 0° ,则对第 k 路振子在任一时刻的信号表达式为:

$$u_k(t) = \{U_0 + 2U_1 \cos[\Omega t + (k-1)\Delta\phi]\} e^{j\omega t} \quad (k=1, 2, \dots, 36) \quad (3)$$

各振子对应馈送上式信号,在空间叠加所形成的方向图即为一个单一心脏形图,旋转频率为 15 Hz。

9 瓣心脏形方向形成与单一心脏形的形成原理相同。135 Hz 正旋和 135 Hz 反旋相移器分别以 $1/135$ s 为周期,对送来的射频信号的相位进行递增或递减变化,同样可以根据向量合成原理得到各个振子的信号表达式:

$$v_k(t) = \{U_0 + 2V_1 \cos[9\Omega t + 9(k-1)\Delta\phi]\} e^{j\omega t} \quad (k=1, 2, \dots, 36) \quad (4)$$

综合以上分析,可以得到移相器同时工作时,任一振子馈送信号的时域用式(1)表示。36 个振子辐射信号在空间叠加就形成了所需的 9 瓣心脏形方向图,各移相器步进式馈相,就形成了旋转的方向图。

1.2 相位校准方法分析

由天线方向图形成原理可知,要形成所需方向图,必须严格控制 15 Hz 正旋、15 Hz 反旋、135 Hz 正旋和 135 Hz 反旋 4 个移相器的相位,以保持 2 对信号的共轭。为了达到此目的,必须对 4 个移相器进行相位校准,来求得各移相器的初始相位。

图 3 中,如果关闭 15 Hz 反旋信号,通过控制 15 Hz 正旋移相器使 15 Hz 正旋信号旋转一周,则 $U_0 e^{j\omega t}$ 和 $U_1 e^{j(\omega+\Omega)t}$ 进行合成,其包络为一正弦波。通过对正弦波信号相位的处理,就可以对移相器进行初相校准。

相位校准借助于 36 个取样检波器,提取各天线振子的检波信号,运用傅氏分析进行处理得到移相器初始相位^[8]。

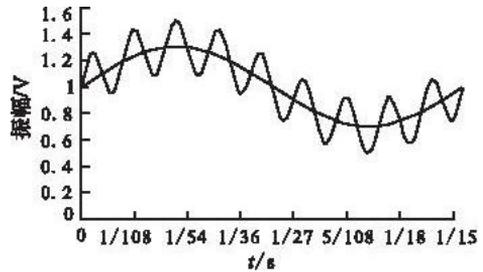


图2 复合调制信号包络

Fig.2 Envelop of compound modulation signal

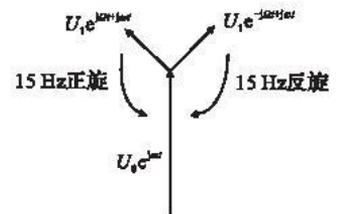


图3 向量合成示意图

fig.3 Scheme of veltor synthesis

由傅里叶理论可知^[9],对周期连续函数 $f(t)$ 可展开为:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos \frac{2\pi mt}{T} + b_m \sin \frac{2\pi mt}{T} = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \left(\frac{2\pi mt}{T} - \phi_m \right) \quad (5)$$

式中包含了信号各次谐波的幅度和相位信息。

信号的直流分量:

$$A_0 = a_0;$$

各次谐波幅度:

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \quad (6)$$

各次谐波初始相位:

$$\phi_m = \arctan \frac{b_m}{a_m} \quad (7)$$

对于离散序列 $\{x_i\}$, $i=0, 1, \dots, N-1$ (N 为 $f(t)$ 一个周期内的采样点数), 有:

$$a_m = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \left(\frac{2\pi mi}{N} \right), \quad b_m = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \left(\frac{2\pi mi}{N} \right) \quad (m=0, 1, \dots) \quad (8)$$

式中 m 为信号各次谐波成分。

因此,为了进行相位校准,只要对天线振子检波信号进行离散傅里叶变换就可得到移相器的初始相位。

2 相位校准方法的改进和实现

校准时,移相器扫描一个周期,得到的振子检波信号近似为一个正弦波,对其进行采样处理,得到移相器初始相位。相位校准对 4 个移相器分别进行,校准方法相同。

从 36 路天线振子提取的检波信号的初始相位均有一个理论值,对 15 Hz 包络的理论值为 $0^\circ, 10^\circ, \dots, 350^\circ$; 对 135 Hz 包络的理论值为 $0^\circ, 90^\circ, \dots, 35 \times 90^\circ$ 。利用式(7)和式(8),可计算出每路检波信号的初始相位。为求得移相器初始相位,需对计算的 36 个振子检波信号初始相位进行综合。文献[7]中采用的方法是将计算出的 36 个初始相位减去对应理论初相值后计算几何平均值作为移相器初相值。由于式(7)反正切函数值域的限制,且各振子均有理论初相值,计算各检波信号的初相需对其所在象限进行判断,计算中需要反复进行正弦、余弦运算,在计算几何平均值时很容易出错,且对硬件资源要求较高。

为了简化计算过程,提出了一种采用矢量叠加原理完成初始相位综合的方法。下面以 15 Hz 正旋移相器初始相位计算为例进行说明。

由式(7)、式(8)可计算出第 k 路振子检波信号基波成分的 2 个正交分量 a_k 和 b_k ; 对应其 15 Hz 包络理论值,计算出 2 个理论正交分量 a'_k 和 b'_k , 则有:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \left(\frac{2\pi i}{N} \right), \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \left(\frac{2\pi i}{N} \right) \quad (9)$$

$$a'_k = \cos[(k-1) \times 10^\circ], \quad b'_k = \sin[(k-1) \times 10^\circ] \quad (10)$$

为计算初始相位,将相位综合变换为矢量综合。

由三角恒等式减法公式可知,第 k 路振子的计算初相值与理论相位值之差的正弦分量和余弦分量可用计算初相值与理论相位值单独的正弦分量和余弦分量来表示。假设第 k 路振子的计算初始相位与理论相位值之差为 φ_k , 则有:

$$\begin{aligned} \sin \varphi_k &= b_k a'_k - a_k b'_k \\ \cos \varphi_k &= a_k a'_k + b_k b'_k \end{aligned} \quad (11)$$

因此,将 36 路振子计算式中 2 对正交分量分别进行综合,可得到最终综合信号的 2 个正交分量的正弦分量和余弦分量,分别为 A 、 B 。

$$\begin{cases} A = \sum_{k=1}^{36} (b_{1k} a'_{1k} - a_{1k} b'_{1k}) \\ B = \sum_{k=1}^{36} (a_{1k} a'_{1k} + b_{1k} b'_{1k}) \\ \tan \phi = \frac{A}{B} \\ \phi = \arctan \frac{A}{B} \end{cases} \quad (12)$$

通过式(12)对 A 、 B 2 个分量符号的判断和反正切运算,即可得到移相器初始相位 ϕ 。

经过上述方法对 4 个移相器依次进行相位校准后,使得塔康相控阵天线向空间辐射的信号 15 Hz 包络的正斜率拐点和 135 Hz 包络的正斜率拐点重合,满足塔康系统信号格式需要。

该方法合理有效,得到的初始相位准确,计算中间过程不直接对相位值进行处理,而是采用相位值的 2 个正交分量进行运算,因此可以避免对各振子初始相位进行加减综合中相位值的符号变化带来的问题,同时可降低对硬件平台的要求,提高相位校准的速度。

3 天线校准的实验结果

在对天线方向图形成原理和相位校准方法改进的基础上,进行了实验。采用示波器对塔康机载接收机检波信号测试端输出信号进行了测试,测试波形图见图 4、图 5。

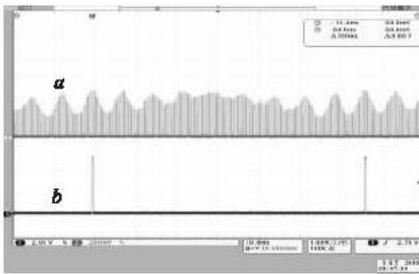


图 4 未校准的信号波形

ig.4 Waveform of uncalibrated signal

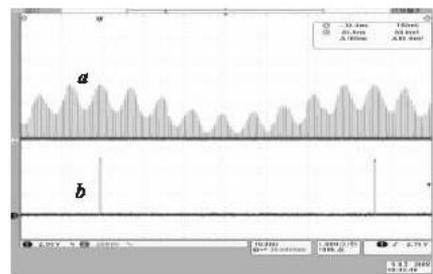


图 5 已校准的信号波形

Fig.5 Waveform of calibrated signal

图 4、图 5 中,上部波形为接收机接收信号波形。与图 2 比较可以发现,天线未校准时,接收机接收到的信号波形出现畸变,测试波形中 15 Hz 调制信号分量和 135 Hz 调制信号分量都出现很大偏差,天线辐射信号场型不符合塔康信标天线要求;当天线校准完毕后,15 Hz 调制信号分量和 135 Hz 调制信号分量复合得很好,形成了比较标准的复合调制信号,其包络信号的 15 Hz 调制信号分量正斜率拐点和其对应的一个 135 Hz 调制信号分量的正斜率拐点重合较好,满足塔康系统对天线方向图的要求。通过与未校准时信号的比较可以看出,该方法对天线的相位校准非常有效。

采用该方法对天线进行校准,校准过程只需要 1 s—2 s 即可完成,校准速度快。由于采用傅里叶理论和矢量叠加原理,同时在校准信号一个周期内增加采样点数,相位计算精度很高。

4 结束语

塔康相控阵天线在安装完毕或更换器件、电缆或改变频道后,必须对其进行相位校准,以保证形成满足要求的旋转 9 瓣心脏形方向图。本文运用傅里叶变换理论和矢量叠加原理,提出了一种相位校准的实现算法。通过实际测试,设计的方法对硬件要求较低,能够很好的完成天线的相位校准,满足塔康相控阵天线系统需要。目前,该方法已成功应用到塔康相控阵天线中。

参考文献:

- [1] Paradise Ronald Y, Hillsdale N J. Digital TACAN System; USA, 3940763[P].1976.

- [2] Edward J.Christopher .Electronically Scanned TACAN Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 1974 ,22(1) :12—16.
- [3] 沈文辉 .提高相控阵天线波束指向精度的方法[J].上海交通大学学报 ,2004 ,38(2) :233—235.
SHEN Wenhui . Method for Improving the Beam—Steering Accuracy of Phased Array Antenna[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University ,2004 ,38(2) :233—235. (in Chinese)
- [4] Sorace R .Phased Array Calibration[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation ,2001 ,49(4) :517—525.
- [5] 张忠兴 ,李晓明 .无线电导航理论与系统[M].西安 :陕西科学技术出版社 ,1998.
ZHANG Zhongxing , LI Xiaoming . Theory and System of Radio Navigation[M]. Xi'an :Shaanxi Technology Press ,1998. (in Chinese)
- [6] 史小鸣 .相扫 BUTLER 矩阵网络组件的分析与信号合成[J].导航 ,1996 ,33(1) :72—86.
SHI Xiaoming . Analysis and Signal Synthesis for Phase Scanned BUTLER Matrix Network Assembly [J]. Navigation , 1996 ,33(1) :72—86. (in Chinese)
- [7] 郑艳菊 .塔康相控电扫天线系统中的相位校准技术[J].导航 ,1997 ,34(4) :79—85.
ZHENG Yanju . Phase Calibrating Technique for TACAN Antenna with Electronic—scanning[J]. Navigation , 1997 ,34(4) :79—85. (in Chinese)
- [8] 陈 亿 .塔康相控阵天线射频单元研制[D].西安 :空军工程大学 ,2008.
CHEN Yi . Study and Realization of Radio Frequency Unit of TACAN Phased Array Antenna[D].Xi'an :Air Force Engineering University ,2008. (in Chinese)
- [9] 吴大正 ,杨林耀 ,张永瑞 .信号与线性系统分析[M].北京 :高等教育出版社 ,1998.
WU Dazheng ,YANG Linyao ,ZHANG Yongrui . Analysis of Signals and Linear Systems[M]. Beijing :Higher Education Press ,1998. (in Chinese)

(编辑 :徐楠楠)

A Research on the Phase Calibration Algorithm for TACAN Phased—Array Antenna

ZHAO Ying—hui , YUAN An—min , LI Yu—lin , QI Yun—jun

(Telecommunication Engineering Institute , Air Force Engineering University , Xi'an 710077 , China)

Abstract: TACAN phased—array antenna is a large antenna of TACAN beacon . Because the antenna should be formed into a rotating nine—lobed cordate pattern , real—time control must be performed for the phase of the phased—shifter controlling the phase of radiated signal . The veracity of the antenna pattern is determined by the initial phase of the phased—shifter , so , only when phase calibration is done , can TACAN phased—array antenna work normally . In this paper , based on the analysis of the direction pattern forming principle and phase calibration method for TACAN phased—array antenna , and by adopting Fourier theory and vector accumulation principle , a realizable phase calibration algorithm on the basis of vector accumulation is put forward . By using this algorithm , the times of calculation can be reduced , the calibration speed is enhanced and the requirements for hardware are moderated . The experiment result shows that this algorithm is reasonable and effectual in precise phase calculation , fast in phase calibration . And this algorithm has been successfully applied in the TACAN phased—array antenna .

Key words: TACAN ; phased—array antenna ; phase calibration ; vector accumulation